

TEMPLATE FOR COMPLETION WHERE PhD/MSc PROJECTS CONTRIBUTE TO SWITCH DELIVERABLES

Name of SWITCH theme:

Theme: Urban Water Environments and Planning

Subtheme: Resource Recovery and Re use Urban Agriculture

Work package title and number: WP 5.2 Use of Urban Water for Urban Agriculture

Identification of Deliverable (name and number):

5.2.4 Bc(2)

Beijing PhD Research

Details of contributing PhD/MSc theses (including title, date, author, abstract, details of where thesis can be accessed):

PhD: **Ji Wen-hua**

Title: **Optimisation and Management of Rainwater Harvesting and Reuse in Beijing**

Date finalised: May 2010

This PhD is financed by SWITCH and linked to the Demonstration in Beijing.

Abstract:

The natural water cycle is changing due to rapid urban development. Under the guidance of traditional water resources concept, rainwater is treated as waste and discharged out of city as quickly as possible. Modern cities are faced with a series of water problems. And traditional urban water supply and drainage systems face big challenges. China is a relatively poor water country. Under rapid urbanization, the pressure on water and water shortages increase. The situation in northern China, is even worse.

Despite its importance, no city in China systematically implements rainwater harvesting, and the –needed- development the use of urban rainwater harvesting in China urgently needs theoretical and methodological guidance.

This PhD analyzed the optimization and management of urban rainwater harvesting for agricultural production in Beijing (related to the SWITCH demo in Huairou, Beijing). A framework has been developed to evaluate the hydrological and economic performance of such rainwater harvesting system. To analyse the spatial potential and suitability of rainwater harvesting technologies, the ArcGis spatial analysis methodology has been applied. Optimal rainwater harvesting modes are identified according to efficiency and benefits of rainwater harvesting. By spatial analysis, the potential and suitability area of rainwater harvesting in Beijing was identified. And the difference between the utmost potential and the real potential of rainwater harvesting is discussed.

Major conclusions are:

a) The efficiency of rainwater harvesting and reuse in Beijing is low: respectively 10%-45% and 45%-80% for domestic and agricultural (using greenhouses) systems. The substitute efficiency (using rainwater instead of groundwater or other sources of water) is calculated as 30%-65%. The simulation result of the hydrological

performance of greenhouse rainwater harvesting system is close to the data gathered in 2008, which proves the reliability of this YBS algorithm.

b) Due to the low price of water in Beijing, the financial benefit of most domestic RWH systems is quite low. Therefore, there is a lack of interest or driving force to upscale new technologies. Although there is a clear need in terms of water shortages, without government's regulation or subsidies, there is also little incentive to upscale greenhouse rainwater harvesting technologies. A fee for the use of groundwater (as planned by the Beijing Water Authority) could significantly influence the implementation of RWH. In the absence of these regulations, though, farmers are willing to build rainwater harvesting system by themselves when there are other sources of income. The realization of multi-functional use of the greenhouse (notably the system's storage pool) is quite important to improve the financial performance, and stimulates upscaling of new technologies.

c) The potential map of rainwater harvesting using greenhouses shows that the high potential area locates mainly at north part of Beijing plain. And the low potential area distribute mostly in south part of Beijing plain.

d) The cost/benefit of the rainwater harvesting system is higher in north-east and south-west than central and south part of Beijing. However, research results show that the benefit/cost ration in most area of Beijing is around 1.0. This indicates that the domestic system is not a financially feasible in the present situation. According to financial performance the spatial suitability map of greenhouse rainwater harvesting system shows that suitable area include Miyun, Huairou, Changpin, Haidian, Shijingshan, Fengtai and Fangshan districts.

Key Words: Rainwater harvesting, Hydrological performance, Economic performance, Cost-benefit analysis, Beijing

Contribution to Deliverable:

Comprehensive description of how the content of the PhD/MSc thesis contributes to achieving the goals/objectives of the Deliverable

The PhD research contributes to overall theme of 5.2, *Use of water for urban agriculture and other livelihood opportunities*.

Work package 5.2 aims to contribute to a paradigm shift in wastewater management and sanitation towards a recycling-oriented closed loop approach. Water, sanitation and food problems affect people directly, and call for sustainable management of urban resources. The aim of the work package is to effect significant improvements in agricultural production, processing and marketing, and other livelihood activities, using freshwater, storm and waste-water. Changes sought include positive actions (e.g. integrated planning) and mitigating actions necessary to reduce risks to the environment and health of producers and consumers. The work-package involves working in Accra, Beijing and Lima and (to a lesser extent in Hamburg) to start up multi-stakeholder processes for action research on productive use of water and wastewater.

In Beijing research linked to the demonstration is undertaken by one PhD (Ji Wenhua), while two co-financed PhD's contributed to an improved understanding of available water resources in Beijing. The resulting knowledge contributes to influencing urban water planning approaches to become more integrative in support of both, urban water based livelihoods and improved water quality. Based on this PhD and the demonstration of SWITCH, and in combination with the two other PhDs, a series of measures and advices have been suggested to facilitate the up-scaling of rainwater harvesting in Beijing. Through involvement of the working groups, both the

Beijing Water Authority and the Beijing Agricultural Bureau already use this information.

Results

One report and several papers.

In addition to the use of this research in Beijing by Beijing Water Authority and the Beijing Agricultural Bureau in further development of Rainwater Harvesting using Greenhouses, Ji Wenhua has accepted a job at Yunnan University, to undertake similar research.

5.2.4 Bc1 Optimized use and management of rainwater harvesting, in Beijing. PhD proposal Ji Wenhua.

5.2.4 Bc2 PhD Thesis Report Ji Wenhua (finalized in 2010).

5.2.4 Bc3 Analysis of an adapted rainwater harvesting technology for periurban agricultural production in Huairou, Beijing

Ji Wenhua and Cai Jianming, IGSNRR – China, 2009. Presented at SC meeting in Delft.

5.2.4 Bc3 Diversification of water sources and more efficient use in urban agriculture in Beijing

Ji Wenhua, CAI Jianming, René van Veenhuizen. 2009. Presented at SC meeting in Delft

5.2.4 Bd1 Adapting to Water Scarcity: improving water sources and use in urban agriculture in Beijing

Ji Wenhua and Cai Jianming. 2008.

5.2.4 Bd2 New water source for urban agriculture—rainwater harvesting demonstration in Huairou, Beijing

Ji Wenhua, Cai Jianming. 2008. Presented at SC meeting in Belo Horizonte

Potential Estimation of Rainwater Harvesting by Roofs of Residential Areas in Beijing

Ji Wen-hua, CAI Jian-ming, HE Ke-jian, Van Veenhuizen René

5.2.4 Bd3 Cost-benefit analysis of a typical model of Agricultural Rainwater Harvesting based on a demo-project in Beijing.

2009. Ji Wen-Hua, CAI Jian-Ming, Wang Ke-Wu, Wang Zhi-Pin, Van Veenhuizen René.

5.2.4 Be Improvement Based on Government's Pilot Rainwater Harvesting and Greenhouse System Project: Farmers' innovation.

Be Zhang Feifei, Cai Jianming, Ji Wenhua. IGSNRR (13). 2007. In Urban Agriculture Magazine, no. 19, December 2007.

5.2.4 Bf Water Management and Urban Agriculture Development in Peri-Urban Beijing, towards a demonstration proposal

Ji Wenhua, Cai Jianming, Zhang Feifei. 2007.

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院 博士学位论文

雨水集蓄利用的优化与管理——以北京市为例

季 文 华

指导教师 蔡建明 研究员 中国科学院地理科学与资源研究所

申请学位级别 博 士 学科专业名称 人 文 地 理 学

论文提交日期 2010 年 3 月 论文答辩日期 2010 年 5 月

培养单位 中国科学院地理科学与资源研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席_____

Classification No. _____

Confidential _____

UDC _____

No. _____

Graduate University of Chinese Academy of Sciences

Doctor Thesis

**Optimization and Management of Rainwater Harvesting and
Reusing——A Case Study of Beijing**

Ji Wen-hua

Advisor _____ **Cai Jian-ming** _____

_____ **Institute of Geographic Sciences and Natural** _____

_____ **Resources Research, CAS** _____

Application Degree _____ **Doctor** _____ **Major** _____ **Human Geography** _____

Submitted Date _____ **March 2010** _____ **Defence Date** _____ **May 2010** _____

Education Unit _____ **Institute of Geographic Sciences and** _____

_____ **Natural Resources Research, CAS** _____

Degree Awarding Unit _____ **Graduate University of** _____

_____ **Chinese Academy of Sciences** _____

Chairman of committee _____

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国科学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：

时间： 2010 年 3 月 25 日

关于论文使用授权的声明

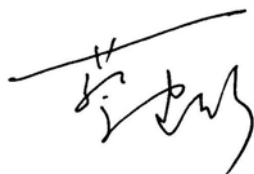
本人完全了解中国科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国科学院可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名：

时间： 2010 年 3 月 25 日

导师签名：



时间： 2010 年 3 月 25 日

本文资助项目

由联合国教科文组织水务教育研究所（IHE）发起，欧盟第六框架子项目——SWITCH（Sustainable water management Improves Tomorrow's cities' Health, 编号：018530）

摘 要

城市的快速发展改变了原有的自然水循环过程，在传统的水资源开发利用理念引导下，城市雨水被作为废水尽快排除。人类活动对自然水循环的强烈干扰给现代城市带来了一系列的城市水问题，传统的城市供排水系统面临着巨大的挑战。基于这一重大现实问题，国外许多发达国家率先开展了现代城市雨水利用的实践和研究，并取得了重大的进展和突破。中国是一个水资源相对比较贫乏的国家，在我国快速城市化进程中，城市社会经济发展受制于水资源短缺瓶颈，尤其是北方干旱半干旱地区城市的缺水危机日益严峻。但囿于对雨水资源的认识不足，我国目前仍没有城市系统的开展雨水利用的实践和研究。

中国城市雨水利用工作的顺利推进急需理论和方法的指导。鉴于此，本文以北京市为例，开展了城市雨水集蓄利用的优化与管理研究。本文从总结雨水集蓄利用的技术体系入手，通过创建雨水集蓄利用的水文和经济性能评价模型，建立了雨水集蓄利用的优化理论与方法。采用 Arcgis 空间分析方法，系统的开展了北京市雨水集蓄利用的空间潜力和适宜性研究。具体而言，一是通过对北京市典型雨水集蓄利用系统的效率效益研究，确定了北京市雨水集蓄利用的优化模式；二是通过空间化分析，对北京市雨水集蓄利用的潜力和适宜性进行了空间区划，并论述了最大可能潜力与可实现潜力之间的联系和区别。

本文的主要研究结论如下：

1. 受自然、社会经济等多重因素影响，雨水集蓄利用的最大潜力与现实潜力之间存在巨大的差距；北京市雨水集蓄利用的效率不高，住宅屋面系统的雨水收集效率介于 10%-45%之间，替代效率介于 30%-65%之间，设施农业系统的雨水收集效率介于 45%-80%之间，替代效率介于 40%-65%之间；设施农业雨水集蓄利用系统水文性能模拟结果与实际监测结果十分接近，证明 YBS 取水模式能够较准确模拟蓄水池的流量过程；确定了北京地区的存储系数 θ 阈值范围；

2. 受北京市低水价的影响，住宅屋面系统的微观经济效益极不明显，系统应用缺乏利益驱动力；如果缺乏政府资金资助，设施农业雨水集蓄利用技术的应用缺乏经济驱动力，只有当政府资助比例提高到 70%左右时才表现出显著的微观经济效益；农业水资源费征收对设施农业系统的微观经济效益能产生明显影响，但只有当水资源费达到一定高值时才足以促使农民独立投资。因此，目前农业水资源费的征收只能起到促进作用，但无法替代政府资助的作用；充分发挥设施农业系统蓄水池的多功能作用对于提高系统的整体效益十分重要，如果不加以重视，则农业雨水集蓄利用技术的推广将受到极大的限制；

3. 北京市住宅屋面系统的雨水收集利用潜力的空间分布与降雨的时空分布规律显著相关，多年平均降雨量越大则雨水集蓄利用的潜力越大，形成了北京市东北、西南集雨利用潜力高值区和西北、中南集雨利用潜力一般区的格局。但雨水集蓄利用空间潜力的差异并不明显；北京市设施农业雨水集蓄利用空间潜力评价结果显示，市区以北平原区雨水集蓄利用的潜力普遍较高，市区以南大部分区县的雨水收集利用潜力偏低；

4. 北京市住宅屋面雨水集蓄利用系统经济可行性总体上呈现东北部、西南部高于中、南

部的趋势。但除少数区县外，雨水集蓄利用的效益成本比值均在 1.0 左右，表明北京市住宅屋面雨水集蓄利用的应用总体上缺乏利益驱动力；受北京市降雨时空分布规律和平原区地下水分布规律影响，设施农业系统的空间经济适宜性表现出很强的规律，经济适宜区主要分布在密云、怀柔、昌平、海淀、石景山、丰台和房山等毗邻山区的区县，而平谷、顺义、朝阳、通州及大兴等 5 区县的经济适宜性较差。

基于以上研究结论，论文最后提出了一系列有针对性的措施和建议，以期为北京市雨水利用工作的顺利推进提供参考和科学的依据。

关键词：雨水利用，水文性能，经济性能，成本效益分析，北京

Abstract

Natural water cycle is changed due to rapid urban development. Under the guidance of traditional water resources concept, rainwater is treated as waste and discharged out of city as quickly as possible. Modern cities are faced with a series of water problems. And traditional urban water supply and drainage systems face big challenges. On the basis of these urgent issues, dozens of developed countries took the lead in practicing modern urban rainwater harvesting and doing researches. China is a relatively poor water country. During the amazing urbanization process, pressure of water shortage increases. The situation in northern part of the country is even worse. However, there is still no city in China systematically practice rainwater harvesting due to misunderstanding of rainwater.

The successful development of urban rainwater harvesting in China urgently need theoretical and methodological guidance. This paper takes Beijing as a case doing researches on optimization and management of urban rainwater harvesting. Based on the research objectives, the technological system of rainwater harvesting is described. Then the paper develops models to evaluate the hydrological and economic performance of rainwater harvesting system. To analyse the spatial potential and suitability of rainwater harvesting technologies, Arcgis spatial analysis methodology is applied. First, the optimized rainwater harvesting modes are identified according to efficiency and benefits of rainwater harvesting. Secondly, by spatial analysis, the potential and suitability area of rainwater harvesting in Beijing is identified. And the difference between the utmost potential and the real potential of rainwater harvesting is discussed.

The major conclusion of the paper follows as:

a) Big difference of utmost potential and real potential of rainwater harvesting exists in Beijing. The efficiency of rainwater harvesting and reusing in Beijing is low. Respectively, rainwater harvesting efficiency of the domestic systems and the greenhouse systems is between 10%-45% and 45%-80%. And the substitute efficiency of the system is 30%-65%. The simulation result of the hydrological performance of greenhouse rainwater harvesting system closes to the monitoring results of 2008. Which proves the reliability of YBS algorithm. *And* the storage coefficient θ in Beijing is identified and discussed. Which provides a simple way to model the hydrological performance of rainwater harvesting in using monthly time interval.

b) Due to the low water price of Beijing, the financial benefit of domestic system is quite low. Therefore, there is the lack of interests of the driving force to upscale the new technologies. Without government's subsidies, there is lack of interests of the driving force to upscale greenhouse rainwater harvesting technologies. And the financial performance of greenhouse system becomes remarkable only when the subsidies up close to 70% of the initial investment. Water resource fee could bring significant influence on the financial performance of the

greenhouse system. However, farmers are willing to build rainwater harvesting system all by themselves only when water resources fee at a quite high value. The realization of multi-function of the greenhouse system's storage pool is quite important to improve financial performance. Otherwise, it's difficult to upscale the new technologies.

c) The spatial potential of rainwater harvesting of domestic system is accordant with the rainfall's spatial distribution. The area with high annual rainfall could have high rainwater harvesting potential. However, the spatial difference of rainwater harvesting potential is small. The rainwater harvesting potential map of greenhouse system show that the high potential area locates mainly at north part of Beijing plain. And the low potential area distribute mostly in south part of Beijing plain.

d) The benefit/cost of the domestic rainwater harvesting system is higher in north-east and south-west than central and south part of Beijing. However, research results show that the benefit/cost in most area of Beijing is around 1.0. This indicates that the domestic system is not a financial feasible technology at present. According to the financial performance of greenhouse rainwater harvesting system, the spatial suitability map show that suitable area includes Miyun, Huairou, Changpin, Haidian, Shijingshan, Fengtai and Fangshan districts. And the rest districts are in low financial suitability area.

Based on the research results, a series of targeting measures and advices are then put forward to facilitate the upscaling of rainwater harvesting in Beijing.

Key Words: Rainwater harvesting, Hydrological performance, Economic performance, Cost-benefit analysis, Beijing

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
图索引.....	VII
表索引.....	VIII
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究的目的和意义.....	3
1.3 研究方法与创新点.....	6
1.4 研究思路.....	8
第二章 雨水利用及相关研究进展	10
2.1 基本概念解析.....	10
2.2 城市与城市化.....	13
2.3 城市水文水资源.....	14
2.4 城市水问题及解决措施.....	16
2.5 雨水利用发展概述.....	19
2.6 雨水利用主要研究内容.....	20
2.7 本章小结.....	39
第三章 雨水集蓄利用技术体系	40
3.1 雨水利用的技术类型.....	40
3.2 城市屋面雨水集蓄利用系统.....	43
3.3 设施农业雨水集蓄利用系统.....	47
3.4 本章小结.....	50
第四章 雨水集蓄利用性能评价理论与方法	52
4.1 模拟模型.....	53
4.2 问题识别.....	54
4.3 模拟目标.....	55
4.4 模型要素及数据.....	56
4.5 降雨量.....	56
4.6 集雨面.....	58
4.7 初期弃流.....	60
4.8 过滤装置.....	61
4.9 水泵.....	62
4.10 自来水供水和污水排放系统.....	62
4.11 蓄水池.....	63

4.12 模型选取.....	69
4.13 模拟步距.....	70
4.14 降雨数据.....	73
4.15 用水量.....	74
4.16 集雨面面积.....	76
4.17 本章小结.....	77
第五章 雨水集蓄利用经济评价及空间化研究方法	78
5.1 水利工程经济评价方法概述.....	78
5.2 雨水利用系统微观评价研究综述.....	79
5.3 全成本评价法.....	81
5.4 评价方法确定及要素选择.....	83
5.5 数据收集.....	85
5.6 空间化研究.....	96
5.7 本章小结.....	99
第六章 北京市雨水集蓄利用系统评价、空间化及管理研究	100
6.1 研究区概况.....	100
6.2 北京市水资源现状分析.....	100
6.3 北京水资源开发利用及存在问题.....	103
6.4 北京市雨水利用现状.....	105
6.5 北京市雨水集蓄利用典型系统性能评价.....	107
6.6 雨水集蓄利用最大可能潜力计算.....	124
6.7 雨水集蓄利用空间评价.....	125
6.8 对北京市雨水利用管理的启示.....	128
6.9 本章小结.....	131
第七章 结论与展望	132
7.1 主要结论.....	132
7.2 不足与展望.....	134
参考文献.....	136
博士期间发表的学术论文	151
作 者 简 介.....	152
致 谢.....	153

图索引

图 2-1	城市化进程 S 型曲线图	14
图 2-2	城市化前后水循环及流量过程线示意图	15
图 2-3	城市水循环改良模式	18
图 3-1	雨水集蓄利用流程图	40
图 3-2	间接泵送屋面集雨利用系统	43
图 3-3	直接泵送和重力流屋面集雨利用系统	44
图 3-4	典型屋面雨水集蓄利用系统完整结构图	45
图 3-5	封闭蓄水池间接泵送系统	48
图 3-6	封闭蓄水池直接泵送系统	48
图 3-7	开敞室内蓄水池间接、直接泵送系统	48
图 4-1	模拟模型构建过程图	54
图 4-2	集雨面有效集雨面积	59
图 4-3	蓄水池流量累积曲线图	64
图 4-4	基于行为分析法的蓄水池流量过程图	65
图 4-5	蓄水池流量要素发生组合图	66
图 4-6	YAS 取水模式图	67
图 4-7	YBS 取水模式图	67
图 4-8	北京气象站 1989-2008 年年际年内降雨量变化图	74
图 5-1	宏、微观全成本评价法	82
图 5-2	雨水集蓄利用系统主要零部件使用寿命	86
图 5-3	蓄水池规模经济效益图	88
图 5-4	蓄水池容积-造价曲线估计图	88
图 5-5	水泵耗电量随抽水深度变化拟合图	93
图 5-6	雨水集蓄利用信息系统结构图	98
图 5-7	基于 ArcGis 的雨水集蓄利用用户操作界面	99
图 6-1	雨水利用量与蓄水池容积变化关系图	111
图 6-2	1989-2008 年北京气象站各月降雨量分布图	112
图 6-3	设施农业雨水集蓄利用系统集雨利用量与降雨量关系图	118
图 6-4	北京市年均降雨量及住宅屋面雨水集蓄利用空间差异图	126
图 6-5	北京市住宅屋面雨水集蓄利用效益成本比值空间差异	126
图 6-6	北京市平原区地下水及设施农业雨水集蓄利用量空间差异图	128
图 6-7	北京市平原区设施农业雨水集蓄利用效益成本空间差异	128

表索引

表 2-1	不同集雨面的径流效果及使用寿命	21
表 2-2	欧洲 7 国城市雨水管理资金来源	33
表 2-3	欧洲 6 国推广雨洪源头控制技术的公共措施	33
表 3-1	北京市 2005 年土地利用现状表	41
表 4-1	历史降雨数据选择标准	58
表 4-2	各种类型屋面的径流系数	59
表 4-3	不同屋面材料的初期径流损失	60
表 4-4	过滤器过滤效率参考值	61
表 4-5	潜水泵型号及性能表	62
表 4-6	行为分析法降雨数据步距选择	71
表 4-7	黄瓜微灌试验记录表	72
表 4-8	北京气象站信息表	73
表 4-9	城市居民生活用水量标准及统计表	75
表 4-10	家庭生活人均日用水量构成调查统计表	75
表 4-11	典型城市居民生活用水量调查表	76
表 5-1	雨水利用系统微观经济评价研究综述表	79
表 5-2	储水罐容积价格关系拟合结果表	87
表 5-3	蓄水池容积-造价拟合结果表	88
表 5-4	雨水集蓄利用系统其它设备成本	89
表 5-5	雨水集蓄利用系统的维护费用	89
表 5-6	1999-2008 年北京市电价调整表	90
表 5-7	北京市居民水价变化情况表	91
表 5-8	北京市居民水价变化预测表	91
表 5-9	水泵耗电量随抽水深度变化拟合参数表	92
表 5-10	北京市 2005-2008 年农业水利基础设施建设投资表	94
表 5-11	英国财政部折现率参考值表	95
表 6-1	北京市各水系水资源补给量	100
表 6-2	北京市入境水量统计表	101
表 6-3	北京市地表水资源量	101
表 6-4	北京市平原区地下水储变量统计表	102
表 6-5	北京市一次水资源总量表	102
表 6-6	典型住宅屋面雨水集蓄利用系统类型	108
表 6-7	典型住宅屋面雨水集蓄利用系统水文性能模拟表	109
表 6-8	1989-2008 各年住宅屋面雨水集蓄利用系统水文性能模拟表	110

表 6-9 住宅屋面雨水集蓄利用日步距、月步距模拟结果对比	113
表 6-10 住宅屋面雨水集蓄利用系统经济评价表	114
表 6-11 设施农业雨水集蓄利用系统水文性能模拟表	116
表 6-12 1989-2008 各年设施农业雨水集蓄利用系统水文性能模拟表	117
表 6-13 设施农业雨水集蓄利用日步距、月步距模拟结果对比	118
表 6-14 设施农业雨水集蓄利用系统微观经济评价表（30%投资比例） ..	120
表 6-15 设施农业雨水集蓄利用系统微观经济评价表（50%投资比例） ..	121
表 6-16 征收水资源费情景下设施农业雨水集蓄利用系统微观经济评价 ..	121
表 6-17 设施农业雨水集蓄利用系统微观经济评价（无生产性收入）	122
表 6-18 设施农业雨水集蓄利用系统宏观经济评价结果表	123
表 6-19 北京市住宅屋面雨水集蓄利用最大可能潜力	124
表 6-20 北京市设施农业雨水集蓄利用最大可能潜力	124

第一章 绪论

1.1 研究背景

在过去的一个世纪,随着科学技术的飞速发展,人类以发展经济为重点开发利用水资源,创造了世界经济奇迹,但水资源不合理的开发利用使全世界面临着严重的水资源危机(World Bank, 1995; Gleick, 1993)。1972 年联合国人类环境会议指出:石油危机之后,下一个危机是水(UNEP, 1972)。1977 年联合国水事会议进一步强调:水,不久将成为一个深刻的社会危机(赵卫, 1999)。1997 年联合国《对世界淡水资源的全面评估报告》中提出:缺水将严重制约下世纪的经济和社会发展,并可能导致国家间的冲突(UN, 1997)。据联合国公布的数据,全球用水量在 20 世纪增加了 6 倍,是人口增长的两倍(WWC, 2006)。联合国教科文组织认为,目前地球上淡水资源总体充足,但由于分布不均、管理不善、环境变化及基础设施投入不足等原因,全球约有五分之一的人无法获得安全的饮用水,40%的人缺乏基本卫生设施(UNESCO, 2006)。就农村而言,据预测,到 2030 年,全球粮食需求将提高 55%,因此农村地区需要更多的灌溉用水,而这部分用水已经占到全球人类淡水消耗的近 70%。就城市而言,据预测,到 2030 年,城镇人口比例会增加到近三分之二,从而造成城市用水需求激增(Janusz, 1999)。联合国估计,届时将有 20 亿人口居住在棚户区和贫民窟,而缺乏清洁用水和卫生设施将严重威胁城市贫民的基本生存。为此如何处理好水资源开发与保护、人口与水资源以及与可持续发展的关系,已成为世界各国科学界研究的热点。

20 世纪 80 年代以来,全球范围内水资源危机频繁发生,雨水利用重新引起了人们的注意。1983 年在美国夏威夷举行了国际雨水收集系统的第一次会议,掀起了世界各国利用雨水的热潮。在随后的 20 多年里,雨水利用已被世界各国的学者所重视,国际雨水利用系统协会(IRCSA)已经成立。美国、加拿大、法国、印度、以色列、日本、德国、澳大利亚等几十个国家和地区,在城市和农村开展了不同规模的雨洪(水)利用研究和实践,其中日本、美国和德国等经济发达国家,城市化的进程发展较早,且都是暴雨洪水灾害频发的国家,因此,雨水利用起步早,发展较为完善(钱易等, 2002)。

我国水资源紧缺,而以城市为中心的城区更是水资源供需矛盾的焦点。近 20 年来,由于人口激增、城市化与工业化迅速发展,城市缺水和水质恶化已经成为城市发展的重要制约因素。全国近半数的城市缺水或严重缺水,其中大部分在我国北方尤其是华北地区,水资源紧缺已经成为制约我国国民经济发展的主要障碍。为了暂时解决城市缺水问题,很多缺水城市大量开采地下水,造成了严重的地下水枯竭、地面沉降、地裂缝等地下水环境问题,在沿海地区还引起了海水入侵问题。由于超采而形成的地下水漏斗,改变了地下水原有的流向,导致地表

污水渗入地下含水层，污染了作为生活和工业最主要水源的地下水。

21 世纪我国进入了城市化高速发展的时期。预计到 21 世纪中期，城市将由目前的 668 多座增加到 1000 多座，城市人口将增加到 9 亿左右。城市人口的迅速增加，将使城市人均占有水量不断下降。缺水的原因是多方面的，除工程供水能力的限制外，用水方式不合理也是原因之一。如几乎所有城市都将饮用水用于冲洗厕所、绿化及其它杂用；另外，没有充分合理地利用城市雨洪资源也是原因之一。另一方面，城市化的高速发展使不透水面积大幅度增加，造成降雨对地下水入渗补给的大量减少，因而加剧了地下水枯竭的速度和范围。不透水面积大幅度增加，还造成城市洪水增大，洪涝灾害加剧。城市化带来的城市洪涝问题加剧，是世界各国城市发展所面临的普遍性问题，也是越来越棘手的问题之一。

中国的雨水利用具有非常悠久的历史。然而，随着现代大规模水利工程的兴建，雨水利用渐渐被人们淡忘。20 世纪 80 年代以来，为了解决缺水地区的人畜饮水问题，我国的雨水利用重新兴起。大规模的雨水利用始于西北一些省区（甘、青、宁、内蒙古等）的农村。80 年代末甘肃省实施的“121”工程向世界展示了雨水利用的空前规模和效果。1995 年第七届国际雨水利用收集系统大会在北京召开，来自 40 多个国家和地区的代表参加了大会。1996 年、1998 年、2000 年和 2004 年，我国先后举行了 4 次全国雨水利用大会暨国际学术研讨会，推动了我国雨水利用的研究和实践。目前，中国已经形成了较为完善的农业雨水集蓄利用技术和管理体系（顾斌杰等，2001）。相对而言，中国的城市雨水利用起步较晚，现仅有少数城市开展了一些实验和示范研究，但相关的技术体系、法规政策等尚不成熟，缺乏全面推广应用雨水利用技术的条件。不可否认的是，雨水利用不应仅限于农村聚落的人畜饮水和雨养农业，既然降雨在空间上是遍历的，那么，雨水利用就应该是广泛的。

北京是一个水资源十分短缺的城市，在我国北方尤其是华北地区众多缺水城市中具有典型性和代表性。北京市水资源的消耗量在 1970 年代中期已经达到北京地区自然界水资源供给量的极限。城市缺水已经极大地影响了城市社会经济的发展。近年来，由于连年干旱，密云水库和官厅水库来水量大幅度衰减，以及地下水大面积超量开采，使得供需矛盾更加尖锐。加之工业污水，生活污水的增加，造成生态环境恶化，已经影响到首都人民的生产和生活，成为制约首都社会经济可持续发展的重要因素。近 20 年来北京市的人口和经济规模有了空前的增长，尽管大力推进了计划用水和节约用水，但水资源供需态势仍十分严峻。目前，北京平原地区已经出现了巨大的漏斗区，它将直接导致水质恶化、地面下沉和市政设施被破坏。

对雨水处理和利用的观念错位进一步加剧了北京的缺水危机。北京市城区汇集的雨水资源量随着城市的快速发展不断增加。随着北京城区建设的迅速发展，不透水地面所占比例由 1959 年的 61% 增至 2000 年的 77%，导致城区总径流系数

增大,雨水的汇集、排出时间缩短,高峰流量增大(北京市水利局中德合作雨洪利用项目办公室等,2003)。这不仅对城市防洪形成巨大压力,还会造成接纳水体河岸侵蚀和下游城市的洪涝灾害。城市雨水径流具有一定的污染性,特别是初期雨水所受的污染最重。不对其加以有效的处理将造成河流水体的严重污染和整个城市的生态环境恶化。同时,由于城区发展导致的不透水地面增加,使地下水从降水获得的补给量逐年减少,加重了城市水危机。此外,降水的直接排放还加重了市政建设压力。降水后北京城区需要使用庞大的人工雨水排放系统(雨水管道、泵站等)将日益增长的雨水径流排出城市,同时雨污合流导致雨水汇入污水管道,稀释了进入城市污水处理厂的污水,使得污水厂不能高效运转而造成浪费。

缺水将直接影响北京农业的发展。从新中国成立至今,农业都是北京的用水大户。1980年以来,北京农业用水最高峰出现在1989年,用水量达24.42亿 m^3 ,占当年北京市用水总量的53%。然而,北京“大城市、小郊区”的特点决定了水量分配必须优先满足工业和城镇生活用水,农业用水只能在保证城市生活和工业用水的前提下进行安排,随着工业和城镇生活用水的增加,可供农业灌溉的水量大为减少,这将直接对农业生产活动造成不利影响(王红瑞等,2004)。目前,北京农业用水主要依靠大量开采地下水维持,但这种用水方式正面临着巨大的挑战。大量超采地下水导致北京地下水水位急剧下降,农业用水成本增加,这对农业的用水安全和可持续性发展极为不利。如何解决快速城市化引起的农业缺水问题是北京市面临的一个新课题。我国干旱区、半干旱区农业雨水利用的成功历史和实践表明,作为一种遍在性和可再生性的水资源,雨水资源的集蓄利用可以成为解决农业缺水的重要手段。北京农业雨水利用不仅有利于缓解农业缺水现状,也有利于缓解城市的缺水状况,具有较大的现实意义。

总之,一方面,北京的高速发展面临水资源短缺瓶颈;另一方面,北京大量的雨水资源没有得到充分利用而被浪费,并且带来了一系列的社会经济与环境问题。本文正是基于以上现实问题的存在,试图通过研究,总结雨水集蓄利用适用技术,构建雨水集蓄利用优化方法,评价北京市雨水集蓄利用潜力,探讨雨水利用管理方法,以期北京市乃至中国雨水利用事业加快发展贡献微薄之力。

1.2 研究的目的和意义

1.2.1 研究目的

现代意义的雨水利用起源于一些发达国家,其研究和应用已经有几十年的历史。但我国能系统、综合利用雨水资源的大中城市目前还是空白。本研究就是基于这一现实,在探讨国内外雨水利用的先进技术与管理经验的基础上,结合北京水资源利用与管理的现状,系统地总结北京市雨水集蓄利用适用技术,科学评价

城市集雨利用潜力，探讨城市集雨利用的管理方法，为中国雨水利用的规模化、产业化和市场化发展提供必要的经验和方法借鉴。具体而言，本文主要针对以下问题展开研究：

（1） 科学认知雨水利用

中国具有悠久的雨水利用历史，但现代意义的雨水利用发源于国外。因此，论文首先要解决雨水利用的基本理论问题。我国雨水利用的研究很不成熟，对雨水利用的相关概念认识不清晰、理解不深刻。本文从雨水利用研究的产生和发展出发，研究雨水利用的概念内涵、属性特征、类型划分等问题。为北京雨水利用的深入研究奠定基础。

（2） 深入探析雨水集蓄利用技术体系

国内外雨水利用的类型十分丰富。各种类型的雨水利用系统的设计和应用都需依据当地的社会、自然和经济条件，统筹兼顾雨水利用的水量、水质及技术经济可行性。而且还需考虑与现有水资源利用管理体系的衔接。因此，城市雨水利用是一项复杂的系统工程。只有在充分考虑各种限制影响因素条件下，合理设计的雨水利用技术体系，才能充分发挥其作用。也正是因为雨水利用的综合性和复杂性，本论文不可能也不准备对雨水利用的所有类型和涉及的所有问题展开讨论，而是重点研究雨水集蓄利用技术体系，以期深入探讨该类型技术应用的效率、效益、潜力和管理等方面的问题。

（3） 确定雨水集蓄利用最优模式

雨水利用的最终目的是充分利用雨水资源，弥补城市传统供排水系统的不足，改善城市水循环。但是，在集雨利用技术的实际应用中，必须要兼顾技术、经济和生态环境可行性。雨水利用技术的推广需要重点注意两个方面，一是技术应用可能引发的环境效应，二是技术应用的经济可行性，亦即用户的接受意愿。因此，雨水利用应当以雨水资源利用环境适宜性及工程效益最大化为目标。在此前提目标下，探讨北京市雨水集蓄利用的最优模式，才能为今后技术的推广应用提供切实的技术参数和经济参考。

（4） 科学评价雨水集蓄利用潜力

一个地区降雨资源的丰富度决定了最大可收集雨水量，即“可能潜力”。但城市雨水集蓄利用的可实现潜力受多种因素的制约。充分分析本地的自然社会经济影响因素，才可能正确评价城市现实的集雨利用潜力，才能从宏观上正确认识 and 把握雨水利用的规律。基于雨水集蓄利用类型和空间特征的潜力评价是雨水利用工作开展的必要前提条件和指导原则之一。

（5） 论述雨水利用的管理方法

作为城市水资源管理体系的重要内容，雨洪（水）利用逐渐受到了重视。但是如何落实雨水集蓄利用技术和发挥其应有的作用仍然面临着很大的挑战。首先，北京市雨水利用尚处于初级阶段，大范围推广雨水利用技术需要政府、企业

和用户之间的默契配合,尽快出台雨水利用管理办法尤显重要;其次,雨水集蓄利用与城市污水再生回用、城市水价等多个水资源利用和管理环节有着密切的联系。如何处理好它们之间的关系,从而使雨水利用真正发挥节水、减污和防洪等多重作用,是本研究要展开探讨的内容之一。总之,将雨水利用纳入到水资源利用和管理体系当中是其得到长足发展的关键所在。

1.2.2 研究意义

本研究对水资源可持续利用和管理理论及城市雨水资源利用实践均有重要的意义,具体表现在:

(1) 理论意义

雨水利用是一种经济、实用的小型技术,但可以产生巨大的环境和生态效益。尽管雨水利用技术有了很大的发展,雨水利用的范围从家庭、农业到城市环境日益扩大,以至于需要重新认识传统的水资源概念及其理论,但雨水利用有关的理论研究并不完善,国内外一直缺乏系统的理论基础和方法(牟海省,1998)。

水资源具有丰富的内涵。但是在实践中,人们往往将水资源等同于地表水和地下水资源,而雨水资源的深度开发利用往往被忽略。究其原因在于人们对水资源的内涵认识不清。本研究有助于完善水资源理论,丰富水资源的概念和内涵。

另外,雨水利用的研究和实践必须借助于气象学、水文学、土壤学、工程学、经济学、管理学和农业科学等多种学科的理论 and 知识。同时,雨水利用具有自身特有的研究对象和内容,因此,又必须形成独有的理论和方法体系,本研究有助于丰富雨水利用的理论基础和方法。

(2) 现实意义

中国城市雨水利用的研究和实践远落后于一些发达国家,这与我国经济的快速发展和人均意义上的“贫水国”地位极不相称。同时,我国北方尤其是华北地区水资源供需矛盾的日益尖锐也要求加速开展城市雨水利用工作,缓解城市水资源短缺,解决一系列的水生态环境问题。北京在中国北方的缺水城市中具有典型性和代表性,北京雨水利用工作的开展在全国具有巨大的宣传、示范和指向作用。目前,北京城市雨水利用仍处于深入研究和示范推广阶段,距离大范围推广还有较大的差距。本论文以城市雨水集蓄利用为主要研究对象,深入探讨国内外先进的雨水利用技术、经验和管理理念,设计适合本地的城市雨水集蓄利用技术体系及管理机制,切实解决城市雨水利用的可行性和适用性问题。

在中国,农业是用水大户,许多城市的农业用水占到城市用水总量的 50% 以上。挤占农业用水是缺水城市缓解水短缺的无奈之举,但显然并非解决缺水问题长期、根本的办法。中国农业农村的雨水利用历史实践证明,雨水利用能够为农业和农村发展提供可靠的水源,在解决我国干旱、半干旱区农业缺水,带动农民致富中起到了重要的作用。在我国缺水城市开展农业雨水利用可以提高城市的

水资源自给保证率,减少农业超采地下水现象,减少农业因缺水造成的各种损失,其现实意义巨大。1998 年-2002 年,北京市开展了“山区水利富民工程”,解决了山区百万人的用水问题,取得了很好的效果。近些年以来,城市用水量的增加和连续的干旱,致使北京地下水超采现象加剧,平原区地下水位快速下降,以地下水为主要水源的农业的发展受到影响,农业用水成本不断上升,用水高峰期的缺水现象频发。

设施农业是北京农业的重要组成部分。由于设施农业具有较高的投资收益率,在北京市得到了较快的发展。但设施农业种植周期长,年耗水量大,缺水将成为北京市设施农业发展的主要瓶颈。在北京市农业局和水务局的共同支持下,目前,北京设施农业雨水集蓄利用正处于示范阶段。农业雨水利用具有与城市化地区雨水利用截然不同的条件和要求。由于北京市农业用水是整个城市用水的重要组成部分,因此,农业雨水利用也应该是城市雨水利用的重要组成部分,需要给予重视。本论文将对设施农业雨水集蓄利用展开研究,针对农业雨水集蓄利用过程中出现的问题,构建设施农业雨水集蓄利用效率效益的评价方法,分析适合北京地区的设施农业雨水集蓄利用体系,完善农业雨水利用的管理体系,为推广应用该项技术提供政策依据。

总之,本研究以北京市雨水集蓄利用为主要对象,在借鉴前人丰富研究成果的基础上,进一步完善雨水利用基础理论和方法,丰富水资源的概念和内涵。同时,依据北京市雨水利用的研究和实践经验,借鉴多种学科的理论和方法,深入研究北京市雨水集蓄利用的类型、效率、潜力及管理等方面的问题,为中国雨水利用的实践和学科发展添砖加瓦。

1.3 研究方法与创新点

1.3.1 研究方法

雨水利用研究是跨学科的交叉研究,其研究方法可借鉴相关学科的某些常规方法。根据研究需要,本文主要采用如下研究方法:

(1) 文献归纳法

通过阅读大量雨水利用相关文献,归纳总结雨水利用的概念、类型、技术体系、管理经验、研究前沿和核心问题,结合北京雨水利用实践,力求形成较为系统的城市雨水利用技术和管理体系,凝练出本论文所要解决的科学命题。

(2) 相关主体访谈法

通过访谈的形式,调查现有雨水集蓄利用技术应用中存在的问题和可能的改进方法,比较不同类型之间的优劣所在,为探索适合本地的雨水集蓄利用集成技术提供依据。

(3) 定性定量相结合

定性讨论能够准确把握事物的特征,而定量研究能够用准确数据充分证明论点。本研究充分利用二者的优点,有机融合定性讨论与定量研究。

(4) 案例实证分析

通过相近或相似案例的分析对比,可以多方位、多视角分析研究对象的特征,从而更好地把握影响雨水利用效率和效益的关键因素。同时,通过分析一些成功的案例能够有助于形成雨水利用优化模式。

(5) GIS 空间分析法

地理信息系统(GIS)具有强大的空间信息分析功能,利用空间信息分析技术,通过观察分析和模型试验等方法,可以获得新的知识和结论,并以此辅助空间决策。本研究运用 GIS 技术对北京雨水集蓄利用潜力进行空间划分,并试图构建面向用户的信息化管理系统,为雨水利用工作的开展和城市规划提供借鉴。

1.3.2 创新点

(1) 雨水利用技术相对比较简单,但国内外雨水利用系统的类型十分丰富。确定适合一个地区的雨水利用技术体系,涉及到该地区的水文水循环平衡、雨水利用工程的效率、效益以及水资源管理体系等许多方面,因此,这又是一个相对比较复杂的过程。本论文通过对国内外雨水集蓄利用技术与模式的详细剖析,结合北京雨水利用的实践经验,考虑雨水集蓄利用技术开展的各种现实条件,对雨水集蓄利用系统的水文性能和经济性能进行评价,提出北京雨水集蓄利用的优化模式。尤其是北京设施农业雨水集蓄利用的实践尚处于起步阶段,其进一步的发展急需相关理论的指导和雨水集蓄利用综合集成技术的形成。总之,雨水集蓄利用模式的优化对北京雨水利用工作的开展十分重要,但目前国内外缺乏系统而科学的优化方法。本论文建立的评价方法和体系能为城市雨水集蓄利用系统的优选提供借鉴。

(2) 雨水集蓄利用的潜力评价和空间区划是雨水利用研究的重要内容,也是雨水利用的基础性工作,是一个地区雨水利用工程布局、政策制定的重要参考。本论文运用 GIS 空间分析方法,结合雨水利用的主要限制因素,对北京雨水集蓄利用的主要类型进行潜力评价和时空量化预测,并进而展开雨水集蓄利用的空间区划。以期能够为城市雨水管理和规划提供良好的平台,尽量避免雨水利用工程建设的盲目性。

(3) 国内外的实践证明,雨水利用可以产生巨大的社会、环境和经济价值。但雨水利用系统的推广面临着用户信息缺乏的瓶颈。因此,构建面向用户的雨水利用和管理平台,是实现雨水利用从研究向现实价值转化的重要步骤,也是政府一系列雨水利用政策措施能够得到贯彻落实的重要一环。本论文探讨构建面向用户的雨水利用交互式管理平台的方法、步骤,并初步构建了这一平台。同时,现有的城市水资源管理体系不能完全适应雨水利用技术的推广和应用。因此,急需

以雨水利用为切入点,转变传统的水资源综合管理方式,为中国城市水资源管理提供一种全新的思路。

1.4 研究思路

第一部分,立论和研究思路。介绍了研究背景,明确研究目的和意义,概括并简要介绍研究中所应用的研究方法,提出本研究的总体思路。

第二部分,总结已有的实践与研究成果,包括研究综述和理论基础两个部分。现有文献对雨水利用做了很多的研究,本文基于现阶段的研究,力求研究进程得到进一步推进。理论基础是雨水利用研究的基本工具,本研究充分利用已有理论,并对已有理论在雨水集蓄利用领域的应用进行分析,为形成本论文的理论基础和研究方法奠定基础。

第三部分,雨水集蓄利用技术体系的详细剖析。国内外存在类型丰富的雨水集蓄利用技术和模式,根据世界雨水利用发展的进程和北京市雨水利用的实践经验,确定了住宅屋面雨水集蓄利用系统和设施农业雨水集蓄利用系统为论文的主要研究对象,详细介绍了两种系统的技术体系、构成要素和工作原理,为后续研究奠定了技术基础。

第四部分,雨水集蓄利用水文性能评价的理论和方法。科学评价雨水集蓄利用系统的运行效率,即雨水的收集效率和雨水对优质水的替代效率,是雨水利用研究的重要内容,也是雨水利用工作开展的重要依据。通过详细分析雨水集蓄利用系统中蓄水池的工作原理,构建了雨水集蓄利用系统水文性能的模拟方法。该方法综合分析降雨量、用水量和蓄水池溢流量之间的相互关系,并允许用户根据对模拟精度的需求选择数据资料的步距,弥补了以往简单估算雨水收集利用量的不足。

第五部分,雨水集蓄利用经济性能评价的理论和方法。雨水利用的社会、经济和环境价值巨大,这一点毋庸置疑。但雨水集蓄利用工程能否被公众所接受,需要从雨水集蓄利用工程的经济可行性上进行识别。雨水集蓄利用经济性能评价的目的就是要论证在特定的社会、经济及自然条件下,这一技术是否具有经济可行性,从而从雨水收集利用的效率和效益方面综合考查系统的适宜性。

第六部分,北京市雨水集蓄利用系统的评价、空间化及管理。在简要介绍了北京市概况后,首先通过构建典型雨水集蓄利用系统,对单个雨水集蓄利用系统进行水文性能和经济性能评价,分析雨水集蓄利用系统的效率效益及其主要影响因素。然后,通过对不同区位雨水集蓄利用系统的水文性能和经济性能评价,开展雨水集蓄利用系统的空间适宜性研究,辨别雨水集蓄利用的最大可能潜力和现实潜力区。并根据雨水集蓄利用系统性能评价及空间化研究的过程和结果,提出了一系列有针对性的政策措施。

第七部分,对全文的研究成果进行总结,并探讨本研究所存在的不足,最后

展望未来雨水利用研究的发展方向与趋势。

第二章 雨水利用及相关研究进展

2.1 基本概念解析

对雨水利用及相关概念的准确理解, 是进行雨水利用研究的基础和先决条件。明确水资源、雨水资源的概念、内涵及相互关系, 有助于更加清晰地理解雨水利用研究的对象、方法、意义和价值。

(1) 雨水资源与水资源

大气对地面水分的输入方式分为垂直、水平和凝结 3 种空间形式, 对应于通常所称的垂直降水、水平降水与地面凝结水。大气降水 (precipitation) 是从空中降下来的雨、雪、雹等的总称, 是从云雾中降落到地面的所有液态水和固态水。降雨 (rainfall) 是从空中降落到地面的滴状液态水。可见, 降雨只是降水的一部分。本论文所研究的雨水利用是指降雨资源 (即“雨水”) 的集蓄利用, 而非降水资源的利用。究其原因, 一是北京地区年降水中主要以降雨为主, 二是在现有的技术经济条件下, 降雨以外的其它降水形式的开发利用难度很大, 有悖于雨水利用的经济性和便捷性。

到目前为止, “雨水”概念还没有一个明确的界定, 导致“雨水利用”概念的模糊。张祖新 (1999) 认为: “从广义上讲, 凡是利用雨水的活动都可以称为雨水利用。如兴建水库、塘坝及灌溉系统等开发利用地表水的活动, 打井开采地下水的活动以及人工增雨措施等活动。而狭义的雨水利用是指直接利用雨水的活动”。刘昌明 (1993) 认为, 目前国际上谈雨水利用都是指雨水集流的家庭利用和农业应用两个方面的含义。我们认为这是狭义的雨水利用概念, 或称之为雨水的直接利用或雨水的一级利用。除雨水集流系统收集的雨水外, 流域产流汇集到河流、湖泊、水库、地下水的水资源, 被人类开发利用, 称之为雨水再利用, 这是更广义的雨水利用。我们在以往的水利工作中加强了后者, 实际上是雨水再利用。李丽娟认为: “从广义上讲, 一切利用雨水的活动都可以称为雨水利用。而雨水的主要赋存形式—地表水和地下水由雨水转化而来。所以, 一切水资源的开发利用活动, 都是雨水利用活动”。朱强 (2002) 等认为: “雨水集蓄利用是雨水利用的一种形式, 也是水资源开发的形式。地球上一切形式的水资源都来自雨水”。

从国内学者对雨水利用的理解可以看出, 雨水利用的概念并不清晰。广义的雨水利用往往等同于水利甚至超出了传统水利的范畴, 又可称其为雨水二次利用、再利用和间接利用等; 狭义的雨水利用往往是指雨水的初次利用、一级利用或直接利用。我们所理解的雨水利用是指对原始状态下的雨水进行利用, 或对雨水最初转化阶段时的利用, 试图将雨水利用和其他水资源利用区分开来。但由于概念模糊, 雨水的原始状态和最初转化形式缺乏明确的界定, 导致雨水

利用的范围和内涵也不明确。同时,雨水资源与水资源既相互区别有相互联系,理顺雨水资源与水资源的关系,是深入研究雨水利用的必要前提。

明晰雨水利用概念首先要确定雨水的概念和范围。降雨过程从空气中水的凝结下降开始,到水滴停止洒落到地表为止。在降雨过程中,雨水在空中和地表都存在,另外,在降雨过程停止后,洒落到地面的水进行二次分配,通过入渗转化为土壤水和地下水,通过汇集形成径流,流经河流湖泊,进入大海。有人认为所有形式的水都来自雨水,这仅仅是就水循环系统中的循环过程而言的,与认为所有形式的水都来自蒸发一样。水循环系统中,雨水存在的时段分为空中水阶段和陆地表面水阶段,也就是从空中水汽凝结下降的瞬间开始,到形成地表水通过蒸发变成空中水瞬间结束。从这个意义上来讲,陆地表面水都是雨水的存在形式,这就是泛雨水概念,也就是地表所有形式的水均来自雨水的根据。雨水是时间、形式及其数量的统一体。在时间上,表现为雨水是降水过程中产生的,没有被转化为生理水、土壤水、地表水和地下水之前这一段时间内的水资源。它存在时间的长短取决于它被转化的形式。在数量上,表现为一定区域一定时段内的雨水总量是可以计算的,在同一区域内不同时段的水资源量是不稳定的。当雨水作为一种用来满足人们生产、生活、生态要求的物质资料时,它就成为雨水资源。

理解雨水利用需要界定水资源的概念及其与雨水资源的相互关系。水资源一词很久以前就已经出现,其内涵随着时代前进不断得到丰富和发展。国内外对水资源概念的界定主要有:

- ① 英国1963年通过的水资源法将水资源定义为“具有足够数量的可用水源”。
- ② 联合国教科文组织(UNESCO)1977年将水资源定义为“可资利用或有可能被利用的水源,这个水源应具有足够的数量和可用的质量,并能在某一地点为满足某种用途而可被利用。”
- ③ 1988年的《简明大英百科全书》中水资源的概念是“地球上所有的(气态、液态或固态)天然水”。
- ④ 1999年《不列颠百科全书》认为水资源是:“地球上存在的不论属于哪种状态(液态、固态或气态)的,对人类有潜在用途的天然水体。”
- ⑤ 《中国大百科全书》的“大气科学、海洋科学、水文学”卷对其的定义是“地球表层可供人类利用的水。包括水量(质量)、水域和水能资源,一般指每年可更新的水量资源(叶永毅,1987)”。
- ⑥ 1987年《中国农业百科全书》水利卷定义的水资源为“可恢复和更新的淡水量”。根据更新周期又将水资源分为两类,即“永久储量”和“年内可恢复储量”,永久储量更新周期长而缓慢,这类水的利用消耗应小于它的恢复能力;年内可恢复储量是参与全球水循环最为活跃的动态水量,通

过逐年更新可保持较长时间内的动态平衡。

⑦ 1992 年出版的《中国大百科全书》“水利卷”将水资源定义为“自然界各种形态的天然水”。其中供评价的水资源是指可供利用的水资源，这部分水资源具有一定的数量和可利用的质量，并能够长期满足在某一地点的某种用途（陈志恺，1992）。

⑧ 2002 年《中华人民共和国水法》规定“水资源包括地表水和地下水”。而《全国水资源综合规划》把“地表水资源量和地下水资源量之和扣除二者重复计算量”作为水资源的总量。

可以看出，至今为止，水资源还没有形成公认的概念。究其原因，一是水的表现形式多种多样，如地表水、地下水、降水、土壤水等，且可以相互进行转化；二是水资源具有明显的地域差异和不可替代性，不同地区水的特性不同；三是水资源用途十分广泛，利用方式多样，不同部门、行业和地区对水资源的理解往往不同；四是水资源的开发利用受到多种因素的影响和制约，水资源的概念随着影响因素的改变而发生变化。

雨水资源与水资源之间存在着紧密的联系。广义雨水资源包含所有形式的水资源，雨水是淡水资源的一种存在形式和主要来源，没有雨水的更新和补充，传统水资源将不复存在。雨水利用工作的不断开展，使可开发的水资源范围由传统的点、线拓展到点、线、面（雨水资源）。刘昌明从广义水资源概念出发，根据集中持续供水能力大小，将水资源划分为“强水”和“弱水”。强水是指点、线分布的可集中持续开发的地表水和地下水；弱水是指分散分布、来水强度较小的雨水资源。强水是传统水利工程开发的主要对象，已经成为工农业和城市生活用水的主要来源。弱水则可为缺乏集中水源的用户提供水资源。在强水开发利用强度已经很大、水资源短缺较普遍的形势下，作为弱水的雨水资源应尽快成为开发利用的主要水资源形式之一。

（2）雨水资源化与雨水利用

雨水资源化是指雨水被开发、利用，转化为资源并产生其价值的一个过程。它包括雨水资源开发利用和产生效益等主要环节。

雨水在形成、转化过程中，有些在降水过程中由于洒落到植被上或者植被根部或者入渗到农田，被植物直接利用，有些汇集到一定的区域或容器中被人们直接利用。但并不是所有阶段和所有的水量都可以被直接利用。雨水在空中，无法被人或者植物所利用；在降落到地面后，很大一部分雨水因入渗、径流和蒸发不能够被直接利用。在降水过程中或降水之后产生的雨水，不被人为干预，直接转化为其他形式水资源，产生经济效益和生态效益的过程，是雨水资源的天然利用或雨水资源的自然利用过程。在这一过程中，人们没有采取特定的行为来改变雨水的形成与转化过程和途径，雨水处于自然循环中。雨水的人为利用是人们为了满足某种需求，采取各种措施和手段改变雨水的形成条件、雨水

资源产生过程和雨水资源的转化途径,使雨水的分配方式、分配途径发生改变,从而将雨水转化为其他形式水资源,产生经济效益和生态效益的过程。雨水的人为利用改变了雨水产生、输送、转化的途径、时间、质量和数量,改变了水循环的自然规律,可能会对环境产生一定的影响。雨水的自然利用在水文学、土壤学等学科有专门的研究和论述,而本文所关注的是雨水的人为利用,一般简称为“雨水利用”。在本文以后的各章节中所讲的雨水利用,如没有特殊说明,都特指雨水的人为利用。

雨水形成并转化为其他形式的水资源大体可以分为三个阶段。一是雨水形成阶段,即云层中的水汽凝结成水滴或水晶,下降之前的阶段;二是降落阶段,即雨水形成后在重力作用下下降过程;三是雨水消失阶段,即雨水降落到地表后,通过入渗、蒸发和径流转化为其他形式水资源的过程。人们可以分别在这三个阶段采取各种措施,改变雨水的自然循环规律,实现雨水利用的目的。在第一阶段和第二阶段,或者由于雨水利用的技术要求高、投资大,或者由于雨水利用的自然条件差,所以这两个阶段雨水利用的广度和强度都不大。绝大部分雨水都在第三阶段洒落到地表,再通过蒸发转化为空中水资源,或通过入渗转化为土壤水资源,或通过汇集形成地表径流,转而进入河流、湖泊等形成地表水资源。这一阶段的雨水利用是当前雨水利用研究和实践的重点、核心。

2.2 城市与城市化

现代雨水利用技术的兴起和发展与城市的发展有着密不可分的联系。系统了解城市的由来和发展、城市发展对水文水资源的影响能帮助人们理解雨水利用的内涵及意义,是探讨雨水利用理论与方法的前提和基础。

城市是相对于乡村的一个概念。如果说乡村是农业生产的基地和农民的生活场所,那么城市就是非农业生产的基地和非农业人口的生活聚居地,这是对城市概念的一种直观理解。在不同的历史时期,城市的功能在不断变化,其内涵也在不断丰富。

不同的学科和学者从不同的角度对城市进行解释。城市的特征大致可以从以下几个方面进行描述以加深对其的理解。

- (1) 城市是一定规模的非农业人口的聚居地;
- (2) 城市是一定地域范围的中心地;
- (3) 城市是高密度的物质和精神聚集体;
- (4) 城市是一个高效率的社会综合体。

城市化是社会经济发展的必然结果,是人类社会文明程度提高的重要标志。它是伴随着工业化和现代化进程,人类社会由传统的农业社会向现代城市社会转型,人们的生产和生活活动逐步向城市集中,农业活动的比重逐渐下降,而非农业活动的比重逐渐上升的过程。城市化的主要表现是大量农村人口向城市

集中，城市数量增加和城市规模扩大，城市基础设施建设的加速和城市现代化水平的提高，城市提供更多的就业机会和巨大的发展空间，区域社会经济结构（人口结构、就业结构、城乡结构）发生根本性的变革等。

世界城市化发展的经验表明，城市化发展具有明显的阶段性。美国地理学家诺瑟姆（Ray M. Northam）1979 年研究了世界各国城市化发展所经历的轨迹，把城市化进程概括成一条稍被拉平的“S”型曲线（图 2-1），并将城市化进程划分为初期-中期-后期三个阶段，每一阶段的城市化各有其特点。其中，城市化中期阶段的判定标准是城市化水平在 30-70%之间。该阶段由于工业基础已比较雄厚，经济实力明显增强，农业劳动生产率大大提高，工业吸收大批农业人口，城镇人口比重可在短短几十年内突破 50%而上升到 70%。

2007 年我国城镇人口总数 5.94 亿，占全国人口总数的 44.94%（中国统计年鉴 2008，中华人民共和国国家统计局）。可见，我国目前正处于城市化中期阶段，是城市化进程中的快速上升期。中国快速的城市化必然引起城市各方面的深刻转变，不仅涉及到社会经济问题，也涉及到资源与能源、生态与环境问题。因此，加强城市及其相关问题的理论和应用研究具有重要的现实意义。雨水利用是解决我国快速城市化进程中城市水问题的重要途径。

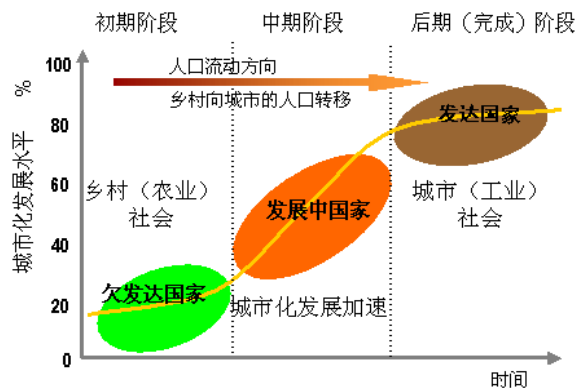


图2-1 城市化进程S型曲线图

图片引自吴佩林，2005

2.3 城市水文水资源

水循环是联系大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互作用的纽带，是自然界千差万别的水文现象、水资源特征形成的基础。人类活动对自然界的改造，实际上是改变了水循环过程，从而影响到了水文过程和水资源形成特征。研究城市水资源问题需要从认识水循环开始。

水循环是指地球上各种形态的水，在太阳辐射、地心引力等作用下，通过蒸发、蒸腾、水气输送、凝结降水、下渗以及径流等环节，不断地发生相互转换和周而复始运动的过程（左其亭等，2005）。全球水循环时刻都在进行着，它发生的领域有：海洋与陆地之间，陆地与陆地上空之间，海洋与海洋上空之间。

自然界中的水循环一般经历蒸发、蒸腾、水汽输送、凝结降水、下渗以及径流等环节。没有水循环就谈不上水资源的可再生，即无法持续利用。当然，说水资源是可再生的，并不能简单地理解为“取之不尽，用之不竭”。水资源的

开发利用必须保证在一定时期内水资源得到补充、恢复和更新。

2.3.1 城市水循环

城市是人类活动高强度地区，城市中道路、广场、房屋以及各种管网等密布，水循环过程较天然流域更为复杂，更具有特殊性。城市化前后水循环过程发生了重大变化，如下图所示。

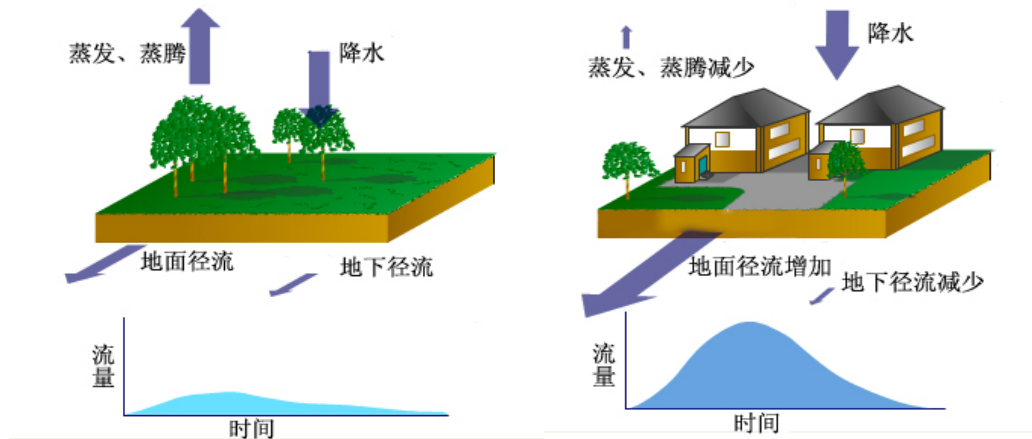


图 2-2 城市化前后水循环及流量过程线示意图

从蒸发过程来看，城市建设后，原来的自然陆面蒸发演变成城市建筑物不透水面蒸发，蒸发量集中但总量减少；原来的自然河流变成人工渠道，蒸发量相应减少。同时，由于城市人口和建筑物集中等原因，城市的平均气温较建设前升高，影响水的蒸发。

从下渗过程来看，原来的透水地面变成了不透水或透水性弱的地面，使降水下渗量大大减少。这导致了城市洪水比较集中，地下水补给量大大减少。

从径流过程来看，城市建成后，大气降水到达地面，很快流入地下管道或排水渠，形成地表径流的时间缩短，流速增大；而地下径流则由于下渗量减少，径流过程滞后，流速随之减少。

最后，城市人工引用水过程进入城市水循环过程中，使原本复杂的水循环过程更加复杂。因此，在城市化地区，水循环是以“人工水循环”为主导的“人工——自然”水循环模式。

2.3.2 城市水文效应

城市气候变化引起的水文效应。城市气候是在区域气候的大背景下，受城市建设和其他人类活动影响而形成的一种局地气候。城市对气候的影响作用，归纳起来有以下几个方面（李养龙等，2001）。

（1）城市热岛效应

城市空气中二氧化碳等气体和微粒含量要比乡村高得多，这必然会减弱空

气的透明度,减少日照时间、降低太阳辐射。但是,城市高大的建筑群、砖石、水泥和泊油路面反射率小,能吸收较多的太阳辐射,再加上有大量的人工热源,其结果是城市气温明显高于附近郊区。这种现象被称为“城市热岛效应”。城市热岛效应导致城市空气层不稳定,有利于产生热力对流。当城市空中水汽充足时,容易形成对流云和对流性降水。

(2) 城市阻碍效应

城市建筑物高低不一,其表面粗糙度比郊区平原大。这不仅能引起湍流,而且对稳定滞缓的降水系统有阻碍效应,使其在城市滞留的时间加长。导致城区降水强度增大,降水历时延长。

(3) 城市凝结核效应

城市受大气污染比郊区严重,导致城市空气中的凝结核比郊区多。这些凝结核吸收大气中的水分,易于形成降雨。

从城市水文水资源角度来看,城市对气候的综合影响集中表现在降水的变化上。不同的降水量及降水过程,形成的径流量大小和过程不同;同时蒸发量是水循环过程中水量损失的一个重要方面,直接影响着降水形成径流的比率;温度、湿度及其它气象因子的变化也在不同程度上影响径流形成过程。

城市下垫面性质变化的水文效应。城市建设大大改变了城区下垫面性质。公路、广场、学校、购物中心、街道、人行道、停车场、住宅和各种管网等挤占了农村耕地、草地、林地和湿地等,使原来的下垫面变成了人工硬化地面或房屋建筑。城市下垫面使流域不透水面积大大增加,蓄水能力大幅度减小,径流量集中而时间相对缩短。

城市下水道设施影响径流过程。天然条件下,降水形成的径流是通过自然形成的河道向下游汇集。自然河道一般比较粗糙,宽窄不一,形态各异,导致径流时间比较长。而城市人工修筑的下水道一般比较光滑,直线形状较多,有利于水流快速下泄,径流时间缩短。城市下水道的存在既加速了暴雨径流的形成,又起着疏通暴雨洪水的作用。

2.4 城市水问题及解决措施

2.4.1 城市水问题

城市化对城市建设前的自然系统进行了大规模的改造,使城市水系统发生了本质变化,引起了一系列的水问题。概括起来主要有三大问题:水资源短缺、水环境污染和城市洪水。

(1) 城市水资源短缺问题

城市化的快速发展,城市规模的不断扩大,城市人口增加,工业迅速发展,导致城市需水量急剧增加,城市缺水正成为世界性的问题。城市尤其是大城市

地域相对狭小，人口密度大，生产活动集中，取用水集中，所以容易出现资源型缺水；同时，城市排污集中，对水环境破坏力大，又容易出现水质型缺水。随着城市规模的不断扩大和城市化进程的不断加快，城市缺水日益严重，加大了地下水的开采量，导致规划区地下水超采，引发了地面沉降、地下水降落漏斗不断扩大等问题（吴季松，2002）。

（2）城市水环境污染问题

随着城市化进程的加快，城市生活污水和工业废水排放量迅速增加，导致城市水环境的污染。城市居民生活污水和工业废水在未经处理或处理不充分情况下排入城市河流，以及工业废气排放进入大气，其中的有害物质通过降水降落到地表水体，都会造成水体污染、水质恶化（冉茂玉，2000）。水环境恶化，一方面降低了水资源的质量，对人们身体健康和工农业用水带来了不利影响；另一方面，由于水资源被污染，原本可以被利用的水资源失去了利用价值，造成“水质型缺水”，加剧了水资源短缺的矛盾。

（3）城市洪水问题

在城市化地区，不透水面积增加截断了水分入渗及补充地下水的通道，使地表径流增加，滞洪、蓄洪能力下降，常造成洪涝灾害。在城市化过程中，人们对天然河道进行改造和治理，增加了城市汇流能力，汇流速度增大，汇流时间缩短。同时，天然河道的调蓄能力减弱，使城市区内产汇流过程发生变化，进而导致雨洪径流增加，洪峰流量增大，形成洪峰时间减短，洪水总量增加。所有这些变化往往加剧了城市及其下游地区的洪水威胁。

2.4.2 城市水问题的形成根源

造成城市“水少、水多、水脏”等问题的因素很多，综合起来主要有几个方面：一是城市人口增加、经济增长导致了用水量的急剧增加；二是城市化改变了原有的气候特点，集中表现在对降水的影响。总体来看，城市降水量要比郊区有所增加；三是城市发展导致了污水排放量的增加，加之降水携带了固、气态物质中的大量有害物质进入水体，造成了城市的水污染；四是城市建设使下垫面性质发生了根本的变化，改变了径流形成的条件，从而改变了水循环的自然规律，导致了一系列的城市水问题。

以上分析表明，城市水问题的实质是城市水系统的恶性循环。实现城市水资源可持续利用的关键在于建立城市水系统的良性循环机制。

在自然状态下，水循环处于良性状态。就某一自然区域而言，通常情况下，水资源的补给量与排泄量是动态平衡的。但是，在人类社会参与的情况下，天然状态的水循环模式将被改变，原有的平衡将被打破，稍有不慎便可能陷入恶性循环之中。从城市水资源开发利用的行为看，供水单位从水源取水，经净化处理后供给用户，用户使用后将污（废）水排入环境，污（废）水最终又回到

水源，这一活动过程构成了一个由“取水（水源）→供水→用水→排水→水源”等子系统构成的城市水循环系统。若按照这种水循环模式每循环一次，水源的水量就可能因使用过程中的消耗而减少，水质也会因使用而随之降低，甚至变为污水，污水排放后又会进一步污染水源，从而形成水越取越少，越用越脏的恶性循环，这是城市水系统在失控状态下的必然结果。从系统科学的角度看，城市水污染、缺水危机和洪水问题的实质就是城市水系统恶性循环的表现，这是当前很多城市水资源难以持续利用的理论根源所在。因此，建立城市水系统的良性循环机制是实现城市水资源可持续利用的关键所在。

2.4.3 解决城市水问题的措施

解决城市水问题，改善城市水系统的循环模式，主要有三种基本的途径（钱易等，2002）。

一是在城市水系统中增加节水子系统（图 2-3,a），不仅可以减少用水量和污水排放量，减轻对水源的压力，还能减少取水、供水、排水和污水处理的设施投资，是一种于自然和社会各方均有利的多赢的循环模式。

二是在城市水系统中增加治污（包括清洁生产）子系统（图 2-3,b），可大大消减污染物，改善排水水质，有助于遏制水环境恶化，保护供水水源，从而降低供水成本，提高用水质量，进而促进城市水的良性循环。

三是在城市水系统中增加再生水回用或非传统水资源（如雨水、海水、微咸水等）利用子系统（图 2-3,c），相当于增加水系统的供水能力和可用水量，同时也可减少水源的取水量。另外，城市雨水具有双重性质，合理开发利用城市雨水资源，可以增加城市可用水量，缓解城市水短缺；相反，不能很好的处理城市雨水，将直接导致城市水多、水少和水脏等问题。因此，增加城市雨水利用对改善城市水循环，解决城市水问题具有十分重要的作用。

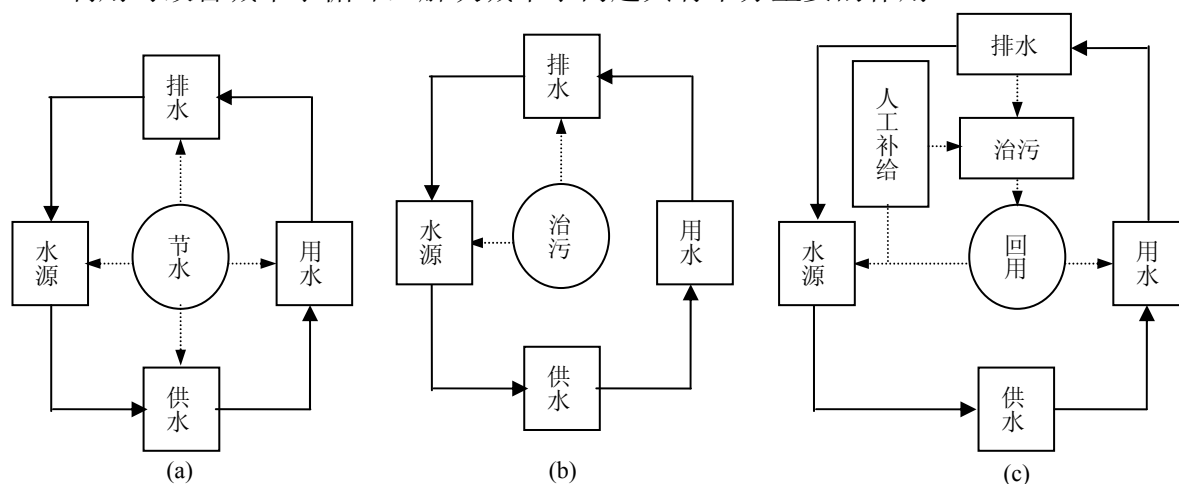


图2-3 城市水循环改良模式

注：引用自钱易等，2002

综上所述，现代城市的发展和城市规模的不断扩大导致城市集中取水量急剧增加。加之人类对城市水系统和水循环模式的认识不足，在水源保护与开发、水资源利用、污水处理等各环节处理不当，使自然状态下的良性水循环演变成城市水系统的恶性循环。解决城市水问题，建立城市水系统良性循环机制的根本策略是“节流优先，治污为本，多渠道开源”。其中，雨水利用不仅有助于治理城市水污染，而且增加了城市可用的水资源，使其成为解决城市水问题的重要手段。可以说，现代雨水利用技术的兴起是现代城市水问题频繁发生以及人类重新审视城市水循环的必然结果。

2.5 雨水利用发展概述

雨水利用是一项古老的传统技术。据有关资料记载，雨水利用最早可追溯到公元前 6000 多年的阿兹泰克（Aztec）和玛雅文化时期，那时人们已把雨水用于农业生产和生活所需。数千年来，雨水利用被广泛应用于缺水地区和国家（顾斌杰等，2001）。

进入近代工业化以后，人们不断向城市移居，城市有了非常快速的发展。人类开始广泛地利用电力和机械化，方便、随意地抽取地下水和地表水资源，为城市提供安全、充足的水源，雨水利用反而逐渐被人们淡忘。几十年来甚至上百年来，雨水反而成为城市的一种负担，一直被人们当作“废水”用各种措施尽快地予以排放。

但是，人类社会经济的进一步发展，人口的不断增长，对有限的水资源提出了越来越高的要求，水资源的紧缺已成为许多地方经济发展的制约因素，同时，大型水利工程引起越来越多的生态环境问题也迫使人们反思自己的行为并寻找其它出路。近 20、30 年来，雨水利用又重新引起了人们的注意。特别是联合国“国际供水与卫生十年”（IDWSSD）开展以来，这一技术迅速在世界各国复兴和发展，成为许多国家解决水资源不足、农村人口生活用水困难、城市洪水和水污染问题的重要途径。雨水利用也被赋予了新的含义，涉及到更多、更复杂的问题和技术。

概括起来，因雨水利用技术应用的区域特征和目的不同，可以将现代雨水利用技术分为两大领域，即现代城市雨水利用技术和现代农业（村）雨水利用技术。前者是伴随城市化而来的水资源短缺、城市洪水和城市水环境恶化等问题引起了人们的重视，观念上发生了从雨水是“废水”向雨水是资源的转化，并从 20 世纪 80 年代以后得到了快速发展。后者能够重新得到重视并得以广泛、快速的发展，一是得益于二战结束后世界经济的复苏，二是世界上广大缺水地区农业发展的现实需要。特别是进入 20 世纪 80 年代后，随着首届国际雨水集流系统会议的召开和国际雨水集流系统协会的成立，国际上掀起了集雨农业理论和技术研究的热潮。

2.6 雨水利用主要研究内容

雨水利用研究的内容十分丰富。概括起来,当前研究的方向大体上可分为雨水利用效率研究、雨水径流模拟研究、雨水收集系统研究、雨水利用潜力研究、雨水利用效益及环境影响研究、雨水利用空间区划研究、雨水利用的管理方法研究等。这些研究大体上可分为技术和管理两个层面。技术研究侧重于从微观上分析雨水利用工程的水量、水质及其经济效益等。管理研究主要从宏观上把握一个地区或城市雨水利用的潜力、环境影响、制度和政策措施等。

受雨水利用目的、下垫面性质、用水需求以及社会经济条件等多种因素的影响,城市雨水利用与农业雨水利用存在着较大的区别,两者研究的主要内容也各有侧重。同时,由于世界上各国的经济发展水平和包括降水在内的自然条件存在很大的差异,各国雨水利用研究所关注的重点也各有不同。

2.6.1 国外农业雨水利用研究进展

集雨面研究。集雨面是雨水降落的陆地表面。通过改变集雨面的性质(材料、坡度、大小等)可以改变雨水径流的速率和强度,最终可影响雨水收集利用的效率。因此,国内外对集雨面的研究非常重视,国外对这方面的研究比较多(Myers L E., 1967; Myers L E, 1967; Fink D H, 1970; Kemper W D, 1970; Hillel D, 1974; Fink D H, 1976; Fink D H, 1977; Mehdizadeh P, 1978; Fink D H, 1980; Boers Th M, 1982)。Oweis 等(1999)将集雨面处理方法总结为6个方面:

- (1) 清除集雨坡面上的植被,移走能截留和阻碍雨水流动的石块及其它物质,使集雨坡面在下降雨滴的不断敲击作用下形成紧实连续的表面硬壳。
- (2) 通过对集雨坡面进行平整压实处理,能减小土壤的渗透性,提高集雨效率,适宜的土壤湿度条件对土壤压实效果有显著影响。
- (3) 应用化学物质(主要是钠盐)疏散土壤胶体,使其充塞土壤孔隙,减低土壤渗水能力。
- (4) 应用化学物质(主要是石蜡沥青)充塞土壤孔隙,使土壤表面形成致密层,增大径流率。
- (5) 在集雨坡面上平铺混凝土板、木板或金属片等刚性材料,这种方法成本高,但使用寿命长(可用20年以上)。
- (6) 在集雨坡面上覆盖塑料膜、橡胶布和用沥青处理过的玻璃纤维等软性材料,这种方法的成本也比较高。

集雨面的选择直接影响雨水收集系统的效率。表2-1列举了农业雨水利用工程中各种集雨面的径流率及使用年限,对农业集雨工程的设计和建设具有一定的指导价值。当然,集雨面的径流效率不仅仅取决于集雨面所使用的材料,

还与集雨面形状、坡度、老化程度以及当地的降雨特征（如降雨强度、持续时间等）有着很大的关系。因此，在实际操作中，还需要结合实际情况来确定集雨面的径流率，以避免雨水利用工程建设的盲目性。

表 2-1 不同集雨面的径流效果及使用寿命

方法	径流率(%)	使用寿命(年)	方法	径流率(%)	使用寿命(年)
地表清理	20~30	5~10	混凝土	60~80	20
平整土地	25~35	5~10	薄膜	70~80	10~20
钠盐	40~70	3~5	沥青	85~95	15
石蜡	60~90	5~8	人造橡胶	90~100	15

(Oweis 等, 1999)

集雨系统研究。Boers (1982) 将世界各地的集雨系统分为两类:

(1) 微型集水区集雨系统 (micro-catchment water harvesting, 简称 MCWH): 指面积在 0.5~1,000 m² 之间的集水区 (contributing area, 简称 CA) 上的地表径流, 经过不大于 100 m 的距离, 存入邻近的入渗区 (infiltration basin, 简称 IB) 的根系土壤中, 供植物吸收利用。集水区 CA 和入渗区 IB 的面积之比 CA/IB, 是 MCWH 设计的关键参数。但各国对此进行研究得出的结论相差很大 (从 1 到 25), 主要是由于各地气候、土壤条件和作物需水量不同所致。MCWH 的优点是径流率高, 投资少, 容易建设; 缺点是工程占地较多, 导致作物密度小, 单位面积产量低。

(2) 径流农场集雨系统 (runoff farming water harvesting, 简称 RFWH): 所谓 RFWH 是指收集集水区 CA 上的地表径流, 通过沟、渠、坝等将其引入地面储水设备 (surface reservoir, 简称 SR) 蓄存或将其导入作物根区直接为作物所利用, 其设计关键是 CA 与 SR 的相对大小的确定。RFWH 的优点是, 通过 SR 可以使有限的水资源在时间和空间上得到更加合理地分配, 因此 RFWH 常用于家畜饮用或关键期的农田灌溉; 其缺点是建设 SR 和从 SR 到农田的输水系统需较大的投资。

Prinz 等 (2000) 将集雨系统进一步细分为 4 种类型:

(1) 屋顶集雨系统 (rooftop water harvesting): 在屋顶和庭院安装管道、输水设备和蓄水设备, 收集屋顶上的雨水供家庭饮水、卫生、养畜等使用。

(2) 小型集雨系统 (micro catchment water harvesting): 与微型集水区集雨系统 (MCWH) 相似, 集水区面积小于 1000 m², 种植区面积小于 100 m², 两者之比在 1:1~10:1 之间; MCWH 大多由手工建成, 不设溢流口。

(3) 中型集雨系统 (macro catchment water harvesting): 集水区坡度在 5%~50% 之间, 面积在 1,000~2,000,000 m² 之间; 种植区是梯田或是坡度小于 10% 的缓坡; 集水区面积与种植区面积之比为 10:1~100:1; 由手工或机械建成, 设溢流口。

(4) 大型集雨系统洪水集流系统 (flood water harvesting): 需建设复杂的渠坝体系, 收集雨季季节性河流水; 集水区面积在 200~500 万 m^2 之间, 集水区面积与种植区面积之比为 100:1~10000:1; 收集的雨水蓄存于水库、池塘和农田土壤中, 其主要用途为补充作物所需的土壤水分、回补地下水和减小洪水灾害造成的损失。主要由机械建成, 设溢流口。

集雨模型研究。1982 年以前, 专门针对雨水收集利用的模型很少, 但与雨水利用相关的研究不少, 主要为模拟降水—径流关系的水文模型和模拟雨水入渗、径流等物理过程的土壤物理模型两个方面 (Boers Th M, 1982)。1982 年以后, 随着国际上集雨农业研究热潮到来, 对集雨利用模型的研究也逐渐多了起来。Boers 等 (1986) 为探寻不同气候、土壤条件下, 小型集雨系统工程建设中合理确定集水区面积与种植区面积的最佳比值, 应用一维瞬时有有限差分土壤水分平衡模型 (SWATRE) 建立了用来描述缺乏长期气象水文资料地区降水—径流关系的线性回归模型, 并通过在 Negev 集雨径流农场的试验对模型进行了检验和校正。Critchley 和 Siegert (1991) 在考虑生长季作物需水量、预期降水量、集水区径流系数及种植区内水分的蒸发、渗漏和非均匀分布等因素的基础上, 提出了集水系统模型。该模型也旨在确定集水区面积与种植区面积的合理比例。

近些年来, 集雨系统模型逐步向全面、准确和实用的方向发展, 模型中大多详细考虑了土壤水分平衡方程的各个分项 (降水、径流、渗漏、作物蒸散和土壤水分的变化), 具备模拟集水区径流量和种植区土壤水分含量的功能 (Sanchez-Cohen I, 1997; Rockstrom J, 1999; Panigrahi B, 2001)。Young 等 (2002) 提出了 Parched-Thirst 模型, 该模型不仅能模拟降水径流过程、土壤水分运动过程, 还可以对高粱、水稻、玉米、谷子等作物的生长进行模拟, 并可预测集雨灌溉对作物产量的影响。在新技术应用方面, Abdinam (1998) 和 Melesse (2002) 等分别应用陆地资源卫星图片和 GIS 系统结合 SCS 模型对伊朗 Gharachai 河流域和美国佛罗里达 Kissinmmee 河流域的径流量进行了模拟评价。

雨水高效利用研究。在农业生产应用方面, 世界各地已涌现出很多高效收集利用雨水的技术: 约旦北部的土壤主要为粘土, 降雨入渗既慢又浅, 水分主要保存在土壤表层, 在当地高温强辐射条件下, 水分很快就蒸发殆尽, 当地科学家们发明了“沙沟 (sand ditches) 集雨法”, 即在作物 (一般为“橄榄树”) 行间隔一段距离挖一个 5 m 长、1 m 宽、80 cm 深的沟, 填入入渗能力很强的沙子和砾石直至填平或略低于四周, 这样的沙沟可有效地收集、蓄存雨水以供作物生长所需。据对比观测, 沙沟区域的水分入渗深度和土壤含水量为 100 cm 和 28%, 而传统区仅为 68 cm 和 19%; 沙沟区域土壤蓄水量占降水量的 73%, 而对照区只有 45% (Abu-Zreig M, 2000)。

Fox (2003) 在北布基纳法索 (Burkina Faso) 进行了集雨补灌与施肥相结合抗御干旱的试验。集雨设施为容积 150 m^3 的人工池塘, 集水面面积共 1.8 hm^2 , 试验作物为高粱, 设集雨补灌、施肥、集雨补灌+施肥三种处理方法, 与传统耕作方式 (不补灌、不施肥) 进行对照。在 3 年的试验中 (1998~2000 年), 降水量介于 $418\sim 667 \text{ mm/年}$ 之间, 试验结果表明, 集雨补灌处理的年均产量为 712 kg/hm^2 , 施肥处理的年均产量为 965 kg/hm^2 , 集雨补灌+施肥处理的年均产量为 1403 kg/hm^2 , 对照区 3 年平均产量仅为 455 kg/hm^2 , 集雨补灌+施肥处理产量是对照区产量的 3 倍多。这个试验说明了集雨补灌的显著抗旱作用。

Kudakwashe 等 (2004) 在津巴布韦进行了雨水收集利用研究, 对比了 4 种耕种方式下的雨水收集利用效果, 即并列脊、渗透坑、fanya juus 和传统耕种方式。通过分析雨后土壤残留水分和雨水灌溉对玉米产量的影响, 发现并列脊耕种方式的水分保持和增产效果最佳, 玉米产量从传统耕种方式下的 1.5 t/hm^2 增长到并列脊耕种方式下的 3 t/hm^2 。

Leo (2008) 认为不能将非洲面临的干旱缺水问题简单归结为气候变化的后果。事实上, 最近的很多研究表明, 非洲干旱期的长度和出现频率并没有大的变化。土地退化可能是导致干旱发生的最主要原因。干旱是否发生很大程度上取决于“绿水”的使用效率, 即雨水资源的农业利用效率。在撒哈拉以南的非洲, 农业雨水利用效率只有 15% 左右。

Jean-marc 等 (2007) 研究了农业雨水利用对作物产量的影响以及水分的生产率问题。通过构建农业生产模拟模型, 对 7 种农业生产管理措施的增产作用进行了模拟。在 7 种措施中, 使用无机肥和雨水利用相结合是唯一能够弥补当地农产品产量不足的措施。农业雨水补灌不仅能够使农业绝收的风险从平均 20% 下降到 7%, 而且能使水分生产率从 1.75 kg/m^3 上升到 2.3 kg/m^3 。

Theib 等人 (2006) 认为, 在干旱地区, 水资源而不是土地资源是农业生产最大的限制因素, 提高水资源生产率而不是单位土地面积产量是干旱地区更好的战略选择。补灌能有效的提高干旱区农业产量并提高农民的生活质量, 具有巨大的潜力。干旱地区的大部分降雨都因蒸发损失, 雨水的生产效率极为低下。研究表明, 雨水利用技术可挽回超过 50% 的降雨蒸发损失, 并且能以很低的成本实现。

农业雨水利用潜力研究。对区域可收集利用雨水资源潜力的评估与计算是发展雨水收集利用技术中最基础的理论 and 现实问题。B.P. Mbilinyi 等 (2007) 认为确定集雨潜在区域是增加半干旱地区可用水量和提高土地产量的重要一步。但是, 由于研究数据的缺乏, 在大尺度上确定集雨潜在区面临着很大的挑战。研究者利用基于 GIS 的决策支持系统, 结合 RS 技术和实地调查判别集雨潜在区。结果表明, 大多数集雨技术都有很广的适用潜在区。但是评价模型仍然需要进一步的完善, 例如增加社会经济因素来优化模型。J. Mwenge Kahinda

(2006)认为以往评价集雨潜力区的方法尽管提出了社会经济因素的重要性,但是并没有将它们作为评价的因子,这样的评价结果无法解释许多集雨工程失败的现象。他基于对自然、生态和社会经济因素的综合分析,利用 Arcgis 空间分析方法绘制了南非地区适合集雨的潜力区划图。

农业雨水利用效益研究。Balram (2006)通过 1999、2000 年的野外试验,对位于印度东部的一个水稻-芥末农作物生产区的雨水集蓄利用系统进行了水文和经济特征研究。结果表明,直接降雨和降雨径流对蓄水池流入水量的贡献率分别为 79.5%和 20.5%。在蓄水池所有流出水量中,蒸发占 10%,渗漏占 31.2%,灌溉占 58.8%。1999 年,水稻补灌用水平均 8.4cm,产量增加 44%;芥末平均补灌 4.5cm,产量增加 15.4%。蓄水池雨水集蓄利用系统的效益成本率、内部收益率和成本回收期分别为 1.17、14.8%和 16 年,证明该系统是经济可行的。

Stephen 等(2005)对肯尼亚部分农用池塘的补灌增收作用进行的研究表明,蒸发和渗漏使池塘的径流损失高达 30-50%,但雨水利用的成本效益仍然十分显著,农民可在增加收入的同时,在 4 年内偿还系统建设的所有投资。尽管如此,该系统较低的雨水储存效果和相对较高的初期投资限制了大范围的推广。

Hatibu 等(2006)对坦桑尼亚 4 种农业雨水利用系统进行了研究,即小(微)型集水区系统、中型集水区系统、中型集水区与道路集水混合系统以及中小型集水区存储系统。研究表明,收集雨水用于水稻种植的投资回报率很高,在 4 种雨水利用系统中,中型集水区与道路集水混合系统的经济性最优。

Ambast 等人(2005)以印度恒河流域为研究对象,模拟和预测了农业雨水利用措施和农业生产实践对农业产量和当地地下水的影响。在原有的管理措施下,水资源只能满足 60%耕地的水稻需水量,或是 65-80%耕地的小麦生产需水量。但是,通过改变土地利用方式(10%的可耕地休耕用于地下水回灌)和水管理方式,能够使农产品(例如小麦)的产量增加 23%,而且有助于稳定恒河流域地下水水位。

农业(农村)雨水利用管理研究。Theib 等人(2008)对叙利亚的补灌增产效果及水资源的可持续性研究表明,补灌成本与粮食价格共同决定了补灌的效益。理论上,当边际单位产品的用水成本与单位产品价格等同时,补灌作用的产出效益达到最大。基于这一理论,作者建立了叙利亚北部不同降雨条件下的小麦补灌生产函数。在一定的降雨条件下,补灌成本与产品价格的比率存在边界范围,范围以外的补灌措施将缺乏利润。农产品价格的提高和用水成本的下降有利于提高产量,但会影响用水效率。因此,如何解决农业生产利润最大化和农业可持续发展之间的矛盾是政策制定所面临的巨大挑战。Stephen 等人(2003)对撒哈拉沙漠以南非洲地区的农业雨水利用情况及其推广应用的限制因素进行了研究。由于水资源短缺,该地区的农业产量低下,粮食短缺持续存

在，但是雨水利用的潜力并没有被充分挖掘。为了科学评价地区的雨水利用潜力及其对流域水文的影响，“雨水利用对尼罗河上游地区水资源管理的影响研究”项目已经开展。目前，该项目对来自 4 个国家的 6 个雨水利用案例进行了研究。研究中发现，尽管一些雨水利用工程获得了成功，但雨水利用技术的应用率很低，导致该技术的影响力甚微。

2.6.2 国内农业集雨利用研究

我国对集雨农业的系统研究相对较晚：20 世纪 60 年代，我国科学家在黄土高原进行水土保持研究时曾涉及到鱼鳞坑和水平沟雨水集流技术；20 世纪 70 年代山西昔阳采用集雨梯田发展雨养农业；20 世纪 80 年代以来，随着干旱加剧和水资源紧缺问题的突出，我国各级政府对集雨农业工作日益重视，甘肃省率先在国内开展实施了“集雨补灌”工程，随后，陕西、宁夏、内蒙古、山西等省（区）也相继开展了类似的雨水利用工程，在我国半干旱区逐步建立了初具规模的庭院经济集雨农业模式，收集的雨水除供人畜饮用外，还结合点灌和微灌措施发展果园、蔬菜及花卉和小规模的大田作物生产（李小雁，2002）。与此同时，我国科技工作者就雨水收集利用开展了大量的科研工作，发表了许多学术论文和研究报告，其中有一些已在国外刊物上发表（Li X Y, 2002; He X B, 2003; Yuan T, 2003; Zhang Y Q, 2004）。自 1995 年在我国北京举行了第七届国际雨水集流系统会议后，从 1996 年到 2000 年，我国共召开过 3 次全国性的雨水利用学术会议。2001 年，我国颁布了关于雨水利用的国家级行业标准《雨水集蓄利用工程技术规范（SL267-2001）》。

雨水收集蓄存技术研究

（1） 就地拦蓄入渗技术：通过修筑水平梯田、隔坡梯田、反坡梯田、鱼鳞坑、丰产沟、水平沟等水保工程，改变原地形特征，拦蓄径流，采用带状间作、等高种植、沟垄种植、蓄水聚肥耕作等技术，使降雨就地入渗（马耀光等，2003）。

（2） 雨水集流技术：目前我国主要采用屋顶、庭院、硬化路面、自然荒坡、塑料大棚的棚面等进行集雨，集水面材料有：混凝土、砖瓦面、塑料棚膜、混合土夯实、黄土夯实和沥青等。吴普特等对 HEC 土壤固化剂、AAM 混凝土、沥青玻璃丝油毡、沙兰特油毡等几种新材料进行了试验，发现 HEC 土壤固化剂和沥青玻璃丝油毡的集水效果较好（吴普特，2002）。魏兴琥等人（2003）在半干旱偏旱区设置了清除土表杂草、红沙覆盖、废膜覆盖和日光温室棚面 4 种不同的集流面处理，结合日光温室秋冬茬黄瓜、番茄不同灌水量试验，通过水的转化效率探讨不同集流面的使用价值和提高水转化效益的适宜灌水量。结果表明：温室棚面的年产流率最高，达 85.4%，其次为废膜集流面的 45.4%，而清除土表杂草集流面的年产流率仅有 8.2%。从单方水集流费用看，清除土表杂草 > 红沙集流面 > 废膜集流面 > 日光温室棚面，平均集流费用为 2.18 元/m³，单座温

室棚面 (450 m^2) 集流面加上温室间隔区废膜集雨 (600 m^2), 集雨水总量可达到 197 m^3 , 能够满足温室一茬黄瓜和一茬番茄的需水量。

(3) 雨水蓄存净化技术: 雨水蓄存技术系指修筑水窖、塘坝、小水库等工程设施, 把集雨面所收集的雨水蓄存起来, 以备利用。小水库、塘坝、涝池等由于蒸发下渗等原因, 蓄水效率低, 使用较少。目前我国半干旱地区收集的雨水主要蓄存在混凝土薄壳水窖及传统的红胶泥旱井中。水窖、旱井一般分布在庭院旁或接近路面的田地中, 容积一般为 $15\sim 50\text{ m}^3$ 。雨水在流入水窖或旱井前要先经过沉沙池和过滤池的物理净化以去除部分杂质和泥沙, 进入水窖或旱井后还要经过“沅水”和化学净化使其更清洁, 常用的化学药剂有明矾、漂白粉和石灰等(吴普特, 2002)。

集雨模型研究

(1) 径流量计算模型: 近些年来, 我国科技工作者在集水区径流量计算方面做了有益的探索。梁天刚等(1998)采用地理信息系统方法, 研究了甘肃省环县地表水流方向、集流能力、子集水区的划分及水系网络空间分布等水文特征, 模拟了降雨量分别为 10、20、30、40、50 和 60 mm 时, 各自然集水盆地内可产生的径流量, 该研究为计算某地可积水量提供了一个很好的思路, 但由于栅格太粗 ($250\text{ m}\times 250\text{ m}$), 在计算微小地形径流量时显得实用性不强。白清俊等(1999)从流域坡面产流机制出发, 依据 Horton 入渗曲线, 建立了一个适用于不同流域的综合产流模型, 模型以降雨强度和土壤蓄水量为控制条件, 同时兼顾超渗产流和蓄满产流, 适用于下垫面条件较为均一的流域或单元区域在不同条件下的产流计算。徐雨清等(2000)在梁天刚等的研究基础上, 以黄土高原半干旱地区 6 个自然集水区为研究对象, 利用遥感和地理信息系统获得研究区地形、植被、流域特征等参数, 通过统计分析得出该区域多年平均年径流量与降雨量、地形、植被等因素关系模型。徐秋宁等(2002)应用 SCS 降水—径流模型对陕北、渭北多个典型小型集水区降雨径流量进行了分析计算, 结果表明 SCS 降水—径流模型考虑了径流与土壤特性和土地利用情况的关系, 可用于小流域、沟道等小型集水区可集水量的计算。这些研究结果, 对半干旱区集水农业工程的规划与决策具有一定的指导意义。

(2) 集雨农业系统优化模型: 集雨农业是一项非常复杂的系统工程, 涉及到雨水收集、雨水蓄存和雨水利用三个方面, 要想使雨水集流系统高效运行, 应运用系统工程的理论对其进行规划设计。牛文全(2004)根据水量平衡原理, 考虑雨水利用的年内分布, 计算各时段的水量盈缺状况并进行调蓄计算, 确定了人畜饮水工程和农田补灌工程中雨水集蓄设施经济容积的计算方法。张新燕等(2000)以陕西省礼泉县北部丘陵区为例, 针对大田作物(小麦、玉米)雨水集蓄灌溉利用问题, 应用动态规划等系统分析方法, 以纯收益最大为目标函数, 从技术、经济两方面对该雨水集蓄灌溉利用系统进行了分析研究, 建立了

系统优化模型。优化模型包括降水序列分析模型、集水量分析计算模型、蓄水窑窖优化设计模型、灌溉水量优化分配模型等 4 个基础物理模型和经济模型，并根据水量平衡原理，利用调蓄计算方法，在集水量和用水量一定的基础上，进行蓄水工程的优化设计，确定出蓄水设施的有效容积及其复蓄次数、单位设施容积及数量的优化组合方案。该研究为干旱半干旱地区雨水集蓄灌溉利用的规划设计提供了有益的参考。

农业集雨补灌效应研究

(1) 集雨补灌的增产效应：尹光华等(2001)对春小麦进行了集雨补灌试验，结果表明苗期少量补灌可使春小麦出苗率提高 10.3%~17.3%；在植株生长的需水关键期补灌，可使小麦叶面积增大，叶绿素含量提高 13.8%~18.7%；最终使小穗数增加 2.0%~14.7%，穗粒数增加 12.8%~34.0%，籽粒干物质积累量增加 25.3%~63.2%，导致经济产量和生物学产量提高。柴强等认为补充灌溉可加速不同作物生长后期干物质向穗部的转移。1997~1999 年，国家“九五”重点科技攻关“节水农业技术与示范”项目“人工汇集雨水利用技术研究”专题在甘肃省定西县安家沟流域进行了春小麦、玉米的雨水补灌技术示范推广，研究结果如下：1997 年，春小麦增产 40.2%，玉米增产 53.8%；1998 年，春小麦增产 60.8%，玉米增产 33.5%；1999 年，春小麦增产 49.6%，玉米增产 36.7%（吴普特，2002）。

(2) 集雨补灌的最佳时期：小麦（冬小麦、春小麦）的最佳补灌时期为拔节期（王 勇，1997；张源沛，2002）；玉米的最佳补灌时期为大喇叭口期。考虑到集雨储水的有限性，少量水分应优先保证抗旱播种保苗，其次是关键生育期的有限供给（尹光华，2000；刘一，2003）。

(3) 集雨补灌对经济作物和果树生长发育的促进作用：为证明集雨补灌对砂田西瓜是否有效，王亚军等(2003)在甘肃省皋兰县进行了集雨补灌效应研究，结果表明砂田集雨补灌栽培西瓜是雨水利用的一种经济高效的方式，补灌对西瓜的产量、含糖量和水分利用率都有影响，只有适时适量补灌，才能既提高产量和水分利用率，又不降低品质，最佳补灌量应控制在 45 mm 左右为宜。李有华等(2000)采用集流设施集蓄汛期超渗产流，对苹果树进行集雨节灌试验，结果表明：集雨节灌对苹果树叶绿素含量、根条数、新梢总长、百果重、总产量的增加均有明显的促进作用。

农业集雨经济问题研究。徐晓红(2007)对半干旱地区的 5 种集雨节灌工程建设模式进行国民经济评价显示，应用集雨节灌技术发展大田粮食作物虽然可以实现增产，但在经济上不可行的，而用于经济林果的种植则可以获得十分满意的效果；与此同时，利用塑料大棚配套道路、混凝土集流面集水，进行大棚蔬菜种植也可以获得良好的经济效益。陈耀文等(2004)对宁夏区南部山区农业集雨节灌工程的投资管理机制进行了研究。集雨节灌工程属于农村微型

水利水电项目，其所需建设资金以国家投资和地方匹配为主，农民自筹为辅，原则上各占 1/3，但对于宁夏区南部山区经济不发达的特困地区，国家投资的比例适当增加，可达到 1/2。国家投入是政策性的，起引导和鼓励的作用，主要用于购置各种节水灌溉设备、材料和设施；地方各级政府的匹配资金主要用于生产性基础设施和管理设施建设，在建设过程中积极推行以奖代补、以物代补等投资形式；农民自筹资金主要用于生产建设。对 5 种典型的集雨节灌工程的系统结构和投资主体、形式进行了分解。

2.6.3 国外城市雨水利用研究进展

雨水模型研究。目前，世界上关于模拟城市雨水径流和雨水水质的模型众多(Christopher, 2001)。美国环境保护局于 1970 年代开发了 HSPF 模型(Bicknell et al., 1993; Johanson et al., 1980 1984)，模型最初主要用于模拟农业和农村流域的水文水质过程。但该模型也同样适用于城市，被认为是当前最综合、最具适用性的水文水质模型。该模型是模拟步距为 1 小时，主要模拟陆地表面的径流过程和土壤污染物的转移过程，以及河流内水文、沉淀物和化学排放物的相互作用。美国陆军工程兵团水利工程中心于 1977 年研发的 STORM 模型能够模拟城市和非城市集水区域降水径流和污染物负荷 (Hydrologic Engineering Center, 1977)。通过每间隔一小时的监测对单个降雨过程进行模拟。对降雨径流形成的模拟表明，径流量与降雨量和降雨拦截量的差之间存在线性关系。同时认为不透水面和透水面上的径流系数是会发生变动的。DR3M-QUAL 模型 (Alley and Smith, 1982a, b) 用地表径流、渠道径流、管道径流和水库（蓄水池）代表了城市的排水系统。利用土壤湿度、蒸发量、透水和不透水面积、次级流域的长度和坡度等参数计算过剩的雨量。同时雨水的水质和雨水造成的侵蚀也可以通过模型进行模拟。Havno 等建立的 MIKE-SWMM 模型 (1995) 能够分析雨水和污水排放系统的水文水质特征，包括对污水处理厂和水质控制设施的模拟。同时能够模拟管道、水泵、拦蓄、滞留池、压力流和污水溢流等。QQS 模型 (Geiger and Dorsch, 1980) 每 5 分钟对连续或单次的降雨事件进行一次模拟，利用运动波动方程模拟管道和渠道径流、贮存路径、静水分析以及压力管道。SWMM 模型可应用于城市雨水水质和水量的管理，以及城市污水的溢流管理 (Huber et al., 1984)。该模型既可以用于连续的降雨过程又可以用于独立的降雨事件。模型可以模拟降雨-径流过程，包括雨水入渗存储、蒸发和地表径流。同时，对污染物、污水流动等通过设定不同的参数和假设条件进行模拟。Wallingford 模型 (Price and Kidd, 1978) 是由英国水利研究院在 1970 年代开发的一个综合模型，包括了降雨-径流模型、动态管道路径模型和水质模型。该模型每间隔 15 分钟对雨水和污水系统进行模拟。目前已经应用于实时操作、设计和规划模拟。

为了应对雨水管理中出现的问题，研究者建立了众多的模拟雨水水量和水质的模型。但是，这些模型也存在一些缺陷：模型模拟的时间尺度很长，为了解释城市水流和水质过程的复杂性，很多模型都需要数年甚至是数十年时间进行改进和完善；很多模型都可以模拟雨水、废水和水供给设施，但是很少能将它们综合起来考虑；几乎所有模型都能用来指导规划，但模型的实际操作性不足。一个重要的原因是，在城市环境中，降雨及其相关的过程的发生非常迅速，导致复杂的模型很难运用于实际中，而且实时数据获取的难度很大；模型的可靠性是一个值得关注的问题，由于经验参数存在不确定性，导致了模型模拟结果的不可靠性；最后，在很多模型中，降雨的空间分布特征被忽略，降雨往往被认定为在空间上是均匀分布的。

总之，国外对雨水利用的水量水质模拟模型的研究已经较为全面和成熟。这些模型不仅能够模拟降雨径流和污染物质的运动，同时能够对不同时间不同地点的集雨结果进行模拟，从而为雨水利用的研究提供了科学的方法。

雨水利用技术研究。城市雨水利用技术涉及雨水收集技术、雨水处理技术、雨水利用技术和雨水收集利用的经济性等。Edgar L. Villarreal（2005）对瑞典 Ringdansen 大型居住区的雨水收集系统进行了研究和评价。模拟了在四种雨水收集利用情景模式下，即收集雨水用于洗衣、冲厕、洗衣和冲厕、浇灌，雨水替代饮用水的节约效率；分析了水量使用标准和节水器具对水消耗量的影响；计算了合理的蓄水池规模。研究表明，Ringdansen 居住区雨水替代效率和节水效率很高：假如居住区所有屋面都用于雨水的收集，在雨水用于冲厕的情景模式下，修建 40 m^3 的蓄水池，并使用节水器具，则可以节约 60% 的冲厕用水。在雨水只用于洗衣的情景模式下，使用低耗水的节水洗衣设备，修建 40 m^3 的蓄水池可以节约 40% 的洗衣用水。而当雨水同时用于冲厕和洗衣时，能够节约总用水量的 30%。同时，在 2000 m^2 的汇水面积内修建一个 80 m^3 的蓄水池可以在夏季节约 60% 的灌溉用水。

Jeroen Mentens（2006）对德国 18 位研究者关于屋顶绿化减少降雨径流的研究方法进行对比，建立了年和季节降雨-径流关系模型。在屋顶特征和年、季降雨量给定的情况下，利用经验模型对不同类型屋面的径流进行评价。研究表明，屋顶的年降雨径流主要受绿化层深度的影响，屋顶绿化层越厚，雨水径流的控制效果越好。从绿色屋顶的雨水滞留时间来看，冬季要短于夏季。在德国布鲁塞尔的研究显示，占屋顶面积 10% 的屋顶绿化能够使区域的总雨水径流量减少 2.7%，而独栋建筑的屋顶绿化可使雨水径流量减少 54%。但是，要想获得更好的雨水径流控制效果，应当同时使用其它类型的径流控制和雨水滞蓄方法。

Thilo Herrman 将德国市场上的雨水利用系统进行了分类，包括全部利用型，雨污分流型，滞留型和利用-入渗地下型。并利用 10 年降雨序列资料对雨水利用进行了模拟，对不同汇水面积下，不同用水户和不同用水特点的集雨利

用效率、雨水流失量、水量平衡等进行了研究。结果表明,一个私人家庭使用 4-6 m³ 的蓄水池,平均优质水节约率约为 30%-60%。对实现最大雨水利用效率时的蓄水池容积的研究表明,对于一个屋顶面积为 100 m² 的四口之家,如果每人每天的冲厕用水为 25L,那么使用一个 1 m³ 的蓄水池可以达到 44% 的雨水利用率。如果冲厕用水量增加并且蓄水池的容积增加到 5 m³,雨水利用效率可以提高到 85%。而在多层建筑和高密度区域,由于人均屋顶面积小,所有的屋顶径流都有可能被利用,因此雨水利用的效率可以达到最高。

M. Zaizen 等(1999)将雨水利用设施分为两类:一类是小型的私人住宅雨水利用设施;另外一类是大型的雨水利用设施,例如大型的体育馆。上世纪 80 年代,日本的许多城市面临着严峻的供水危机,雨水利用的重要性凸显。雨水利用不仅被看成是缓解供水短缺的措施,也被看成是雨水径流的控制措施。M. Zaizen 对比分析了东京、名古屋和福冈三个圆顶体育馆的雨水利用设施,并进行了水量平衡分析和弃流控制技术的讨论。以名古屋圆顶体育馆为例,1993-1994 年体育馆利用的雨水占低质水(在日本,工业用水、再生水和雨水统称为低质水)总用水量的 65%,高于预计的 59%。名古屋圆顶体育馆汇流区域内年降雨量的 75% 被利用,略低于设计利用率 78%。在成本效益方面,雨水利用每年能够节省资金大约 120,000 美元。

Ree-Ho Kim(2007)对应用于办公建筑内的污水和雨水处理新技术(纤维过滤媒介和金属膜)的研究表明,纤维过滤媒介能提升初期降水的水质,但仍不能达到非饮用水的使用标准。利用金属膜做进一步过滤的实验结果显示,处理后水的浊度下降 50%~70%,色度下降 50%~73%,COD 下降 45%~70%。其过滤的效果要比纤维过滤媒介的效果好很多。同时,操作人员可以通过调节金属膜的孔径大小来满足不同水质的处理要求。该研究还显示,对雨水进行水质处理的成本要远低于对中水的水质处理成本。

E. Sazakli 等(2007)通过 3 年的监测,对希腊西南地区 Kefalonia 岛收集雨水的水质进行评价。结果表明,所有收集的雨水的化学参数都符合欧盟 98/93 的执行标准。在所有的雨水样本中,80.3% 的样本含有大肠菌、40.9% 的样本含有埃希氏菌、28.8% 的样本含有肠球菌,但是这些微生物菌体的含量都不高。主成份分析显示,微生物的含量主要受到汇水区清洁水平的影响,而化学含量主要受到邻近海洋和人类活动的影响。

国外城市雨水利用技术研究的内容很多,但研究的重点是集雨利用的技术经济可行性。技术可行性研究要同时关注收集雨水的水量和水质问题,目前的研究多侧重集雨效率方面,而对集雨水水质的研究并不深入。这是因为城市可收集的雨水量相对于收集区的用水量而言所占比例小。因此,收集的雨水往往不足以替代劣质水,例如冲厕、洗车和灌溉等用水。这样,人们对雨水的水质要求不高,雨水水质的研究也显得不重要。

经济可行性研究注重雨水利用工程的经济效益。雨水收集的效率、雨水的水质、雨水利用的方式以及当地水价等各方面决定了雨水利用工程的经济效益高低,从而进一步决定了雨水利用工程的可行性。绝大多数研究表明,与传统的城市集中型供排水系统相比较,分散、小型的集雨利用系统具有更大的灵活性和更高的经济性,城市雨水利用技术具有很高的经济适用性。当然,正如很多研究者指出,城市雨水利用的效益研究仍存在很多不足,尤其是对雨水利用的社会效益和环境效益仍然缺乏全面、系统的认识和研究。

雨水利用风险研究。Patricia 等(2004)认为人为雨水渗透会影响城市地下水位的变化规律。对德国北部城镇 Recklinghausen (面积 11.5 km^2) 的地下水补给以及地下水位变化的模拟结果表明。当新开发区的开发密度较大时,降雨对地下水的补给从开发前的每年 221 mm 下降为 163 mm 。但是,当新开发区的屋面雨水全部(100%)下渗补给地下水,补给量将升高到每年 245 mm ,高于开发前的地下水补给量。降雨洼地入渗的地下水补给率为 60%-77%,渠道入渗的地下水补给率稍高,达到 68%-80%。降雨对地下水的补给效率与入渗面积率有很大的关系,当入渗面积率达到 75%时,地下水的补给基本与开发前的补给程度相当,但是当入渗面积率只有 50%时,年均入渗量只有 207 mm ,小于开发前的入渗水平。同时,地下水的水位将会相应的下降 1.32 m 。对于干旱年、正常年和丰雨年的地下水变化模拟显示,干旱年开发前的年均地下水补给量仅为 109 mm ,如果开发区的不透水面积比例很高且所有屋面降雨入渗地下,地下水的年均补给量能够达到 150 mm ,但地下水补给量和地下水位均低于正常年份。而在降雨丰富年,新开发区的地下水位比正常年份最多可高出 4.72 m 。该研究认为,城市的拓展和雨水渗透技术的运用对雨水入渗地下的强度和速度产生了显著影响。在雨水补给地下水的影响因素中,重要性依次为降雨量、入渗面积率、不透水面积率和新开发区面积。

DayWater 是由欧洲各国共同发起的致力于雨洪源头综合管理,促进可持续水管理战略决策支持系统的研究项目(M.B. Hauger, C. de Roo, G.D. Geldof, 2003)。2002 年-2005 年,Daywater 项目对欧洲雨洪管理的潜在不利影响进行研究。该研究建立了风险管理原则、程序和方法,并预测了雨洪源头控制给城市水管理带来的风险。

雨水利用潜力研究。Enedir Ghisi (2005)对巴西 santa catarina 州的可利用雨水资源进行了情景模拟分析,并评价了该州 62 个城市的居住区的雨水利用节水潜力。研究表明,62 个城市优质水的节约率在 34%-92%之间,平均节约率为 69%。政府应当执行相关政策以促进雨水的利用,对节约饮用水以及水资源保护具有重要的意义。日本东京 1998 年的水资源利用平衡表明(Hiroaki Furumai, 2008),在年均 1405 mm 的降雨量中,形成地表径流 634 mm (45%),入渗地下水 359 mm (26%),蒸发 412 mm (29%)。在东京的很多城区,城市不透水面

积比例高达 80%以上。而东京的年人均水消费量高于 1100 mm，其中自来水厂供水 879 mm，地下水供水 53 mm，循环用水 199 mm 和污水再利用 5 mm。雨水利用在东京还远没有形成规模，1998 年收集利用的雨水只有人均 0.23 mm，未来雨水利用的潜力巨大。

雨水利用管理政策研究。2006 年 SWITCH（可持续水资源管理促进明日城市健康）项目完成了“城市雨洪管理研究报告”（Bryan Ellis, Mike Revitt and Lian Scholes et al, 2006）。报告对世界上雨水管理先进国家的雨水利用实践进行了分析和对比，这些国家主要包括欧洲的英国、法国、德国、荷兰等，美洲的美国和巴西，澳洲的澳大利亚和新西兰，亚洲的日本和马来西亚。研究的内容包括各国的雨洪控制技术、政策和制度的驱动力等。报告认为，美国和加拿大在雨洪管理方面处于国际领先的地位，日本、澳大利亚和新西兰等国家根据各自的气候特点、土地类型、规划和制度，引进美国、加拿大的雨洪管理和实践方法并加以调整。该报告还模拟和分析了气候变化对城市雨水管理的影响，以及环境和社会经济条件变化对雨水管理技术发展的影响。

Eleni Chouli（2007）以欧洲 Daywater 项目的研究报告为基础，阐述了欧洲 7 国（英国、法国、瑞典、丹麦、德国、荷兰和希腊）雨洪源头控制技术的进展情况，即欧洲各国的雨洪管理、技术的应用以及公共政策。雨洪控制技术分为传统的末端处理和源头控制两类。传统的末端处理技术成本昂贵，污水处理能力受到限制。随着欧洲城市规模的扩展以及人们对雨水污染的关注，再加上欧洲新的水框架的实施（2000/60/EC），人们对雨洪源头控制技术的需求变得迫切。例如，瑞典首都斯德哥尔摩过去依靠末端处理设施处理污水。现在，该城市要求在所有新建的项目中使用雨洪源头控制技术。为了促进这一技术的应用和推广，政府根据不透水面的面积，向业主收取雨水费，一旦业主采用了源头控制技术，雨水费可以减免。丹麦的公共管理模式与瑞典相似，将污水排放费分成两部分：60%用于污水的管理，40%用于雨洪的管理。新政策促使新建工程尽可能使用源头控制技术。荷兰政府对污水控制提出了越来越高的标准和要求，这迫使很多城市建设新的污水处理厂。但是，部分城市选择了将雨水和污水系统相隔离的办法，并取得了成功。因此，在荷兰新的国家政策中规定，城市 20%的面积应通过源头控制技术使雨水与污水相隔离。德国北 Rhine-Westphalia 地区要求所有新建项目必须使用雨水渗透设施，并且为雨水利用研究、规划、渗透技术的使用等提供资金支持。而在德国的 Dresden 市，水务公司依据城市不透水面的面积，向市政府和私人征收雨水费，并为私人提供源头控制技术的指导。德国的这些举措使该国的雨水利用已经相当普遍。法国 1992 的《水法》规定城市政府必须规划雨水径流区，并对径流进行有效处理。由于传统雨水处理系统的运行非常昂贵，法国雨水管理部门更加倾向小型的雨水收集利用系统。法国所有重要的雨水排放工程、人工渗透工程和面积超过 5

公顷的不透水面建设工程都必须获得政府批准才能予以实施。一些雨水管理部门已经要求土地所有者应用雨洪源头控制技术，以获得未来的土地使用权。法国新的水法将有望引入雨水费，为未来雨水管理提供资金支持。英国所有新的城市建设项目必须保证长期的雨水管理。环境保护局负责编制洪水区域图，制定污水排放标准，规定雨水的排放必须得到其批准。

在雨水利用和管理的发展道路上，欧洲各国经历了一个共同的过程：1 雨水问题的诊断；2 末端污水处理设施建设，应对当前的洪水和污染问题；3 规划未来的应对措施；4 开展公共的雨水收集利用试验工程；5 在城市新开发区使用雨洪源头控制技术；6 在城市建成区使用雨洪源头控制技术。这些共同的经历表明，末端治理技术的使用代价过于昂贵，而将雨洪源头控制技术集成应用于城市规划建设当中是当前和未来的最优选择。

表 2-2 欧洲 7 国城市雨水管理资金来源

国家	公共财政	地方税	污水费（水量）	污水费（房价）	污水费（不透水面积）
瑞典	是		是		是
丹麦	是		是		
荷兰	是	是			
德国	是		是		是
英国				是	
法国	是				
希腊	是				

表 2-3 欧洲 6 国推广雨洪源头控制技术的公共措施

国家	示范项目	立法	污水排放控制	污水排放费	雨洪费	减税政策	补贴政策	宣传
瑞典	是	是	是		是	是		是
丹麦	是	是	是		是	是		是
荷兰	是	是	是	是	是		是	是
德国	是	是	是	是	是	是	是	是
英国	是	是	是	是	是	是		是
法国	是	是	是	是			是	是

（Eleni Chouli, 2007）

2.6.4 国内城市雨水利用研究

集雨利用技术研究。丁跃元等（2003）对城市可渗透路面砖进行了研究。在保证可渗透路面砖的强度大于 30 Mpa，渗水能力 1 m/s 以上的条件下，以达西定律为依据对路面砖的渗水能力进行了试验。研究了水泥品质、集灰比（碎石、砂与水泥的比例）、水灰比（水与水泥的比例）、增强剂以及成型工艺（静压、振动和振动加压）对路面砖强度和渗透能力的影响，初步确定了可渗透路

面砖的最优配方和生产工艺。杨明庆等（2005）从理论上探讨了城市雨水利用的关键问题，从分析雨水供需平衡入手，建立了可收集雨水量计算模型，依据用水定额和相应的面积计算了用水需求量，确定了中水补充水源和渗透回灌地下水 2 种形式的雨水利用方案。并以郑州某高效雨水收集为例，计算了贮水池容积，提出了水质保护措施。李俊奇（2007）认为，在城市雨水利用中，雨水调蓄容积的计算依其目的、方式、有无渗透、溢流做法等条件的差异而不尽相同。并对雨水调蓄的不同方式及其调蓄容积计算原理进行了评述，总结了蓄水池容积的实用算法，包括降雨量估算法、降雨强度曲线计算法、统计降雨频率累计法。对有削减洪峰要求的调蓄储存池建议核算其削峰容积。孙雨虹（2007）研究了北京市立交桥的各种类型和不同排水方式，分析了立交桥积水的主要原因。提出了立交桥雨水利用的三种模式，即桥区建设下沉式绿地、建设地下蓄水池、新建立交桥采用调蓄排水。李梅等（2007）概括了目前城市雨水收集的三种技术：屋顶雨水收集、城市路面雨水利用和城市绿地、花坛和园林雨水集蓄。提出了三种雨水收集技术的收集流程及其采取的工程模式。对回用雨水的水质要求和标准进行了分析，总结了城市屋面集雨、雨水绿地渗透、雨水综合处理和雨水深度处理的雨水处理技术。朱宜平等（2007）对上海市浦东新区某快速干道的雨水收集处理系统进行了研究。首先分析了该地区 1989-2004 年的降雨特征，参考了国外的工艺流程设计，即雨水分流井、初期雨水弃流池、雨水沉淀池、人工湿地、清水池和雨水利用。研究结果表明，初期雨水弃流池为 57.6 m^3 时，既可以保证有足够的可用水量，又能够大大简化后续的处理工艺；沉淀池的表面积为 210 m^2 ，有效水深为 2.5 m ，也即是总体积 525 m^3 时，能够满足雨水沉淀的要求；人工湿地的体积为 371 m^3 ，即长 23 m ，宽 15 m ，湿地有效水深为 1.1 m 时，能保证雨水水质符合使用标准；清水池的实际有效容积为 800 m^3 时，全年用水满足率可达 91%。胡先琼等（2008）对深圳机场雨洪利用工程的可行性进行了研究。深圳机场的近期远期最大日用水量分别为 $9,690 \text{ m}^3$ 和 2 万 m^3 ，而雨水调蓄池的建设规模在近期和远期均能达到雨水利用保证率 100%。聂发辉（2008）在分析上海地区近 20 年降雨资料的基础上，运用概率统计的方法获得当地的降雨特性参数以及相关降雨特性概率分布函数，在此基础上计算了降雨径流超出下凹容积发生溢流的概率，最终从概率平均的意义上估算一定下凹深度绿地的年雨水蓄渗效率。研究表明，在绿地下凹 50 mm 的情况下（绿地率等于 20%），绿地的长期运行效率 $> 72.9\%$ ，蓄渗效果非常明显。继续增加绿地的下凹深度可以提高截留效率，但对人口密度很高、绿地景观要求也高的上海市区是不适宜的。可行的办法是通过增加绿地面积比例来提高径流的截留效率。

降雨径流特征研究。张思聪等（2003）提出利用绿地滞留雨水的合理模式。研究表明，北京市城区和城近郊区地下水埋深多在 10 m 以下，有滞蓄消纳降雨

入渗的巨大空间。北京平原区的土壤多为粉砂壤土，土层深厚。表土 1~2m 内粉砂壤土的稳定入渗率为 0.1~0.3 mm/min，入渗能力达到 140-430 mm/d，其入渗容量相当大。北京市对小区开发建设有明确的规定，绿地面积不得少于 30%，而建筑物、道路等不透水铺装面一般占 40-50%。不透水面的降雨径流系数可达 0.85 以上，是形成小区暴雨径流的主要产流区。市政部门对城市排水设计的指导思想是降雨径流尽快排入排水管网。一般在小区立面设计中，绿地高于路面，屋顶、路面和小区内径流通过路边竖井排入排水管网。这样，随着城市建设区的扩大，必然使排水流量增加并形成对城市防洪的巨大压力。而利用绿地滞蓄雨水，减少暴雨径流峰值，增加地下水的补给，是开发利用雨水资源的有效途径。对径流系数变化的研究表明，在日降雨量为 144 mm，汇水面积和绿地面积相同的情况下，绿地与路面平齐的径流系数为 0.54，绿地比路面低 5 cm 时的径流系数为 0.2，绿地比路面低 10 cm 时没有径流产生。在日降雨量为 200 mm，汇水面积和绿地面积相同的情况下，绿地与路面平齐的径流系数为 0.56，绿地比路面低 5cm 时的径流系数为 0.34，绿地比路面低 10 cm 时的径流系数为 0.18。在日降雨量为 260 mm，汇水面积和绿地面积相同的情况下，绿地与路面平齐的径流系数为 0.6，绿地比路面低 5 cm 时的径流系数为 0.55，绿地比路面低 10 cm 时的径流系数为 0.27。对北京不透水路面雨水径流的水质研究表明，降雨产流中，雨水污染物含量超过地表水环境质量标准的主要有 3 类污染物，分别是 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 和重金属。在降雨产流的过程中，污染物浓度总的变化趋势是降雨初期污染物的浓度高而后期则变小。地面径流的污染物主要是有机污染明显偏高，属于 V 类地表水标准，通过绿地渗滤会得到降解，但是对地下水的污染问题，尚有待深入研究。王义成等人（2007）对城市降雨径流模型-修正 RRL 法进行了改进，并证明了改进后的修正 RRL 法的有效性。修正 RRL 法是在 20 世纪 60 年代英国开发的 RRL 法的基础上，经日本土木研究所改进后的城市降雨径流模型，在日本被广泛应用于下水道和雨水管网的规划、设计、管理以及径流污染控制。但修正 RRL 法忽略了地面汇流过程，采用的管网汇流计算方程也不能处理有压管流问题。研究者使用修正 RRL 法和改进后的修正 RRL 法，分别对某生活小区的径流量和洪峰流量进行了模拟，结果表明，改进后的模型模拟精度更高。魏飒等人（2009）对河北省石家庄市省水利科学研究院内的屋面雨水、院区雨水（蓄雨池雨水）、市区道路雨水的水质进行了监测。结果显示，天然雨水、屋面雨水、院区雨水和市区道路雨水的水质由优到劣。其中院区雨水的水质基本符合生活杂用水的指标要求。王彦红等人（2006）对宝鸡市区路面雨水径流的水质进行了测定和分析。雨水采样时间覆盖每次降雨的整个过程，根据降雨强度和降雨历时，采样时间间隔为 5~10 min。水质测定结果表明，在降雨形成径流过程中，污染物浓度很快就达到峰值，随着降雨历时延长，浓度逐渐降低，最后趋于平缓。降雨量越大，对污染物的稀释能力越强，

浓度降低越快；降雨历时不仅决定了污染物被冲刷的时间，而且也决定了降雨期间的污染物向地表及水体的输送时间；降雨强度则决定了淋洗地表污染物的能量大小，强度越大，冲刷越彻底，雨水径流中的浓度也将越高。车伍等人（车伍，张炜，李俊奇等，2007）通过理论分析和实际监测对雨水径流的初期冲刷规律进行了讨论。一般的冲刷规律表现为，在降雨形成径流的初期污染物浓度最高，随着降雨时间的持续，雨水径流污染物浓度逐渐降低，最终维持在一个较低的浓度范围。对北京城区的天然雨水、屋面、路面的降雨径流主要污染物（SS、COD、TN、TP 等）浓度随降雨历时变化的大量监测数据进行统计分析表明，径流污染物浓度随降雨历时的变化较好地符合了一般的冲刷规律。但是该结果只适用于小而平整的汇水面（例如屋面和道路），对于大而复杂的汇水面及管道系统雨水径流输送过程中污染物的浓度变化却不一定适用。为研究大汇水面及管道系统中的径流冲刷规律，研究者建立了理论假设模型。该模型反映的规律是：污染物浓度变化与源头污染物冲刷规律基本一致，但随着雨水口数目的增多（汇水面积的增大）污染物浓度的下降趋势渐缓。但是，受很多因素的影响，模型表征的规律与实际监测结果之间却存在偏差。究其原因，降雨是一个非常随机的过程，实际条件与模型的假定条件间可能相差很大。例如降雨强度的突变、雨水口的数量与分布、汇水面及管道内的污染物分布与沉积状况等。丛翔宇等人（2006）运用 SWMM 暴雨洪水管理模型，对北京某典型城市小区的暴雨径流进行了模拟。经模型计算可得出地下管网与道路坡面水流情况，以及各个积水点的积水深、积水范围、积水历时等。此外，研究者的情景模拟分析表明，将凸式绿地改为平式和下凹式可以有效地增加入渗，减少径流和洪峰流量。模型计算结果显示，10 年一遇的暴雨洪水，平式和凹式绿地比凸式绿地的入渗量分别增加 10%和 36%，径流量减少了 30%和 53%，洪峰流量降低了 10%和 35%。车伍等人（车伍，唐宁远，张炜等，2007）分析了我国南北方各 10 个典型城市的降雨特点，在此基础上，讨论了与城市降雨特点相适应的雨水利用方式和管理方法。其中两个研究结果与城市雨水利用实践密切相关。一是我国南、北方城市降雨都具有明显的季节性，估算各城市（尤其北方城市）可利用雨水资源量时应乘以季节折减系数，北方城市的季节折减系数为 0.81~0.98，南方城市的季节折减系数为 0.91~1。二是研究者通过降雨不均匀系数（即降雨的时间分布特征）定量描述南、北方城市降雨的不均匀性，北方城市的降雨不均匀系数是南方城市的 2 倍多。潘国庆等人（潘国庆，车伍，李海燕等，2009）对管道径流污染物（汇水面和管道沉积物 2 个来源）的流失规律进行了理论探讨和试验分析。结果表明，汇水面源头污染物流失较符合源头冲刷的指数衰减模型，管道内沉积物流失可用流量曲线模型计算；管道内沉积物占管道径流污染物的比例越大，管道径流的初期冲刷现象越不明显。为了提高径流污染控制设施的效率，宜在源头进行分散控制，并加强雨水管网系统清洁

维护,避免污染物的积累。潘国庆,车伍等人(潘国庆,车伍,李俊奇等,2008)介绍了国外径流污染控制量及控制参数的确定方法。对中国 31 个城市近 30 年的降雨资料(降雨量日值)进行了统计分析,得出了径流污染控制量(WQV)的设计降雨量,为中国各城市实施径流污染控制提供了量化参数。同时指出,WQV 的设计降雨量也可以作为设计雨水收集利用设施经济规模的一个很好的参考值。

雨水利用经济性研究。李俊奇(2001)结合北京城区某新建小区设计了直接排放,渗透管渗透加排放,高花坛加低绿地加浅沟和渗透渠渗透,中水利用加浅沟渗透 4 种雨水处置与利用方案,并对各方案进行了技术经济分析和比较。研究表明,方案三与方案一的差额投资经济内部收益率为 19.2%,高于目前我国社会折现率 12%,故方案三优于方案一。方案二与方案一的差额投资经济内部收益率为 15.5%,优于方案一。方案四与方案一的差额投资经济内部收益率小于 12%,方案一优于方案四。在计算中,对各方案的防洪减灾、节省水资源、防止地面沉降减少的灾害,改善城市环境以后带来的其它环境效益和社会效益等未作定量分析。如果考虑这些效益,则方案三、方案二的收益率更大,方案四的可行性则需根据具体情况进行分析。李俊奇等(2005)通过分析雨水贮存池容积、多年平均日降雨量、满蓄次数等关系,依据贮存池的工作过程和费用效益分析原理提出了雨水贮存池经济规模优化求解方法,进而对优化设计中常见的关键问题进行了讨论,如贮存池满蓄次数、可收集水量、投资与成本、综合效益、资金时间价值等。并对北京市某中学集雨工程实例进行了应用分析。计算了在贮存池设计降雨量为 1、5、10、15、25、30、40 mm 等情景下,贮存池的容积、年均满蓄次数、收集雨水量和投资等。并计算了不同设计降雨量情况下工程的动态效益费用比和静态费用效益比,并根据成本效益分析,确定了不同设计降雨量下的最优贮存池的容积大小。张书函等(2007)通过 5 种类型总面积 60hm² 的 6 个雨水利用示范区的建设,和近 5 年的试验观测,研究总结了城市雨水利用的基本形式,即入渗地下、收集回用和调控排放,并探讨了实施城市雨水利用的经济效益、环境和社会效益分析方法。分析结果表明,示范工程每年综合利用雨水 10 万 m³,每 m³ 雨水收益平均为 11.53 元,而平均成本为 1.89 元,收益成本比约为 6.0。雨水利用的社会性效益远大于小区建设者或业主的直接经济效益,政府可通过政策刺激和鼓励小区建设者或业主投资建设雨水利用工程。胡晓亮等(2007)比较了北京、南京和桂林三个小区的雨水利用经济可行性。研究表明,虽然由于各地具体条件和雨水利用方案不同,雨水转化成本有较大的差异,但雨水利用成本水价在 0.5~2.0 元/m³ 之间,雨水利用在经济上是非常合理的。

雨水利用管理政策研究。赵世明等(2007)对《建筑与小区雨水利用工程技术规范》进行了剖析,认为城市雨水利用工程担负着节水和防止雨水流失的

双重功能。防止雨水流失就是把地面硬化造成的径流增量进行拦截并利用，这就构成了雨水利用工程建设规模的基本标准。如果工程建设规模小于基本标准，地面硬化产生的径流增量会有流失，雨水得不到合理利用。如果高于该标准，则会造成投资浪费。也就是说，建筑区雨水利用工程建设的规模，应保证因地面硬化造成的雨水径流增量全部被拦蓄和利用，或者应保证向小区外排放的雨水径流量不大于地面硬化之前的水平。在此基础上总结了雨水利用规模的 4 个基本公式：雨水径流增量公式、雨水利用平衡公式、雨水入渗公式和雨水回用公式。并提出了针对雨水利用规模的建议：建筑区雨水利用工程的规模应设置建设依据标准；雨水利用量应按重现期为 1~2 年设计；收集回用系统供水管网的规模应满足 3 天用水量不小于集水面 24 h 的雨水径流量，雨水蓄水池容积不小于集水面 24 h 的雨水径流量；雨水入渗设施的渗透面积应满足日渗透量不小于汇水面上的日雨水径流量，储存设施的有效容积不宜小于渗透面的日产流水量。张书函等（2004）对国内与雨水排放相关的法律法规和规范规程进行了总结。从雨水排放系统的设计排放期、排水体制的规定、排水量的计算、雨水管渠的水力计算等方面对雨水排放的法律、法规和规范的适用范围、特点和不足等做了对比。我国现行的法律法规和排水设计规程规范主要针对雨水排放做了详细的规定，但有一些问题需要深入研究。特别是对于雨水的排放，只强调了排，没有专门规定滞蓄、储存、处理和回收利用。为解决城市防洪压力，缓解或者避免水资源危机，必须加强雨水的管理，制定专门的法规和规范。

20 世纪末以来，城市雨水利用逐渐在国内成为研究的热点。许多大中城市相继展开研究和试验。目前，除少数城市以外，大多数城市的雨水利用实践停留在示范阶段，城市雨水利用的推广还面临着一系列的技术、经济、管理和政策等问题，有待进一步的研究和实践加以解决。目前，国内的研究大多集中在单项技术、指标和方法上，例如降雨径流关系研究、集雨模式研究、集雨技术及应用研究、集雨设施规模研究、雨水水质研究、集雨技术的经济效益、社会环境效益研究等。丰富的研究成果为城市雨水利用后续研究和推广提供了理论、技术基础和重要的参数。但是，国内城市雨水利用的研究还无法满足实际应用、推广的需求，还不足以支撑城市雨水利用规模化、市场化的发展。中国城市雨水利用实践和研究主要存在 8 方面的问题（车武，2002）：（1）城市雨水利用与城市雨水管理（污染防治、防涝和排放等）的关系与对策；（2）城市雨水利用与城市供水（地表水与地下水）的关系及统一管理；（3）城市雨水利用与城市环境和生态建设的关系；（4）城市雨水利用与建筑、城市规划的关系及其对策；（5）缺少相关法规与政策的支持；（6）缺乏技术规范与标准；（7）不同地区自然条件下的城市雨水利用战略与技术路线；（8）观念的转变。

2.7 本章小结

本章从辨析水资源、雨水资源和雨水利用基本概念入手，通过系统分析城市化过程对城市水文水循环所造成的影响，论证了雨水利用在城市水资源可持续利用中的重要作用。在详细阐述了国内外水资源研究进展的基础上，重点介绍了雨水利用的研究现状，包括国内外城市雨水利用与农业雨水利用的技术、经济、环境、政策和管理等各个方面的内容。通过文献综述，辨别当前水资源和雨水利用相关研究中取得的重要进展和存在的不足，为论文后续深入的研究奠定了基础。

第三章 雨水集蓄利用技术体系

就全世界范围来看，雨水利用的技术类型十分丰富，这是由世界各地不同的风土人情所决定的。本论文并不准备对所有雨水利用类型展开详细的讨论和研究，而仅限于研究北京地区主要的雨水集蓄利用技术系统。这一方面是受限于本人的能力，另一方面也是出于深入探讨雨水利用关键问题的需要。基于此，本章首先对雨水利用技术体系进行简要的概述，进而重点介绍北京市雨水集蓄利用技术，明确本论文的研究对象。

雨水利用系统主要由雨水收集、存储和利用三部分组成。收集的雨水可用于饮用水或非饮用水目的。20 世纪后半叶，雨水利用系统广泛应用于缺少地表水和地下水资源的边远地区和干旱地区。雨水利用系统的运行流程见图 3-1

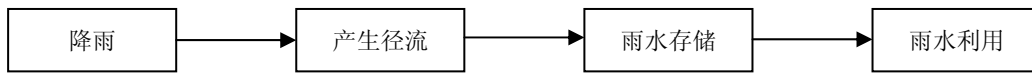


图3-1 雨水集蓄利用流程图

所有的雨水利用系统都必然包括一些共同的组成部分，包括：

1. 产生径流的集流面，例如屋面或者道路等；
2. 雨水存储空间，例如人造的池塘、水窖甚或自然形成的地下空间等；
3. 将雨水从集流面导向存储空间的输水通道；
4. 雨水回用装置。

收集雨水的主要用途包括：

1. 主要的饮用水水源；
2. 饮用水替代水源；
3. 非饮用水替代水源；
4. 农业用水补灌水源。

就目前而言，在发展中国家，雨水主要收集利用于饮用水和农业用水方面；而在发达国家，收集的雨水可能用于上述各种目的。其中，雨水作为饮用水主要分布在农村和边远地区，而将雨水作为非饮用水更多发生在城市。

3.1 雨水利用的技术类型

（一）按下垫面性质不同划分

根据雨水利用技术应用区域下垫面的性质不同，雨水利用系统首先可分为城市和农业（农村）两大类。国土资源部《全国土地分类》标准将城市土地利用类型分为农用地、建设用地和未利用地三个一级类。国内城市土地利用的特点是：城市化地区或城市建成区以建设用地为主，而农村地区则以农用地为主，仅包含少量的建设用地。这样，城市与农村地区的下垫面性质就出现了明显的

差异。在城市，大量住宅、交通及商业等设施的建设导致城市不透水面面积在建设用地上占有比例很高。而在农村地区，广大的农用地一般都具有良好的透水性（设施农业除外）。另外，中国城市和农村的供排水体系存在很大的差别，城市和农业对用水的要求也完全不同，因此，两种雨水利用系统也必然存在着很大的差别。

从北京市 2005 年的土地利用现状来看（表 3-1），农用地和建设用地分别占全市土地面积的 67.40% 和 19.60%。与 1991 年土地利用状况相比较，农用地面积未发生大的变化（占当年全市土地的 67.7%），但建设用地面积明显增长，尤其是居民点及工矿用地从 1991 年的 11.85% 增加到 2005 年的 16.3%。因此，雨水集蓄利用的研究和实践应当同时兼顾城市和农村地区。

表 3-1 北京市 2005 年土地利用现状表

地类		面积 (km ²)	占一级地类的	占全市土地的比例
一级	二级	16411	比例	100.00%
农用地	小计	11055	100.00%	67.40%
	耕地	2334	21.10%	14.20%
	园地	1242	11.20%	7.60%
	林地	6910	62.50%	42.10%
	牧草地	20	0.20%	0.10%
	其他农用地	548	5.00%	3.30%
	小计	3230	100.00%	19.60%
建设用地	居民点及工矿用地	2679	82.90%	16.30%
	交通运输用地	289	8.90%	1.80%
	水利设施用地	262	8.10%	1.60%
	小计	2125	100.00%	13.00%
未利用地	未利用土地	1792	84.30%	10.90%
	其他土地	333	15.70%	2.00%

资料来源：北京市国土资源局

（二）按雨水利用的时空划分

雨水利用按利用时间不同可划分为即时利用、延时利用和综合利用。即时利用就是将雨水资源通过人为措施立即转化为其他形式的水资源，主要应用于农业生产方面；延时利用是通过一定技术措施使雨水资源继续以雨水的形式存在，供以后转化为其他形式的水资源再加以利用，例如改变径流过程、减少入渗和存储雨水等；综合利用是指在雨水资源形成和降落阶段采取措施并加以利用。同样，雨水利用也可以根据利用空间不同分为就地利用、异地利用和综合利用。

（三）按雨水利用的用途划分

按照雨水利用用途，可以将雨水利用分为雨水农业利用、生活利用、工商

业利用和生态利用等。农业利用主要是指利用雨水资源补充灌溉农田,实现粮食的稳产和增产;生活利用主要是指将雨水资源用于家庭生活用水中。一般而言,在淡水缺少地区,雨水资源经过处理后可作为饮用水,而在城市中,雨水资源一般作为非饮用水使用,以替代优质的自来水;工商业利用主要是指将雨水资源应用于工业的冷却水、商业的辅助性用水等,替代和节约优质水;生态利用是指收集利用雨水资源以改善当地的生态环境,包括增加林草面积、改善城市水环境和回灌补充地下水等。

(四) 按雨水存储的方式划分

按照雨水存储的方式不同,雨水利用可以分为雨水集蓄利用和雨水渗透利用。雨水集蓄利用指将雨水收集存储于蓄水容器中,再将雨水加以利用的过程。雨水集蓄利用一般至少包括雨水收集、处理、存储和利用四个环节。雨水的存储是各环节中的关键一环,存储设施的选择和使用直接关系到整个系统的雨水收集量和收集效率;雨水渗透利用是指将收集的雨水通过自然或者人工的方式渗透进入地下水,以维持当地地下水资源的相对稳定,这一技术尤其适用于以地下水为主要水源的地区。

综合以上,雨水利用系统和技术体系十分丰富。为了深入研究雨水利用技术在应用过程中所面临的关键问题,必须对研究对象进行一定的取舍。本文选择研究对象的出发点为:

1. 雨水利用技术应用范围较广,能产生较大的宣传和示范效应;
2. 雨水利用技术安装和操作简便;
3. 雨水利用系统具有可预期的成本收益率,能在一定程度上保证系统使用的经济性;
4. 雨水利用技术的推广应用能在一定程度上缓解当地的水资源问题,例如水资源短缺、洪水和水环境恶化等。
5. 雨水利用技术应符合当地的社会、经济、文化和自然条件。

北京城市的快速发展、广阔的农用地以及极其缺水的现状都要求应在城市和农村全面推广雨水利用技术。在世界范围内,城市屋面雨水集蓄利用系统得到非常广泛的应用,其中不乏许多成功的案例,其经济、社会和环境价值得到了广泛认可。许多研究者对城市屋面雨水集蓄利用技术和系统进行了深入的探讨和研究。北京自 2000 年以来也开展了一系列关于屋面雨水集蓄利用的研究和示范项目。因此,对城市屋面雨水集蓄利用系统进行研究,既具有较成熟的研究经验和方法,也具有现实的条件和需求。

另一方面,无论是国内还是国外,农业雨水集蓄利用都具有非常悠久的历史。最初多应用于干旱区、偏远地区 and 海岛地区。北京在历史上是一个水资源较为丰富的城市,但随着北京的快速发展,城市用水快速增加并大量挤占了农业用水水源,北京农业的发展正面临着缺水的严重威胁。在此现状下,北京设

施农业的快速发展却给农业雨水集蓄利用提供了现实的可能性。设施农业的外表面一般具有十分良好的不透水性，是非常理想的雨水收集面，收集的雨水可以补灌设施农业用水，可提高缺水情况下的农业用水保证率。正基于此，北京市农业局、水务局等相关政府部门提供强大的财政和技术支持，自 2005 年以来在北京郊区农村推广示范设施农业雨水利用技术。因此，将设施农业雨水利用作为本文的研究对象之一，具有坚实的现实基础，也是为推动农业雨水利用事业发展而急需开展的工作。

总之，本论文以城市屋面雨水集蓄利用系统和设施农业雨水集蓄利用系统作为雨水利用研究的主要对象。本章后续内容将分别阐述两种系统的技术体系和构成要素，其余章节将论证和辨析两种系统的优化理论及方法，探讨雨水集蓄利用系统的空间化方法，并将这些理论和方法实际应用于北京地区。

3.2 城市屋面雨水集蓄利用系统

目前，国内外普遍采用的屋面集雨利用方式，按泵送方式不同可分为间接泵送、直接泵送和重力流集雨利用 3 种系统。

(1) 间接泵送系统（图 3-2）抽取蓄水池中的雨水进入室内水箱，水箱中的水在重力作用下自流供给用水装置。在蓄水池缺水时，水箱来水由自来水补充。该系统的优点是：水泵出现故障时，可使用自来水确保正常供水；水泵的利用率高（不用考虑水泵功率与用水装置是否配套），节约能源和供水成本。其缺点一是供水水压一般较低，可能导致部分用水装置无法正常使用，需添加额外的加压设备；二是需要较大的室内空间放置水箱，普通建筑物往往缺乏这样的空间。

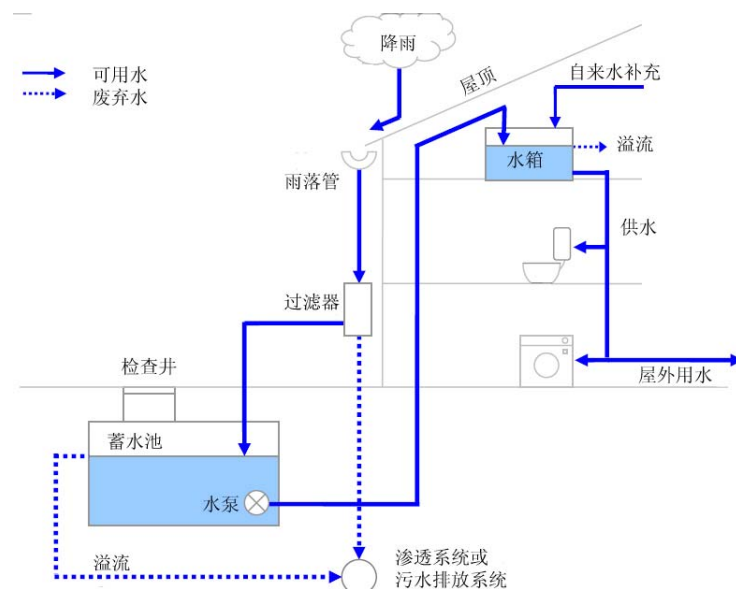


图3-2 间接泵送屋面集雨利用系统

(2) 直接泵送系统（图 3-3，a）将收集的雨水处理后存放于地下蓄水池

中，并使用水泵抽水直接供给家庭生活使用。当蓄水池内水量不足时，用自来水进行补充。其优点是：用水泵直接供水的水压可满足任何用水装置的要求；不需要安装室内水箱，因此对室内空间大小没有要求。该系统的不足之处是，在水泵损坏的情况下可能会导致无水可用。

(3) 重力流系统（图 3-4, b）与前两者的最大不同之处是收集的雨水直接存储于室内蓄水池，而不是室外地下蓄水池。供水方式与间接集雨利用系统相似，通过重力自流供水。同时，室内蓄水池在缺水情况下也是由自来水进行补充。该系统最明显的优势是不需要使用水泵抽水，因此不仅可以节约成本和能源，而且不会有水泵损坏时的供水中断问题。当然，该系统也存在着不足，主要表现为：供水水压不足，影响水的正常使用，需要安装增压装置；为了不影响雨水收集效率，室内蓄水池容量一般较水箱大，需要预留出足够大的室内空间；室内的温度变化比地下大，加大了对蓄水池的承压能力、防渗能力和水质保持能力的要求；另外，由于雨落管和过滤器都必须安装在蓄水池之上，因此对房屋的楼层高度有严格的要求。

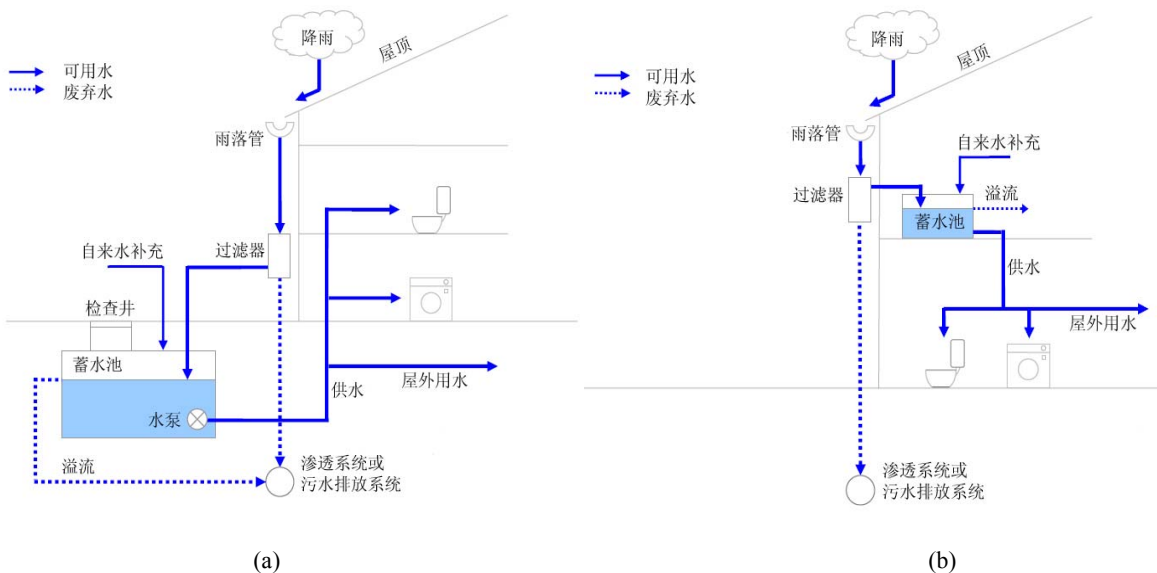


图3-3 直接泵送和重力流屋面集雨利用系统

国内外的屋面雨水集蓄利用的实践表明，由于家庭住宅缺乏足够的室内空间，直接泵送集雨利用系统比较适合家庭住宅。而间接泵送和重力流集雨利用系统则更多被应用于商业建筑。一方面，商业建筑内的供水时间比较集中，直接泵送系统可能无法满足短时内的大量供水需求；另一方面，室内水箱能确保在水泵出现故障时，雨水利用系统仍然能够持续供水。

典型屋面雨水集蓄利用系统全部或部分包括以下组成部件：

- 集流面（屋面）
- 水槽、雨落管等排水设施
- 初期弃流装置
- 过滤装置

- 存储设施
- 溢流处理设施
- 水泵
- 电源开关
- 室内水箱（间接和重力流系统所需）
- 连接自来水系统的设施
- 雨水回用管道

典型屋面集雨利用系统的主要组成部件及其完整结构见图 3-4。该图以雨水集蓄间接利用系统为例，其中大部分部件都适用于其它类型的屋面集雨利用系统。

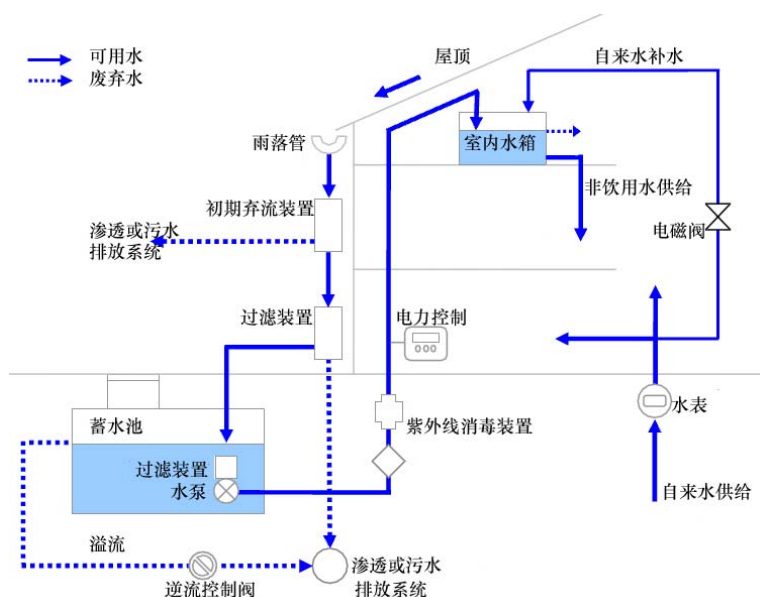


图3-4 典型屋面雨水集蓄利用系统完整结构图

屋面。作为雨水集蓄利用系统的集雨面，屋面的类型和建造坡度等对雨水径流效率的影响最大。如果将雨水收集利用系统作为建筑物规划的内容之一，就应当尽量选择径流系数较大的材料用于屋面建造。当然，为了快速排除屋面雨水，现代建筑物的屋面一般都具有相当高的径流效率。另外，屋面的清洁程度对雨水的水质影响很大，清洁的屋面不仅可以使雨水保持较好的水质，还可以减少后期的雨水处理成本。因此，定期对屋面进行清洁是一项很重要的工作。

初期弃流装置。在干季，建筑物屋顶会积累很多物质，从而影响收集雨水的水质，例如大气中的颗粒物、鸟粪、枯枝落叶及其它残留物等。当降雨发生时，屋顶物质被雨水冲刷后形成径流。对于一个特定的屋面而言，降雨的强度大、干旱期持续时间长，则雨水径流的水质相对较差。

研究表明，降雨初期雨水受污染的程度要远高于降雨后期，随着降雨持续时间增加，雨水径流的水质不断提高。因此，将降雨初期的雨水分流，避免其进入雨水储蓄池，可大大提高收集雨水的水质，这样可以减少后期雨水处理成

本，甚至可以避免后期处理措施。

过滤装置。过滤装置用于移除雨水中含有的树叶、泥沙、苔藓等各类杂质。过滤装置首先应当易于清理而且不易堵塞。过滤装置的类型很多，必须根据水流速度、雨水酸碱度和雨水中所含杂质的种类进行合理的选择。

存储设施。降雨的随机性和用水需求之间必然存在矛盾，雨水存储设施可暂时滞留雨水以满足日后的用水需求。蓄水池的容积可由供用水的平衡关系来确定。各种常用的雨水存储装置包括地下蓄水池、地面蓄水池、池塘或地下蓄水层等。

将蓄水池置于地下有很多优点。首先，地下蓄水池能避免日光直接照射从而防止藻类的繁殖；其次，地下蓄水池可避免在极端气候条件下遭到损坏；最后，较稳定的地下温度能有效的抑制池内细菌和藻类等的滋生。

蓄水池的种类很多，形状、材料和容积大小等可各不相同。目前用于建造蓄水池的主要材料包括钢筋混凝土、砖块、钢材和各种塑料。

一般而言，在确定了蓄水池的材料和尺寸后，蓄水池容积大小将决定其购买和安装费用。因此，选择合适的容积非常关键。确定蓄水池容积的最优规模是本文需要深入探讨的研究内容之一。相关研究表明，要使雨水集蓄利用系统的使用效果达到较优的水平，蓄水池在一年当中应至少满蓄两次。

溢流处理设施。溢流装置可防止蓄水池蓄水能力不足时出现局部洪灾，同时能借助水池内水的自然流动去除漂浮的杂质。溢流的雨水可排入渗透系统、污水系统或者其它雨水排放系统。溢流处理系统中必须安装逆流防止阀，以防止污水回灌进入蓄水池。

水泵。对于直接和间接泵送系统，水泵都是必要的组成部分，而重力流系统可以不用水泵而直接使用雨水。但是，在有些情况下，重力流系统的水压不足会导致用水设备无法正常运转，因此，往往需要安装增压水泵。

水泵的使用年限较短，一般仅有 10-15 年。为了确保水泵和雨水利用系统的正常使用，水泵定期检修是必不可少的。

电路控制。许多雨水集蓄利用系统都配有电路控制装置。当然，电路控制装置并不一定是必须的，例如水泵的控制可以通过简易的机械浮阀来完成。但是，由浮动开关、压力感应器和电力驱动阀组成的精密控制系统能确保系统常年稳定运行。当然，电路控制装置的使用会增加系统的总成本和运行费用，用户可根据自身的经济情况进行取舍。

室内水箱。室内水箱主要用于间接泵送系统。水箱一般置于建筑物内接近屋顶处，其出水口应至少高于用水装备入水口 1m 以上。水箱内需设置连接浮动阀的高位和低位控制开关来控制水泵。这样，当水箱内水量不足时，低位开关将开启水泵，抽取蓄水池内的雨水或者启用自来水补充水源。

自来水补充系统。降雨的随机性和时间不确定性决定了雨水利用系统无法

保持持续供水。因此，安装自来水补充系统能确保在干旱少雨季节雨水集蓄利用系统的持续供水。自来水即可以直接补充进入水箱，也可以注入蓄水池中或直接供给用水装置。

在自来水补充系统中，一般使用电磁阀进行控制。当室内水箱或蓄水池内水量低于预定水平时，内置的浮动开关就会激活电磁阀，使自来水补充进入水箱或者水池中，这样就能保证系统在任何时候都有水可用。

3.3 设施农业雨水集蓄利用系统

设施农业是人类运用现代科学技术、现代物质装备、现代管理方法，将完全顺从和适应自然造化的传统农业生产过程，改造为能够逐步摆脱或完全摆脱自然束缚的一种现代农业生产方式。设施农业具有经济效益高，作物生产周期短，需水量大等特点。

设施农业雨水集蓄利用系统（greenhouse rainwater harvesting, GRWH）通过修建集雨槽、沉淀池、蓄水池等设施将降落在温室、大棚等的棚膜表面上的雨水收集存储起来，再将雨水通过微灌施肥系统高效利用于设施农业生产或景观优化等。在北京地区，将设施农业雨水集蓄利用技术与微施肥等水资源高效利用技术相结合的模式正处于试验推广阶段，该模式可为农业发展提供较可靠的水源。

根据雨水存储和泵送方式不同，设施农业雨水集蓄利用系统可分为四类：

（1） 封闭蓄水池间接泵送系统将封闭的蓄水池建于温室或大棚外的地下，池内雨水通过水泵送入室内水箱，雨水在重力作用下自流供给农业生产用水（图 3-5）。其优点在于蓄水池内雨水的蒸发损失很小，无需考虑水泵与灌溉系统之间的匹配，雨水在水箱内经过二次沉淀后所含的杂质少，不易造成灌溉系统的堵塞等；其缺点在于封闭式蓄水池造价高，室内水箱可能会占用一定的生产空间，水箱出水的压力可能不足而需要额外的增压装置。

（2） 封闭蓄水池直接泵送系统将封闭的蓄水池建于温室或大棚外的地下，池内雨水通过水泵抽取直接供给农业生产用水（图 3-6）。其优点在于收集雨水的蒸发损失小，能节约室内的生产空间。但是这一系统对过滤系统和水泵的要求较高，容易造成水泵或灌溉系统的损坏，从而导致系统供水失效。

（3） 开敞室内蓄水池间接泵送系统将开敞的蓄水池建于温室或大棚以内，池内雨水通过水泵先送入室内水箱，然后雨水在重力作用下自流供给农业生产用水（图 3-7，a）。该系统的优点是能大大减少蓄水池的建造成本，对水泵的要求不高，室内水箱的使用有利于水质提高；其缺点是开敞蓄水池对人身安全具有一定的危险性，尽管蓄水池仍在封闭的室内，但其雨水蒸发损失要高于封闭蓄水池，蓄水池的建造可能会挤占农业生产空间，水箱出水的压力不足可能需要配备额外的增压装置。

(4) 开敞室内蓄水池直接泵送系统将开敞的蓄水池建于温室或大棚以内，池内雨水经水泵直接供给农业生产用水（图 3-7，b）。该系统的优点是蓄水池建造成本低，不使用水箱能节约室内空间；其缺点是蓄水池对人身具有一定的危险性，雨水蒸发损失较大，水泵的配置和维护要求高，蓄水池可能会占用农业生产空间等。

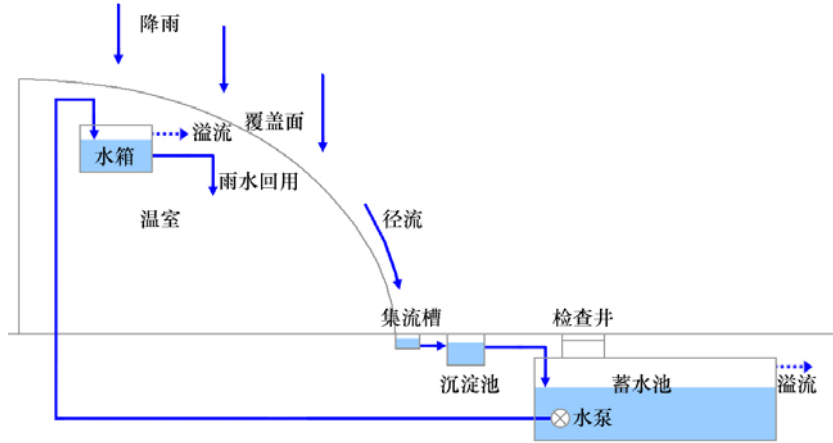


图3-5 封闭蓄水池间接泵送系统

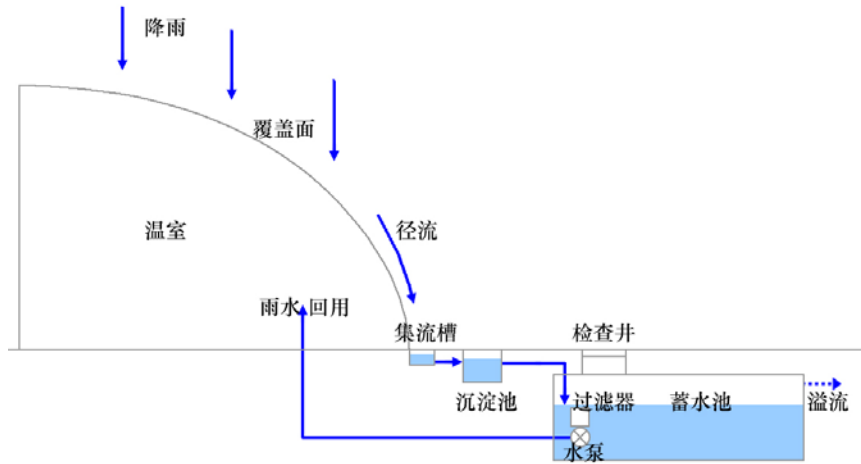


图3-6 封闭蓄水池直接泵送系统

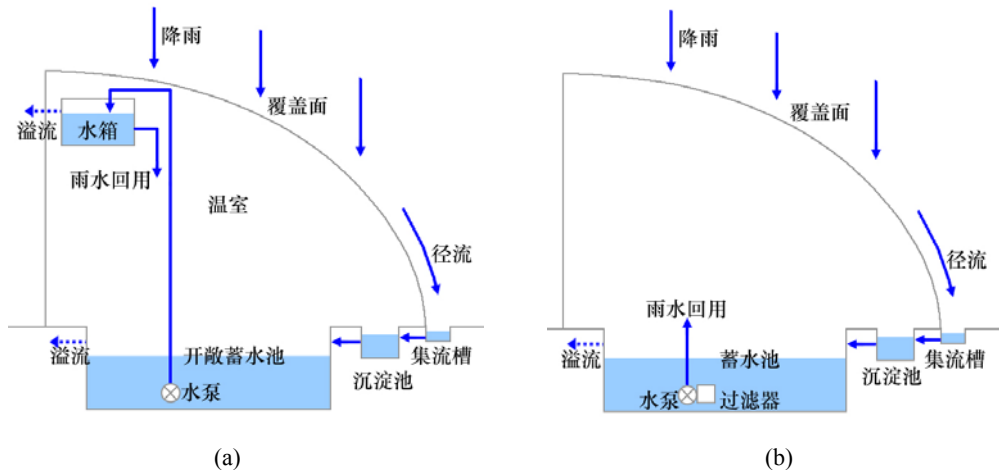


图3-7 开敞室内蓄水池间接、直接泵送系统

另外，在设施农业雨水集蓄利用系统的实践过程中，也存在开敞室外蓄水池雨水利用系统这一类型，但是这种系统具有很高的人身危险性，而且雨水直接暴露在阳光下，容易滋生各种水藻从而导致水泵或灌溉系统经常堵塞。基于以上重大缺陷，本文对这一系统将不再进行论述和研究。

根据设施农业雨水集蓄利用系统服务对象的多寡，还可以将其分为一对一和一对多雨水集蓄利用系统。一对一系统是指收集的雨水存储于一个蓄水池内并供给一个温室或大棚的农业生产用水；一对多系统是指收集的雨水存储于一个蓄水池内并提供给多个温室或大棚的农业生产用水。一对一系统蓄水池的容积一般较小，其优点是蓄水池的建造空间可灵活安排，雨水收集和回用管路短，因此，雨水收集利用的效率相对较高；一对多系统蓄水池的容积一般较大，蓄水能力强，可灵活安排农业用水，而且蓄水池的建造具有规模经济效应，即蓄水池越大，则单位容积的建造成本相对较低。

典型的设施农业雨水集蓄利用系统一般包括以下组成要素：

- 集雨面
- 集流槽
- 沉淀池
- 过滤装置
- 蓄水池
- 水泵
- 电源开关
- 水箱
- 回用管路
- 灌溉系统
- 溢流处理系统

设施农业雨水集蓄利用系统与屋面雨水集蓄利用系统主要存在以下几点不同：一是农村地区的环境质量要远高于城市，且温室或大棚的覆盖面经常更换以满足农业生产要求。因此，雨水质量和集雨面的清洁程度较高，决定了设施农业雨水集蓄利用系统一般可不采用初期弃流装置；二是设施农业雨水集蓄利用系统不接入污水处理系统，溢流的雨水一般通过坑井或者自然洼地就近渗透进入地下蓄水层；三是设施农业雨水集蓄利用系统不连接自来水供水系统，这是因为北京市农业生产一般采用地下水而不是自来水灌溉。因此，雨水利用系统是相对独立的供水系统。

集雨面。设施农业雨水集蓄利用系统的集雨面一般为塑料薄膜或者玻璃，具有良好的导水性，径流效率一般都很高。设施农业生产具有一定的周期性，每年需要定期打开覆盖面以满足农业生产的特定需求（例如充分利用光照杀灭土壤中的有害细菌或降低室内的温度等），因此，集雨面一般都可保持较高的清

洁程度，有利于雨水的收集、处理和利用。

集流槽。与屋面集雨利用系统不同，设施农业的集雨面很多都直接与地面相连接，因此需要建造开敞式集流槽对雨水进行汇流和导流。集流槽长度一般与温室或大棚的长度相当，其宽度和深度根据当地的降雨特征和集雨面面积的大小合理确定，集流槽应当具有一定的坡度以利于雨水快速流入蓄水池。总之，集流槽的建造标准应保证在暴雨发生情况下不发生溢流。

沉淀池。由于设施农业雨水利用系统的集流槽建于地面，因此雨水中较易携带泥沙和各种体积较大的杂质。因此，在雨水进入蓄水池前，须经过沉淀池进行初次沉淀，去除雨水中夹杂的固体杂质。沉淀池大小可根据来水速度和集流槽的清洁程度设置。在沉淀池和蓄水池之间可再加设简易过滤网，以去除雨水中漂浮的固体杂质。

蓄水池。设施农业雨水集蓄利用系统蓄水池用于暂时存储雨水以便日后农业生产用水需求。蓄水池的容积大小将影响整个系统的集雨效率、投资成本和效益，需要对其重点研究以确定与系统相匹配的最优规模。

对于室外封闭蓄水池，为了不因为蓄水池的修建而减少农业生产面积，可在其顶部覆盖一定厚度的土壤层（在北京覆盖的土壤层厚度一般为 50cm），但提高了对蓄水池的承重能力要求。另外，一些具备条件的大型农场或农业园区，可以在每年的干旱季节利用大型封闭地下蓄水池从事农业生产活动，例如蘑菇、韭黄等喜阴作物的生产，也可以将其用于物质的储存和保鲜，但必须设置便于进出的通道；对于室内开敞蓄水池，可在蓄水池上部开展空中农业生产项目，同样可以达到既能收集雨水又能不减少生产空间的目的。另外，对于大型开敞蓄水池，也可以在其内开展水产养殖活动，丰富农业生产的内容，提高农民的收入。

水泵。水泵是设施农业雨水集蓄利用系统中必须配备的。对于间接泵送系统而言，由于室内水箱具有再次沉淀的作用，因此水泵入水口一般无需配备过滤装置就可以达到用水要求，但水箱内可能需要加设增压装置以满足供水需求。对于直接泵送系统而言，水泵出水与灌溉系统直接相连接，水泵进水口或出水口一般都需要安装较为精细的过滤系统，以保证较高的出水水质，防止灌溉系统堵塞。

水箱。水箱用于间接泵送系统中，具有雨水清洁和沉淀的作用。水箱大小可根据设施农业用水规律确定，一般水箱的容积应至少满足一次灌溉的用水需求。由于设施农业的面积一般较大，输水距离较远，水箱出水口距离地面应至少超过 1.5m，否则可能导致输水压力不足，这时就必须配备额外的增压装置。

3.4 本章小结

本章首先简要介绍了雨水利用的概念和过程，然后按照不同的划分标准对

国内外雨水利用进行了类型划分。在分析国内外雨水利用的发展趋势和北京市雨水利用实践的基础上，确立了本文研究的雨水利用类型，即住宅屋面雨水集蓄利用系统和设施农业雨水集蓄利用系统。并对两种系统的结构、功能、运行过程及各自的优缺点进行了详细的阐述。从而为本文后续的雨水集蓄利用性能评价提供了技术基础。

第四章 雨水集蓄利用性能评价理论与方法

雨水利用系统的雨水收集效率和雨水利用效率是所有系统使用者、参与者和研究者共同关注的内容。尽管北京已经开展了城市屋面雨水集蓄利用系统和设施农业雨水集蓄利用系统的研究和示范工作,但到目前为止,对已建设施的集雨效率和供水效率仍缺乏有效的评价手段,也无从获知什么样的雨水利用系统是适合本地的最佳系统,这将影响人们对雨水利用工程的正确认识,影响到雨水利用工程的进一步推广和应用。

建立一套科学合理的雨水集蓄利用系统性能评价体系,有助于全面了解系统运作的流程和细节,有助于判断和选择最佳的雨水集蓄利用系统。基于这一需要,本章将围绕雨水集蓄利用系统性能评价,构建一套适用的科学评价体系,为进一步模拟提供理论和方法依据。

雨水集蓄利用系统的水文性能是指系统收集和利用雨水的能力。如果一个雨水集蓄利用系统收集和利用雨水的能力低,表明这一系统不能满足供水需求而应当舍弃。

在城市中,雨水集蓄利用系统不仅可以通过增加可用水资源以减少自来水的使用,同时也能减少径流高峰期的流量,减少进入污水系统的污水量。国外研究者对雨水集蓄利用系统的这些作用进行了模拟和研究(Vaes & Berlamont, 2001; Shaaban & Appan, 2003; Hardy et al, 2004),但这一领域并不是本文研究的内容。本论文首先对单个雨水集蓄利用系统的组成及其雨水收集利用的水文性能进行模拟和评价,然后,通过雨水集蓄利用工程的成本效益分析,确定雨水集蓄利用系统的优化模式。在此基础上,结合北京市的自然、社会经济状况,对雨水集蓄利用系统进行空间化分析并探讨建立雨水利用信息系统和管理平台。

对雨水利用系统性能评价的方法很多,既有相对简单的经验型方法,也有复杂的统计学方法或数学模型。尽管研究对象统称为雨水利用系统,但不同研究者的具体研究对象存在差异,有的仅仅关注系统中的某一些组成部件,例如集雨面(降雨径流关系研究)或者蓄水池,有的研究者则尽量评价包含所有组成部件的雨水利用系统。同时,雨水利用系统研究也存在空间尺度的差异。有些对单个建筑物的雨水利用系统进行研究,有些结合GIS空间分析方法,对行政区或流域范围内的雨水利用进行了潜力评价及影响研究(Liu et al, 2005; Sekar & Randhir, 2006; Kahinda et al, 2006)。在研究内容上,有些侧重于研究雨水利用系统的效率评价,有些侧重于经济评价(Liaw & Tsai, 2004; Ghisi & Oliveira, 2007),也有些研究关注雨水利用系统的可持续性(Perkinson et al; Anderson, 2005)。

4.1 模拟模型

模型首先可以分为数学模型 (mathematical model) 和物理模型 (physical model)。物理模型是按照预测对象所表现出来的物理现象所建立的模型,着重描述组成预测对象的基本概念及其基本因素,并确立基本因素之间的结构或功能上的联系模型。物理模型往往是数学模型的基础,数学模型则是对物理模型中的基本因素赋予数学符号和数量化,并用数学方法(公式、方程等)进行描述。按照人们对事物发展过程的了解程度,数学模型可以细分为三大类:

1. 黑箱模型 (black box), 亦称经验模型, 指一些其内部规律还很少为人们所知的现象, 如生命科学、社会科学等方面的问题。在水文学模型中, 黑箱模型不考虑流域物理过程, 模型的建立基于输入和输出时间序列的分析。因此, 黑箱模型一般具有较高的预测功能, 但不能清晰诠释系统运行的过程。黑箱模型更多的限定于在观察和数据收集的研究区内应用, 模拟结果往往不适用于其他研究区。
2. 灰箱模型 (Gray box) 或概念模型 (conceptual model), 指那些内部规律尚不十分清楚, 在建立和改善模型方面都还不同程度地有许多工作要做的问题, 如气象学、生态学、经济学等领域的模型。在水利学上, 灰箱模型是指结合流域观测数据和试验数据, 以物理过程为基础建立起来的模型。由于物理意义不是很明确, 灰箱模型的参数和变量很难通过实测数据获得, 经常需要模拟 (simulate), 检验 (verification), 验证 (validation) 和评估 (evaluate)。通常灰箱模型是由一些独立模块共同组成的集总模型。灰箱模型与黑箱模型相似, 不能很好的解释系统运行过程, 模拟结果也不能随意地运用到其它研究区域。
3. 白箱模型 (white box) 或机理模型, 指那些内部规律比较清楚的模型, 如力学、热学、电学以及相关的工程技术问题。白箱模型能反映过程的机理, 但由于真实世界十分复杂, 影响因素很多, 纯用理论方法描述过程往往是不可能, 因而白箱模型的应用是很有限的。

数学模型还有很多种分类。例如根据是否考虑随机因素, 可以将其分为随机性模型和确定性模型两大类。确定性模型是指输入变量与输出结果相对应的模型。随机性模型与确定性模型恰恰相反, 受随机因素的影响, 输入相同的变量可能会得到不同的输出结果; 根据模型模拟时间尺度的不同, 数学模型可以分为静态模型和动态模型, 在静态模型中, 时间完全不被考虑, 而动态模型正好相反。当时间作为一个变量时, 既可以是连续的, 也可以是离散的。

模拟模型建立过程见图 4-1 (James, 1984)。用模型对现实世界进行模拟所得结果的精度高低非常重要, 但是能够精确模拟现实的模型是不存在的。正如 Thomas (2002a) 所说, 受多种不确定性因素的影响, 对雨水利用系统水

文性能的预测只能是大概的而并非精确的，例如未来的水资源需求和气候变化等影响雨水利用系统模拟过程的因素存在着不确定性或者难以进行准确的预测。引用 Box（1984）所述：“人类创造的所有模型都是错误的，但其中的某些模型是有价值的”。也就是说，一个不能完全准确模拟现实世界的模型也可以是非常有价值的预测工具。尽管实地调查研究具有真实性和确定性的优点，但是这种研究的时间和资金投入一般十分巨大，这是利用模型模拟取代实地研究的优势所在。

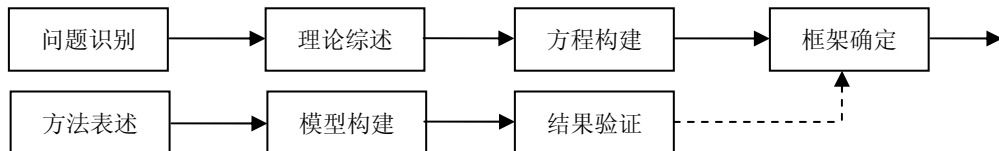


图4-1 模拟模型构建过程图

本章后续内容主要涉及雨水集蓄利用系统性能评价模型构建过程中的前三个步骤，即问题识别、相关理论综述以及模型方程的构建。

4.2 问题识别

本文比较和分析雨水集蓄利用系统的模拟模型及方法。选取和构建模拟模型后将模拟两个方面的内容，一是对单个雨水集蓄利用系统效率及经济效益进行模拟，二是对区域雨水利用的潜力进行评价。在此基础上，进一步展开雨水利用的空间化研究和构建城市雨水利用系统信息平台。为了达到上述研究目的，首先需要回答以下关键性问题：

- 有哪些模型评价雨水集蓄利用系统的效率？
- 有哪些模型评价雨水集蓄利用系统的经济效益（成本效益）？
- 评价城市或更大尺度区域的雨水利用潜力以及经济效益的模型有哪些？
- 现有的模型是否能够满足本论文研究的需要？
- 如果现有的模型不能满足研究需要，如何构建新的研究方法和模型？

模拟和预测雨水利用系统性能模型很多。构建雨水利用系统性能评价模型首先要回答什么是性能？为何要模拟和预测系统的性能？到目前为止，研究者主要采用两个指标来考查和评价雨水利用系统的性能，即可靠性和效率指标。可靠性指标又可分为时间和水量可靠性指标（Fewkes & Butler, 1999）。Liaw 和 Tsai（2004）将雨水利用系统的可靠性定义为收集利用的雨水量占用水总量的比例，或者雨水能够完全满足用水需求的时间比例。Thomas（2002a）对雨水利用系统的水量可靠性也有类似的定义，并且增加了“效率”这一指标。此处“效率”是指可利用径流量占雨水收集面总径流量的比例。与 Liaw 等人对系统水量可靠性的定义相类似，Fewkes 和 Warm（2000）将其定义为节约自来

水的效率（见公式 4-1）。

$$E_T = \frac{\sum_{t=1}^T Y_t}{\sum_{t=1}^T D_t} \times 100 \quad (4-1)$$

式中： E_T 指节水效率（%）， Y_t 指蓄水池取水量（ m^3 ）， D_t 指总需水量（ m^3 ）， T 指一定的时间范围。

与水量可靠性指标相比较，时间可靠性指标具有很大的缺陷。例如，一个雨水利用系统可能可以提供 99% 的用水需求，但是系统的时间可靠性却可能为零（还有 1% 的用水量无法提供）。因此，在很多情况下，时间可靠性指标无法用来准确衡量一个系统的优劣程度。而水量可靠性指标却能够较好的反映出系统的供水可靠程度。

当然，在雨水是唯一水源的地区，例如一些发展中国家和远离城市的乡村地区，利用时间可靠性来评价雨水利用系统的水文性能和效率存在其合理性。但是，在具有完善供水系统的城市中或在雨水用于农业补灌的情形下，雨水仅仅是作为替代或补充水源，当雨水量无法满足用水需求时，可以用自来水等其它水源进行补充，而无需担心供水不足。在这种情况下，使用水量可靠性指标是比较合理的。因此，本文采用水量可靠性来衡量雨水利用系统的性能和效率。

4.3 模拟目标

运用数学模型有助于人们理解一个复杂系统的运行过程。Wainwright 和 Mulligan（2004）对建立数学模型的目的进行了总结和分类，包括研究、理解、模拟和预测、虚拟实验、学科综合、科学成果交流方式。本文构建雨水利用系统数学模型的目的是模拟各种情形下雨水利用系统运行过程，并预测系统的性能。

在评价雨水利用系统性能时，需要考虑很多的问题和因素。例如与系统相关的成本和利益，不同的系统设计会给系统的性能带来什么样的影响？雨水利用系统性能方面的问题包括：

- 雨水量可替代用水需求量的比例？
- 收集利用雨水的单位成本是多少，与其他节水措施的成本比较如何？
- 系统投资回收期多长？
- 系统寿命期内的投资回报率是多少？
- 系统存在什么样的风险？例如，降雨量低于预期时应当如何处理？

系统的运行及其性能受到多种相互关联的因素的影响。其中一些完全是人为因素，例如集雨面的特征、需水量、系统成本等。而另外一些主要是自然因素，例如地区的降雨规律。雨水利用系统的运行状态取决于所有影响因素的相

互作用结果。模型模拟能够使我们更好地把这些因素作为一个有机整体来看待，从而提高我们对系统的认识，而不是仅仅通过简单的调查来得出结论。

4.4 模型要素及数据

Thomas (2002a) 提出，评价雨水利用系统性能至少需要以下数据：

- 集流面面积和径流系数；
- 平均日需水量；
- 时间跨度足够长的历史降雨数据；
- 蓄水池规格、容积等。

基于不同的研究目的和方法，对研究数据的要求也不尽相同。Fewkes (1997) 在计算集雨面径流系数时考虑了集雨面的雨水滞留损失。而 Leggett 等人 (2001b) 将过滤损失也纳入到径流系数中。Liaw 等人 (2004) 则使用了一系列的经济性能评价指标 (financial performance)。一些单凭经验的研究方法可能仅仅使用了少量的数据。尽管如此，对雨水利用系统性能的评价至少应该包括三种基础数据，即降雨量、集雨面面积和用水量。

现代雨水利用系统一般都包括较多的零部件。为了更加准确的模拟和预测系统的性能，对这些零部件的模拟必须有所取舍，并寻找合适的方法来模拟被选零部件的实际运行过程。很显然，构建一个能模拟系统所有零部件和运行过程的完整模型是不可行的。正如前所述，任何一个模型都不可能完全准确的模拟系统中每一个组成零部件的运行过程。因此，比较合理的做法是尽量简化模拟过程，但这些过程能够代表整个系统的运行机理。这样，模拟的复杂程度得到降低，但模拟的结果仍具有可接受的准确度和可靠性。

为了更好的模拟雨水利用系统的运行过程和性能，必须设置标准来选择和排除一些不重要的零部件及其运行过程。雨水利用系统性能模拟的要素选择应包括对收集和使用雨水量有明显影响作用的要素。对于城市屋面雨水集蓄利用系统而言，这些要素包括降雨量、集雨面、初期弃流装置、过滤装置、水泵、自来水供给系统、蓄水池以及非饮用水用水量；而对于设施农业雨水集蓄利用系统而言，这些要素则包括降雨量、集雨面、水泵、蓄水池以及农业生产用水量。

4.5 降雨量

降雨量随着时间和地点的变化呈现规律性的变化。降雨的空间分布受地形、海陆位置关系等众多因素的影响。在北京，年降水量从 200mm 左右到 1000 多 mm 不等。降雨量是决定雨水利用系统性能的关键因素，因此，使用科学的方法来解释当地的降雨特征也就显得十分重要。总体上而言，将降雨数据用于雨

水利用系统性能评价的方法大致分为两类，即历史资料法和随机概算法。历史资料法使用一系列从气象观测站获得的历史降雨数据，而随机概算法使用的降雨数据是通过各种随机计算方法获得的。

*历史降雨数据。*历史降雨数据记录的是一定时间范围和区域内的降雨量，例如北京某气象站的多年日值降雨量或月值降雨量。这些数据可以直接用于雨水利用系统的模型中。历史降雨数据已经被广泛的用于各种雨水利用系统的研究当中。

目前，北京市已经建立了完善的气象观测站网。北京市各主要气象站点的多年日值降雨量数据可以向国家气象局或者北京市气象局申请获得。

*随机降雨数据。*通过对历史降雨记录进行统计分析可以获得新的降雨量系列数据。Fewkes 和 Ferris (1982) 使用蒙特卡罗分析法生成英国诺丁山地区的日降雨量数据集，并将其用在质量平衡模型 (mass-balance) 中，对雨水用于冲厕的系统性能进行了评价。Coombes (2002) 将基于随机性的 DRIP (disaggregated rectangular intensity Pulse) 降雨模型作为水量分配平衡模型的一部分，预测了家庭雨水利用系统的性能。

对于缺乏降雨资料或者降雨资料有限不能满足研究需要的地区，使用随机降雨分析方法获得降雨数据非常有用。但为了获得较理想的随机降雨数据，必须根据实验或观测数据对新生成的数据进行验证，这在缺乏历史降雨数据的地区往往无法实现。

4.5.1 降雨数据选择标准

使用历史降雨数据时面临三个基本问题：

- 降雨数据的步距是多少，1 小时、1 天、1 月或是 1 年？
- 历史降雨数据覆盖的时间跨度是多少？1 年、2 年、10 年或是更长？
- 历史降雨数据的观测地点与雨水集蓄利用系统所在地间的距离是多少？

关于降雨步距的问题将在本章稍后进行详细的讨论，此处先对后两个问题进行阐述。国外很多研究者和机构对选择合适的降雨数据提出了自己的见解(见表 4-1)。

降雨记录时长决定了模型是否能够真实反映当地的气候特征，从而影响到雨水集蓄利用系统性能预测的准确性。降雨记录过短，据此建立的雨水集蓄利用系统会面临很大的风险。例如，如果仅使用干旱期的历史降雨记录，就会低估系统的整体性能。雨水集蓄利用系统与降雨观测点的距离大小对系统性能的评价也会有显著的影响。降雨的空间变化可能会十分显著，地形起伏较大的地区尤其如此。从表 4-1 中可以看出，目前并没有形成一致的降雨记录时长标准。但是，最小降雨记录时长 10 年以上是一个广为接受的标准。同样，对到达降雨

观测点的距离也没有形成公认的标准，研究者需要根据研究区的具体情况作出判断。

表 4-1 历史降雨数据选择标准

参考出处	降雨记录时长	至降雨观测点距离
英国 Environment agency (2003b)	-	10 英里以内
Heggen (2000)	5 年降雨数据	-
Konig (2001)	10 年日降雨数据	最近的气象站点
Mitchell (2007)	10 年降雨数据	-
Schiller 等 (1982)	至少 10 年降雨数据	-
Gould 等 (1999)	至少 10 年, 20-30 年更优	相近的气候和地形
Liaw 等 (2004)	至少 50 年降雨数据	-
Thomas (2004)	干旱区大型系统 25 年, 小型系统 5-10 年	-

4.6 集雨面

在城市中，人们可以利用各种类型的不透水面收集雨水，例如道路、停车场等。但在实际中，出于对收集雨水水质和收集效率的考虑，人们更多选择屋面作为雨水收集面。因此，对城市集流面降雨径流特征的研究将仅限于屋面；设施农业雨水集蓄利用系统的集雨面多为塑料薄膜和玻璃，集流面的特征相对比较简单。

受多因素的影响，降落到集雨面的雨水不能全部形成径流，这些因素包括表面湿润、滞留、吸收和蒸发作用等。有效径流就是指形成径流并最终可被收集的雨水径流，而其它不可收集的雨水称为径流损失。用来估计和计算降雨转换成有效径流的方法很多，其中较多被采用的是“径流系数”或者“初期损失”法。研究表明，使用径流系数或者初期损失进行模拟都可以获得较好的结果。

4.6.1 径流系数

径流系数是指集雨面上形成的径流量与降雨量的比值。径流系数的计算一般是通过长时间（几个月或者几年）的降雨-径流观测来获得。平均的径流系数可以从各次降雨事件得到的径流系数求平均值获得（Zhu 和 Liu, 1998; Fewkes, 1999a）。径流系数 C_R 的计算公式如下：

$$C_R = \text{时间}t\text{内的径流量} / \text{时间}t\text{内的降雨量} \quad (4-2)$$

其中，集雨面上的降雨量等于降雨深度乘以有效集雨面积；屋面或设施农业覆盖面的有效集雨面积一般是指其垂直投影面积，即水平长度与水平宽度的乘积（见图 4-2）。当有效集雨面面积和径流系数确定后，一定时间内的降雨径

流量可用公式 4-3 计算。

$$ER_t = R_t \cdot A \cdot C_R \quad (4-3)$$

式中， ER_t 指时间 t 内的有效径流量 (m^3)， R_t 指时间 t 内的降雨深度 (m)， A 指有效集雨面积 (m^2)。

对集雨效率可能会产生影响的天气因素包括降水类型（降雨、雪和冰雹等。降雪在北京冬季较常发生）以及较强的风。在当今技术水平下，降雪所产生的水很难进行有效的收集，因此，降雪量将不纳入模型当中。而 Fewkes (1999a) 和 Schemenauer (1993) 等人的研究表明，风速和风向等对径流的影响是非常微弱的。

使用径流系数来计算降雨产生的有效径流量非常便捷和容易。因此，很多研究者都将径流系数用于雨水利用研究中 (Few, 1995, 1999a; Zhu 和 Liu, 1998; Liaw 和 Tsai, 2004; Lau et al, 2005; Ghisi et al, 2006)。研究表明，屋面材料对径流系数的影响非常显著（见表 4-2）。一般而言，建筑物屋面的设计都是以尽快排除雨水为原则，通常屋面的坡度大、使用的材料较为光滑。因此，屋面的径流系数普遍较高。

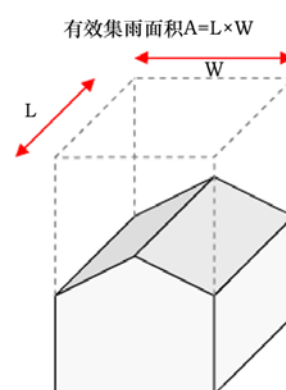


图4-2 集雨面有效集雨面积

表 4-2 各种类型屋面的径流系数

参考出处	屋面类型	径流系数		
		高	平均	低
DEHAA (1999)	沥青屋顶		0.9	
	瓦片屋顶	0.9		0.8
Dharmabalan (1989)	波浪型屋顶	0.9		0.7
	塑料屋顶	0.8		0.7
	茅草屋顶	0.6		0.5
	沥青瓦片屋顶	0.9		0.75
Environment Agency (2003)	瓦片平屋顶		0.5	
	砂砾平屋顶	0.5		0.4
	沥青瓦片屋顶	0.75		1
Fewkes & Warm (2000)	不透水膜面平屋顶	0		0.5
	绿色屋顶	0		0.5
Herrmann & Hasse (1997)	家庭住宅屋顶		0.84	
Leggett et al (2001b)	沥青瓦片屋顶	0.9		0.75
	表面光滑平屋顶		0.5	

	砂砾平屋顶	0.5	0.4
Liaw & Tsai (2004)	铁皮或水泥屋顶		0.82
Martin (1980)	住宅沥青屋顶	0.85	0.8
Rahman & Yusuf (2000)	波浪型屋顶		0.8
	沥青瓦片屋顶		0.8
	平屋顶		0.5
Woods-Ballard et al (2007)	砂砾平屋顶		0.4
	稀疏的绿化屋顶		0.3
	密集绿化屋顶		0.2
Yusuf (1999)	波浪型屋顶	0.85	0.75

由于各种原因造成的初期径流损失可以转换成最小降雨深度，当一次降雨所产生的降雨深度低于该值时，则径流将不会产生。研究表明，屋面材料对初期径流损失有明显的影响（表 4-3）。在本论文中，初期径流损失量采用 1mm，即单次降雨量小于等于 1mm 的日降雨作为无效降雨。

另一方面，设施农业覆盖面的材料和类型相对较少，一般都为塑料或玻璃材料，且覆盖面的坡度较大以求尽快排除雨水。国内的研究表明，设施农业覆盖面的平均径流系数一般可达 0.9 以上。

表 4-3 不同屋面材料的初期径流损失

研究者	屋面材料	初期损失量 (mm)
Fewkes, 1999a	沥青或混凝土瓦片	0.25
Pratt & Parker, 1987	沥青平房屋顶	0.32
Li 等, 2004	沥青或玻璃	0.10
	塑料	0.20
Mitchell, 2007	澳大利亚普通城市屋顶	1.00
MJA, 2007	澳大利亚普通家庭屋顶	0.50
NSWG, 2006	家庭屋顶	0.50-1.00

4.7 初期弃流

初期弃流量是指在降雨初期从径流中分离出来的一定雨水量。不同研究者根据不同情况提出了各种初期弃流量。例如，Yaziz（1989）认为小型屋面的初期弃流量为 0.005m^3 ；Cunliffe（1998）的研究表明，澳大利亚普通家庭屋面的初期弃流量为 $0.02-0.025\text{m}^3$ 。Coombes（2002）对澳大利亚 27 个住宅单元的雨水利用系统研究结果认为，初期弃流量可设为 2mm，但此值设置偏大，这一方面是为了尽可能的去除附近工业活动带来的污染物，另一方面是为获得地方政府的批准。北京雨季降雨十分集中，这有利于保持屋面的清洁，因此，在本文

的计算中，屋面雨水集蓄利用系统的雨水初期弃流量设为 1mm 较为合理。另外，设施农业雨水集蓄利用系统中不包含初期弃流装置，其初期弃流量设为零，这是由其处于较好的环境以及农业用水对水质要求较低等现实因素所决定的。

4.8 过滤装置

过滤装置类型多种多样，但在现代屋面雨水集蓄利用系统中较为常用的是错流过滤器（Crossflow）。其工作原理为：雨水进入错流过滤器的滤膜管道做高速循环流动，在压力的作用下，雨水透过滤膜微孔管壁以切线垂直于轴向渗透出，水中的颗粒则被截留在滤膜管内表面，形成截留层。高速循环流动而形成的雨水湍流不断冲洗滤膜管道的内表面，将少量附着在膜上的截留颗粒带走，从而防止了滤膜的阻塞，保持过滤的正常进行。

与传统过滤操作（并流过滤）不同的是，错流过滤的高速循环滤液在流经滤膜管道内时，会形成高剪切力，不断冲洗沉积在内表面的截留层，将其中的颗粒打散并带回滤液高速循环流，最后带出膜管。由于颗粒在滤膜管内表面的截留沉积速度与滤液高速循环流经内滤膜管内表面时产生的剪切力引发的颗粒返回循环流的速度达到平衡，可使截留层不再无限增厚而保持在一个较薄的稳定水平。因此一旦截留层达到稳定，滤膜管的渗透速率就将在较长一段时间内保持在相对高的水平上。总之，错流过滤器不但能有效去除雨水中所含的杂质，而且具有自我清洁功能。

过滤器的过滤效率是指通过滤后进入蓄水池的雨水量占有所有参与过滤雨水量的比例。很多研究者都对错流过滤器的过滤效率给出了评价，例如 konig（2001）和 leggett 等人（2001b）认为过滤器的效率为 90%左右。当然，该值只是一个经验值，过滤器实际过滤效率与来水速率之间存在关联，一般而言，水流流速越大则过滤器的效率越低。表 4-4 列出了一些研究者给出的过滤效率参考值。从表中可以看出，过滤效率 90%是一个较常用的数值。

表 4-4 过滤器过滤效率参考值

参考来源	评价	效率系数
Leggett 等（2001b）	适用于自我清洁系统	0.9
Konig（2001）	德国制造过滤器	0.9
Gould & Nissen-Peterson（1999）	Downpipe 和 Vortex 过滤器	0.9

在确定了过滤装置的过滤效率后，就可以根据进入过滤器的水流量来计算一定时间内通过过滤器并最终进入蓄水池的水量。其计算公式如下

$$F_t = EF_t \cdot C_F \quad (4-4)$$

式中 F_t 指通过过滤器并进入蓄水池的水量（ m^3 ）， EF_t 指全部来水量（ m^3 ）， C_F 指过滤效率。

设施农业雨水集蓄利用系统在蓄水池前设置了简易沉淀池，一般情况下，无需再对雨水进行过滤处理，因此不存在雨水过滤损失。

4.9 水泵

表 4-5 列出了国内某水泵生产厂家各种型号水泵的扬程、流量、功率及价格信息，用户可根据具体的用水需求选择水泵。水泵的电量消耗一般可由抽水时间和水泵功率确定，电费支出取决于消耗电量和当地的电费标准。

表 4-5 潜水泵型号及性能表

型号	额定扬程/m	额定流量/m ³ /h	额定功率/kw	价格/元
QN1.5-7	7	1.5	0.12	550
QN5-7	7	5	0.25	680
QN6-14	14	6	0.55	1030
QN10-10	10	10	0.75	1200
QN40-6	6	40	1.1	1450
QN15-14	14	15	1.1	1500
TPHK4T3-3	30	8	0.85	2000
QY100-17	7	15	7.5	3150
QX12.5-120	120	12.5	9.2	5675
QS65-10	10	65	3	2195

资料来源：通过网络和电话向生产商询价获得

4.10 自来水供水和污水排放系统

在屋面雨水集蓄利用系统中，当系统供水不足时就需要用自来水进行补充。雨水的使用替代了部分自来水，从而节约了自来水用水成本。尽管屋面雨水收集利用的实际利益远不止节约水费，但对特定用户而言，这是使用雨水集蓄利用系统最主要的经济驱动力。而系统带来的其它利益，诸如节约城市污水处理总费用，降低洪水风险等效益多以外部性和公共性表现出来，但并不能给系统使用者带来直接的收益。

在中国，城市市政部门根据建筑物所占用的建设面积向户主收取防洪费。受下垫面和大气污染的影响，城市雨水是一种带有污染性的水源，如果不加以处理，会污染城市水环境，从而可能引起各种社会经济损失。根据占用面积收取防洪费却忽略雨水处理费，忽视雨水可能带来的环境负效应，会增加城市环境的负荷(对于雨污合流制的排水系统，也将大大增加污水处理厂的处理费用)。而在一些发达国家，已经形成了较完善的雨水处理费制度。有些国家规定，城市开发者可以选择上缴雨水处理费，或者控制雨水径流量到开发前的水平以免

交雨水处理费。中国目前还没有实行雨水处理费制度，也未有迹象表明将采取这一制度，这使得雨水收集利用系统的价值很难被真正认识到。当然，到目前为止，国内也没有对雨水使用后所产生的污水进行收费的制度。这主要是因为中国城市雨水利用处于试验探索阶段，还远没有形成规模。在很多城市雨水利用发展较快的国家，也没有对使用后的雨水收取污水处理费。这可能是促进雨水利用事业发展一种政策倾斜。在本研究中，对雨水成本效益的评价将不考虑雨水排放可能产生的任何费用。

4.11 蓄水池

蓄水池的水文性能由其容积大小、集雨面类型及大小、当地降雨状况和需水量等要素决定。Fewkes 和 Butler（2000）认为，在雨水利用系统中，蓄水池的容积大小对系统的经济性和可行性有极大的影响，主要表现在：

- 影响存储水量；
- 影响安装成本；
- 影响雨水存储的时间，从而对水质产生影响；
- 影响溢流事件发生频率，从而影响移除漂浮污染物或杂质的效率；
- 影响溢出的雨水量。

作为存储设备，雨水蓄水池一方面要收集随机产生的有效降雨径流，另一方面满足特定的用水需求。蓄水池容积大小由设计者或使用者的决定，其标准应当是雨水集蓄利用系统达到最优的供水和经济效果。McMahon 和 Mein（1978）建立了两种确定蓄水池容积大小的方法，即 Moran 相关法（Moran related methods）和关键期法（Critical period methods）。

4.11.1 Moran 相关法

Moran 相关法建立在 Moran 存储理论基础之上（Moran, 1959）。该方法使用一组联立方程来确定蓄水池存储容积、需水量和供水量之间的相互关系，从而能够明确在任何一个给定时间点蓄水池的存储状态。但 Moran 相关法只有在比较理想的条件下才能运用。Gould（1961）对这一方法进行了改进，建立了通常所说的“Gould 矩阵”。Gould 矩阵法兼顾了蓄水池入流和出流的同步性、入流的季节性以及时间序列相关性等问题，但该方法没有得到广泛的应用（Fewkes, 2006）。

4.11.2 关键期法

蓄水池的“关键期”是指蓄水池从满蓄到无水状态的持续时间（Ragab et al,

2001)。关键期法使用一系列的流量数据（一般为历史资料数据），根据供需水的关系来确定蓄水池的存储容积（Fewkes & Butler, 2000）。这一方法又可以再分为两类，即累积曲线法和行为分析法（Fewkes, 2006）。

累积曲线法最初由 Rippl (1883) 提出，随后被广泛的引用。该方法主要用于确定入流累积量（例如降雨量）和出流累积量（供水量、蒸发量等）之间的最大差值，差值最大时即为所谓的“关键期”。最大差值由未来最大的需水量确定，并据此计算必要的存储容积以实现最大的供水需求（Gould & Nissen-Peterson, 1999）。对于雨水集蓄利用系统而言，当方程 4-5 得到满足时，系统就能够提供足够的用水量。

$$S \geq \text{Max} \left(\int_{t_1}^{t_2} [D_t - Q_t] dt \right) \quad (4-5)$$

式中， $t_1 < t_2$ ， S 指蓄水容积（ m^3 ）， D_t 指时间 t 内的需水量， Q_t 指时间 t 内的入流量（ m^3 ）。

图 4-3 是以 1 月时间序列数据绘制的蓄水池流量累积曲线图。当然，使用 1 天时间序列数据可以更加准确的评估蓄水池容积、需水量和入流量之间的关系。在图中，A 为雨水集蓄利用系统实现最大供水效率时的最小蓄水池容积，此例中的最小容积为 27m^3 ；B 为在模拟初期蓄水池中残留的水量，此例假设为 5m^3 ；C 为模拟末期蓄水池中残留的水量，此例假设为 5m^3 。

可以看出，累积曲线法的主要不足之处表现为无法计算出在给定供水保证率情形下的存储容积。换句话说，该方法并不能很好的模拟蓄水容积大小与不同供水保证率之间的关系。

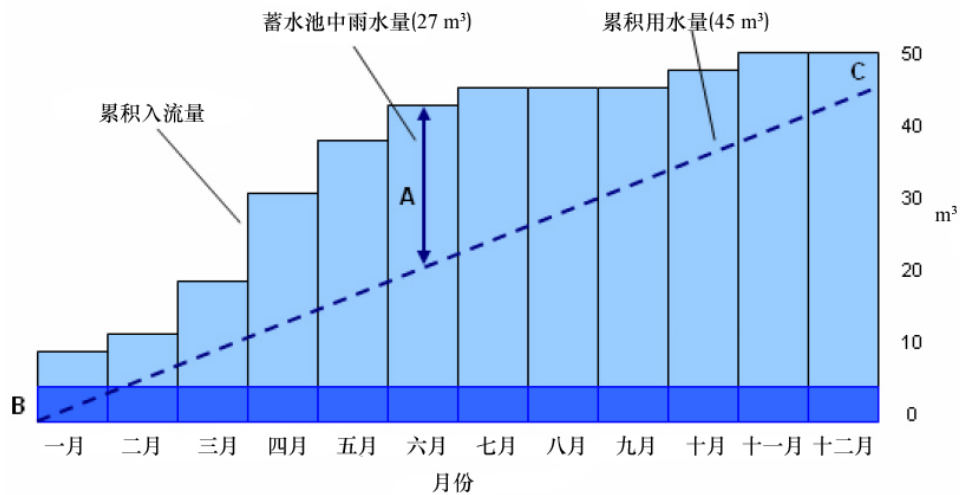


图4-3 蓄水池流量累积曲线图

资料来源：Gould & Nissen (1999)

4.11.3 行为分析法

行为分析法（又称“模拟分析法”）采用水量平衡公式 4-6 来计算蓄水池水量的变化（Mcmahon et al, 2007）

$$S_t = S_{t-1} + Q_t - D_t - \Delta E_t - L_t \quad (4-6)$$

约束条件为： $0 \leq S_t \leq V$

式中， S_t 表示 t 时蓄水池水量（ m^3 ）， Q_t 为 t 时流入蓄水池的水量（ m^3 ）， D_t 表示 t 时流出蓄水池的水量（ m^3 ）， ΔE_t 为 t 时蓄水池蒸发损失水量（ m^3 ）， L_t 表示 t 时蓄水池其它损失水量（ m^3 ），如渗漏损失。 V 表示蓄水池的有效容积（ m^3 ）。

在现代雨水集蓄利用系统中，蓄水池一般采用封闭结构，而具有很高的防渗功能。尽管设施农业室内开敞蓄水池雨水集蓄利用系统使用的是半封闭蓄水池，但是由于蓄水池被安置于温室或大棚内，其蒸发损失也较小。因此，在实际计算中，蒸发损失和其它损失一般可以忽略不计（Chu et al, 1997）。上述公式可简化为：

$$S_t = S_{t-1} + Q_t - D_t \quad (4-7)$$

约束条件为： $0 \leq S_t \leq V$

行为分析法的优点表现在：易于理解系统的水量变化过程，能灵活运用各种步距的数据序列，能模拟不同的需水模式。图 4-4 为运用行为分析法模拟蓄水池水量变化的过程示意图。从图中可以看出，与蓄水池相关的流量要素包括入流量、溢流量和取水量。

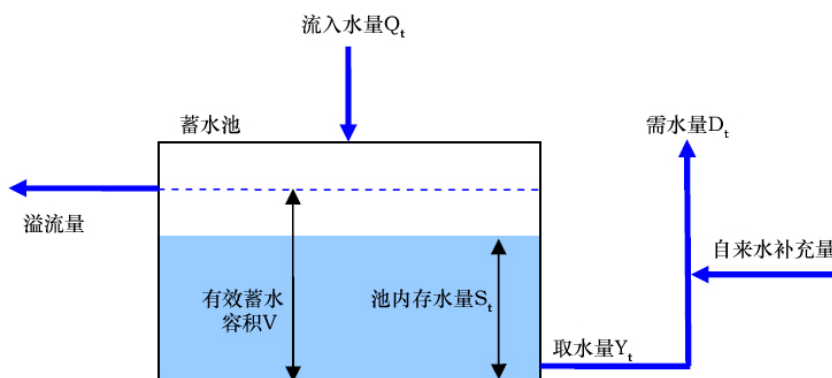


图4-4 基于行为分析法的蓄水池流量过程图

从图 4-5 可以看出，在任何一个时间点上，蓄水池水量的流入与流出可发生 8 种可能的情况，例如第 1 种情况表示无流量变化，而第 8 种情况表示入流、溢流和取水三个过程同时发生。

行为分析模型是基于离散数据（不连续数据）进行流量计算的，这些离散数据的步距（特定的时间间隔）可以是 1 分钟、1 小时、1 天或者 1 个月等。行为分析模型的这一特点决定了该模型具有一定的局限性。例如，模型无法解释

比所选取步距更小时间尺度上发生的水量变化过程。蓄水池入流、溢流和取水过程之间是相互影响的，因此，这些过程的精确模拟必须基于连续的数据才可能实现。换句话说，利用行为分析模型模拟蓄水池水量变化需要一定的假设条件，即入流、溢流和取水过程在时间上不是相互重叠的，并且按照一定的先后顺序发生。而对这些流量发生顺序的假设将影响模型的模拟结果。尽管该模型存在着上述不足之处，但实践表明，它对蓄水池的流量、水量变化的模拟仍然具有较高的精度。

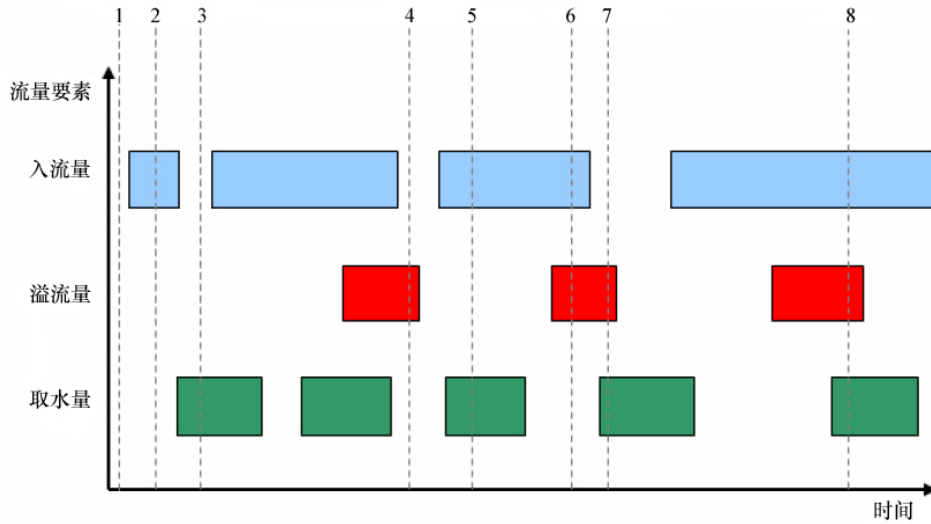


图4-5 蓄水池流量要素发生组合图

Jenkins 等人（1978）采用行为分析法，对蓄水池入流、溢流和取水不同顺序的流量过程进行了模拟，并建立了两种基本的运算法则，即 YAS（yield after spillage）和 YBS（yield before spillage）取水模式。到目前为止，这两种取水模式已经被众多的研究者所使用来模拟蓄水池的水量变化并确定蓄水池的容积（Jenkins, 1978）。

YAS 取水模式指先溢流后取水的蓄水池流量变化模式。在 YAS 取水模式中，在一个步距内，假定流量、水量变化的先后顺序为：上一步距末期蓄水池存量-需水量-流入水量-溢流量-实际取水量-本步距末期蓄水池存量。其运算公式如下。

$$Y_t = \min \begin{cases} D_t \\ S_{t-1} \end{cases} \quad (4-8)$$

$$S_t = \min \begin{cases} S_{t-1} + Q_t - Y_t \\ V - Y_t \end{cases} \quad (4-9)$$

式中字母含义如前所述。在 YAS 取水模式运算中， t 时的取水量等于 t 时需水量和 $t-1$ 时末期蓄水池存量之间的最小值。降雨径流发生后，蓄水池的水量等于 t 时入流量加上池内原有水量（ $t-1$ 末期水量），直至蓄水池满蓄发生溢流，此时蓄水池水量等于蓄水池的有效容积。YAS 取水模式可用图 4-6 来描

述其过程。

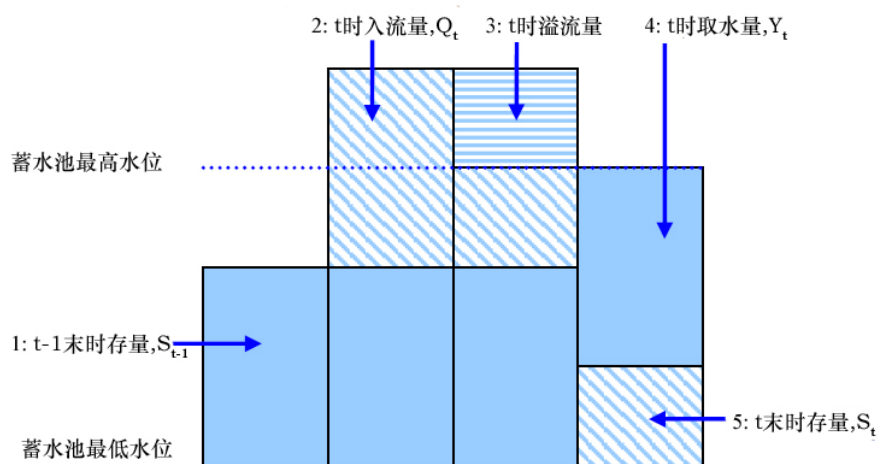


图4-6 YAS取水模式图

YBS 取水模式是假定先取水后溢流的蓄水池水量变化模式。在 YBS 取水模式中，一个步距内确定流量、水量的先后顺序为：上一步距末期蓄水池存量-流入水量-需水量-实际取水量-溢流量-本步距末期蓄水池存量。其运算公式如下：

$$Y_t = \min \begin{cases} D_t \\ S_{t-1} + Q_t \end{cases} \quad (4-10)$$

$$S_t = \min \begin{cases} S_{t-1} + Q_t - Y_t \\ V \end{cases} \quad (4-11)$$

在 YBS 取水模式运算中， t 时取水量等于 t 时需水量以及 $t-1$ 时末期蓄水池存量和 t 时的流入量加和之间的最小值。如果在取水后，蓄水池内水量仍超过其有效容积，则多余的水量通过溢流排出。YBS 取水模式流程可参见图 4-7。

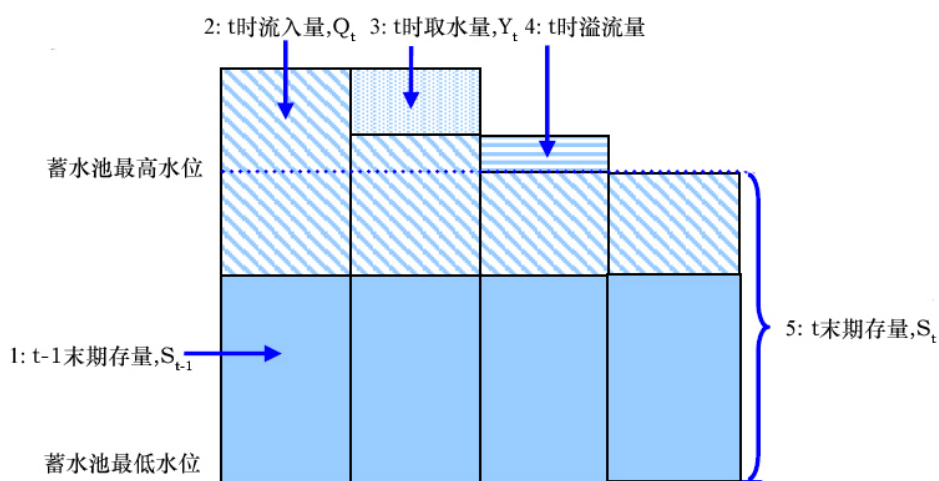


图4-7 YBS取水模式图

在现实中，蓄水池内雨水的获取和使用并不是完全按照 YAS 和 YBA 取水

模式进行，而更倾向于两种模式的结合。对两种取水模式的定义使我们不难理解到，YAS 取水模式可能会低估雨水系统的供水量，而 YBS 取水模式倾向于高估系统的供水能力，两种模式的这种特点已经被很多研究结果的所证实（Chu 等人，1997，1999；Liaw & Tsai，2004；Mitchell，2007）。

将降雨数据的步距从 1 天增加到 1 个月甚或 1 年，则模型所用数据越容易获取，模拟和计算过程也越简单。但是，步距加大也同时意味着模拟和预测的准确程度下降，据此模拟结果建立的雨水集蓄利用系统很可能无法达到理想的运行效果。Latham（1983）采用 YAS 取水模式，并利用月步距数据预测雨水集蓄利用系统的运行效果。研究发现，系统的蓄水池规模普遍偏大。为了在使用月步距数据的情况下仍然能够得到较理想的模拟精度，Latham 对 YAS 和 YBA 取水模型进行了修正，获得了如下的运算法则：

$$Y_t = \min \begin{cases} D_t \\ S_t + \theta Q_t \end{cases} \quad (4-12)$$

$$S_t = \min \begin{cases} (S_{t-1} + Q_t - \theta Y_t) - (1 - \theta) Y_t \\ V - (1 - \theta) Y_t \end{cases} \quad (4-13)$$

式中， θ 为蓄水池的存储系数，取值范围在 0 至 1 之间。可以看出，当 θ 取值为 0 时，即上式变为 YAS 取水模式；而当 θ 取值为 1 时，则变成了 YBS 取水模式。Latham 采用日数据确定了研究区域内的 θ 值，从而使基于月步距数据的模拟结果与日步距数据的模拟结果非常接近，达到了使用月步距数据准确模拟的目的。Latham 的研究为人们提供了一种利用月数据进行雨水利用研究的简便方法。但是，在缺乏 θ 值的地区，研究者仍然需要使用日步距数据来确定 θ 值。因此，这种改进方法只适合已经确定了 θ 值的地区。

4.11.4 其它设计方法

除累积曲线法和行为分析法以外，还有其它各种“关键期”法被用于确定蓄水池规模。例如 Hazen 的 semi-infinite 蓄水池法（1914）、Hurst 的程序法（1965）、Thomas 的时序高峰运算法（1963）等。Fewkes（2006）指出，以上方法都没有被广泛应用于雨水蓄水池的设计，因此，本文不再对这些方法作进一步的解释。

在国内城市雨水利用的研究中，对蓄水池规模的优化研究十分缺乏，这是中国城市雨水利用事业发展较晚和较慢的一个很好的佐证。李俊奇等人（2007）在收集的雨水能够被及时和完全利用的假设条件下，利用累计曲线法对北京某雨水利用工程的蓄水池规模进行了优化预测。但这种用水量随着降雨量的变化发生相应变化的假设在现实中不仅不存在，而且可能完全背离现实，因此这一方法的应用具有很大的局限性。

相对于城市雨水利用，中国的农业雨水利用具有更加悠久的历史，应用范围非常广泛。因此，农业雨水利用的研究进展要远快于城市雨水利用。但到目前为止，对农业雨水利用系统蓄水池规模优化的理论和方法也并不多见。由内蒙古自治区水利厅主编，中华人民共和国水利部于 2001 年 4 月颁布的《雨水集蓄利用工程技术规范》是国内较为权威的农业雨水利用规范。规范中提出蓄水工程的容积大小根据年供水总量和年降雨量来确定（公式 4-13）。

$$V = \frac{KW}{1-\alpha} \quad (4-13)$$

式中， V 为蓄水规模或容积（ m^3 ）， W 为全年供水量（ m^3 ）， α 为蓄水工程蒸发、渗漏损失系数，取值 0.05-0.01， K 为容积系数，半干旱地区人畜饮水工程取值 0.8-1.0，灌溉供水工程取值 0.6-0.9；湿润半湿润地区取值 0.25-0.4。

另外，张新燕等以陕西省礼泉县北部丘陵区为例，针对大田作物（小麦、玉米等）雨水集蓄灌溉利用问题，应用水量平衡原理和动态规划等系统分析方法，建立了系统优化模型；牛文全根据水量平衡原理，计算年内各时段的水量盈缺状况并进行调蓄计算，确定了人畜饮水工程和农田补灌工程中雨水集蓄设施经济容积的计算方法。

以上各种雨水集蓄利用工程蓄水池容积的确定方法都有一个共同的目标，即雨水收集量应满足农业用水需求。其中“规范”以一年为步距来确定蓄水池容积大小，这与中国大部分地区降雨的季节分配极不均衡的特征存在较大的矛盾。因此，即使据此确定的蓄水池容积可满足一年的总用水量需求，但无法满足年内各时期的用水需求。张新燕、牛文全等人的研究方法在模拟步距上有了明显的减小，供水保证率得以大幅度的提高，但是他们的研究方法只适合中国十分干旱缺水的地区，例如中国的西北干旱区，因此并不适合本文的研究需要。

4.12 模型选取

通过以上对蓄水池规模模拟方法的比较可以发现，就目前而言，行为分析法是一种较为普遍使用的、合理的模拟方法。 $Moran$ 法及 $Gould$ 矩阵法并不适合本研究，原因在于这些方法主要用于预测蓄水池的供水可靠性和安全性。但是，现代雨水集蓄利用系统并不刻意要求达到一定的供水可靠性。这与对供水安全、稳定和可靠要求的大型水利系统有很大的不同。即使在雨水集蓄利用系统缺水的情况下，用户仍然能够通过其他供水系统获得水源。事实上，雨水集蓄利用系统更加关注其供水效率与成本效益之间的关系。

另外， $Moran$ 法无法反映出年内的降雨、用水等的季节变化特征，对用水量恒定的假设无法解释系统的实际运行过程。换句话说， $Moran$ 法既不能模拟降雨的季节性变化，也不能模拟用水的时间变化，这些都限制了该方法在雨水集蓄利用系统中的应用。

累积曲线法的初始目标是确定能够完全满足用水需求的蓄水容积。McMahon 和 Mein (1978) 等研究者指出, 累积曲线法无法很好的反映用水的季节变化。因此, 在一些用水季节性变化很大的案例中, 例如灌溉用水或者家庭洗衣用水, 累积曲线法将无法进行较为准确的模拟。所以, 作为确定雨水集蓄利用系统蓄水池规模的方法之一, 累积曲线法至今仍极少被应用。

与 Moran 法和累积曲线法相比较, 行为分析法则具备了许多优势。首先, 这种方法不必事先假定某一供水保证率, 即蓄水池的容积大小不是根据需水量的多寡来确定。这种灵活性可以允许研究者根据特定的研究目标来确定蓄水池的容积, 例如根据雨水集蓄利用系统的成本效益来确定系统所需要的蓄水池容积。

作为一种成熟的蓄水池流量模拟方法, 行为分析法受到很多研究者的青睐而广泛应用于雨水利用系统的设计和评价中, 例如 Jenkins 等 (1978)、Latham (1983)、Fewkes (1999b)、Coombes (2001) 等等。同时, 行为分析法的模拟效果也得到了研究者的肯定。例如, Fewkes (1999a) 运用行为分析法模拟了雨水收集利用于家庭冲厕的系统。对研究结果与实际观测结果进行比较发现, 模拟预测结果与实际运行结果十分吻合, 很好的证明了行为分析法在雨水集蓄利用系统模拟中的有效性。

在研究数据可获取的情况下, 行为分析法能够模拟降雨的季节性变化规律和用水的季节性变化特点。但是, 在确定将行为分析法作为模拟方法后, 研究者将面临新的选择, 即使用 YAS 取水模式还是 YBS 取水模式? 考虑到 YAS 取水模式具有较为保守的取水估计值, Fewkes 和 Butler (2000) 选择该模式用于雨水利用系统的研究当中。但是, Liaw 和 Tsai (2004) 认为 YBS 取水模式要优于 YAS 取水模式, 因为在考虑到雨水集蓄利用系统的时间可靠性时, YBS 取水模式具有一定的优势。很显然, 对于行为分析法取水模式的选择应基于研究者的研究目标来确定。

4.13 模拟步距

行为分析法中的步距依据数据的可获性和研究的精度要求进行选择。研究者选择了各种步距展开研究, 例如 1 小时 (Fewkes 和 Butler, 1999)、1 天 (Fewkes, 2001)、3 至 10 天 (Liaw 和 Tsai, 2004) 和 1 个月 (Jenkins 等, 1978)。

就行为分析法而言, 使用的时间步距越小则模拟的精度越高 (Fewkes 和 Butler, 2000)。但是, 详细的降雨数据往往缺乏或者不可获取, 从而无法满足研究所需。在理想状态下, 研究者所用的降雨数据应当是低成本的、准确的和小步距的。

许多研究者对行为分析法应采用的步距提出了见解, 具体内容见表 4-6。

表 4-6 行为分析法降雨数据步距选择

参考来源	主要研究结论
Heggen (1993)	采用 YAS/YBS 运算法则, 比较不同步距下新墨西哥地区雨水收集利用系统的时间可靠性。使用 7 年日降雨数据(步距为一天), 采用 YAS 和 YBS 方法模拟的结果几乎没有差别。以步距为一天的 YAS 模型模拟结果为基准, 与步距为二、三、七、十四和三十一天的模拟结果进行比较, 发现随着步距增加模拟精度不断下降。七天步距的模拟结果与一天步距的模拟结果相差 50%, 而一个月步距的模拟结果与一天步距的模拟结果相差 90%以上。因此, 在降雨数据可获得的情况下, 应当尽量使用一天步距作为模型模拟的时间间隔。
Chu 等 (1997)	考察了台湾地区雨水收集利用于冲厕的系统。使用的降雨数据时长 84 年, 步距分别为一、三、五、七和十天。步距为一天的模拟结果与实际情况十分接近。由于使用 YAS 方法有损于雨水利用系统实际的供水能力, 研究者建议使用 YBS 方法进行模拟。
Thomas (2002a)	比较了四个地区(分别在肯尼亚、曼谷、巴拿马和巴西)日步距和月步距模型模拟结果。结果表明, 对于大型蓄水池, 不同步距的使用对最终的模拟结果影响很小; 但对于小型蓄水池, 使用月步距进行模拟会出现很大的误差。
Liaw 和 Tsai (2004)	使用一、三、五、七和十天为步距, 分别采用 YAS 和 YBS 方法对台湾地区的雨水利用系统进行模拟。结果表明, 步距越大则模拟精度越低, 小型蓄水池的差异表现更为明显。研究者建议应当尽可能使用一天作为模拟的步距。
Mitchell (2007)	研究了澳大利亚地区各种类型雨水收集利用系统存储量和取水量之间的关系, 以及步距、初期蓄水池存量和模拟时间长度等对模拟精度的影响。研究者使用四种时间间隔作为步距, 即 6 分钟、30 分钟、3 小时和 24 小时。以 YAS 方法模拟的期限 50 年、步距 6 分钟的模拟结果作为基准值。当蓄水池容积小于 6300L 时, 各种模拟结果的差别在 1%以内, 表明大蓄水池雨水系统的模拟模型对步距的大小并不敏感。与其他研究者的结论相同, 采用 YAS 方法模拟的系统供水量偏低, 而采用 YBS 方法模拟的系统供水量则偏高。

理论上, 研究者可以使用任何步距开展雨水利用的研究。但从表 4-6 中可以看出, 在实际研究当中, 使用较多的步距集中于从 1 分钟到 1 个月。评价模型优劣的标准应当是其解释现实的能力。随着步距的逐渐减小, 对雨水利用系统模拟的数据要求会迅速提高。因此, 在能够解释现象并获得准确模拟结果的前提下, 使用尽可能大的步距是一种合理的选择。

采用日步距进行模拟即意味着所使用的降雨数据和需用水数据是以 1 天为单位的。北京市雨水利用研究所需的日步距数据比较容易获得。首先, 北京市各区县气象局有多年日降雨数据可供研究者使用; 其次, 北京市已经开展了多次居民用水消费的调查, 人均日用水量是一个经常使用的指标, 这一指标值可以通过很多途径获得。但是对于步距小于 1 天的降雨数据或者用水数据, 在中国几乎无法得到准确的资料。

相对于日步距或更小步距的模型而言, 月步距模型所用的数据更容易获得, 研究成本也大大降低。但是, 使用月步距数据得到的研究结果往往缺乏可靠性,

或者仅适用于一些大型的蓄水设施，例如水库等。但屋面雨水集蓄利用系统是微小型的雨水利用系统，配备的蓄水池一般都不大。因此，使用月步距数据对其进行模拟一般不能获得理想的结果。

农业生产用水与城市居民生活用水存在着很大差异，用水量和灌溉频率由农作物的生长周期来确定。农作物的灌溉制度是指作物播种前（或水稻栽秧前）及全生育期内的灌水次数、每次的灌水日期和灌水定额。灌水定额是指一次灌水单位灌溉面积上的灌水量，各次灌水定额之和，叫灌溉定额。到目前为止，北京还没有发布权威公认的灌溉制度。这样，设施农业雨水集蓄利用系统水文性能模拟中农业用水量的确定就缺乏依据。

设施农业可种植的农作物类型很多，而不同农作物的生长发育及其灌溉规律也千差万别。为此，以一种具有一定地方代表性的农作物的灌溉规律来确定用水量是一种较为合理的选择。在实际应用中，用户可根据具体的农作物类型对农业用水量进行调整。本文采用的具有地方代表性的设施农业农作物为黄瓜，并将黄瓜的灌溉规律作为用水量确定的依据。为此，本人与北京市农业技术推广站共同合作，于 2008 年对设施农业黄瓜生产的灌溉规律开展了试验研究，主要研究成果见表 4-7。

表 4-7 黄瓜微灌试验记录表

灌溉日期	月	4			5			6			7	休耕期
	日	5	18	28	10	20	2	12	21	2		
灌溉量 (m ³ /亩)		10	9	9	10	10	11	11	12	12	0	
灌溉日期	月	7			8			9				
	日	30	5	15	25	2	10	15	20	25	30	
灌溉量 (m ³ /亩)		6	6	5	5	8	8	8	8	8	8	

从表中可知，设施农业黄瓜灌溉具有一定的规律性。首先，4-6 月份灌溉频率较低，平均约 10 天灌溉一次，期间每次灌水量约为 10m³/亩，日均灌溉水量 1.1m³/亩。而 7-9 月份灌溉频率明显增加，约为 6 天一次，每次灌溉量约为 7m³/亩，日均灌溉水量 1.2m³/亩。可见，黄瓜的灌溉频率和灌溉量存在一定的季节性变化规律。为了研究简便同时又尽可能不影响模拟结果，本文采用灌溉频率为 6 天，每次灌溉量为 7m³/亩来确定设施农业雨水集蓄利用系统的用水量；另外，在设施农业黄瓜生产过程中，每年都有一个休耕期，休耕期间农业用水量为零。因此，休耕期的安排对雨水集蓄利用系统的模拟结果就会产生影响。为了高效利用雨季的雨水，应尽可能的将休耕期控制在干旱少雨季节。在本文中，假定休耕期被安排在每年的 1 月份。由于北京 1 月份无降雨，休耕期对设施农业雨水集蓄利用系统模拟结果的影响可忽略不计。

综上所述，步距小于 1 天的模型对数据要求很高，将大大增加模型的复杂程度和数据获取的难度；而步距为 1 个月的模型对数据的要求较低，但模拟的

精度无法达到研究的要求。因此，在本文的实证研究中，雨水集蓄利用系统的水文性能模拟采用的步距为 1 天。

4.14 降雨数据

确定模型步距后，需要根据选取的步距获得足够的历史降雨数据。表 4-1 对雨水利用研究降雨数据时间尺度的要求表明，历史降雨数据时长至少要大于 10 年，才能使模型模拟的结果具有足够的可信度。另外，就距离问题，本文采用雨水集蓄利用系统距离气象站最近的原则。

北京市降雨历史数据可以从北京市气象局和国家气象局获得。在对单个雨水集蓄利用系统的水文性能和经济性能进行评价时，本文采用北京气象站 1989 年至 2008 年共 20 年日降雨数据。表 4-8 对北京市气象站及降雨数据进行了详细描述。

表 4-8 北京气象站信息表

参数	值
站名	北京气象站
站号	54511
地理位置	39°48' N 116°28' E
海拔高度	31.3m
数据类型	20-20 时降水量 (0.1mm)
记录时长	1989-2008 年
数据完整性	无数据缺失
年均降雨量	504.1mm/年
年降雨量变动幅度	266.9-813.2mm/年
单日降雨最大值	156.2mm

图 4-8 是北京气象站 1989 年至 2008 年降雨量变动情况。不难看出，北京年际间降雨量变化很大，其中最最小年降雨量（1999 年）不到最大年降雨量（1994 年）的 1/3。降雨量年际变化大毫无疑问将会影响到雨水集蓄利用的集雨效率。另外，北京市年内降雨分布也极不均匀，每年 5-9 月份的降雨量占全年降雨量的绝大多数，有很多年份该时期的降雨量可占到年降雨量的 90%以上。在这种降雨模式下，如果仅以月或者年为步距对雨水集蓄利用系统进行模拟，势必会得出与事实截然不同的结果。

在对雨水集蓄利用进行空间化研究中，需要多点的历史降雨资料进行空间插值，实现历史降雨资料的空间连续性。因此，在本论文的空间化研究中，采用了北京市观象台、密云、怀柔、通县等 11 个气象站以及天津气象站和河北 3 个气象站的历史降雨资料进行模拟。受各气象站的建站时间及台站变动等因素影响，部分站点的历史降雨资料的时间跨度受到一定限制。在用于空间插值的

气象站中，河北泊头气象站的记录时间最短，仅 13 年（1996-2008 年）。当然，这仍然符合本文对历史降雨资料时长的需求。

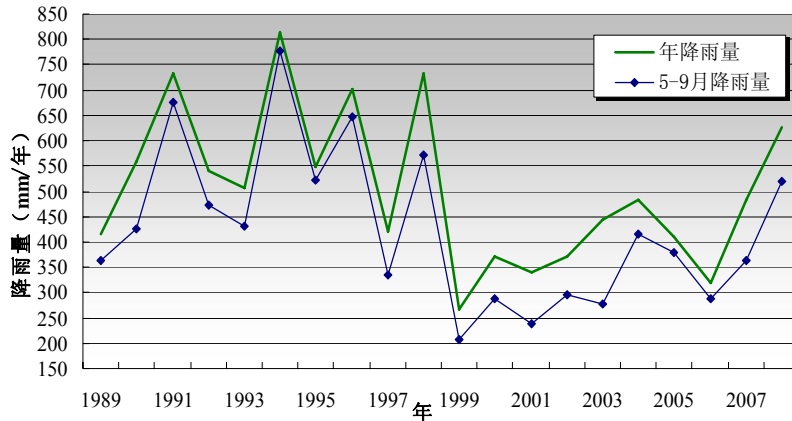


图4-8 北京气象站1989-2008年年际年内降雨量变化图

利用历史降雨资料进行雨水集蓄利用系统的模拟可能会面临的一个问题是未来的气候变化。为了弥补这一缺陷，少数研究者也试图将降雨量的预测纳入到预测模型当中。但是，先不论对降雨变化的预测是否准确，大多数预测研究的时间尺度（年或者月）与本论文采用的步距（天）之间无法达到统一。因此，对未来降雨变化的预测即使存在理想的结果也无法采用。基于此，本论文不再考虑未来气候变化可能对模型模拟结果所带来的影响，即假设模拟期内的降雨规律与历史降雨规律没有发生明显的差异。

4.15 用水量

4.15.1 居民生活用水量

在城市中，建筑物类型多种多样，例如厂房、商业用房、办公室、学校、体育馆和住宅楼等。这些建筑物内的实际用水情况千差万别，这加大了获取用水数据的难度。本论文对屋面集雨利用系统的模拟将限定在城市家庭住宅这一建筑类型，主要出于以下考虑：

1. 在北京的城市建筑物中，城市住宅占有很高的比例，以城市住宅屋面雨水集蓄利用系统为研究对象具有代表性。根据 2008 年中国城市建设统计年鉴，北京 2007 年居住用地 372.28km^2 ，占当年城市建设用地的 28.87%；
2. 北京居民家庭生活用水在城市用水中占有很高的比例。根据北京市 2009 年统计年鉴，2008 年北京市供应自来水和自备井水共 12.62 亿 m^3 ，其中居民家庭生活用水 5.51 亿 m^3 ，占供水总量的 43.6%。因此，研究雨水替代居民家庭自来水的潜力很有价值；
3. 居民家庭生活用水量数据比较容易获取，且家庭用水量变化幅度一般不

会很大,这有利于保证模拟结果具有较高的精度;

4. 住宅屋面集雨利用系统已经在国际上得到了广泛应用,并取得了很多相关的研究成果,这有利于本论文研究工作的深入和研究结果的对比。

为合理利用水资源,加强城市供水管理,促进城市居民合理用水、节约用水,中华人民共和国建设部于2002年制定了《城市居民生活用水量标准》。该“标准”主要依据1998-2000年中国108个城市居民用水调查制定,具有很高的可信度。另外,北京市“市区居民住宅用水现状与趋势研究”调研组也于2004年开展了居民用水的入户调查。两次居民生活用水调查的主要结果见表4-9和表4-10。

表 4-9 城市居民生活用水量标准及统计表

地域分区	日用水量标准	三年均值	2000 年均值	A 类均值	B 类均值	C 类均值
二	85~140	113	114	66	98	187

注:1.资料来源于建设部《城市居民生活用水量标准》;2.地域分区二区包括北京、天津、河北、山东、河南、山西、陕西、宁夏、甘肃;3.A、B、C三类用水户为:A类指室内有取水龙头,无卫生间等设施的居民用户;B类系指室内有上下水卫生设施的普通单元式住宅居民用户;C类系指室内有上下水洗浴等设施齐全的高档住宅用户。

表 4-10 家庭生活人均日用水量构成调查统计表

分类	北京 (%)	中国 108 个城市					
		拘谨型	(%)	节约型	(%)	一般型	(%)
冲厕	25.93	30	34.8	35	32.1	40	29.1
淋浴	40.82	21.8	25.3	32.4	29.7	39.6	28.8
洗衣	21.63	7.23	8.4	8.55	7.8	9.32	6.8
厨用	5.21	21.38	24.8	25	23	29.6	21.5
饮用	2.16	1.8	2.1	2	1.8	3	2.2
浇花	0.16	2	2.3	3	2.8	8	5.8
卫生	4.08	2	2.3	3	2.8	8	5.8
合计	100	86.21	100	108.95	100	137.52	100

注:北京市数据来自北京市市区居民住宅用水现状与趋势研究调研报告,其它数据来自建设部《城市居民生活用水量标准》;单位 L/人·d。

从表 4-9 可知,不同城市、不同居民家庭的生活用水量存在较大的区别。北京作为国内社会经济发展水平较高的城市,其居民生活用水水平要远高于分区二内的其它城市。因此,北京市居民生活用水水平应取用“标准”中的上限值为宜。另外,据调查,城市中 B 类家庭的比例高达 76%左右,B 类用水水平家庭是城市中用水人群的主体。另外从表 4-10 中可以看出,北京市居民家庭生活用水构成与其它城市存在一定的差别,其中冲厕用水量占家庭用水总量的比例明显偏低。在本论文的模拟过程中,住宅屋面收集的雨水用于家庭冲厕。但目前国内对家庭生活用水的构成变化缺乏预测研究,因此,本文假定模拟期内家庭生活用水构成比例没有发生变化。

根据《城市居民生活用水量标准》，北京市 2000 年居民用水量平均值为 127L/人·d，其中 B 类均值为 103L/人·d。“标准”以 B 类典型调查均值为基点计算得出北京市居民生活用水标准的上限值为 140L/人·d。这一上限标准与一些发达国家城市的居民生活用水量水平仍有一定的差距（见表 4-11）。

表 4-11 典型城市居民生活用水量调查表

国别	城市名	居民生活用水量(L/人·d)	资料年份
日本	东京	190	1998
德国	柏林	117	1999
	法兰克福	171	1999
美国	洛杉矶	308	1996
	费城	341	1996

综合以上资料，城市居民家庭用水量是随着城市社会经济发展和人民生活居民水平的提高而不断提高的一个变量。但为了简化在住宅屋面雨水集蓄利用系统性能评价过程中的计算，本论文采用 2000 年北京市 B 类家庭的用水水平（103 L/人·d）和北京市居民生活用水标准的上限值（140L/人·d）的均值作为模拟期内的居民生活用水水平，即 121.5L/人·d。这样，模拟期内的人均日冲厕用水量为 31.5 L/人·d。

4.15.2 设施农业用水量

设施农业雨水集蓄利用系统模拟采用黄瓜为代表作物，其用水量根据表黄瓜微灌试验结果来确定，即在黄瓜生长期，灌溉频率为 6 天 1 次，每次灌溉量为 7m³/亩，设施农业休耕期假定为每年 1 月份（休耕期的安排可根据实际情况进行调整）。这样，设施农业黄瓜种植的年用水量约为 391m³/年·亩（335*7/6）。

4.16 集雨面面积

在雨水集蓄利用系统的模拟中，集雨面面积是一个非常重要的考察因素。一方面，集雨面面积的大小关系到可收集的雨量大小，从而直接影响到蓄水池容积大小的确定；另一方面，人均或地均集雨面面积的大小将直接影响雨水替代其它水资源的效率。

对于设施农业雨水集蓄利用系统而言，设施农业集雨面面积与设施内的播种面积存在较固定的比例关系，即地均集雨面面积的大小是相对固定的。但是，住宅屋面雨水集蓄利用系统的情况就比较复杂。在北京市的多数住宅中，同一屋顶下的家庭户往往是多户，尤其是在中高层住宅建筑中，人均住宅屋顶面积非常小。因此，这就涉及到如何分配屋顶面积的问题，即人均集雨屋顶面积问题。举例来说，在一个 10 层高的住宅建筑中，假设其屋顶总面积为 600m²，如

果将收集的雨水用于一个 4 人家庭的生活用水,则人均集雨屋顶面积为 150m^2 ,而如果将收集的雨水用于 2 个 4 人家庭,则人均集雨屋顶面积为 75m^2 。以此类推,收集雨水的分配方式不同,则人均集雨屋顶面积也就不同。通常来说,人均集雨屋顶面积越大,则雨水替代自来水的效率会越高,但对雨水收集效率和雨水集蓄利用系统的经济性会产生怎样的影响还需要进一步的研究来确认,这将在本文的后续章节中展开论述。

4.17 本章小结

收集和利用雨水的能力大小是判断雨水集蓄利用系统优劣的标准之一。建立科学的雨水集蓄利用性能评价方法是准确评价雨水集蓄利用效率的前提。本章从探讨数学模型入手,辨析了雨水集蓄利用模拟所要解决的关键问题及模拟的目标。通过分析雨水集蓄利用水文性能模型模拟的要素类型及数据要求,重点介绍了蓄水池的流量过程及模拟理论和方法。经分析比较,确定了本文水文性能模拟的主要方法,即行为分析法中的 YAS 和 YBS 取水模型。行为分析法通过对蓄水池流量过程顺序的假定,可以对蓄水池的入流、出流和溢流过程进行较精确的模拟,模拟的精度高低最终由数据步距来决定。根据本文研究的精度要求和数据获取的难易程度,选择了合适的模型模拟步距,并根据模拟的步距要求对本文使用的降雨数据和用水数据进行了深入探讨。总之,本章介绍的理论与方法能够位科学评价雨水集蓄利用系统的能力奠定基础,从而为雨水集蓄利用的经济性能评价提供重要的参数,为雨水集蓄利用系统的规模优化奠定了基础。

第五章 雨水集蓄利用经济评价及空间化研究方法

本章内容可分为两大部分：一是阐述成本效益评价的理论和方法，并进而构建雨水集蓄利用系统成本效益评价体系；二是在单个雨水集蓄利用系统水文性能及成本效益评价的基础上，开展雨水利用的空间化扩展研究。仅从雨水集蓄利用系统的水文性能评价仍然无法判断系统的优劣。这是因为，即使一个系统具有非常良好的水文性能，即具有很高的雨水收集利用效率，但如果其成本远远高于传统制水方式的成本，那么并不能称其为严格意义上的好系统，也无法将其广泛应用。因此，考量雨水集蓄利用系统的经济性是一个非常重要的评价环节。另一方面，如果对雨水集蓄利用系统的研究仅仅局限于单个系统而不能将研究成果向整个城市拓展，那么，这样的研究结果缺乏其应有的价值。因此，本文也力图借助 GIS 空间分析的一些方法，将单个雨水集蓄利用系统的研究成果向整个城市拓展，论证城市雨水集蓄利用的潜力，并论述为系统的推广应用和管理提供一个可视化信息平台的可行性。

5.1 水利工程经济评价方法概述

对水利工程技术的经济合理性进行定量评价是技术经济分析论证很重要的内容。技术经济评价有两种：一是微观技术经济评价；二是宏观技术经济评价。

宏观和微观技术经济评价在方法上主要存在以下区别：（1）评价立场不同：微观技术经济评价计算方法是站在局部利益主体（如企业、行业、地区）的立场上，对技术方案本身所发生的经济利益关系进行分析计算；宏观技术经济评价计算是站在社会或国家的立场上，对技术方案所发生的内外部经济利益关系进行分析计算。（2）评价目的不同：宏观技术经济评价可为决策提供科学依据；微观技术经济评价只有在符合国家利益的前提下，可为决策提供科学依据；一般只能为调节国家和局部利益关系提供依据。（3）经济含义不同：如税收对宏观技术经济评价来说是收入不是费用，而对微观来说是费用。（4）计算范围不同：微观技术经济评价只考虑局部利益主体企业本身的直接经济效益，而宏观还要考虑由它引起的间接经济效益。

另外，这两种评价有着共同的特性：（1）静态和动态：在宏观和微观技术经济评价方法中，这两种计算形式都被采用。实际上，考虑时间因素的动态计算形式被较多采用，动态计算有“现值法”和“时值法”两种时间因素折算方法。（2）总值和年值：总值是指整个计算期或寿命期内的总经济量，年值是指整个计算期或寿命期内每年平均的经济量。对于寿命期不等的多方案经济比较，以采用年值计算形式为好；如果用总值计算，则要有相同的计算期或寿命期。

用于水利工程的经济评价方法很多，Ashley 等人（2004）将其分为三大类，

即成本效益分析法 (Cost benefit analysis)、社会成本效益分析法 (Social cost benefit analysis) 和成本效果分析法 (Cost effectiveness analysis)。Herrington (2006) 认为对水利工程的系统评价应当包含技术、经济、社会和环境等要素。他继而描述了一系列适用于不同工程规模的经济评价方法。其中, 适用于微小型水利工程的方法包括成本效益法、成本效果法、净现值法 (NPV)、内部收益率法 (IRR)、回收期法和资源总成本测试法 (total resource cost test)。为了得出不同家庭节水措施的成本, Grant (2003) 采用了平均边际成本法。Fane 等人 (2003) 则采用了平准化单位成本法 (levelised unit cost approach) 对比分析了各种节水措施的成本与效果。

就雨水集蓄利用系统而言, 可以采用微观或宏观经济评价方法对其进行评价, 这取决于评价的不同立场。在本论文中, 对屋面雨水集蓄利用系统的经济评价将从用户的利益出发, 采用微观经济评价方法; 而对设施农业雨水集蓄利用系统的经济评价将分别采用宏观和微观的方式, 这是由北京市设施农业雨水集蓄利用系统的自身特点所决定的, 本章后续内容将进行具体的解释。

5.2 雨水利用系统微观评价研究综述

表 5-1 对国际上已经开展的一些具有代表性的雨水利用系统微观经济评价研究进行了综述。综述中几乎已经涵盖了现有雨水利用研究的方法、范围、研究深度及其局限性等。

表 5-1 雨水利用系统微观经济评价研究综述表

研究者	研究目的	微观经济评价细节
Brewer (2001)	对 3 个雨水收集利用系统示范点进行了为期 12 个月的观测。工程回收期估计为 30 年。	<u>要素</u> : 初期投资 (即设备购买和安装费)、维护费 (水泵置换)、运行费 (电费); <u>方法</u> : 年自来水费节约, 回收期法; <u>评论</u> : 假设水费、电费和系统运行与观测年保持一致; 未考虑折现率。
Dixon (1999)	研究污水和雨水共用于冲厕和灌溉的系统。模型步距为 1 小时, 模拟可利用和节约的水量。根据不同的假设条件, 系统回收期从 5 年到大于 60 年不等	<u>要素</u> : 初期投资、运行费用; <u>方法</u> : 折现率和回收期法; <u>评论</u> : 未考虑维护费用。电费、水费以及系统水文性能不变。折现率设定为 6%。
Mustow (1997)	研究居民住宅、办公室、旅馆等建筑物雨水收集利用于冲厕的系统。回收期跨度从 3 年 (旅馆) 到 122 年 (办公室)。其中, 家庭雨水系统的回收期为 29-32 年。	<u>要素</u> : 初期投资、运行和维护费用 (假定两项费用的年支出为 5-40 英镑); <u>方法</u> : 回收期法; <u>评论</u> : 假设雨水利用率为 50%, 日均降雨量 2.3mm, 水费不变, 家庭用水量不变; 未考虑折现率。
Grant	对各种节水措施 (不同的冲厕装置、雨	<u>要素</u> : 初期投资、维护费用 (水泵 10 年更换一次)

(2006)	水利用、污水利用等)进行成本效益分析。雨水利用不是效益成本最优的措施,其成本回收期超过 20 年。	和运行费用(电费); <u>方法</u> :净现值和回收期法; <u>评论</u> :维护费用(5 英镑/年)和水费不变,雨水利用系统运行保持不变。
Shaaban, Appan (2005)	研究马来西亚一家庭雨水利用系统。使用日步距对观测结果进行模拟。雨水收集成本估计为 3.66 元/m ³ ,与自来水水费几乎等同。	<u>要素</u> :初期投资、运行成本(电费); <u>方法</u> :雨水收集成本根据初期投资、系统寿命、运行成本和预期收集雨水量来确定; <u>评论</u> :仅调查了两个雨水存储池。假设条件为:运行成本、水费保持不变,维护费用为零;未考虑折现率。
Dominguez (2001)	调查了墨西哥城市大型集雨屋面雨水利用系统,使用日步距模型进行模拟,探讨经济效益最优的蓄水池容积。	<u>要素</u> :初期投资,但仅考虑蓄水池投资; <u>方法</u> :比较不同容积蓄水池的成本和可节约的自来水水费; <u>评论</u> :未考虑运行和维护成本,未使用折现率,假定电费和水费不变。
Ghisi, Oliveira (2007)	采用日步距模型模拟巴西家庭雨水和污水利用以节约自来水的潜力。分别对雨水、污水以及雨污合用系统进行了效益评价。	<u>要素</u> :初期投资、运行费用; <u>方法</u> :使用净现值和回收期方法; <u>评论</u> :净现值方法中使用了各种折现率;模型中未考虑维护费用。
Liaw, Tsai (2004)	采用日步距模型模拟台湾各种蓄水池容积(1-20m ³)的雨水系统的供水能力。研究目的是探讨屋顶面积和蓄水池容积之间的最优组合,以满足特定的供水需求。	<u>要素</u> :初期投资、屋面改造投资; <u>方法</u> :生产理论用于分析屋面和蓄水池的最优成本效益组合,边际替代率用于确定最优蓄水池容积; <u>评论</u> :模型假设条件:无运行和维护费用,无自来水使用费;成本分析更加关注系统的供水可靠性而不是效益最优。
Coombes (2003b)	调查澳大利亚家庭雨水收集利用系统。雨水用于冲厕、洗浴和户外灌溉等。雨水收集的成本约为 0.3 美元/m ³ ,当地的自来水费和污水处理费分别为 0.94 美元/m ³ 和 0.20 美元/m ³ 。	<u>要素</u> :初期投资、维护费用(水泵更换费 200 美元/10 年)、运行费用(电费); <u>方法</u> :雨水收集效益和成本净现值; <u>评论</u> :假定自来水水费和污水处理费保持不变;雨水用于洗浴的假设条件不适用于很多地区。
MJA (2007)	分别从住宅社区和户主的角度探讨了澳大利亚城市家庭雨水系统的成本效益。调查的蓄水池容积分别为 2、5 和 10m ³ 。单位雨水收集的成本约为 1.41-12.30 美元/m ³ 。	<u>要素</u> :初期投资、水泵置换费(650 美元/10 年)、其它维护及运行费(20 美元/年); <u>方法</u> :单位成本法; <u>评论</u> :假设水费和污水处理费不变、维护运行费用固定不变。YBS 运算法会高估系统的供水能力。

表中的研究者大部分都来自一些雨水利用发展较发达的国家或地区。其中,澳大利亚的雨水利用经济评价研究较为成熟和综合。而西欧和美国研究者首要

关注的是雨水利用系统的节水效率，其次才是系统的微观经济性。因此，缺乏研究的深度。同样，英国的雨水利用研究也更加关注其水文性能，对其微观经济性的研究十分稀少，直到最近几年才出现了这方面的研究报告。

从以上已经开展过的研究中可以看出，研究者纳入到雨水系统模型中的成本要素还远不全面，通常只考虑一些非常明显的成本。例如水泵置换成本和水费等。雨水集蓄利用系统一般都包括一些共同的安装、运行和维护过程。但到目前为止，对于系统中哪些成本要素应当纳入成本核算中以及应当如何量化还没有形成统一的认识，现有研究中所使用的费用值往往差异巨大。为了简化研究，往往假设一些成本是固定不变的，例如水费、污水处理费和电费等。但事实上，这些费用随着时间的推移一般都会发生很大的变化。就拿北京市来说，水费从 1996 年到 2004 年共经历了 8 次上调，从最初的 0.6 元/m³ 上升到 2004 年的 2.9 元/m³，而同期的污水处理费也从无至有，逐渐上调。

更为重要的是，在所有已开展的研究中，研究者们似乎忘记了雨水利用系统所有组成零部件的使用寿命问题。仅有部分研究考察了水泵以及蓄水池的使用寿命。很显然，这与很多零部件在系统整个寿命期内需要更换或维修不止一次的事实是不相符的。例如，水泵、电磁阀、浮动阀和开关等在 15 年内至少需要更换一次，地上蓄水池的使用寿命一般不超过 30 年，地下蓄水池、过滤器和管道的使用寿命一般不超过 60 年。但是，已有的很多研究都假定这些零部件是可以永续利用的。很显然，这样的假设对最终的经济评价结果会产生很大的影响，因此，完善雨水利用系统的微观评价方法很有必要。

但是，由于城市雨水收集利用系统应用的历史较为短暂。相关经验和数据的空缺使人们对系统中各零部件的维修成本等很难做出准确的预测和判断。这是目前开展雨水利用微观经济评价研究的最大难点。

5.3 全成本评价法

仅仅考虑初期投资和建设费用并不能真实反映雨水收集利用系统使用期内的所有成本。因此，系统使用后的运行和维护费用等也必须纳入到成本核算当中。换句话说，只有建立全成本评价方法（whole life costing approach）才能准确评价系统的效益和成本。

全成本评价法存在多种定义。全成本评价强调鉴别和包括雨水利用工程在使用期内所有相关的货币成本。也有一些研究者将非货币成本，即环境成本和社会成本等，纳入到全成本评价当中。

Woods-Ballard (2004a) 认为全成本评价法就是要辨别未来的所有成本，并将其转化为净现值。这一方法非常适用于运行维护具有周期性的工程的总成本预测。他将全成本分析法分成两种类型，即宏观和微观全成本评价。宏观评价包括与工程相关的所有社会成本和效益，而微观评价仅包括工程本身的实际成

本和收益（见图 5-1）。

成本分为现金和非现金成本。现金成本又可以再分成直接和间接成本。直接现金成本指与工程直接相关的成本，例如初期投资、运行维护费以及处理费等。间接现金成本是指拥有某一工程设施后所需要承担的经济后果，例如租用备用设备的费用。

非现金成本是指工程建成运行后给社会带来的负经济效果。与雨水利用相关的非现金成本可能包括洪水和水污染事件。当然，雨水利用系统的建成使用也可以给社会带来收益，例如为民众提供娱乐设施或者有利于生物多样性等。

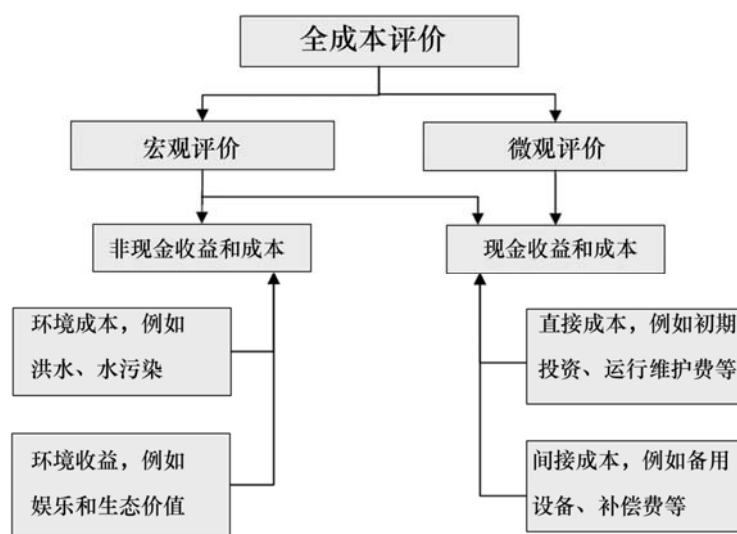


图5-1 宏、微观全成本评价法

5.3.1 全成本评价法的优势

采用全成本评价法对雨水集蓄利用系统经济性评价的优势表现在：

- 能充分理解雨水集蓄利用系统长期的投资，而不仅仅是初期投资；
- 通过对系统运行过程中各种费用的预测，有助于对系统风险进行有效的评价和管理；
- 有利于降低系统运行过程中的不确定性，减少总成本。

5.3.2 全成本评价法的不足

采用全成本评价法也存在很多不足之处，具体而言有以下几个方面：

- 在很多案例中，难以界定雨水利用系统运行维护费用的承担者；
- 很多关键因素存在着不确定性，例如系统的真实寿命、运行和维护费用、折现率以及经济波动等；
- 相关数据的获取难度大，且一般费用较高；

- 当进行宏观评价时,雨水利用的非现金收益和成本目前尚缺乏科学的界定和量化方法。

尽管如此,作为一种全面审视工程项目成本效益的评价方法,全成本评价法仍是众多评价方法中能较准确模拟现实的一种方法。因此,本论文将采用这一方法对北京市雨水集蓄利用系统的经济性进行研究。尽可能的将雨水利用系统建立和运行过程中的成本和收益包含在模拟模型中,以求评价过程与结果更加接近实际情况。其中,屋面雨水集蓄利用系统经济性能评价从用户利益角度出发,采用微观全成本评价法,但不涉及宏观方面的评价。这是因为当前城市屋面雨水利用系统在全世界范围内得到了广泛应用,对其进行宏观评价已不是当前研究的重点;另一方面,对设施农业雨水集蓄利用系统的经济性能评价将分别从农户和政府的角度展开研究,即同时采用宏观和微观全成本评价法,原因在于:

1. 投资主体。在北京,相对于农户收入而言,设施农业雨水集蓄利用系统的初期投资十分高昂。因此,初期投资由政府 and 农户按比例共同出资。这样,仅仅从政府或农户角度对工程的成本效益进行评价都是不完整的;
2. 收益。长期以来,北京水资源短缺现象加剧,地下水水位呈持续下降趋势。因此,雨水收集利用于农业生产可以给农户和社会带来不同的效益。首先,地下水在北京农业生产用水构成中占有极高的比例,例如 2003 年农业地下水用水量占当年农业用水总量的 90%以上。因此,地下水位的持续下降威胁着农业用水安全,增加了农业用水成本;其次,北京每年因地下水下降所遭受的经济损失巨大。毫无疑问,农业雨水利用的开展将有助于减缓地下水的耗竭,给农户和政府带来不同的利益。因此,对雨水集蓄利用系统的成本效益分析也需要从宏观和微观的角度分别把握。

5.4 评价方法确定及要素选择

如上所述,本论文将采用全成本分析法全面分析雨水集蓄利用系统的各项成本。在确定了成本和收益后,采用效益成本法来判断雨水集蓄利用工程的经济可行性。按照是否考虑时间因素对货币价值的影响,效益成本法可分为静态和动态两种形式,静态效益成本法的计算方法为:

$$BV = \sum_{t=1}^{t=N} B_t \quad (5-1)$$

$$CV = I + \sum_{t=1}^{t=N} C_t \quad (5-2)$$

$$\alpha_1 = \frac{BV}{CV} \quad (5-3)$$

式中, CV 和 BV 分别指总成本和总收益, I 为初期投资, B_t 和 C_t 分别为第 t 年的收益和成本, N 为经济评价末年, α_1 指成本效益比, α_1 大于 1, 则项目可行, 反之, α_1 小于 1, 项目不可行。

动态效益成本法的计算公式为:

$$NBV = \sum_{t=1}^{t=N} \frac{B_t}{(1+r)^t} \quad (5-4)$$

$$NCV = I + \sum_{t=1}^{t=N} \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (5-5)$$

$$\alpha_2 = \frac{NBV}{NCV} \quad (5-6)$$

式中, NCV 和 NBV 分别指成本和收益净现值, r 为折现率, α_2 为动态效益成本比值, 其它字母含义与静态成本效益法中的相同。

由于不同雨水集蓄利用系统的成本收益各不相同, 因此, 具体评价要素的选取也各不相同。

住宅屋面雨水集蓄利用系统微观经济性分析需要纳入的要素包括:

- 安装总成本 (即初期投资);
- 减少自来水使用节约的费用 (包含水资源费和污水处理费);
- 维修费用;
- 运行费用;
- 零部件使用寿命及置换费用;
- 系统使用寿命期;
- 折现率 (用于动态效益成本法);

设施农业雨水集蓄利用系统的微观经济性分析需要的要素包括:

- 安装总成本 (按照投资比例计算);
- 减少抽取地下水用电节约的费用;
- 增加农业生产空间所带来的额外收入 (适用于室外封闭蓄水池);
- 维修费用;
- 运行费用;
- 系统使用寿命期;
- 零部件使用寿命及置换费用;
- 折现率 (用于动态效益成本法);

设施农业雨水集蓄利用系统的宏观经济性分析需要的要素包括:

- 安装总成本;
- 减少抽取地下水用电节约的费用;
- 增加农业生产空间所带来的额外收入 (适用于室外封闭蓄水池);
- 维修费用;

- 运行费用；
- 零部件使用寿命及置换费用；
- 减少农业水利设施投资节约的费用；
- 减少地下水超采而减少的经济损失；
- 系统使用寿命；
- 折现率（用于动态效益成本法）；

5.5 数据收集

5.5.1 数据来源

本文全成本效益成本评价研究的数据主要来源于以下几个方面：

- 相关的研究文献和著作；
- 雨水利用系统零部件供应商；
- 参与本地雨水集蓄利用系统建设和使用所积累的经验；

全球性的经济危机或者战争等的发生可能会严重影响雨水集蓄利用系统的成本和效益，从而使预测结果完全偏离实际情况。因此，需要明确指出，本文对雨水集蓄利用系统经济性评价所隐含的假设前提是，在模拟期内世界经济状况不会发生大的变动。

5.5.2 系统设计寿命期

系统设计寿命期是指一个系统履行其功能的最短时期。雨水集蓄利用系统设计寿命期包含两层含义：其一是系统所有者所期望的系统使用年限；其二是系统内不同零部件的使用寿命，这一点对于系统全成本分析十分重要。

许多雨水利用系统的零部件都被预期具有相当长的使用寿命。从前述文献综述中可知，人们对雨水利用系统零部件的使用寿命知之甚少。大致是因为这些零部件的使用寿命往往都长达十几年甚或几十年，但现代雨水利用系统的应用时间短，即使存在也只有极少数系统的使用年限达到其寿命期。因此，关于零部件使用寿命的经验和数据都是相当缺乏的。对系统及零部件使用寿命的估计往往是基于有限的研究案例或者直接根据制造商或供应商的估计。

系统零部件的维修和置换对系统的成本效益有显著的影响，因此需要详尽了解它们的使用寿命。图 5-2 是从相关文献以及雨水利用产品生产商和供应商处获得的雨水集蓄利用系统主要零部件的使用寿命。

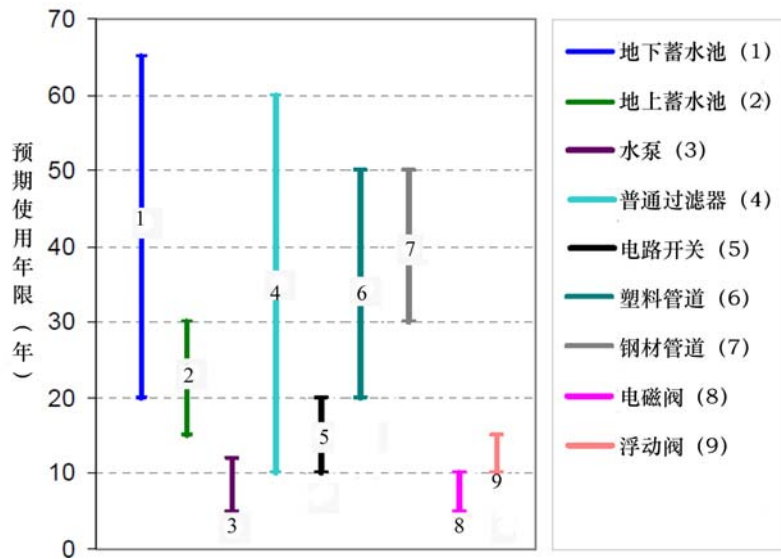


图5-2 雨水集蓄利用系统主要零部件使用寿命

5.5.3 初期投资

在雨水集蓄利用工程实际建设和管理中，初期投资应包括：

- 规划和选址成本；
- 项目设计和管理成本；
- 材料费；
- 建设费；
- 占用土地费。

对于新建住宅，初期投资中的前两项成本通常非常微小。这两项工作已经包含在住宅的建设规划中。新建住宅雨水集蓄利用系统的规划选址费用、设计费用、管理和准备工作的费用并不会明显增加系统建设总成本。在进行雨水集蓄利用系统的微观经济评价时，可以简化这部分费用或采用一个估计值。

对于现代雨水利用系统而言，材料费可以分成两个部分：第一部分是系统本身的费用，包括购买蓄水池、过滤器、水泵、电路开关等的费用；另一部分是一些辅助设施费用，对这些设施的需求与具体情况紧密相连，例如雨水集蓄利用系统中输水管路的费用由特定的安装条件所决定。安装费用全部或部分包括以下内容，即蓄水池的挖掘和构筑、管路的布置、其它零部件的安装以及系统的测试等。

相对而言，系统材料购置费比较容易预测，但系统的安装费用由特定的地点和条件来确定，存在空间上的不确定性。

蓄水装置成本

在雨水集蓄利用系统中，蓄水池的大小可以人为控制。一般而言，蓄水池的容积越大，则购买和安装费用随之增加。但受规模经济作用，蓄水池单位蓄

水容积的成本将会下降。蓄水池容积增加最初会引起系统可供水量的增加，但当容积达到某一值时，追加蓄水容积可增加的雨水收集量将微乎其微（Appan, 1993; Chu 等, 1997; Dixon 等, 1999; Coombes 等, 2003b）。最终，系统收集的雨水量不再随着蓄水池容积的增加而增加（集雨面是一定的）。与蓄水池不同，用户对系统中其它组成零部件的选择余地较小。例如，某一建筑物的屋顶面积和类型基本上不会发生改变，水泵应与预期的水流速度相匹配，而系统的日常维护一般不受蓄水池大小的影响。总之，蓄水池的选取对整个雨水集蓄利用系统的成本效益影响最为显著。

通过电话和网络可以向家用蓄水罐供应商查询蓄水罐的售价及其相关性能（详见附件 1），调查的家用蓄水罐容积范围 0.25-40m³ 不等，可用于住宅屋面雨水集蓄利用系统中。利用 Spss 统计分析软件对蓄水罐的容积-价格关系进行拟合，结果见表 5-2。

表 5-2 储水罐容积价格关系拟合结果表

储水罐材料	模型	R ²	F 值	P 值	常数项	b ₁	b ₂	b ₃
不锈钢	Quadratic	1.00	22624.16	0.000	-19.378	1422.99	-0.912	-
	Cubic	1.00	14010.17	0.000	12.164	1398.79	2.518	-0.11
	Power	0.996	3347.54	0.000	1478.51	0.972	-	-
塑胶	Quadratic	1.000	30786.5	0.000	52.2	566.1	-0.783	-
	Cubic	1.000	18847.6	0.000	48.7	568.1	-0.944	0.003
	Power	1.000	313330.1	0.000	605.8	0.969	-	-

从拟合结果来看，采用 Quadratic 和 Cubic 模型对不锈钢材料储水罐拟合的决定系数 R² 都很高，但 Quadratic 模型模拟的 F 值更大，表明其模拟效果更好；而对塑胶材料蓄水罐的拟合结果以 Power 模型最优，据此建立拟合方程分别为：

$$Y = -19.378 + 1422.99 \times X - 0.912 \times X^2 \quad (5-7)$$

$$Y = 605.8 \times X^{0.969} \quad (5-8)$$

公式（5-7）为不锈钢蓄水罐容积-价格拟合方程，公式（5-8）为塑胶蓄水罐容积-价格拟合方程，Y 为蓄水罐价格（元），X 为蓄水罐容积（m³）。

设施农业雨水集蓄利用系统的集雨面面积一般为几百至几千 m²，远大于住宅屋面雨水集蓄利用系统的集雨面面积，因此，所需的蓄水装置容积也很大。在北京市的实践中，蓄水池通过人工挖掘和浇筑的方式建造。设施农业雨水集蓄利用系统的蓄水池成本无法根据购买价格来确定。2005 年-2007 年间，北京农业技术推广站资助农民修建了几十个设施农业雨水集蓄利用系统（具体内容参见附表 2），这样，蓄水池的修建成本可以参考已建蓄水池的造价获得。

图 5-3 是根据蓄水池建造容积和成本，利用 Spss 统计分析软件绘制的蓄水池容积-单位体积造价关系图，亦即蓄水池规模经济效益图。显然，随着蓄水池容积的不断增加，单位容积造价呈下降趋势。当蓄水池容积小于 400m³ 时，这

种下降趋势非常明显。

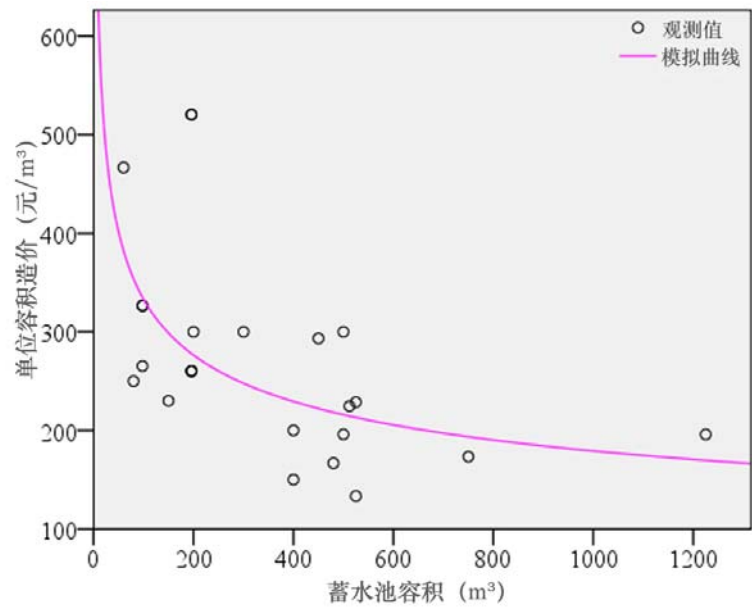


图5-3 蓄水池规模经济效果图

图 5-4 是利用 Spss 统计分析软件绘制的蓄水池容积-造价曲线估计图。在 5 种曲线估计模型中，Power 模型的拟合效果最好，拟合结果见表 5-3。据此建立的蓄水池造价拟合方程为：

$$Y=923.3\times X^{0.76} \tag{5-9}$$

表 5-3 蓄水池容积-造价拟合结果表

模型	R ²	F 值	P 值	常数项	b ₁
Power	0.892	181.639	0.000	923.30	0.76

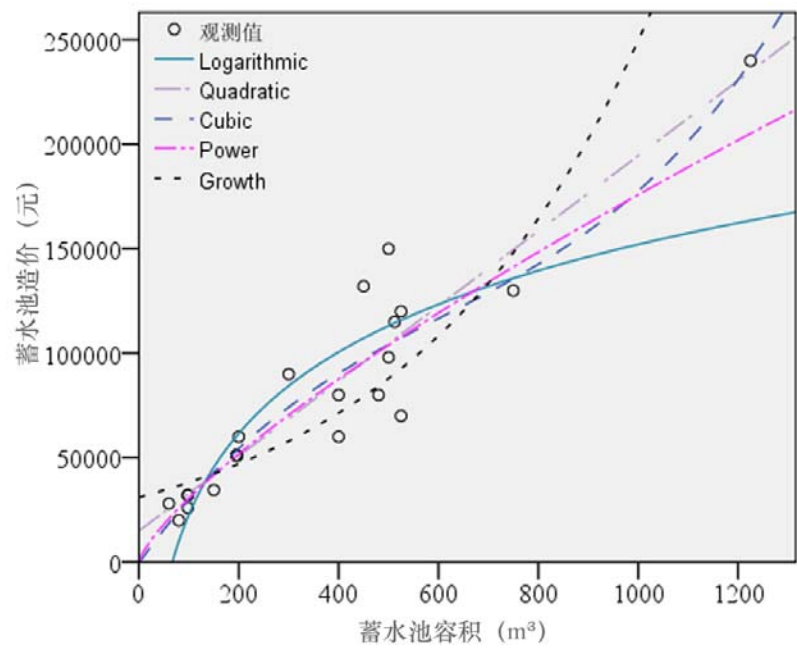


图5-4 蓄水池容积-造价曲线估计图

其它设备成本

除蓄水装置成本外，雨水集蓄利用系统其它设备成本见表 5-4。其中水泵价格参考表 4-5，其它设备的市场价格由于材料和规格等不同可能会存在差异。

表 5-4 雨水集蓄利用系统其它设备成本

设备名称	价格（元）
水泵	参考表 4-5
小型过滤器	100
浮动球阀	30
逆止阀	50
电磁阀	50

资料来源：通过网络和电话向供应商询价获得

雨水集蓄利用系统设备购置后，还需要对其进行安装，安装费用由系统规模大小决定。根据经验，安装费用采用设备购置总费用的 1%进行计算。

5.5.4 维护费用

雨水集蓄利用系统需要日常维护使其发挥正常的功能。不同系统的具体维护内容及费用参见表 5-5。

表 5-5 雨水集蓄利用系统的维护费用

系统类型	维护零部件	维护频率	维护成本
住宅屋面雨水利用系统	手动清洁过滤器	1 次/月	如用户亲自完成，成本为零
	自动清洁过滤器	1 次/3 月	如用户亲自完成，成本为零
	屋面及雨落管	1 次/年	如用户亲自完成，成本为零
	水泵	1 次/10-15 年	根据水泵类型和使用情况确定
设施农业雨水利用系统	集雨面	1 次/年	不计入成本
	集流槽、沉淀池、蓄水池	1 次/年	根据规模大小确定
	水泵	1 次/10-15 年	根据水泵类型和使用情况确定

水泵的置换费用只能估计而无法给出确切的数量，因为其实际运行寿命与水泵类型以及具体运行状况有关。根据使用者及供应商的经验，通常水泵的使用寿命在 10 至 15 年，本文假定其使用寿命为 15 年，置换成本依据水泵的价格确定。另外，设施农业雨水集蓄利用系统集流槽、沉淀池和蓄水池的维护费用需要根据系统的规模来确定。北京市已建设施农业雨水集蓄利用系统的蓄水池规模从几十到几千 m^3 不等，不同系统间集流槽的长度也相差很大。为了简便起见，集流槽、沉淀池和蓄水池等设施年维护费用按照蓄水池造价的 1‰计算，例如，某一系统的蓄水池造价为 200,000 元，则此项费用为 200 元/年。

5.5.5 运行费用

在雨水集蓄利用系统中，运行费用主要是指水泵抽水的耗电费用。水泵抽水耗电量主要由水泵类型、输送高度、水压大小和输送距离等因素决定。北京设施农业雨水集蓄利用系统的使用经验表明，水泵抽水耗电量约为 $0.1\text{kWh}/\text{m}^3$ 。屋面雨水集蓄利用系统对水泵输送高度以及用水水压要求更高，因此，实际输水耗电量也要高于设施农业雨水集蓄利用系统的输水耗电量，本文以 $0.3\text{kWh}/\text{m}^3$ 的耗电指数用于计算住宅屋面雨水集蓄利用系统的实际耗电量。这样，雨水集蓄利用系统水泵抽水耗电量可根据公式（5-10）和（5-11）来确定。

$$W_1=0.3\times R_{u1} \quad (5-10)$$

$$W_2=0.1\times R_{u2} \quad (5-11)$$

式中， W_1 为住宅屋面雨水集蓄利用系统水泵耗电量（kWh）， W_2 为设施农业雨水集蓄利用系统水泵耗电量（kWh）， R_{u1} 和 R_{u2} 分别为两种系统的雨水使用量（ m^3 ）。

水泵抽水成本等于水泵耗电量与当地电价的乘积。在很多雨水利用研究中，研究者都假定电价在很长时期内保持不变，这种假设与实际情况有较大的出入。从北京市 1999 年-2008 年居民用电电价变动情况来看（表 5-6），10 年间电价共上调了 5 次，但电价上调幅度有下降的趋势。尤其是 2004 年-2008 年居民用电年均电价上调仅 0.01 元/kWh。为简化计算，本文假设电价变动幅度为每 5 年上调一次，每次上调价格为 0.05 元/kWh。

表 5-6 1999-2008 年北京市电价调整表

年份	居民用电均价（元/kWh）	年均增长（元/kWh）
1999	0.362	0.000
2000	0.393	0.031
2002	0.421	0.020
2003	0.440	0.020
2004	0.447	0.017
2008	0.488	0.014

注：1. 资料来源于中国物价年鉴；2. 年均增长以 1999 年为基准年。

另外，北京农业用电电价与居民用电电价并不一致。2010 年农业用电电价为 0.554 元/kWh，略高于居民用电电价。在本文的模拟计算中，假定农业用电电价增幅与居民用电电价增幅相同，即 5 年上调 0.05 元/kWh。

至此，本文已经对雨水集蓄利用系统的微观成本进行了分析。对于设施农业雨水集蓄利用系统而言，还需要考量其宏观成本（或社会成本）。就设施农业雨水集蓄利用系统而言，其宏观成本应包括环境成本和风险成本。环境成本主要指系统应用可能引起水污染而产生的成本，风险成本则包括导致洪水发生和造成当地水循环遭受破坏引发的成本。设施农业集雨面受污染程度低，设施农

业周边的农用地具有良好的透水性，这些都决定了设施农业雨水集蓄利用系统的使用并不能增加水污染或洪水发生的几率，这两项成本可忽略不计。但是，大规模应用农业集雨技术会不会破坏当地的水循环却存在争议。本人认为这种担忧是完全没有必要的。首先，北京的年径流系数在 10% 左右，即大部分的雨水均耗于蒸发。因此，多数中、小降雨并不产流，雨水集流仅仅是一种抗蒸；其次，北京当前设施农业面积约为 206km²，仅占北京市总面积的 1.2% 左右。因此，即使所有设施农业都用于收集利用雨水，对地区的水循环影响也是微乎其微。基于此，设施农业集雨利用活动引起水循环变化的成本也可忽略。

5.5.6 微观经济收益

如前所述，住宅屋面和设施农业两种雨水集蓄利用系统的微观经济收益不尽相同，因此需要分别进行分析。

住宅屋面雨水集蓄利用系统微观经济收益

对用户而言，住宅屋面雨水集蓄利用系统能从节约自来水费中获得收益。具体计算见公式（5-12）

$$B_r = P_w \times R_u \quad (5-12)$$

式中， B_r 为节约的自来水费用（元）， P_w 为自来水水价（水价中包含水资源费和污水处理费，元/m³）， R_u 为家庭使用的雨水量（m³）。

从北京市 1996 年以来的居民自来水水价变化情况来看（表 5-7），居民用水水价一直处于调整上升中。如果以 1996 年为比较基准年，则水价的年均增长幅度在 0.3-0.4 元/m³ 左右。受水资源短缺、水环境下降和制水成本上升等多种因素的影响，北京居民自来水水价还将继续保持上升趋势。但增长幅度可能会有所放缓，例如 2004 年-2009 年期间，水价只上涨的 0.3 元/m³。

表 5-7 北京市居民水价变化情况表

年份	1996	1997	1998	1999	2000	2002	2003	2004	2009
水价（元/m ³ ）	0.5	0.8	1.1	1.6	2.0	2.5	2.9	3.7	4.0
年均增长（元/m ³ ）	0	0.30	0.30	0.37	0.38	0.33	0.34	0.40	0.27

注：水价包含自来水价格、水资源费和污水处理费；年均增长以 1996 年为基准比较年。

在雨水集蓄利用系统经济性模拟中，以当前的水价来核算未来雨水利用所带来的收益显然是不合理的。但是对未来水价的增长预测是另外一个复杂的研究课题，至今也没有一个广为接受的预测结果。本文根据北京市历史水价的演变过程，对未来居民水价的变化做出相对保守的估计，即居民水价每 2 年上调一次，每次上调幅度 0.4 元/m³，相当于年均增长 0.2 元/m³。预测结果见表 5-8。

表 5-8 北京市居民水价变化预测表

预测年份（年）	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	2024	2026	2028	...
预测水价（元/m ³ ）	4.00	4.40	4.80	5.20	5.60	6.00	6.40	6.80	7.20	7.60	...

设施农业雨水集蓄利用系统微观经济收益

在设施农业雨水集蓄利用系统中，用户角度的经济收益主要体现在减少抽取地下水用电节约的费用、增加农业产量和农业生产空间带来的收入（封闭蓄水池）。

为了计算雨水集蓄利用系统节约的用电费用，必须先了解不同地下水水位的水泵抽水耗电量。确定因地下水水位下降引起的电费增加量是一个难点。大量事实表明，北京乃至北方很多地区的农民因为地下水水位下降，抽水成本增加而减少甚至放弃了灌溉。但国内目前尚缺乏此方面的量化研究。通过向农民的实地调查同样无法获得有价值的资料来论证地下水水位下降与用电量增加之间的数量关系。因此，本文将采用典型水泵的性能参数来估算地下水水位下降引起的水费增加量。

调研中发现，在抽取地下水进行灌溉的农业生产实践中，为保证用水可靠性，农用机井的输水高度一般要超出地面 10m，否则容易导致水压不足，从而无法实施灌溉。另外，为了减缓农用机井的报废速度和满足集中灌溉需求，机井实际抽水深度往往要低于地下水水位 50m 以上。如果农用机井供水量大且集中，则需要预留的抽水深度越深。北京郊区很多大中型设施农业农场的机井抽水深度已经达到 120-150m。

水泵的额定扬程和额定流量通常未考虑管道水流受摩擦阻力而引起的损失。通常情况下，其实际流量和扬程只能达到额定值的 70% 左右。这样，对水泵额定扬程的要求可根据当地地下水水位深度和预留的抽水深度（本文假定其值为 50m），采用公式 5-13 来确定。

$$H = \frac{10 + 50 + X}{0.7} \quad (5-13)$$

式中，H 为水泵的额定扬程（m），X 为地下水水位（m）。

通过分析计算两种常用潜水泵型号共 42 种水泵的供水性能（具体内容见附件表 3），利用 Spss 统计分析软件对抽水深度和抽取单位地下水的耗电量进行拟合。经比较，使用 Power 模型拟合结果最优，拟合结果见图 5-5 和表 5-9。

表 5-9 水泵耗电量随抽水深度变化拟合参数表

模型	R ²	F 值	P 值	常数项	b ₁
Power	0.983	2360.1	0.000	0.025	0.84

根据拟合结果建立拟合方程如下：

$$Y = 0.025 \times (60 + X)^{0.84} \quad (5-14)$$

式中，Y 为水泵抽水耗电量（kWh/m³），X 为地下水水位（m）。

这样，设施农业雨水集蓄利用系统节约的电费可依据公式（5-11）和（5-14）计算得出：

$$B_e = R_u \times [0.025 \times (60 + X)^{0.84} - 0.1] \times P_e \quad (5-15)$$

式中，B_e 为节约的电费（元），R_u 为系统使用的雨水量（m³），X 为当地地

下水水位 (m), P_e 为预测的未来农业用电电价 (元/kWh)。

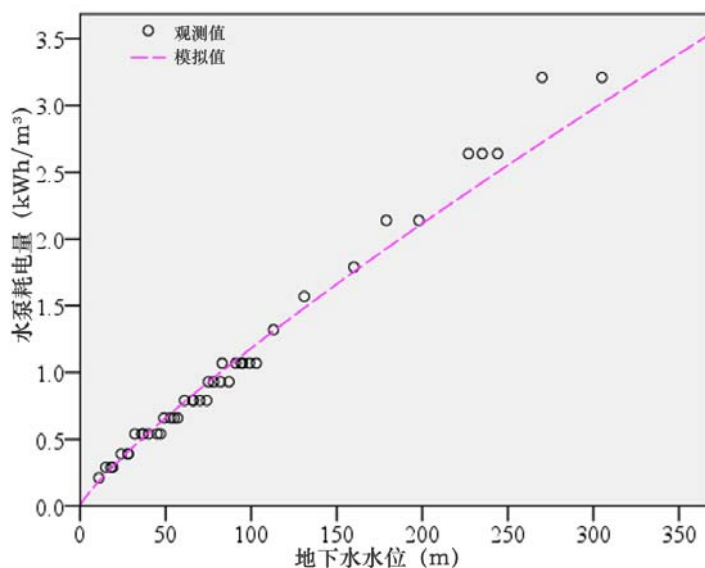


图5-5 水泵耗电量随抽水深度变化拟合图

对于设施农业室外封闭式蓄水池雨水集蓄利用系统而言, 由于蓄水池空间很大, 而且北京市降雨季节性十分明显。因此, 封闭蓄水池可在非降雨季节用于开展农业生产活动, 从而增加农民的收入。根据历史降雨资料可知, 北京市1-4月份、11-12月份的降雨量极少或以降雪居多。在此期间, 蓄水池基本无存水, 可用于农业生产活动。在北京市怀柔区某设施农业雨水集蓄利用示范点的实践中, 农户利用蓄水池温湿度较稳定的特点, 在池内种植蘑菇, 并取得了良好的收益。据估算, 仅2008年, 该蓄水池种植蘑菇的纯收益可达5-6万元。

然而, 仅以个案来预测蓄水池空间利用可带来的收益缺乏说服力。从农业生产功能角度看, 蓄水池与设施农业中的温室、大棚等相类似, 唯一的缺陷是缺乏阳光照射而不能种植普通农作物, 只能选择喜阴农作物, 例如食用菌类、蒜黄等。但这些农作物同样具有很高的经济价值, 而且在普通设施中无法种植。因此, 参照北京市设施农业的单位面积产值来计算蓄水池带来的生产收益是较为合理的。

据北京市统计局统计, 2009年北京市平谷区设施农业占地面积1.33万亩, 当年实现收入1.77亿元, 亩均年收入达1.33万元。同期, 大兴区设施农业占地面积6万亩, 实现收入10亿元, 亩均年收入达1.67万元。另据北京现代农业信息网资料, 北京密云县2007年已经实现设施农业亩均效益1.8万元。综合以上, 北京设施农业的单位面积效益在1-2万元/亩·年。本文采用1.2万元/亩·年(相当于18元/年·m²)来估算蓄水池可实现的农业生产收入, 计算方法见公式5-16。

$$B_p = \frac{5}{12} \times 18 \times A_s \quad (5-16)$$

式中： B_p 指蓄水池生产性年收入（元/年）， A_s 指蓄水池的底面面积（ m^2 ），5/12 表示一年中蓄水池用于生产的时间为 1 月、2 月、3 月、11 月和 12 月等 5 个月。

5.5.7 宏观经济收益

设施农业雨水集蓄利用系统的宏观经济收益包括系统能够产生的所有社会收益。在北京，这些收益至少包括减少抽取地下水用电节约的费用、增加农业生产空间带来的收入（适用于室外封闭蓄水池）、减少农业水利设施投资节约的费用、增加区域内可用水量获得的收益和减少地下水超采而减少的经济损失等五类。其中，前两项收益已经在微观经济收益中进行了论述。

*雨水收集利用减少政府水利投资。*为解决农业用水问题，北京市每年投入大量资金用于农业水利基础设施建设（见表 5-10），据此可计算出单位灌溉面积水利投资额。

表 5-10 北京市 2005-2008 年农业水利基础设施建设投资表

年份	农业水利投资（万元）	有效灌溉面积（千 hm^2 ）	单位灌溉面积水利投资额（元/ m^2 ）
2005	48080	181.5	0.26
2006	78757	181.5	0.43
2007	142243	173.6	0.82
2008	165272	171.8	0.96

资料来源：北京市统计年鉴 2006-2009

北京市近几年农业水利投资和单位灌溉面积的水利投资额均快速增加（2005 年-2008 年年均增长 0.23 元/ m^2 ），这主要是北京市水资源短缺状况不断加剧造成的。尽管我们无法准确判断今后农业水利投资增长的幅度，但农业水利投资保持增长是必然的。另一方面，随着北京市农业用地的逐年减少，其有效灌溉面积也会保持下降趋势。考虑到这两方面因素共同作用的影响，本文保守估计在雨水集蓄利用系统经济性能的模拟期内，单位灌溉面积水利投资额保持在 2008 年的水平，即 0.96 元/ m^2 。

农业雨水集蓄利用设施的建设部分解决了农业用水问题，可以间接减少政府的农业水利投资，水利投资节约量可根据通过收集利用雨水实际解决的灌溉面积进行概算（公式 5-17）。

$$B_i = A_i \times I_{unit} \quad (5-17)$$

式中， B_i 为节约的农业水利投资（元）， A_i 为雨水灌溉的设施农业面积（ m^2 ）， I_{unit} 为单位灌溉面积的水利投资额（元/ m^2 ）。

*增加水资源量获得的收益。*作为北京市供水的主要来源和一种稀缺性资源，地下水资源的价值逐渐被人们所认识。在北京市的水价核算中，水资源费已被计入其中。根据北京市发改委 2010 年发布的水价信息，北京市水资源费均值为

1.26 元/m³。雨水的收集利用减少了地下水的开采利用量，实际上增加了本区域内未来可利用的水资源量。因此，社会可以从雨水集蓄利用过程中获得水资源价值。

*雨水收集利用减少地下水超采的经济损失。*多年来，北京市通过严重超采地下水维持着用水需求。地下水超采引起地面沉降、地裂缝、地面塌陷和地下水污染等一系列生态环境问题，造成了大量的直接和间接经济损失。倪红珍（2006）等人的研究表明，2000 年，北京市因地下水超采造成的水资源耗减损失为 26.09 亿元，地下水污染造成的损失为 2.25 亿元，经济损失共计 29.34 亿元，当年超采单位水量地下水的经济损失约为 4.81 元/m³。另外，依据李晓凯等人（2003）建立的地下水超采经济评估模型，可计算出北京市 2005 年超采地下水造成的直接间接经济损失约 31.8 亿元。2005 年北京市超采地下水 6.4 亿 m³，则超采单位地下水水量的经济损失为 4.96 元/m³。综合上述研究结论与分析，超采地下水造成经济损失可取值 5 元/m³ 进行核算。设施农业雨水集蓄利用系统通过利用雨水而减少了地下水的使用量，间接地减少了因超采地下水造成的经济损失。此项年收益等于年雨水利用量与超采单位地下水经济损失量（即 5 元/m³）的乘积。

但是，中国南水北调中线工程全部完工后，按规划将向北京输水约 10 亿 m³/年。人们普遍认为，届时北京的水资源短缺状况将得到极大改善，地下水超采现象也将得到遏制。因此，南水实现北调后，设施农业雨水集蓄利用系统减少地下水超采的收益就将不复存在。根据中国南水北调中线工程规划，输水工程规划分为近期、后期和远景三个阶段，其中近期规划于 2010 年向北京输水约 3 亿 m³。但事实表明，受多种因素的影响，这一规划在时间安排上已无法按预期实现。据国务院南水北调办公室称，中线工程近期通水时间推迟到 2014 年。这样，本文假定 2014 年以后设施农业雨水集蓄利用系统不能获得减少地下水超采的收益。

5.5.8 折现率

在雨水集蓄利用系统动态成本收益计算中，折现率是一个非常重要的影响因素。经验表明，折现率的取值随着折现期的延长而不断下降（Voinov&Farley, 2006）。Yie-Ru Chiu 等人（2008）在屋面雨水集蓄利用系统的经济评价中，采用的折现率为 3%，折现期为 25 年。从英国财政部给出的折现率和折现期的参考值（表 5-11）中可以看出，雨水集蓄利用系统经济评价的折现率宜取值 3-3.5%。

表 5-11 英国财政部折现率参考值表

折现期（年）	0-30	31-75	76-125	126-200	201-300	>300
折现率（%）	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0

参考来源：HM Treasury, 2003.

5.6 空间化研究

至此，论文论述了单个雨水集蓄利用系统的水文性能和经济性能评价的理论与方法，这些理论和方法能够帮助人们选择最优的雨水集蓄利用系统，确定蓄水池的规模大小。然而，空间差异的存在使单个雨水集蓄利用系统的研究结果不能直接应用到整个城市，因此对雨水利用技术的推广仍然缺乏指导作用。

雨水集蓄利用空间化研究基于不同区位上社会经济条件和自然环境不同，对雨水集蓄利用系统的空间适宜性和存在的潜力进行识别。其目的是协助雨水利用规划工作的开展，避免雨水集蓄利用系统建设的盲目性。可以说，雨水集蓄利用空间化研究是雨水利用技术大范围推广应用的一项基础性工作。到目前为止，国外已经有不少学者做了这方面的研究。例如 B.P. Mbilinyi 等（2007）创建了包含降雨、坡度、土壤特性、灌溉规律和土地利用变化等信息在内的 GIS 决策支持系统，并结合 RS 技术和实地调查判别了坦桑尼亚 Makanya 流域的集雨潜在区。J. Mwenge Kahinda（2006）通过综合分析自然、生态和社会经济因素，利用 Arcgis 空间分析方法绘制了南非地区适合集雨的潜力区划图。而 Enedir Ghisi（2005）基于对未来降雨的预测和城市居民生活用水变化的预测，对巴西 62 个城市雨水利用的节水潜力进行了量化分析。这些研究都从大尺度上分析了不同区位雨水利用的潜力，但研究方法并不适合在小尺度上（例如城市）运用。

在城市尺度上，雨水集蓄利用的空间适宜性或潜力评价可通过两种方式实现：一是通过实地调研获取城市不同区位上的集雨面、用水量、降雨量等关键资料，并分别进行水文性能和经济性能评价，经对比分析识别潜力区，通过这种方式获得的结果较为准确，但工作量十分巨大；二是根据城市的具体情况，构建具有代表性的典型雨水集蓄利用系统，并根据不同区位上的降雨量等信息对典型系统的水文和经济性能进行评价。这样，根据同一种雨水集蓄利用系统在不同区位上的性能表现，同样可以识别雨水利用的区位差异，工作量却要小得多。基于此，本文采用第二种方式对北京市雨水集蓄利用的空间化进行研究。具体而言，一是对城市雨水集蓄利用潜力和适宜性进行区位评价；二是论述雨水集蓄利用信息系统，即用户互动平台的构建。

5.6.1 集雨潜力研究中存在的问题

在国内已有的城市雨水利用潜力评估中，研究者往往根据城市年降雨量、集雨面面积和径流系数来估算城市的集雨潜力（见公式 5-18）。

$$R_p = R_a \times A \times r \quad (5-18)$$

式中， R_p 指城市年集雨潜力， R_a 指城市年均降雨量， A 指集雨面面积， r 指径流系数，不同集雨面的 r 值不同。

这种计算城市集雨利用潜力的方法固然简单，但缺乏准确性。最大的缺陷

是未考虑蓄水池的溢流问题，即假设蓄水池具有无限大的空间，可收集所有来水而不发生溢流。但在实践中，蓄水池昂贵的成本决定了其容积必然是有限的。蓄水池容积的不断增加最终可能导致雨水收集利用者无利可图而放弃这一技术。因此，上述潜力计算方法计算所得的集雨利用潜力可视为城市雨水集蓄利用的最大可能潜力而并非现实潜力。

本文仍将采用公式（5-18）来评价北京住宅屋面和设施农业两种雨水集蓄利用系统的最大可能潜力，但评价结果仅供参考。本文更加关注的一个问题是：随着降雨的时空变化，雨水集蓄利用系统的潜力在空间上会发生怎样的变化？降雨空间差异对不同区位上的雨水利用系统的效率和效益会产生怎样的影响？对这一问题的回答至关重要，也是雨水集蓄利用者们关注的内容。

5.6.2 最大集雨潜力的评价方法

雨水集蓄利用系统最大潜力的评价分为 3 个步骤：

1. 确定多年平均降雨量；
2. 确定集雨面面积；
3. 确定集雨面径流系数。

根据北京市水资源公报资料，北京市多年平均降水量为 585mm/年。其中冬季降雪无法收集，以冬季降雪量占年降水量 5%计算，则多年平均降雨量为 555.75mm/年。

根据北京市统计年鉴 2009 资料，北京市 2008 年设施农业播种面积为 33,889 公顷，即约 3.4 亿 m^2 ，设施农业集雨面面积与其播种面积基本相当。到目前为止，还没有相关资料介绍北京市住宅屋面面积，因此需要构建计算方法对北京市的住宅屋面面积进行概算。依据《城市居住区规划设计规范 GB50180—93》（以下简称“规范”）中的城市居住区用地平衡控制指标，利用公式（5-19）计算住宅屋面面积：

$$TRA=RA \times r_1 \times r_2 \quad (5-19)$$

其中 TRA（Total Residential Area）指可用于雨水收集的住宅屋面面积（垂直投影面积），RA（Residential Area）指北京市居住用地总面积（ m^2 ），数据来源于中国城市建设统计年鉴。 r_1 指居住区用地和公共建筑用地占居住用地的比例， r_2 指居住区建筑净密度系数，即居住区住宅基底面积占居住区和公共建筑用地的比例。公式计算所得的 TRA 实际上是居住区住宅建筑的基底面积。由于住宅的屋面垂直投影面积基本等同于建筑基底面积，因此用 TRA 代表住宅屋面面积是可行的。 r_1 、 r_2 取值于“规范”。城市居住区按照规模大小分为居住区、小区和组团三种类型，“规范”要求城市居住区内居住区用地与公建用地之和分别占居住用地的 65~85%、小区用地的 67~87%、组团用地的 76~92%。考虑到北京市土地的稀缺性，在本文中 r_1 取最大值 92%。“规范”中规定北京市居住

区建筑净密度系数 (r_2) 的控制范围是 25~35%，本文采用中间值 30% 计算居住区住宅屋面面积。

根据本文第三章对屋面及设施农业集雨面径流系数的讨论，住宅屋面和设施农业雨水集蓄利用系统的径流系数均取值 0.9。

5.6.3 空间化评价及信息系统创建方法

空间化评价的目的是比较不同区位雨水集蓄利用的效率和效益，以及降雨时空分布特征对确定集雨面面积和蓄水池容积大小的影响。其评价过程如下：

1. 构建典型雨水集蓄利用系统。住宅屋面雨水集蓄利用系统包括的要素为家庭规模、人均用水量、人均集雨屋顶面积、蓄水池规模；设施农业雨水集蓄利用系统则包括雨水集蓄利用系统类型（在实例研究中，本文着重讨论室外封闭式雨水集蓄利用系统）、设施农业面积、农作物及灌溉规律、蓄水池规模；
2. 采用雨水集蓄利用系统水文性能和经济性能评价方法，根据不同气象站历史降雨资料计算系统的集雨利用效率和效益，分析集雨面面积和蓄水池规模变化对系统性能的影响；
3. 利用 GIS 软件，选取合适的空间插值方法，将上一步计算和分析的结果进行空间插值，得到面状评价结果。

根据上述过程得到的评价结果是基于典型雨水集蓄利用系统获得的。但在实践中，雨水集蓄利用系统建设和应用的环境与典型系统会有很大的差异。为此，建立雨水集蓄利用信息系统变得十分重要。该系统可允许用户根据自身情况来选择所需要的雨水集蓄利用系统。

具体而言，雨水集蓄利用信息系统由 3 部分组成，即系统性能评价模式库、基础资料数据库和 GIS 互动平台。系统性能评价模式库包括水文和经济性能分析模式，资料库包括历史降雨资料及相关空间资料，互动平台则提供用户输入重要评价参数，如地理位置、用水量、集雨面面积、成本等。具体结构见图 5-6

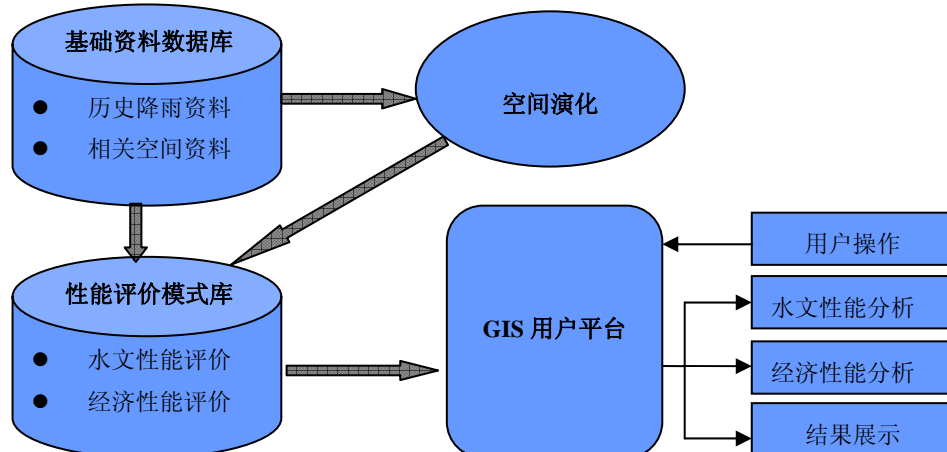


图5-6 雨水集蓄利用信息系统结构图

依据上述雨水集蓄利用信息系统的构建方法，最终可形成用户可视化操作界面（见图 5-7）。但是，受时间、个人能力和降雨资料缺乏等因素所限，本论文未能就如何创建北京市雨水利用信息系统和用户操作平台做进一步的分析。在此，期望其他雨水利用研究者能够从本文介绍的方法中获益。

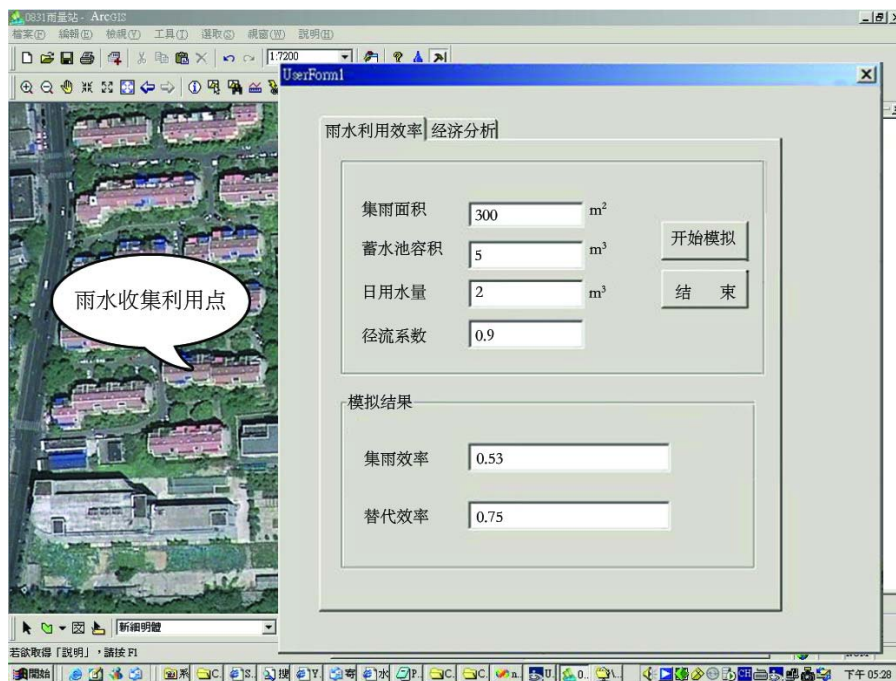


图5-7 基于ArcGis的雨水集蓄利用用户操作界面

5.7 本章小结

本章重点讨论了两个方面的问题：一是如何评价雨水集蓄利用系统的经济可行性，兼顾雨水集蓄利用最优模式的选择依据；二是如何判断雨水集蓄利用的空间适宜性，亦或是雨水集蓄利用的空间潜力区划问题。为了回答这两个问题，本章先简单回顾了水利工程经济的评价理论和方法，重点介绍了水利工程宏观经济和微观经济的评价方法。在此基础上，综述了国内外雨水利用的微观经济评价研究现状，总结了这一研究领域所取得的研究成果和存在的不足。目前的雨水利用经济评价研究主要存在两点不足：其一是在成本核算中忽略了许多重要的因素，往往低估了雨水利用产生的实际费用；其二是在效益量化研究中，往往局限于微观经济的评价而忽略了宏观经济的评价，模糊了雨水利用所能发挥的真正效能。因此，构建全成本分析法，从宏观和微观两个层面对雨水集蓄利用的经济性能展开评价是对现有研究不足的补充。在此基础上，分别讨论了住宅屋面和设施农业两种雨水集蓄利用系统的经济评价要素、数据的收集整理、宏微观经济评价的过程、最大潜力的评价方法和过程以及空间适宜性的评价方法和过程。最后，基于雨水集蓄利用技术推广应用的现实需求，提出了基于 Arcgis 技术，创建雨水利用信息平台 and 用户操作界面的构想。

第六章 北京市雨水集蓄利用系统评价、空间化及管理研究

本章主要围绕两个方面展开研究。一是对北京市单个雨水集蓄利用系统的水文和经济性能进行评价，二是在单个雨水集蓄利用系统评价的基础上，开展雨水集蓄利用的空间化拓展研究。在此之前，先简单介绍北京市的基本情况。

6.1 研究区概况

北京市中心位于北纬 39°，东经 116°。北京全市土地面积 16,410 km²。其中平原面积 6,338 km²，占 38.6%。山区面积 10,072 km²，占 61.4%。北京的气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候，夏季炎热多雨，冬季寒冷干燥，春、秋短促。年平均气温 10~12℃，年平均降雨量不到 600 mm，降水年际、季节分配很不均匀，全年降水 75%以上集中在夏季，7、8 月常有暴雨。

北京是祖国的首都，是全国政治、经济文化中心。全市共划分为 16 个区 2 个县。2008 年，北京市实现地区生产总值 10,488 亿元，占当年全国国内生产总值的 3.46%。截至 2008 年末，全市常住人口 1,695 万人，其中户籍人口 1,229.9 万人。2008 年，城市居民人均可支配收入 24,725 元，农民人均纯收入 12,701 元（北京统计年鉴 2009，中国统计年鉴 2009）。

6.2 北京市水资源现状分析

6.2.1 地表水资源

北京市地表水资源主要来源于两个方面：其一为降水，它是地表水资源补给的主要途径；其二是过境水，通过潮白河、永定河、蓟运河流入境内。表 6-1 是北京市各水系水资源多年平均值及 2007 年值，表 6-2 为北京市入境水量统计表，表 6-3 为北京市地表水资源量。

表 6-1 北京市各水系水资源补给量

流域	面积 (km ²)	降水年均值 (mm)	不同保证率降水资源 (亿 m ³)				07 年降水 (mm)	07 年降水资源 (亿 m ³)
			均值	50%	75%	95%		
蓟运河	1377	653	9.0	8.6	6.9	5.3	555	7.6
潮白河	5163	620	34.8	33.4	26.4	19.1	483	24.9
北运河	4423	611	27.0	25.5	19.9	13.7	481	21.3
永定河	3186	550	17.4	16.6	11.8	9.5	459	14.6
大清河	2219	614	13.6	12.8	9.9	6.6	598	13.3
全市	16800	607	101.9	97.0	76.3	53.3	499	83.8

注：1.数据来源，据北京市地表水资源整理

2.降水年均值指 1956~1984 共 29 年。

表 6-2 北京市入境水量统计表

年份	潮白河	永定河	蓟运河	全 市
1956~1960	15.02	18.31	1.40	34.73
1961~1965	6.71	13.14	0.78	20.63
1966~1970	6.65	12.03	0.62	19.30
1971~1975	8.68	7.46	0.64	16.78
1976~1980	6.66	9.18	1.24	17.08
1981~1983	5.17	6.11	0.41	11.69
1956~1983	8.15	11.04	0.85	20.04
2003	2.25	1.30	0.02	3.57

注：1.资料来源，同上表；2.拒马河为边界河，其入境水量按过境水来考虑；3.除 2003 年，其它数字为年均值，单位亿 m^3

表 6-3 北京市地表水资源量

项 目	多年平均	2000	2007	备 注
降水总量	101.89	73.60	83.80	总量指降水总量与地表水入境量之和； 一次总量指降水形成的地表水和外省 入境地表水的总和。
河川入境	20.50	7.11	3.45	
总 量	122.39	80.71	87.25	
河川径流	23.33	6.34	7.60	
一次总量	43.83	13.45	11.05	

注：1.资料来源，同上表；单位亿 m^3 。

北京降水年际差异很大，1956-1984 年均降雨量为 607 mm。但自 1999 年以来，北京进入一个连续 9 年的干旱期，各年降水量较多年平均值大为减少，造成了地表水资源锐减。受气候变化以及上游地区用水增加等因素的影响，北京的入境水量自上世纪 50 年代以来，一直处于减少的趋势。2003 年北京入境水量锐减至 3.57 亿 m^3 ，只相当于 1956 年-1983 年多年入境水量均值的 1/6。

6.2.2 地下水资源

2005 年北京市供水总量为 34.5 亿 m^3 ，其中地下水资源为 24.9 亿 m^3 ，约占北京市供水总量的四分之三。可见地下水资源对于北京市是不可或缺的。地下水资源变化趋势反映在地下水水位动态的趋势变化及储变量的盈亏变化上。北京市平原区地下水位动态主要受降水的影响而出现年内和年际周期性升降变化。自上世纪七十年代以来，北京市地下水开采量逐年增加，许多地区超量开采，有些地方已靠开采深层地下水维持供水。2000 年，全市地下水平均开采率为 104%，超采最严重的丰台河西地区已达 189%，全市只有平谷、延庆、昌平、密云四个山区县还没有超采。地下水位出现了趋势性下降，至 2000 年，平原地区地下水蓄存量已比 1960 年减少了 57.9 亿 m^3 ，平均埋深比 1980 年下降 8.12 m，已达 15.36 m。

北京市地下水储存量的变化可分为三个阶段：二十世纪六十年代，地下水位有升有降。处于自然状态，地下水资源仍保持采补平衡；七、八十年代地下水属于严重超采阶段，累积亏损分别为 21.25 亿 m^3 、18.40 亿 m^3 ；九十年代中前期北京降水量偏大，加上官厅水库通过永定河放水，使城近郊区地下水得到一定的回补，但自 1999 年以后，北京进入长达 9 年的干旱期，地下水超采又复加重。

表 6-4 北京市平原区地下水储变量统计表

时段	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	1961-2000
累计	0.23	-21.25	-18.4	-18.5	-57.9
年平均	0.02	-2.13	-1.84	-1.85	-1.45

资料来源：中国地下水资源（北京卷），单位亿 m^3 。

6.2.3 水资源及可利用总量

传统上，水资源总量由三部分组成：（1）大气降水直接形成的地表水资源；（2）地下水资源；（3）外省入境的水量（包括地下水）。

表 6-5 北京市一次水资源总量表

项 目	多年平均	50%	75%	95%
山区、平原河川径流	23.0	18.4	12.2	8.5
平原降雨入渗补给地下水	13.0	12.4	9.8	6.9
山区侧向补给平原地下水	6.3	6.0	4.7	3.3
外省入境水量	20.5	18.4	12.9	8.0
全市一次水资源总量	62.8	55.2	39.6	26.7

资料来源：北京水资源普查和区划综合报告，1991 年；单位亿 m^3 。

北京市一次水资源总量多年平均为 62.80 亿 m^3 ，当保证率为 50%、75%、95%时，水资源总量依次为 55.14、39.59、26.73 亿 m^3 。在一次水资源总量中，外省入境量占有很大比重，占 30%以上。因此，保证首都充足的水源，入境水资源量具有重要的地位。

北京市 2000 年水资源总量仅为 23.97 亿 m^3 ，比多年平均值少 62%。其中，地表水资源受降水量锐减的影响，下降幅度最大，其次是入境水资源和地下水资源。如果考虑到技术经济条件和水利工程水平等各种因素的限制作用，可利用的水资源量将更少。

6.3 北京水资源开发利用及存在问题

6.3.1 水资源开发利用历程

自建国以来,北京市工农业及城市生活用水呈现以下规律:(1)随着城市经济发展、人口增长以及人民生活水平的不断提高,城市生活用水量持续增长;(2)工业用水量先增后减。上世纪80年代达到用水高峰,此后随着工业节水措施的严格实施以及工业结构的优化调整,工业用水量呈现稳中有降。进入本世纪,工业用水量的下降趋势尤为明显;(3)农业用水变化特点与工业用水相类似,自建国以来农业年用水量逐渐增加,并于上世纪80年代末达到用水高峰,此后,农业用水逐年缓慢下降。(4)自上世纪90年代以来,北京的用水结构发生了显著的变化,农业用水曾经一度是北京最大用水户,但是在城市生活用水激增和农业用水缓减共同作用下,2005年城市生活用水量与农业用水量基本持平。此后,城市生活用水成为北京最大用水户。(5)城市年用水总量并未随着城市的快速发展而快速增加,相反,自上世纪90年代以来,随着城市产业结构调整 and 用水效率的不断提高,城市年用水量逐年下降。

表6-6 北京市水资源利用统计表

起讫年份	年均生活用水 (亿 m ³)	起讫年份	年均工业用水 (亿 m ³)	年份	农业用水 (亿 m ³)
1949-1959	0.99	1949-1963	6.2	1986	19.46
1960-1981	3.85	1964-1977	10.9	1990	21.74
1982-1995	6.01	1978-1995	10.0	1996	18.95
1996-2006	11.81	1996-2006	9.1	2006	12.78

资料来源: 1.《水惠京华-北京水利五十年》; 2.北京水资源公报 1996-2006 年

6.3.2 存在的问题

水资源开发利用,是水资源使用价值得以实现的前提,也是水资源价值增值过程。水资源的开发利用,应该在可承受的范围之内,否则就会出现各种问题。目前,北京市水资源开发利用存在的问题主要表现在:

(1) 水资源供需矛盾加剧

无论与我国还是世界人均水资源占有量相比较,北京市人均占有水资源量均严重偏低。在上世纪五六十年代,北京水资源供需并没有多大矛盾,七十年代以后,缺水成为北京严重问题之一。分析其原因,主要是:①人口增加,经济发展,水资源需水量增加。例如1949年市区工业用水只有3000多万m³,1980年达到11.2亿m³,三十一年增长了36倍。②入境水量减少。北京市可供水量有相当一部分来源于境外,据计算,北京市地表水资源多年平均入境量20.5亿

m^3 ，相当于一次水资源总量的 32.64%。近几年来，北京水资源入境量明显减少，以官厅水库为例，80 年代后期年入境总量只相当于 50 年代的 1/6。这完全是上游水利工程的拦蓄和沿途利用量增加的结果。③降水量偏少。1999 年以来，北京遭遇连续 9 年的干旱，各年降水量均低于多年平均降水量。例如 2002 年北京全市平均降水量为 413 mm，仅为多年平均降雨量的 69.4%。上述几种因素的相互作用与叠加，使北京水资源供需矛盾加剧。

（2）地下水严重超采

北京市地下水 1981~1989 平均补给量为 37.8 亿 m^3 /年，地下水可开采量约为 24.5 亿 m^3 /年。由于种种原因，补给水并不能全部作为可利用水量。当实际开采量大于可开采量时，会引起一系列的水文地质环境问题。

在五六十年代，地下水资源开采是少量的，自七十年代以后，地下水资源开采量逐年剧增，成为北京市主要水源之一。据计算，1961 年~2000 年全市平原区地下水累积亏损量已达 57.92 亿 m^3 ，平均每年亏损 1.45 亿 m^3 。近几年，受降水减少的影响，地下水亏损状况更趋严重。2007 年地下水严重下降区（埋深大于 10 m）的面积为 5,195 km^2 ，较 2006 年增加 145 km^2 。

北京市地下水严重超采引起的主要问题是：①地面沉降。主要分布在城区的东部和东北部，八里庄——大郊亭一带，沉降幅度最大。②水井供水衰减或报废。以水源四厂为例，1978 年供水能力为 24 万 m^3/d ，1984 年降低为 8.5 万 m^3/d ，平均每年递减 16%。同时由于水位不断下降，至使有些水井枯竭报废，井越打越深，泵越换越大，形成恶性循环，用水费用不断提高。③地下水水质下降。

（3）水质污染严重

水资源开发利用过程中，水质是重要的指标之一，水资源量、质的协调统一是水资源充分发挥效益不可缺少的条件。

2000 年全市全年排放污水总量 257.5 万 t，其中城近郊区 244.3 万 t。污水集中处理率仅为 39.4%。大量未经处理的污水排入河道、渗井和渗坑，加之过量施用农药和化肥，使得河湖水体和地下水受到严重污染。根据对 81 条河流 2,150 km 的河段监测，有 56.4% 的水体受到不同程度的污染，城市下游河道多为超 V 类水体，基本没有生物成活；城市饮用水源受到污染的威胁，官厅水库 1997 年被迫退出饮用水供水系统，同时近一半的平原区表层地下水受到威胁。

（4）污水资源化程度不高

污水是被污染、使用价值不高的水资源，污水资源化是指污水处理后变成可供用水部门使用的合格水源。实现污水资源化，是缓解北京水资源紧缺、防治水污染的一条重要途径，是当前水源建设中一项势在必行的紧迫任务，也是改善首都环境、建设清洁美丽城市不可或缺的重要任务。

目前，北京的污水处理率已经达到了比较高的水平。2007 年北京城区污水

处理率已经达到 90%。但是,在污水再生利用方面,仍存在不少问题,主要表现在:①污水再生利用率不高,并且增长缓慢。2008 年北京市利用再生水 6 亿 m^3 左右,不到污水排放量的 50%;②污水回用规划滞后于污水处理规划,市场经济经营方式尚未完善。这不仅导致污水处理厂亏损运营,而且给再生水的“回用”带来许多难点,最终将造成再生水资源和经济上的极大浪费。

(5) 缺乏完善的水资源价格体系

水资源价格是水资源经济管理的重要手段之一,是促进水资源合理开发利用的前提,是水资源供给与需求的调节器。合理的水资源价格体系才能统筹兼顾、科学有效地配置各种水资源,整体上发挥水资源的效益。目前,北京尚未健全完善的水资源价格体系,致使水资源经济管理未能充分发挥经济杠杆的作用。

(6) 水资源统一管理体制不健全,法规不完善

由于计划经济体制的长期作用,北京市的水管理体制形成一种相互制约、权属分割、管理边界不清的多头管理模式。而天然水资源是一个不容分割的系统,水资源的保护、开发、利用及管理应该顺应自然规律。多头管理造成了各自为政、各行其是的众多矛盾。由于政策不能统一,法规不完善,根本无法实施诸如地表水、地下水联合调度、价格机制控制、取水许可制度、资源优化配置等水资源管理的有效方式。改变现行水管理体制中的弊端可谓是当务之急。

6.4 北京市雨水利用现状

6.4.1 北京市雨水利用进展

北京市城市雨水利用开始于 20 世纪 80 年代,其发展过程可分为 3 个阶段:

(1) 起步探索阶段(1999 年以前)。此阶段主要通过各种试验对雨水利用进行了探索性、基础性分析,涉及雨水入渗、集蓄、水质处理等基础研究。1986 年北京市政工程研究所开展了路面透水透气实验,总结了各种透水透气路面的入渗过程。1998 年北京建筑工程学院开展了“北京市城市雨水利用技术研究及雨水渗透扩大实验”项目研究,对雨水集蓄、入渗、水质控制等进行了较为系统的研究。

(2) 深入研究阶段(2000 年——2005 年)。在这一阶段,北京的雨水利用在试验的基础上加强了雨水利用示范工程的建设,雨水利用的研究开始深入,不仅关注雨水利用的效率和水质问题,也注重雨水利用的效益研究。通过加强国际合作,引入了国外雨水利用先进国家的建设和管理理念。

据北京市节水办公室统计,截止到 2005 年底,北京市城区已经完成并投入使用的雨水利用项目为 88 个,汇水面积达到了 1,009 万 m^2 ,年雨水利用总量可达 111 万 m^3 。从雨水利用的空间上来看,蓄水池主要集中在生态涵养区;透

水砖铺装主要集中在城市发展新区；下凹式绿地主要集中在首都核心功能区；渗水井利用的较少；雨水利用总量主要集中在城市发展新区，年雨水利用总量达 48.43 万 m^3 。

(3) 大范围推广示范阶段(2006 年至今)。这个阶段的突出特点是以政府为主导，通过资金补助、行政等手段积极推广雨水利用，同时加大雨水利用的宣传力度，并提供技术培训和施工指导。到 2008 年为止，北京市全市范围内已建雨水利用工程 600 余个，雨水汇水面积达 3,700 多万 m^2 ，年可利用雨水达到 995 万 m^3 ，涉及政府机关、学校、公园、生产企业、工业园区等，遍及 18 个区县。从雨水利用的类型进行分析，主要以封闭式蓄水池为主，其次为透水性地面和下凹式绿地(左建兵，2008)。

仅 2008 年，北京城区完成雨水利用 200 项，汇水面积 1,651 万 m^2 ，综合利用雨水量的潜力达到 450 万 m^3 。截止到 2008 年 12 月底，200 项雨水利用工程竣工超过 80%，共完成蓄水容积 45.9 万 m^3 (包括封闭式蓄水池、敞开式蓄水池、人工湖、渗水井等)，透水地面铺装 85.31 万 m^2 ，下凹式绿地面积 88.52 万 m^2 ，雨水综合实际利用量达到 257.39 万 m^3 。2008 年北京奥运会场馆区成为当年雨水利用的重点和亮点，充分利用雨水资源、提高水资源利用效率、实现“绿色奥运”的伟大构想成为 2008 年雨水利用的主要理念。从利用的规模来看，奥运场馆区主要以下凹式绿地为主，共完成绿地建设 45.65 万 m^2 ，年均雨水利用量可达 45.01 万 m^3 ；其次是蓄水池，共完成蓄水容积 14.98 万 m^3 ，年均可利用雨水 32.83 万 m^3 。

截至 2007 年年底，北京市农业局农业技术推广站依托“保护地膜面集雨高效利用技术示范项目”，通过集中技术培训、知识竞赛、实地观摩、科技入户等多种方式宣传带动，项目期间在京郊 10 个区县辐射推广保护地膜面集雨高效利用技术 1,750 亩，共计建设集雨窖 587 个、总体积 71,440 m^3 ，修建集流槽 72,385 m ，总集雨面积 93.7 万 m^2 。项目实施一年来，共收集雨水 31.2 万 m^3 ，节约地下水 28.1 万 m^3 。

6.4.2 北京市雨水利用的政策环境

2002 年 10 月颁布实施的《中华人民共和国水法》对雨水利用做出了新的规定。《水法》第 25 条规定，“在水资源短缺的地区，国家鼓励对雨水和微咸水的收集、开发、利用和对海水的利用、淡化”。第 53 条规定，“新建、扩建、改建建设项目，应当制订节水措施方案，配套建设节水设施。节水设施应当与主体工程同时设计、同时施工、同时投产”。2000 年 12 月，北京市人民政府颁布《北京市节约用水若干规定》(第 66 号令)中强调“绿地、道路应当建设低草坪、渗水地面，使用透水性能好的材料。城镇地区的机关、企业、事业单位院内应当建设雨水收集利用的设施”。2001 年国务院批准了包括雨洪利用规划在

内的《21 世纪初期首都水资源可持续利用规划》。2003 年 3 月，经市政府批准，北京市规划委员会和北京市水利局联合发布“关于加强建设工程用地内雨水资源利用的暂行规定”，明确指出，“凡在本市行政区域内的新建、改建、扩建工程均应进行雨水利用工程设计和建设”。2004 年 10 月颁布的《北京市实施〈中华人民共和国水法〉办法》第 22 条也明确鼓励、支持单位和个人因地制宜，采取雨水收集、入渗、储存等措施开发、利用雨水资源；第 52 条规定，“园林绿化、环境卫生用水，应当采用节水技术，充分利用再生水，收集利用雨水”。2005 年 1 月，北京市人民政府颁布的《北京城市总体规划》（2004 年—2020 年）把雨洪利用作为重要内容纳入其中。2005 年 5 月，《北京市节约用水办法》中规定，“节水设施包括用水器具、工艺、设备、计量设施、再生水回用系统和雨水收集利用系统。住宅小区、单位内部的景观环境用水和其他市政杂用用水，应当使用雨水或者再生水，不得使用自来水”。2005 年 12 月 5 日，市规委、市建委、市水务局三部门联合发布了《关于加强建设项目节约用水设施管理的通知》。通知第 5 条明确了北京市雨水利用的要求，“各类建设项目均应采取雨水利用措施，雨水利用工程的设计、建设，以不增加建设区域内雨水径流量和外排水总量为标准；雨水利用应因地制宜，工程一般采用就地入渗和贮存利用等方式”。《通知》还对建筑屋顶、人行道、步行街、广场、庭院、绿地等进行了详细的雨水利用规定，对进一步推进北京市雨水利用将起到积极的作用。雨水利用法律法规的不断健全和完善为城市雨水利用的顺利开展提供了坚实的法律保障。2006 年 12 月，北京市规划委员会、北京市水利局等八个委局联合发布“关于加强建设项目雨水利用工作的通知”，明确规定：“北京市行政区域内所有新建、改建、扩建工程，均应建设雨水利用设施。雨水利用设施应与建设工程主体同时设计、同时施工、同时投入使用”。

6.5 北京市雨水集蓄利用典型系统性能评价

本文对两种雨水集蓄利用系统展开性能评价，一是住宅屋面直接泵送雨水集蓄利用系统，二是设施农业室外封闭蓄水池直接泵送系统。前一种系统在国内外已经被广泛使用，后一种系统在北京设施农业雨水利用实践中占有很高的比例。

6.5.1 住宅屋面雨水集蓄利用系统水文性能评价

典型系统构建

北京市从 2000 年左右才较系统开展城市雨水利用研究，因此，缺乏住宅屋面雨水集蓄利用系统的实际案例用于性能评价。为此，需要根据北京市的具体

情况构建典型住宅屋面雨水集蓄利用系统，以供性能评价之需。典型住宅屋面雨水集蓄利用系统的构建包括以下内容：

- 家庭规模；
- 人均用水量（人均冲厕用水量）；
- 人均集雨屋顶面积；
- 待验证蓄水池容积。

北京统计年鉴 2009 资料显示，2008 年北京户籍人口共 1229.9 万，其中非农业人口 950.7 万人；户籍人口总户数 481.2 万，其中非农业户数 363.9 万户。据此计算可知，北京市 2008 年户籍人口家庭规模约为 2.56 人/户，其中非农业户家庭规模为 2.61 人/户。因此，本文采用 3 人/户作为典型住宅屋面雨水集蓄利用系统的家庭规模。北京市人均用水量的问题已经在第四章中进行了详细的讨论，在此不再重复。

需要再次强调的是，人均屋顶面积和人均集雨屋顶面积并非同一概念。人均屋顶面积由建筑物内居住的总人数和建筑物屋顶总面积决定。人均集雨屋顶面积由使用雨水的人数和建筑物的屋顶总面积决定。资料显示，北京市 2008 年城镇居民人均住宅建筑面积为 $28.74\text{m}^2/\text{人}$ ，农村居民的人均住房面积为 $39.4\text{m}^2/\text{人}$ ，本文据此假定人均集雨屋顶面积 30m^2 。为进一步考察人均集雨屋顶面积对系统效率效益的影响，增加人均集雨屋顶面积 60m^2 以供对比研究。

在 YBS 取水模式中，需要事先假定蓄水池容积的大小，以检验不同蓄水池规模对系统集雨效率和替代效率的影响，再根据对不同蓄水池规模的集雨系统的经济性能评价，比较得出最优的蓄水池规模。依据前人的研究成果和实践经验，本文待检验的蓄水池规模分别为 0.5m^3 、 1m^3 、 1.5m^3 、 2m^3 、 3m^3 和 4m^3 。

表 6-6 典型住宅屋面雨水集蓄利用系统类型

类型	家庭规模（人）	集雨屋顶总面积（ m^2 ）	待验证蓄水池容积（ m^3 ）
RWH1	3	90	0.5
RWH2	3	90	1.0
RWH3	3	90	1.5
RWH4	3	90	2.0
RWH5	3	90	3.0
RWH6	3	90	4.0
RWH7	3	180	0.5
RWH8	3	180	1.0
RWH9	3	180	1.5
RWH10	3	180	2.0
RWH11	3	180	3.0
RWH12	3	180	4.0

表 6-6 是根据上述假设构建的 12 种典型住宅屋面雨水集蓄利用系统。本文利用北京气象站历史降雨资料（日值），采用 YBS 取水模式，依据论文第四章的性能评价方法，分别对 12 种典型系统进行水文性能评价，即系统的雨水收集效率和冲厕用水替代效率，评价结果将进一步用于系统的经济性能评价当中。具体过程如下：

1. 根据家庭规模确定集雨屋顶总面积分别为 90m 和 180m；
2. 根据家庭规模确定人均日冲厕用水量（ $121.5\text{L}/\text{人}\cdot\text{d}\times 25.93\%\times 3=94.5\text{L}/\text{d}$ ）；
3. 确定蓄水池容积大小；
4. 确定初期弃流量和径流系数，本文分别为 1mm 和 0.9，并根据历史降雨资料计算日降雨形成的日径流量；
5. 确定模拟模型为 YBS 取水模式，步距为 1 天，计算 1989 年-2008 年雨水集蓄利用系统的每日集雨量和利用量；
6. 计算雨水收集效率和雨水替代冲厕用水效率。

结果分析

经过计算、整理得出典型住宅屋面雨水集蓄利用系统水文性能评价结果表（表 6-7、6-8）。从表 6-7 中可以看出，住宅屋面雨水集蓄利用系统多年雨水收集效率介于 10%-45%之间，冲厕用水替代效率介于 30%-65%之间，年均集雨利用量介于 10-25m³ 之间。

表 6-7 典型住宅屋面雨水集蓄利用系统水文性能模拟表

类型	屋顶面积 (m ²)	蓄水池容积 (m ³)	降雨量 (m ³)	雨水利用量 (m ³)	年均集用量 (m ³)	集雨效率 (%)	替代效率 (%)
RWH1	90	0.5	889.6	217.5	10.9	24.4	31.5
RWH2	90	1.0	889.6	276.5	13.8	31.1	40.1
RWH3	90	1.5	889.6	309.9	15.5	34.8	44.9
RWH4	90	2.0	889.6	332.2	16.6	37.3	48.2
RWH5	90	3.0	889.6	358.5	17.9	40.3	52.0
RWH6	90	4.0	889.6	379.5	19.0	42.7	55.0
RWH7	180	0.5	1779.3	242.1	12.1	13.6	35.1
RWH8	180	1.0	1779.3	314.1	15.7	17.7	45.5
RWH9	180	1.5	1779.3	352.6	17.6	19.8	51.1
RWH10	180	2.0	1779.3	377.8	18.9	21.2	54.8
RWH11	180	3.0	1779.3	408.4	20.4	23.0	59.2
RWH12	180	4.0	1779.3	432.1	21.6	24.3	62.6

注：降雨量、雨水利用量为 1989-2008 年总量。

从表 6-8 可以看出，雨水集蓄利用系统的年雨水收集利用量与年降雨量之间并不存在必然联系。例如，1994 年降雨量高达 803.1mm，但各种类型雨水集

蓄利用系统的年雨水利用量都不高；2003 年降雨量虽仅有 432.3mm，但其年雨水利用量是所有年份中最高的。可见，仅以年降雨量来判断系统的供水能力会出现很大的误差。

表 6-8 1989-2008 各年住宅屋面雨水集蓄利用系统水文性能模拟表

RWH 年份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	降雨量 (mm)
1989	9.6	12.8	15.5	17.1	18.3	19.3	10.7	13.9	16.3	17.5	18.5	19.5	404.8
1990	11.4	14.0	16.0	17.5	19.8	21.8	12.1	14.8	16.7	18.2	20.3	22.2	531.0
1991	12.1	15.1	16.2	16.7	17.7	18.7	13.1	16.8	18.6	19.6	21.1	22.1	728.2
1992	14.2	16.9	18.3	19.3	20.5	21.5	15.5	18.7	20.1	20.9	21.9	22.9	540.2
1993	10.6	13.2	14.3	15.3	16.5	17.5	11.6	15.0	17.1	18.6	20.9	22.9	501.5
1994	10.0	11.8	13.3	14.7	16.3	17.3	11.3	13.7	15.2	16.6	17.9	18.9	803.1
1995	11.0	13.7	15.1	15.8	16.8	17.8	12.1	15.3	16.3	16.8	17.8	18.8	543.9
1996	10.3	11.7	12.7	13.3	14.3	15.3	11.1	13.2	13.8	14.3	15.3	16.3	697.5
1997	9.5	13.1	14.8	15.8	17.2	18.2	10.5	14.9	17.5	19.0	20.5	21.5	407.1
1998	13.4	17.1	18.5	19.5	21.2	22.2	14.3	18.3	19.8	20.8	22.8	24.1	703.5
1999	10.3	13.1	14.9	15.6	16.6	17.6	12.1	16.2	18.6	20.1	21.4	22.4	266.2
2000	10.0	13.4	15.3	16.6	17.9	18.9	12.1	16.5	19.0	20.9	22.9	24.0	359.1
2001	8.5	10.9	12.9	14.7	16.0	17.0	10.9	14.6	16.5	17.9	19.8	20.8	319.8
2002	10.0	13.5	15.9	17.0	18.2	19.2	11.6	15.9	18.8	20.7	22.2	23.2	362.0
2003	13.6	18.0	20.4	22.0	23.0	24.0	15.8	20.7	23.1	24.7	26.7	27.8	432.3
2004	11.6	14.6	16.9	18.1	19.2	20.2	12.4	16.4	18.7	19.6	20.6	22.0	470.8
2005	9.9	13.0	14.0	14.5	15.5	16.5	10.3	14.3	16.0	17.5	18.6	19.6	398.2
2006	7.5	9.4	10.4	11.4	12.5	13.5	8.7	10.7	12.2	13.2	14.2	15.2	308.7
2007	10.2	13.4	15.4	17.4	20.1	21.2	10.9	14.5	17.1	19.2	22.0	24.0	480.9
2008	13.9	17.8	19.3	20.0	21.0	22.0	15.2	19.6	21.3	21.8	22.8	23.8	626.0
1989-2008	217	277	310	332	359	380	242	314	353	378	408	432	9885

蓄水池规模。蓄水池规模对系统的集雨效率有着非常明显的影响。在家庭人口规模和集雨屋顶面积一定的情况下，蓄水池规模越大则年集雨利用量越多。但两者的增长速度并不一致。从图 6-1 可以看出，蓄水池规模越小，则单位蓄水池容积雨水收集利用量越大。因此，尽管蓄水池规模的增长可以增加系统的集雨和供水效率，但蓄水池存储空间利用效率却是下降的。因此，通过不断增加蓄水池容积，一味追求提高系统的集雨利用效率而忽视蓄水池规模变化对自身利用效率的影响，最终将导致系统成本收益不平衡。这一结论提醒我们，仅仅根据年降雨量、径流系数和屋顶面积来估算雨水收集利用量并不可取，雨水集蓄利用系统的实际集雨效率受限于系统的经济性。

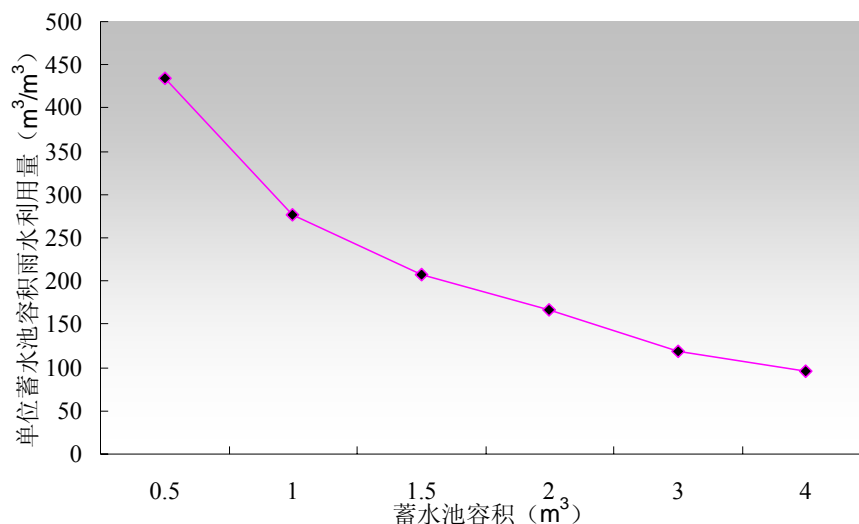


图6-1 雨水利用量与蓄水池容积变化关系图

集雨屋顶面积。毫无疑问，家庭集雨屋顶面积越大，则降落到屋顶上的雨水量越多。在家庭规模和蓄水池规模确定的情况下，集雨屋顶面积对集雨效率和替代效率有显著影响。集雨屋顶面积越大则系统集雨效率越低，但雨水替代效率越高。因此，集雨屋顶面积大小要根据具体的目的来设置，如果要提高系统的雨水收集效率，则可以减少人均集雨屋顶面积；若要提高雨水替代效率，则应当增加人均集雨屋顶面积。总之，人均屋顶集雨面积大小的选取涉及到了社会 and 用户两个不同层面的利益。

用水量。在雨水集蓄利用系统中，用水量的多少直接决定着蓄水池内雨水的存量，从而影响到系统的集雨利用效率。在蓄水池规模和集雨屋顶面积一定的情况下，用水量越大则蓄水池的利用效率越高，可收集利用的雨水相对增加，但系统的替代效率将下降。

降雨。在所有影响因素中，降雨是对雨水集蓄利用影响最大的因素。降雨对雨水集蓄利用系统的水文性能影响主要表现在年降雨量和降雨年内分布两个方面。按照通常的理解，年降雨量越大则雨水集蓄利用系统的集雨利用效率越高。这样理解的假设前提是降雨的年内分布相同，但这往往与事实不符。就北京的降雨而言，存在年降雨量越大，则降雨年内分布越集中的特点（见图 6-2），这将直接导致系统的集雨利用效率下降。就拿 RWH1 雨水集蓄利用系统来说，单次降雨量达到 7mm，蓄水池就将发生溢流。因此，如果日降雨量超过 7mm 的降雨事件连续发生，则第二次降雨的所有雨量都将因溢流而损失；但如果第二次降雨发生在蓄水池内存水被用完之后，则溢流损失可降为零。可见，降雨的年内分布对雨水集蓄利用系统的影响甚大。对 1989-2008 年住宅屋面雨水集蓄利用系统水文性能模拟结果来看，在年降雨量大的年份，雨水收集利用量并不一定明显提高，甚至可能低于年降雨量较小的年份。这很好的解释了北京住宅屋面雨水集蓄利用系统集雨利用效率普遍不高的现象，也让我们更好的理解

到，要准确评价雨水集蓄利用系统的雨水收集利用效率，必须将年降雨量和降雨的年内分布特征同时加以考虑。

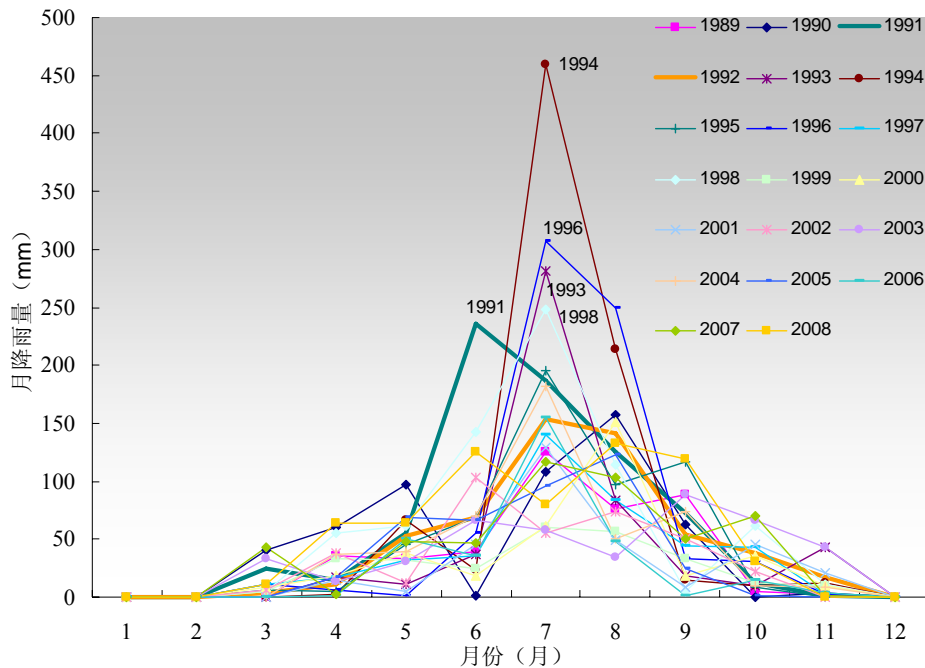


图6-2 1989-2008年北京气象站各月降雨量分布图

月步距模拟及 θ 值确定

正如前文所讨论的，采用日步距进行水文性能模拟可以获得精度很高的模拟结果，但是数据获取难度大，模拟过程较为复杂。而采用月步距进行水文性能模拟得到的结果可能与实际情况会存在较大的差异，但数据获取相对简单，模拟过程也更加便捷。为此，在日步距水文性能模拟结果基础之上，确定蓄水池的存储系数 θ 值修正月步距模拟结果，可为今后雨水集蓄利用系统的模拟提供简便的方法（关于 θ 值详见 4.11.3）。

使用月步距对住宅屋面雨水集蓄利用系统水文性能模拟的过程与日步距的模拟过程基本相同，但使用的数据以1个月为步距，具体模拟过程不再重复。从两种步距模拟结果的对比中可以看出（表 6-9），当蓄水池容积较小时，蓄水池容积与日用水量的比值也较小，模拟的雨水利用量对步距的选择十分敏感，两种步距间的模拟误差可达 40%左右。但随着蓄水池容积的增加，日步距和月步距模拟结果之间的差异减小，当蓄水池容积增大到 4m^3 时，日、月步距模拟的差异仅为 10%左右。同时，集雨面面积的大小对同步距的模拟结果基本没有影响。可见，在采用月步距对住宅屋面雨水集蓄利用系统水文性能进行模拟时，应根据蓄水池容积及用水量的差异选取 θ 值，北京地区 θ 值的范围大致在 0.6-0.9 之间。

表 6-9 住宅屋面雨水集蓄利用日步距、月步距模拟结果对比

类型	屋顶面积 (m ²)	蓄水池容积 (m ³)	蓄水池容积/日用水量	20 年雨水利用量 (m ³)		θ值
				日步距模拟	月步距模拟	
RWH1	90	0.5	5.3	217.5	368.7	0.59
RWH2	90	1.0	10.6	276.5	380.6	0.73
RWH3	90	1.5	15.9	309.9	391.6	0.79
RWH4	90	2.0	21.2	332.2	402.6	0.83
RWH5	90	3.0	31.7	358.5	423.4	0.85
RWH6	90	4.0	42.3	379.5	443.0	0.86
RWH7	180	0.5	5.3	242.1	417.3	0.58
RWH8	180	1.0	10.6	314.1	430.5	0.73
RWH9	180	1.5	15.9	352.6	442.7	0.80
RWH10	180	2.0	21.2	377.8	454.2	0.83
RWH11	180	3.0	31.7	408.4	475.4	0.86
RWH12	180	4.0	42.3	432.1	495.4	0.87

住宅屋面雨水集蓄利用系统的水文性能的评价过程和结果分析,使我们更加清晰的了解了集雨面积、用水量、蓄水池规模、降雨等要素之间的相互关系及对雨水集蓄利用系统的影响。但仅仅凭借集雨效率和替代效率两个指标仍无法判断系统的优劣。例如,一个雨水集蓄利用系统的集雨效率很高,但在其寿命期内,集雨利用总成本却高于总收益,则这个系统仍不能被人们所接受。因此,在水文性能评价基础之上,对住宅屋面集雨利用系统的经济性能进行评价是很有必要的。

6.5.2 住宅屋面雨水集蓄利用系统经济评价

根据本文第五章介绍的经济评价方法,住宅屋面雨水集蓄利用系统微观经济评价过程如下:

住宅屋面雨水集蓄利用系统成本核算的步骤为:

1. 确定雨水集蓄利用的类型(见表 6-6),类型中包括集雨屋顶面积、蓄水池大小和年均集雨利用量等信息;
2. 确定系统模拟期,本文的模拟初年设为 2010 年,模拟末年为 2029 年。模拟期与系统的使用寿命相同,即系统的使用寿命为 30 年;
3. 确定蓄水装置的类型及价格。住宅屋面雨水集蓄利用系统采用塑胶蓄水池,使用寿命 30 年,其价格依据第五章价格模拟公式(5-8)进行计算;
4. 确定其它设备的使用寿命和价格。其中,水泵、电磁阀和浮动阀的使用寿命均为 15 年,价格分别为 550 元/个、50 元/个和 30 元/个,逆止阀和过滤器使用年限为 30 年,价格为 50 元/个和 100 元/个;

5. 确定系统的维护和运行费用。其中，系统维护可由用户亲自完成的，维护费不计入成本；运行费用指水泵抽水电费，可依据用水量、单位水量耗电量和电价核定；

住宅屋面雨水集蓄利用系统年收益来自于节约的自来水费用，年收益等于年用水量与当年水价的乘积。

在确定了初期成本、年成本和收益后，可根据公式（5-3、5-6）计算系统的静态效益成本值（ α_1 ）和动态效益成本值（ α_2 ），其结果见表 6-10

表 6-10 住宅屋面雨水集蓄利用系统经济评价表

类型	蓄水池容积 (m^3)	总成本 (元)	总收益 (元)	单位成本 (元/ m^3)	NCV (元)	NBV (元)	α_1	α_2
RWH1	0.5	1779	2218	4.7	1545	1397	1.25	0.90
RWH2	1.0	2091	2815	4.5	1851	1773	1.35	0.96
RWH3	1.5	2392	3162	4.6	2148	1992	1.32	0.93
RWH4	2.0	2686	3386	4.9	2440	2133	1.26	0.87
RWH5	3.0	3263	3652	5.6	3015	2300	1.12	0.76
RWH6	4.0	3833	3876	6.3	3583	2441	1.01	0.68
RWH7	0.5	1786	2468	4.3	1549	1555	1.38	1.00
RWH8	1.0	2102	3203	3.9	1858	2017	1.52	1.09
RWH9	1.5	2403	3590	4.1	2156	2261	1.49	1.05
RWH10	2.0	2699	3856	4.3	2449	2428	1.43	0.99
RWH11	3.0	3277	4162	4.9	3024	2621	1.27	0.87
RWH12	4.0	3847	4406	5.5	3592	2775	1.15	0.77

注：表中字母含义参见第五章，单位成本指雨水收集利用的单位成本。

从表 6-10 可以看出，在集雨屋顶面积一定的情况下，随着蓄水池容积的不断增大，雨水集蓄利用单位成本逐渐升高，静态、动态成本效益均存在下降趋势。各种类型住宅屋面雨水集蓄利用系统的集雨成本都很高，其中仅有 RWH8 一种类型的单位成本略低于现行的北京市居民水价。可见，在北京市的低水价没有出现较大调整情况下，住宅屋面雨水集蓄利用技术的应用前景并不乐观。在 30 年的模拟期内，12 种住宅屋面集雨利用类型的静态效益成本值均大于 1，但在考虑了折现率后，只有 RWH7、RWH8、RWH9 等 3 种类型的动态效益成本值大于 1。这表明，人均集雨屋顶面积越大，则系统的经济性越好；集雨屋顶总面积相对于蓄水池容积的比值越大则系统的经济性越好。将住宅屋面雨水集蓄利用的水文和经济性能评价结果相比较可以发现，在集雨屋顶总面积确定的情形下，随着蓄水池容积的增大，系统雨水收集和替代效率不断提高，而系统的微观经济效益则是先升后降。在 12 种住宅屋面雨水集蓄利用系统中，RWH8 的经济性最显著，是经济最优的雨水集蓄利用系统，但其雨水收集效率和替代效率却分别只有 17.7% 和 45.5%；而 RWH9 的经济显著性虽不及 RWH8，

但其雨水收集和替代效率有所增加，分别为 19.8%和 51.1%。

从住宅屋面雨水集蓄利用系统水文和经济性能评价中可以得出以下结论：

1. 从系统的效率来看，人均集雨屋顶面积和蓄水池容积越大，则雨水收集和替代效率越高，但后两者的增速明显不及前两者的增速；
2. 住宅屋面雨水集蓄利用系统的集雨效率对降雨的年内分布特征十分敏感，而与年降雨量的大小没有必然的联系。在年降雨量等同的情况下，降雨年内分布过于集中则不利于雨水的收集利用。因此，在采用多年平均降雨量来估算一地的集雨利用现实潜力时，还需要综合考查该地的降雨年内分布特征；
3. 住宅屋面雨水集蓄利用系统的经济性受用水量、降雨、集雨屋顶面积和蓄水池等各因素共同影响。在用水量、降雨和集雨屋顶面积确定的情况下，存在最优的蓄水池经济规模；
4. 在当前的水价水平下，从用户利益出发，住宅屋面雨水集蓄利用系统的效益不明显，并且存在雨水利用效率提高和系统微观经济效益下降之间的矛盾。因此，为促进雨水的收集利用，当地政府应当制定相关的财政补偿政策。

6.5.3 设施农业雨水集蓄利用系统水文性能评价

典型系统构建

为评价设施农业雨水集蓄利用系统水文性能，首先须构建典型系统。本文以北京市怀柔区某设施农业雨水集蓄利用示范点为例，对雨水集蓄利用系统进行构建，包括的要素为：

1. 设施农业规模；
2. 设施农业用水量；
3. 集雨面面积；
4. 待验证蓄水池规模；

该示范点设施农业包括 5 个温室，每个温室占地 1 亩（约 667m^2 ），设施农业总占地面积 $3,335\text{m}^2$ 。以种植黄瓜为例核算设施农业用水量，1 月份为休耕期，期间农业用水量为零，从 2 月 1 日起对黄瓜进行灌溉，每次灌溉量 $7\text{m}^3/\text{亩}$ ，灌溉频率为 6 天一次，则示范点 5 个温室年灌溉用水量约为 $1,960\text{m}^3/\text{年}$ 。设施农业集雨面面积与设施农业占地面积等同。为了验证蓄水池规模对系统性能的影响，蓄水池容积分别设置为 50m^3 、 100m^3 、 150m^3 、 200m^3 、 250m^3 、 300m^3 、 350m^3 、 400m^3 、 450m^3 和 500m^3 等 10 种，根据蓄水池规模可以构建出 10 种典型系统。

参考本文第四章设施农业水文性能评价方法对各典型系统水文性能进行评价，具体过程如下：

1. 确定集雨面面积, 即 $3,335\text{m}^2$;
2. 确定农业生产用水量, 即从 2 月 1 日起, 到 12 月 31 日止, 灌溉用水量为每 6 天 35m^3 ;
3. 确定蓄水池容积, 即 50m^3 - 500m^3 共 10 种蓄水池容积;
4. 确定初期弃流量和径流系数, 设施农业雨水集蓄利用系统的初期弃流量为零, 径流系数为 0.9。并根据历史降雨资料计算出日径流总量;
5. 采用 YBS 取水模式, 步距为 1 天, 计算 1989 年-2008 年雨水集蓄利用系统每日集雨量和雨水利用量;
6. 计算雨水收集效率和雨水替代地下水的效率。

评价结果分析

从表 6-11 中可以看出, 对 1989 年-2008 年的模拟结果显示, 各类型集雨系统的年均集雨量介于 700m^3 - $1,300\text{m}^3$ 之间, 收集和替代效率介于 35%-80% 之间, 与住宅屋面雨水集蓄利用系统相比较, 雨水收集效率有了很大的提高, 这主要是得益于用水量的大幅度提高。系统雨水利用量、雨水收集效率和雨水替代效率随着蓄水池容积的增大而增加。蓄水池容积按照 50m^3 递增, 但雨水利用量、雨水收集效率和替代效率的增长呈现递减趋势, 表明蓄水池的空间利用效率随着其容积的增加而下降, 这一点从单位蓄水池容积的雨水利用量看更为明显。

表 6-11 设施农业雨水集蓄利用系统水文性能模拟表

类型	蓄水池容积 (m^3)	雨水利用量 (m^3)	年均集用量 (m^3)	收集效率 (%)	替代效率 (%)	单位容积雨水利用量 (m^3/m^3)
RWH1	50	14856	742.8	45.2	37.9	297
RWH2	100	17868	893.4	54.4	45.6	179
RWH3	150	19307	965.3	58.8	49.3	129
RWH4	200	20325	1016.2	61.9	51.8	102
RWH5	250	21272	1063.6	64.8	54.3	85
RWH6	300	22172	1108.6	67.5	56.6	74
RWH7	350	22971	1148.5	69.9	58.6	66
RWH8	400	23675	1183.8	72.1	60.4	59
RWH9	450	24292	1214.6	74.0	62.0	54
RWH10	500	24874	1243.7	75.7	63.5	50

从表 6-12 的模拟结果可以看出, 在年降雨量和降雨年内分布确定情况下, 随着蓄水池容积的增大, 系统收集利用雨量不断增加, 但收集利用雨水的增量呈现递减趋势。当蓄水池容积达到一定值时, 收集利用量将不再增加。例如在 1989 年, 当蓄水池容积增加到 450m^3 时, 收集利用雨水量达到最大值, 蓄水池容积继续增加将不再导致集雨量增加, 表明蓄水池容积大于 450m^3 后蓄水池不再发生溢流。类似的情况也发生在 1992 年、1997 年、1999-2003 年、2006 年

和 2007 年等年份。结合表 6-12 和图 6-3 可以发现,对于同一种雨水集蓄利用系统而言,年集雨利用量与年降雨量之间存在一定的弱相关性,即年降雨量越大,则雨水收集利用量相对越多。但这种关系存在不确定性,主要是受到降雨年内分布均匀程度的影响。例如 1994 年和 1996 年是降雨较丰富的年份,但收集利用雨水量反而不及降雨较少的 2003 年,说明这些年份的降雨量虽多,但降雨过于集中,结果导致很多降雨资源经蓄水池溢流损失。

表 6-12 1989-2008 各年设施农业雨水集蓄利用系统水文性能模拟表

RWH 年份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	降雨量 (mm)
1989	704	912	963	1013	1063	1113	1163	1213	1215	1215	404.8
1990	777	941	1091	1199	1263	1313	1363	1413	1463	1513	531.0
1991	848	952	1002	1052	1102	1152	1202	1252	1302	1352	728.2
1992	942	1080	1143	1193	1243	1293	1343	1388	1388	1388	540.2
1993	693	790	840	890	940	990	1040	1095	1195	1295	501.5
1994	657	777	831	881	931	981	1031	1081	1131	1181	803.1
1995	727	908	960	1010	1060	1110	1160	1210	1260	1310	543.9
1996	705	772	822	872	922	972	1022	1072	1122	1172	697.5
1997	706	861	956	1006	1056	1106	1156	1206	1222	1222	407.1
1998	904	1112	1175	1225	1275	1325	1375	1425	1475	1498	703.5
1999	650	777	799	799	799	799	799	799	799	799	266.2
2000	641	796	896	957	1007	1057	1078	1078	1078	1078	359.1
2001	550	724	807	857	907	957	960	960	960	960	319.8
2002	711	827	912	962	1012	1062	1087	1087	1087	1087	362.0
2003	929	1119	1215	1265	1298	1298	1298	1298	1298	1298	432.3
2004	791	953	1012	1062	1112	1162	1212	1262	1312	1362	470.8
2005	651	773	838	888	938	988	1038	1088	1138	1188	398.2
2006	571	672	722	772	822	872	922	927	927	927	308.7
2007	753	961	1086	1136	1186	1236	1286	1336	1373	1373	480.9
2008	944	1162	1237	1287	1337	1387	1437	1487	1549	1631	626.0

结果验证

北京市怀柔区典型设施农业雨水集蓄利用示范点于 2008 年年初建成使用,蓄水池规格长 10m、宽 5m、高 2.5m,蓄水容积 150m³。2008 年 5-9 月份对雨水集蓄利用系统的监测结果为:监测期示范点降雨 22 次,降雨量 530.3mm,同期收集雨水 745m³,利用雨水灌溉 660m³,雨水收集效率为 42.15%。

根据日降雨量数据和示范点实际农业生产用水量,采用 YBS 取水模式进行日步距模拟的结果为:2008 年 5-9 月份收集雨水 763m³,利用雨水 658m³,蓄

水池内剩余存水 105m³。可见，采用本文构建的日步距模型模拟的结果与雨水集蓄利用系统实际的运行结果十分接近，模拟的收集雨水量略高于实际雨水收集量，误差范围在 2%左右。

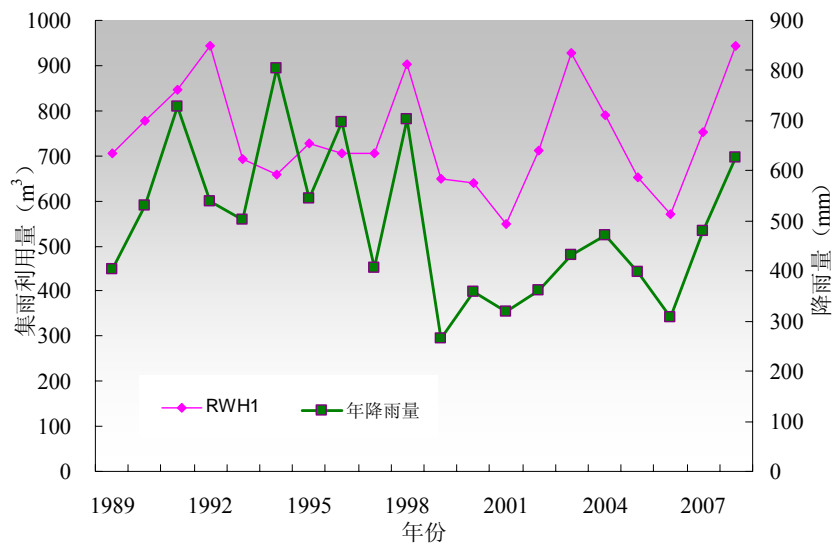


图6-3 设施农业雨水集蓄利用系统集雨利用量与降雨量关系图

月步距模拟及θ值确定

对住宅屋面集雨利用系统水文性能的月步距模拟结果表明，采用月步距模拟的结果与采用日步距模拟的结果间存在一定的误差。为此，有必要对设施农业雨水集蓄利用系统进行同样的对比分析。在设施农业雨水集蓄利用系统水文性能月步距模拟中，使用的降雨量和用水量数据的步距均为 1 个月，模拟结果见表 6-13。

表 6-13 设施农业雨水集蓄利用日步距、月步距模拟结果对比

类型	蓄水池容积 (m ³)	蓄水池容积/日用水量	20 年雨水利用量 (m ³)		θ值
			日步距模拟	月步距模拟	
RWH1	50	8.6	14856	19505	0.76
RWH2	100	17.1	17868	20505	0.87
RWH3	150	25.7	19307	21426	0.90
RWH4	200	34.3	20325	22291	0.91
RWH5	250	42.9	21272	23099	0.92
RWH6	300	51.4	22172	23866	0.93
RWH7	350	60.0	22971	24474	0.94
RWH8	400	68.6	23675	24976	0.95
RWH9	450	77.1	24292	25434	0.96
RWH10	500	85.7	24874	25787	0.96

从表中可以看出，月步距模拟结果的误差大小明显受到蓄水池容积大小的

影响。但是，如果将住宅屋面与设施农业雨水集蓄利用月步距、日步距水文性能模拟结果放在一起考虑，则发现 θ 值与蓄水池容积的绝对大小之间缺乏必然的联系，但与蓄水池容积和日用水量之间的比值大小却关系甚密。例如，住宅屋面雨水集蓄利用系统的蓄水池容积与日用水量的比值为 10.6 时，对应的 θ 值为 0.73，而设施农业雨水集蓄利用系统的蓄水池容积与日用水量的比值为 8.6 时，对应的 θ 值为 0.76。因此，仅依据蓄水池容积的大小来确定 θ 值显然是不合适的， θ 值的确定需要综合考虑蓄水池容积与用水量之间的比例关系。北京地区的 θ 值大小可以参考表 6-9 和 6-13 取值。

6.5.4 设施农业雨水集蓄利用系统经济评价

设施农业雨水集蓄利用系统经济评价将分别从用户和政府角度出发，采用微观和宏观两种经济评价方法。

微观经济评价

设施农业雨水集蓄利用系统微观经济评价需先确定集雨利用的成本和效益，并进而利用效益成本法评判系统的经济可行性，具体过程如下：

1. 确定蓄水池容积，根据第五章公式（5-9）计算出对应的初期投资和维护费用。根据北京市设施农业雨水集蓄利用建设的实践，农户出资分别按照蓄水池造价的 30%和 50%两种情况进行核算，除水泵的替换费用外，其它维护费用按照初期投资的 1%计算；
2. 确定模型模拟期，设施农业雨水集蓄利用系统模拟初年为 2010 年，系统使用寿命 30 年，则模拟期为 30 年；
3. 确定当地的地下水水位，并进而计算出雨水利用可节约的抽取地下水电费。经实地调研，设施农业雨水集蓄利用示范点所在地的地下水水位已达 40m，根据第五章公式（5-14）计算雨水集蓄利用可节约的电费；
4. 确定蓄水池底面面积，并进而计算出蓄水池的生产性收入。蓄水池年生产性收入可按照第五章公式（5-16）进行计算；
5. 在确定了模拟期内各年的成本收益后，依据第五章公式（5-3、5-6）计算出系统的静态和动态效益成本值；

目前，北京市农业灌溉用水取水费用仅包括了地下水抽水费用和机井管理维护费用。然而，北京市水资源短缺现象不断加剧的状况使人们越来越重视水资源的价值，关于农业取水是否要征收一定的水资源费成为了争论的焦点，也是政策制定者们正面临的一个两难抉择。从提高水资源利用效率的角度看，收取农业灌溉用水水资源费是一种有效的手段，尤其是在当前北京农业用水效率水平较低的情况下，其作用将更为明显；然而，从农业、农村发展和粮食安全角度看，农业水资源费的征收将使农业生产的用水成本在已经较高的现状下继

续升高,将会影响农民的粮食生产积极性。2007年3月,北京市发改委、市水务局和市财政局联合发布了“北京市农业用水水资源费管理暂行办法”。该办法规定了农业用水超额使用的征费标准。其中,设施农业限额标准为每亩每年 360m^3 ,超过限额的用水量按照 $0.16\text{元}/\text{m}^3$ 征收水资源费。

从长远来看,为了保障城市水资源的可持续利用,政府向农民征收一定的水资源费并不是没有可能。而一旦制定了农业用水水资源费,势必会对设施农业雨水集蓄利用系统的经济效益产生积极的影响。为此,本文分别假定了农业用水水资源费为 $0.3\text{元}/\text{m}^3$ 、 $0.5\text{元}/\text{m}^3$ 和 $1.26\text{元}/\text{m}^3$ ($1.26\text{元}/\text{m}^3$ 是北京市当前水资源费征收标准)3种情景,考察各种情景下农户独立投资设施农业雨水集蓄利用系统的经济可行性。经济评价过程与未征收水资源费时的过程基本一致,不同的是雨水集蓄利用系统的初期投资按全额计算,而地下水的用水成本中增加了水资源费的支出。

微观经济评价结果

从设施农业雨水集蓄利用系统的微观经济评价结果来看(表6-14、6-15),对农户而言,在政府按照初期投资70%比例实行资助时,采用雨水收集利用技术具有很好的经济效果;这是因为,尽管雨水收集利用并不能直接节约用户的水费(农民灌溉用水免水资源费),但一方面,随着地下水水位的不断下降,地下水抽水费用不断增加,利用雨水可以大大节约电费支出。

表 6-14 设施农业雨水集蓄利用系统微观经济评价表(30%投资比例)

类型	蓄水池 (m^3)	总成本 (元)	总收益 (元)	生产收入 (元)	单位成本 ($\text{元}/\text{m}^3$)	NCV (元)	NBV (元)	α_1	α_2
RWH1	50	9224	21092	150	0.37	8152	13844	2.29	1.70
RWH2	100	14858	28956	300	0.49	13172	19065	1.95	1.45
RWH3	150	19823	35063	450	0.61	17596	23141	1.77	1.32
RWH4	200	24399	40700	600	0.71	21673	26911	1.67	1.24
RWH5	250	28705	46258	750	0.80	25509	30628	1.61	1.20
RWH6	300	32808	51763	900	0.88	29165	34312	1.58	1.18
RWH7	350	36749	57155	1050	0.95	32676	37922	1.56	1.16
RWH8	400	40557	62442	1200	1.02	36069	41463	1.54	1.15
RWH9	450	44252	67631	1350	1.08	39361	44940	1.53	1.14
RWH10	500	47849	72781	1500	1.14	42566	48392	1.52	1.14

另一方面,如果农户能够合理利用蓄水池的地下空间进行农业生产活动,还可以获得额外的生产性收入。但是,当政府资助比例下降到50%时,只有RWH1具备经济可行性。可见,政府投资对于设施农业雨水集蓄利用系统的推广和应用起着十分重要的作用。不过应该引起注意的是,本文假定蓄水池生产性收入一直保持在当前水平而不发生变化,这可能与实际情况不符。如果蓄水

池生产性收入是逐年递增的, 则大容积蓄水池的效益成本比值会有较明显的提高。另外, 雨水收集利用的单位成本随着蓄水池容积的增加而提高, 这与蓄水池的空间利用效率随着蓄水池容积增大而减少的结论保持一致。

表 6-15 设施农业雨水集蓄利用系统微观经济评价表 (50%投资比例)

类型	蓄水池 (m ³)	总成本 (元)	总收益 (元)	生产收入 (元)	单位成本 (元/m ³)	NCV (元)	NBV (元)	α_1	α_2
RWH1	50	12835	21092	150	0.53	11763	13844	1.64	1.18
RWH2	100	20973	28956	300	0.72	19286	19065	1.38	0.99
RWH3	150	28145	35063	450	0.89	25917	23141	1.25	0.89
RWH4	200	34754	40700	600	1.05	32028	26911	1.17	0.84
RWH5	250	40974	46258	750	1.18	37778	30628	1.13	0.81
RWH6	300	46900	51763	900	1.30	43257	34312	1.10	0.79
RWH7	350	52593	57155	1050	1.41	48520	37922	1.09	0.78
RWH8	400	58093	62442	1200	1.51	53605	41463	1.07	0.77
RWH9	450	63430	67631	1350	1.61	58539	44940	1.07	0.77
RWH10	500	68626	72781	1500	1.70	63344	48392	1.06	0.76

表 6-16 是假定农业用水水资源费征收标准分别为 0.3 元/m³、0.5 元/m³ 和 1.26 元/m³, 农户独立投资情景下的设施农业雨水集蓄利用系统的微观经济评价结果。从投资的效益成本比值看, 对于大多数设施农业雨水集蓄利用类型而言, 较低的水资源费并不能起到明显的成本节约效果。因此, 即使北京市政府真正实施农业用水水资源费, 也并不能对雨水集蓄利用系统的推广起到很大的作用。

表 6-16 征收水资源费情景下设施农业雨水集蓄利用系统微观经济评价

类型	蓄水池 (m ³)	水资源费 0.3 元/m ³		水资源费 0.5 元/m ³		水资源费 1.26 元/m ³	
		α_1	α_2	α_1	α_2	α_1	α_2
RWH1	50	1.27	0.88	1.47	1.03	2.25	1.57
RWH2	100	0.90	0.62	1.04	0.72	1.61	1.12
RWH3	150	0.71	0.49	0.83	0.57	1.28	0.89
RWH4	200	0.60	0.41	0.70	0.48	1.08	0.75
RWH5	250	0.53	0.36	0.62	0.43	0.96	0.67
RWH6	300	0.48	0.33	0.56	0.39	0.87	0.60
RWH7	350	0.44	0.30	0.51	0.36	0.80	0.56
RWH8	400	0.41	0.28	0.48	0.33	0.74	0.52
RWH9	450	0.38	0.26	0.45	0.31	0.70	0.48
RWH10	500	0.36	0.25	0.42	0.29	0.66	0.46

在北京设施农业雨水集蓄利用技术的推广过程中, 现有很多系统的设计并没有考虑蓄水池的多功能性, 即蓄水池只用于收集雨水, 而在一年中漫长的无雨季节则被闲置不用, 这种设计应该不符合农户的需求。从表 6-17 中可以看出,

如果雨水集蓄利用系统仅能节约抽取地下水的电费，则除了 RWH1 以外，其它类型的经济效益均很差。这一结果很好的解释了在技术的推广实践过程中，农户对设施农业雨水集蓄利用系统所持的怀疑态度，尤其是在地下水较丰富的地区，即使政府资助比例高达 70-80%，农民使用雨水集蓄利用技术也基本上无利可图。因此，要在北京大力推广这一节约用水的技术，还应从两个方面入手：一是提高政府在初期投资中的资助比例，二是实现蓄水池的多功能性作用。

表 6-17 设施农业雨水集蓄利用系统微观经济评价（无生产性收入）

类型	蓄水池 (m ³)	总成本 (元)	总收益 (元)	NCV (元)	NBV (元)	α_1	α_2
RWH1	50	9224	16592	8152	10816	1.80	1.33
RWH2	100	14858	19956	13172	13009	1.34	0.99
RWH3	150	19823	21563	17596	14056	1.09	0.80
RWH4	200	24399	22700	21673	14798	0.93	0.68
RWH5	250	28705	23758	25509	15487	0.83	0.61
RWH6	300	32808	24763	29165	16142	0.75	0.55
RWH7	350	36749	25655	32676	16724	0.70	0.51
RWH8	400	40557	26442	36069	17237	0.65	0.48
RWH9	450	44252	27131	39361	17686	0.61	0.45
RWH10	500	47849	27781	42566	18109	0.58	0.43

总之，从设施农业雨水集蓄利用系统的微观经济评价中可知，如果能够合理利用蓄水池，并且得到地方政府较高比例的投资资助，那么所有类型的雨水集蓄利用系统均具有较好的经济性，农户可根据具体的需求选择不同类型的系统。例如，在地下水水位较低的区位，农户可选择容积较大的蓄水池从而可节约更多的电费。如果蓄水池的生产性收入较高，农户同样可选择规模较大的蓄水池。

宏观经济评价

在北京市设施农业雨水集蓄利用系统的推广示范实践过程中，农户和政府按照一定的比例进行投资。因此，除了从农户角度进行微观经济评价以外，还有必要从政府或社会角度对系统进行宏观经济评价，以判别各雨水集蓄利用系统类型的经济可行性。与设施农业雨水集蓄利用微观经济评价不同的是，宏观经济评价所要考虑的成本和收益要素更为广泛，需要模拟的成本和收益因素已经在第五章进行了详细的论述。其中，在成本方面，包括了雨水集蓄利用系统建设的所有初期投资以及后期的运行和维护费用，而对系统应用可能引起的环境成本和风险成本则忽略不计；在收益方面，不仅包括农户的微观经济收益，还应当包括减少农业水利设施投资节约的费用、增加区域内可用水资源量获得的收益和减少地下水超采而减少的经济损失等三种。对这些收益的具体评价方

法和过程已在前述章节中有了较为详细的介绍，此处不再重复。

宏观经济评价结果

从表 6-18 可以看出，在 30 年的模拟期内，10 种类型的雨水集蓄利用系统都具有非常显著的宏观经济效益。系统效益的显著性存在随着蓄水池增大而下降的趋势，这主要是因为集雨面面积和农业用水量固定的前提下，蓄水池规模越小，则收集雨水的利用效率越高，即单位容积蓄水池的集雨利用效率越高。但是，效益显著性的下降由快转慢表明，大规模蓄水池尽管在集雨利用方面的效率有所下降。但是，蓄水池规模的增大一方面可以增加总集雨利用量，另一方面可以增加农业生产空间，由此引起的经济效益增加可以在一定程度上弥补蓄水池集雨效率下降导致的不经济。

另外，从雨水收集利用的单位成本方面来看，设施农业用水集蓄利用系统也具有一定的优越性，例如 RWH1 到 RWH4 四种类型系统的单位制水成本都不到 2 元/m³，这一成本应该大大低于北京郊区县正在开展的再生水灌溉工程的单位成本。目前，北京市污水再生处理的成本在 1-2 元/m³ 左右，而将再生水从污水处理厂输送到灌区还需要大量的水利投资和后期维护费用。因此，即使不考虑设施农业雨水集蓄利用所带来的各种社会收益，仅从成本方面也足以判定它是一种经济可行的雨水利用技术。

表 6-18 设施农业雨水集蓄利用系统宏观经济评价结果表

类型	蓄水池 (m ³)	总成本 (元)	总收益 (元)	单位成本 (元/m ³)	NCV (元)	NBV (元)	α_1	α_2
RWH1	50	21861	104137	0.93	20789	74752	4.76	3.60
RWH2	100	36259	128840	1.29	34573	92323	3.55	2.67
RWH3	150	48949	142992	1.61	46721	102299	2.92	2.19
RWH4	200	60642	154321	1.90	57916	110243	2.54	1.90
RWH5	250	71646	165172	2.15	68451	117844	2.31	1.72
RWH6	300	82131	175709	2.36	78488	125217	2.14	1.60
RWH7	350	92203	185565	2.56	88130	132101	2.01	1.50
RWH8	400	101934	194791	2.74	97446	138531	1.91	1.42
RWH9	450	111376	203429	2.92	106486	144538	1.83	1.36
RWH10	500	120570	211832	3.09	115287	150376	1.76	1.30

对单个雨水集蓄利用系统的效率效益研究表明，在北京当前的社会经济条件下，对用户而言，住宅屋面雨水集蓄利用系统集雨效率的提高面临着效益低下的问题。当不考虑系统的生产性收入时，设施农业雨水集蓄利用系统也面临着同样的难题。导致这种状况发生的根源主要有两个：一是北京地区降雨的时间分布极不均匀；二是北京当前的水价偏低，不能反映北京水资源的稀缺性。

然而，北京设施农业雨水集蓄利用系统的宏观经济评价结果表明，雨水收

集利用能够给城市带来巨大的收益。因此，正如很多雨水利用发展较快国家的城市一样，北京市政府应当通过各种政策手段来促进雨水利用技术的应用，提高雨水的收集利用效率。

6.6 雨水集蓄利用最大可能潜力计算

从长远看，北京市的发展将始终面临水资源短缺的瓶颈，雨水集蓄利用可以成为解决这一关键性问题的的重要途径。因此，有必要对北京市雨水集蓄利用的潜力进行评估。从国外雨水利用的实践和北京市雨水利用的现状两个方面考虑，住宅屋面和设施农业雨水集蓄利用系统的发展前景较好。因此，量化这两种系统的最大潜力具有现实意义。根据本文 5.6.2 中雨水集蓄利用最大潜力的计算方法，分别对这两种雨水集蓄利用系统的潜力进行计算，结果见表 6-19、6-20。

随着北京市近几年居民住房建设步伐加快，住宅屋顶面积不断增加。若按照北京多年平均降雨量计算，2010 年北京市住宅屋面雨水集蓄利用最大潜力将达到 0.66 亿 m^3 /年。另一方面，随着北京市设施农业的快速发展，尤其在 2008 年北京市农委和农业局联合出台了《关于北京市设施农业建设的扶持办法》，以及北京市农委发函《百村万户一户一棚援助设施农业工程实施办法》后，设施农业占地面积快速增加。设施农业的迅猛发展一方面对农业供水能力提出了更高的要求，另一方面也为设施农业雨水集蓄利用技术的应用创造了良好的条件。2005 年-2008 年，北京市设施农业雨水集蓄利用的最大潜力显著提高，2008 年可收集利用的雨水资源量达到了 1.85 亿 m^3 /年。

表 6-19 北京市住宅屋面雨水集蓄利用最大可能潜力

年份	居住用地 (km^2)	屋面面积 (km^2)	降雨量 (mm)	集雨潜力 (亿 m^3)
2003	352	113	430	0.44
2005	356	115	445	0.46
2007	372	120	474	0.51
2010	410	132	556	0.66

表 6-20 北京市设施农业雨水集蓄利用最大可能潜力

年份	设施农业面积 (km^2)	降雨量 (mm)	集雨潜力 (亿 m^3)
2005	157	445	0.63
2006	178	426	0.68
2007	303	474	1.29
2008	339	606	1.85

对北京市两种雨水集蓄利用系统最大潜力的计算表明，北京市雨水利用的潜力十分巨大。尽管当前两种雨水集蓄利用系统的最大潜力总和仅占北京市年用水量的 7% 左右。但随着城市的快速发展，其潜力还将有巨大的上升空间。

6.7 雨水集蓄利用空间评价

雨水集蓄利用技术空间适宜性研究,或是雨水集蓄利用潜力区评价就是在辨析影响雨水集蓄利用的主要影响因素基础上,从宏观上把握不同区位集雨利用的潜力,从而为雨水利用的规划和发展提供依据,避免雨水利用工程建设的盲目性。就北京而言,降雨的时空分布即存在不均匀性和不确定性,又表现出一定的规律性。对降雨时空规律的分析 and 总结是雨水利用活动开展的必要前提。

利用北京市 11 个气象站点和周边省市 4 个气象站点的历史降雨资料(日值),采用 Kriging 空间插值方法,可获得北京市多年平均降雨量空间分布图(图 6-4, a)。受地形的影响,北京市形成两个主要的降雨高值区,一个分布在北京市北部的怀柔区和密云区境内,另一个主要分布在北京市西南部的房山区内,高值区的年均降雨量可达到 800mm 以上。对应的,北京市西北部山区的年均降雨量普遍很低,一般在 500mm 以下。

住宅屋面雨水集蓄利用系统空间适宜性

为了考查多年降雨时空分布特征对住宅屋面雨水集蓄利用系统效率效益模拟的影响,选择住宅屋面雨水集蓄利用系统 RWH9 作为空间集雨潜力对比的典型类型。对前文所述 12 种类型的效率效益的模拟结果表明,RWH9 的雨水收集和雨水替代效率处于中等水平,但经济可行性较为突出。RWH9 的空间适宜性评价思路如下:

1. 选择用于空间适宜性评价的典型住宅屋面集雨利用系统,即 RWH9;
2. 初期弃流量和径流系数分别取值 1mm 和 0.9,并根据 15 个气象站点的历史降雨资料计算日降雨可形成的日径流量;
3. 运用 YBS 取水模式,计算 1989 年-2008 年各气象站点(部分气象站点的时间跨度略有不同)上 RWH9 的日集雨量、利用量和溢流量;
4. 对各气象站点上 RWH9 的微观经济进行模拟评价,获得效益成本比值;
5. 运用 Arcgis 空间分析方法中的 Kriging 插值法,以 15 个气象站点上 RWH9 的集雨效率和效益值为插值点进行空间插值,获得雨水利用空间差异图(图 6-4)和雨水利用效益成本比值空间差异图(图 6-5)。

以住宅屋面集雨利用 RWH9 为例进行的空间差异模拟结果表明,雨水集蓄利用系统年雨水利用量的空间分布基本上与多年降雨的空间分布保持一致,形成了北京市东北、西南高,西北、中南低的格局。但年雨水利用量高低值之间的差异并不明显。例如密云气象站的多年平均降雨量达 650mm/年左右,对应的年雨水收集利用量为 19.2m^3 ,而延庆气象站多年平均降雨量只有 460mm,但年雨水收集利用量亦可达 16.6m^3 。显然,雨水收集利用量和年降雨量之间不存在正比关系。究其原因,北京各地区的年降雨量虽然差异很大,但是降雨的年内分布差异并不大。在蓄水池规模不足的情况下,降雨高度集中导致大量雨水

资源溢流。因此，年降雨量大的区域的实际雨水集蓄利用能力并不会显著高于年降雨量较小的区域。

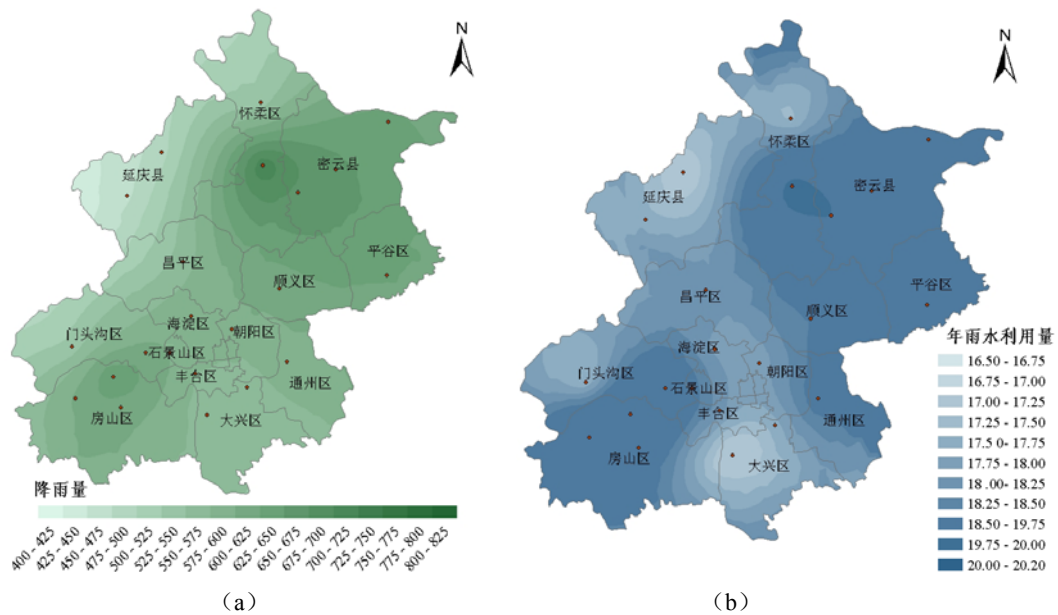


图6-4 北京市年均降雨量及住宅屋面雨水集蓄利用空间差异图

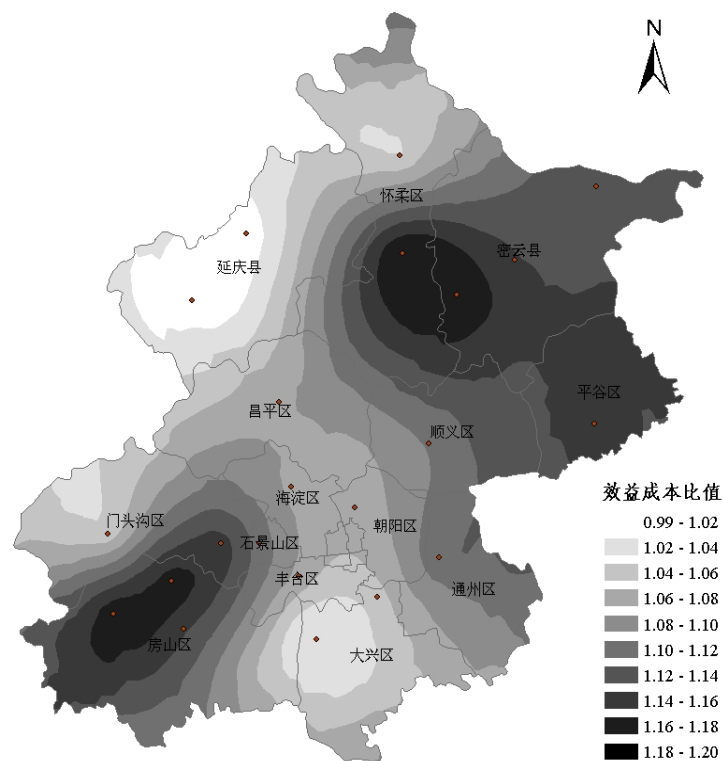


图6-5 北京市住宅屋面雨水集蓄利用效益成本比值空间差异

住宅屋面集雨利用 RWH9 的效益成本空间差异特征与年雨水利用量的空间分布特征相类似。总体上呈现为东北部、西南部的效益成本明显，而西北部、中部和中南部地区的效益成本比值较低，其中延庆县和大兴区的效益成本比值在 1 左右，表明在这两个地区开展住宅屋面雨水集蓄利用活动缺乏经济利益推

力。而在北京居住区分布较为密集的城区，集雨利用的效益成本比值也普遍不高。因此，在北京市当前社会经济条件下，住宅屋面集雨利用系统缺乏足够的经济吸引力。为此，建议尽快建立雨水集蓄利用相关的各种扶持政策，或通过征收雨水径流控制费等措施来刺激这一技术的推广和应用。

值得注意的是，在本文构建的住宅屋面集蓄利用 12 种类型中，RWH9 是其中经济性表现较优的一种类型。在单个住宅屋面雨水集蓄利用系统的微观经济评价中已经证明，扩大蓄水池的规模将导致系统的经济性下降。在雨水利用的实践中，一味追求系统的集雨利用效率是不符合用户的利益需求的，如何调节集雨利用效率和效益之间的矛盾是今后需要研究和关注的内容。

设施农业雨水集蓄利用系统空间适宜性

设施农业雨水集蓄利用系统空间适宜性评价采用 RWH5 作为典型对比系统。对单个雨水集蓄利用系统水文性能和经济性能的评价结果显示，该类型既具有较高的雨水收集和替代效率，又具有较高的经济可行性，因此在 10 种典型系统中较有代表性。其空间适宜性评价的过程与住宅屋面雨水集蓄利用系统的评价过程相类似，详细评价步骤不再阐述。值得注意的是，设施农业雨水集蓄利用系统的经济性能评价与地下水水位的关系十分密切。因此，北京市地下水水位空间分布特征对系统的空间适宜性就会产生较大的影响，必须将其纳入到空间适宜性评价当中。此外，设施农业主要在北京市平原区开展，因此，对其进行空间适宜性评价的范围也仅限于北京市平原区，而不涵盖山区。

从北京市平原区 2008 年地下水埋深情况来看（图 6-6，a），北京市地下水水位空间分异特征极为明显。北京城区以西的平原区与山区交界沿线地下水水位普遍很低，埋深一般达到 30m 以上。而东部的平谷区、通州区和大兴区的地下水水位较高，一般在 5m 左右。仅从地下水水位空间分布就可以粗略判断出北京市平原区西部地区农业生产用水的成本将明显高于东部地区，因此也更加适合开展农业雨水集蓄利用工程。

以设施农业雨水集蓄利用 RWH5 为典型系统进行的雨水集蓄利用空间潜力评价显示（见图 6-6，b），除昌平区靠近山区的少部分地区以外，北京市城区以北平原区的年雨水利用量普遍很高。而城区以南除房山区部分地区以外的大部分区域的年雨水利用量较低，包括房山区以东地区、丰台区、大兴区和通州区以南地区。因此，就雨水收集利用量而言，北京市平原区北部为适宜区，平原区南部为一般适宜区。

将降雨和地下水时空分布特征相叠加后，对 RWH5 的经济性能空间适宜性评价结果显示（图 6-7），地下水水位分布对设施农业雨水集蓄利用系统的空间经济适宜性具有显著影响，在地下水水位较低的地区，系统的效益成本比值较高。其中，经济适宜区主要分布在密云、怀柔、昌平、海淀、石景山、丰台和房山等区县。而平谷、顺义、朝阳、通州及大兴等 5 区的经济适宜性一般，表

明上述 5 区的设施农业缺乏集蓄利用雨水的利益驱动力。

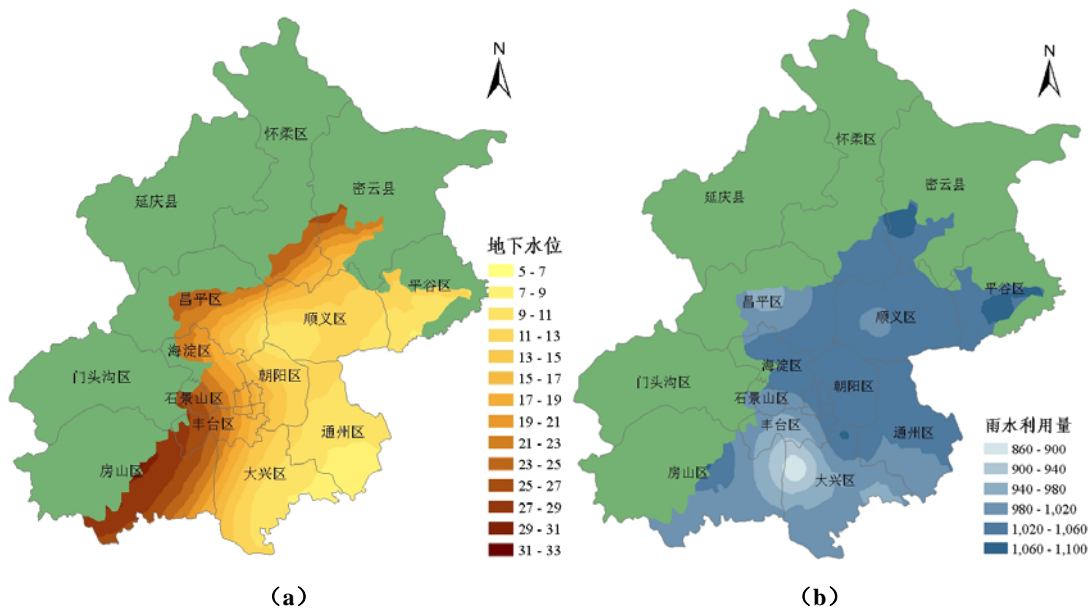


图6-6 北京市平原区地下水及设施农业雨水集蓄利用量空间差异图

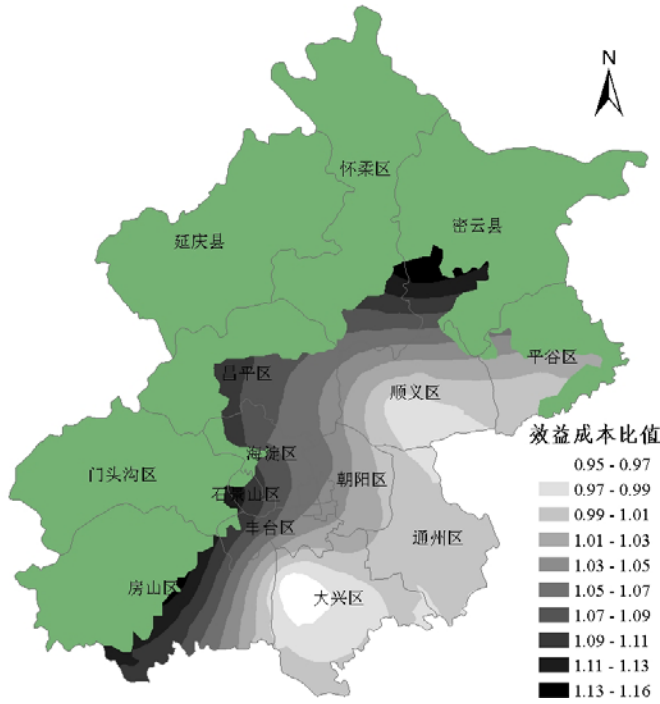


图6-7 北京市平原区设施农业雨水集蓄利用效益成本空间差异

6.8 对北京市雨水利用管理的启示

北京市住宅屋面和设施农业雨水集蓄利用最大可能潜力的计算结果表明，当前的最大潜力已经达到 3 亿 m^3 /年左右。随着北京市住房建设和设施农业的加速发展，雨水集蓄利用的潜力还将持续上升。可见，北京市雨水利用的潜力十分巨大。尽管如此，雨水集蓄利用的可实现潜力却受到诸多因素的影响而十

分有限。雨水利用技术简单，操作简便。但对于住宅屋面雨水集蓄利用系统用户而言，北京市偏低的水价致使居民集蓄利用雨水缺乏利益驱动力。据於凡（2006）对北京城市居民用水承受能力分析，2004年北京市城市居民水费支出仅占年可支配收入的0.71%。对于农民而言，由于可以免费使用地下水，同样缺乏集蓄利用雨水的利益驱动力。与雨水集蓄利用微观效益不足形成鲜明对比的是，对于北京市而言，其宏观效益却十分显著。显然，在推广雨水利用技术，充分挖掘雨水资源的进程中，北京市政府应当起着主导作用。具体而言，政府应做好以下方面的管理工作：

1. 完善雨水利用的相关政策法规，要特别注重政策的时效性和可操作性。尽管北京市已经出台了一系列与雨水利用相关的政策和法规，但大多数仅停留在鼓励和引导层面，对集蓄利用雨水缺乏强制力，对雨水资源开发利用的推动作用十分有限；

2. 加强雨水利用的科学研究，注重研究成果与实践相结合，避免雨水利用工程建设的盲目性。一方面，北京市大力开展雨水利用示范工程的建设，另一方面，雨水利用工作的开展又缺乏理论依据和指导方法。这种现状致使许多雨水利用工程建而无用，成为形象工程。因此，必须加强雨水利用的科学研究，加强国际交流与合作，切实解决雨水利用技术推广中面临的关键性问题。例如工程选址问题、工程设计问题、雨水水质问题和工程合理规模问题等；

3. 尽快着手撰写权威的雨水利用用户操作手册，详细介绍雨水利用技术的各个环节。尽管雨水利用技术看似十分简单，但在具体建设和操作过程中，由于缺乏必要的信息，用户可能会面临很多困难，例如如何确定蓄水池的容积、水量平衡的分析、雨水水质的安全性等等。用户操作手册不仅可以回答集蓄利用雨水过程中可能出现的问题，还兼具节约用户投资成本的功能；

4. 加强雨水利用信息平台 and 网站建设，提供用户根据具体情况设计最优雨水利用模式的各种信息。在当今计算机网络高度发达的社会，应当充分利用网络的力量向用户提供各种与雨水利用相关的信息。用户可通过雨水利用信息系统，模拟集蓄利用雨水的潜力和效益，从而做出合理的取舍；

5. 大力推动雨水利用产业化发展，建立雨水利用相关产品的市场化标准，通过减免税收等优惠政策鼓励相关产品的研发和生产。在北京市雨水利用起步较晚的现状下，雨水利用相关产品在市场上十分匮乏，缺乏统一的价格和标准，使得用户在购买、安装和维护过程中遇到较多的困难。作为一项环保产业，雨水利用产业应具有十分广阔的市场前景；

6. 加强雨水利用的宣传力度，通过电视、报纸、网站等各种新闻媒介推广雨水利用新技术，通过广泛建立雨水利用示范点展示新技术。为了强化雨水利用示范工程的示范和教育作用，雨水利用示范点的选址标准应特别注重以下两点：一是注重示范工程的宣传效果，应尽量将工程建在人群来往频繁的区位，

例如大型娱乐场所、商场和农业休闲旅游区等；二是着眼于长远，把青少年作为宣传的重点对象，可将雨水利用示范工程建在动物园、学校等；

7. 加强政府扶持力度，确保雨水利用多方共赢。在集蓄利用雨水缺乏微观利益驱动力的现状下，政府资金扶持是必不可少的。资金扶持的力度应根据区位条件不同而有所差别，但至少要确保用户集蓄利用雨水能有利可图；

8. 适时制定城市雨水费，促进雨水的收集和利用。制定雨水费是许多国家为减少城市雨洪和控制雨水污染而采取的有效政策措施。为减轻北京市污水处理压力、降低城市洪水风险，促进雨水资源高效利用，应当根据城市建成区不透水面的面积征收相应的雨水费，所得税费收入可作为开展雨水利用工作的重要资金来源；

9. 合理制定农业用水水费，提高农业用水效率。北京市农业用水效率低和农民无需支付水资源费之间存在矛盾。尽管本文的研究发现，对于地下水水位较低的地区，农业水费的提高对增加雨水集蓄利用系统微观效益的作用有限，但仍可以起到积极的作用。因此，制定农民可承受的水资源费标准和提供政府资金支持双管齐下，可有效调动农民集蓄利用雨水的积极性；

10. 尽快制定雨水水质标准，建立水质评价体系。在调研中发现，北京市市民对收集的雨水是否满足生活用水需求和灌溉用水需求存在较大的争议，甚至因此出现雨水集而不用现象。究其原因是缺乏权威公认的雨水水质标准，因此，必须尽快制定出台相关的水质标准，规范雨水收集、存储、处理和利用全过程；

11. 尽快制定建筑屋顶规格标准，提高雨水收集的效率和雨水水质。就屋面雨水集蓄利用系统而言，屋顶类型会对集雨的效率和雨水水质产生很大的影响。因此，从提高雨水集蓄效率，降低雨水处理成本角度出发，应制定新建建筑物的屋顶标准，例如屋顶的材料、坡度等；

12. 提供农业生产技术支持，增加农民收入。对于设施农业雨水集蓄利用系统而言，蓄水池的多功能利用可有效提高农民的收入。因此，政府应该提供相关的技术支持开发利用蓄水池地下空间，增加农民的收入，提高雨水利用系统的效益；

13. 提高天气预报服务水准，及时向用户提供降雨信息。对设施农业雨水集蓄利用系统而言，雨水收集和农业生产之间可能会存在矛盾。尤其在夏季高温多雨季节，农民因作物生长需求，需揭开或覆盖集雨面以控制设施内的温度。在缺乏及时、准确的天气信息的情形下，往往会导致集雨面不能被及时覆盖，雨水无法收集。可见，及时准确的天气预报对于雨水的收集十分重要；

14. 合理制定农业耕作和灌溉制度，加大雨季的雨水利用量。设施农业耕作制度的安排决定着灌溉用水量，而灌溉用水规律又影响着雨水集蓄利用系统的集雨利用效率。尤其是在夏季高温多雨季节，农业用水量越大，则雨水集蓄利

用系统的雨水收集利用效率越高。因此,科学合理制定设施农业耕作制度对于提高雨水集蓄利用效率十分重要。

6.9 本章小结

本章以北京市为例,围绕雨水集蓄利用的性能、潜力和空间化等内容展开研究。首先简要介绍了北京市概况,分析了北京市水资源利用的历史、现状以及存在的主要问题,揭示了雨水利用的必要性、紧迫性和重要性。阐述了北京市雨水利用的历史进程与现状,分析了北京市开展雨水利用的政策和法律环境。总结了北京市雨水利用面临的问题:一是雨水利用研究不足,雨水利用工作的开展缺乏理论指导;二是雨水利用示范工程的宣传示范效应不强,雨水利用技术推广缓慢;三是雨水利用的政策措施不完善,市场化、产业化发展滞后。基于上述问题的存在,本文展开了北京市雨水集蓄利用的性能、潜力和空间化评价研究。研究结果表明:一、雨水集蓄利用系统的集雨效率与年降水量之间呈现弱相关性,年降水量的多寡对可收集利用雨水量影响不明显,但降雨年内分布对集雨利用效率有强烈的影响;二、集雨面面积、用水量、蓄水池容积以及降雨等因素共同作用于雨水集蓄利用系统的集雨利用效率。蓄水池容积越大则雨水的收集和替代效率越高,但单位蓄水池容积的集雨效率下降。用水量越大则集雨效率越高,但雨水替代效率下降。集雨面面积越大,则收集利用的雨水量越多,替代效率越高,但雨水的收集效率下降;三、设施农业雨水集蓄利用系统水文性能模拟结果的验证表明,YBS取水模式能够准确模拟蓄水池的流量过程,在模拟雨水集蓄利用系统的长期性能表现中具有可靠性;四、雨水集蓄利用的效率和效益之间存在天然的矛盾。集雨利用效率的提高有赖于蓄水池的增大,但会影响整体效益,两者之间存在倒U型的关系。用户层面的雨水集蓄利用系统最优规模与社会层面的最优规模并不一致;五、雨水集蓄利用的宏观经济效益显著,但微观经济效益低下。如何发挥政府的主导作用,调动用户收集利用雨水的积极性关系到利益协调问题;六、北京市雨水集蓄利用潜力巨大,但受限于水价偏低、降雨年内分布不均以及雨水利用政策倾向性不足等原因,可实现潜力与最大潜力之间有很大的差距;七、雨水空间潜力及适宜性研究表明,北京市住宅屋面雨水集蓄利用的潜力及适宜性空间分布与多年降雨空间分布密切相关,区域差异较为明显。北京市平原区设施农业雨水集蓄利用潜力的空间差异显著,总体上表现为北高南低的格局,但空间适宜性同时受到降雨和地下水双重因素的影响,表现出西北高、东南低的规律;最后,根据对北京市雨水集蓄利用的研究,文章提出了一系列有针对性的政策措施。

第七章 结论与展望

鉴于北京市水资源短缺、水环境污染严重与雨水资源化不足之间矛盾加剧的态势,本文在国内外水资源及雨水利用相关研究进展及评价的基础上,系统的对雨水资源与水资源的关系,雨水资源与城市化的关系,尤其是雨水利用的技术、效率、效益、管理和政策等进行了讨论。论文首先对雨水集蓄利用技术进行了概括和总结,重点介绍了本文主要研究的雨水利用类型,即住宅屋面雨水集蓄利用系统和设施农业雨水集蓄利用系统;分析了两种雨水集蓄利用系统的主要组成部件及其对雨水收集利用的影响;比较了各种蓄水池流量过程模拟模型,确定了雨水集蓄利用系统的水文性能模拟模型,即 YAS 和 YBS 取水模型;阐述了蓄水池入流量、出流量之间的组合关系,讨论了雨水集蓄利用系统水文性能模拟中的数据步距选择与模拟精度之间的关系,为科学评价雨水集蓄利用系统的雨水收集利用能力提供了理论和方法指导;通过构建全成本分析法,系统的分析了雨水集蓄利用系统在寿命期内的成本和效益,从而为准确评价雨水集蓄利用的微观和宏观经济性,优化雨水集蓄利用模式提供了理论依据;通过构建典型雨水集蓄利用系统,评价了北京市雨水集蓄利用系统的雨水收集利用效率及经济可行性;采用 Arcgis 空间分析方法,分析和探讨了北京市雨水集蓄利用的空间潜力和适宜性问题;最后,基于分析结果,提出了北京市雨水利用的对策和措施。

7.1 主要结论

通过北京市雨水集蓄利用的优化与管理研究,主要得出如下结论:

(1) 国内外关于雨水资源、水资源、城市化对水循环过程影响的相关研究表明,正确认识雨水资源,重新界定水资源概念是今后水资源开发利用与研究的发展趋势。传统的城市供排水系统在提高城市供用水安全、降低城市洪灾风险上起到了重要的作用,但也面临着巨大的挑战。一方面,随着城市的快速发展,社会经济系统对本地水资源系统的压力日增,大型水利工程的供水能力受到限制,越来越无法满足需水要求;另一方面,城市的快速发展导致建成区不透水面积激增,城市环境污染加剧。双重因素作用下,大量快速汇集的雨水资源不仅不能得到利用,反而成为污染城市水环境、诱发城市洪灾的主因。因此,重新审视水资源概念,将雨水作为宝贵的水资源进行开发利用刻不容缓。

(2) 国内外雨水利用的研究与实践表明,雨水利用的最大潜力与现实潜力之间存在巨大的差距。基于特定社会、经济和自然条件下的雨水集蓄利用现实潜力的科学评价是开展雨水利用工作的客观需要。本文在详细剖析雨水集蓄利用技术体系的基础上,分析了雨水集蓄利用系统中蓄水池的流量变化过程与

组合关系,构建了 YBS 水文性能模拟的运算法则,并以北京市典型雨水集蓄利用系统为例,探讨了集雨面面积、蓄水池容积、用水量及降雨量对雨水收集利用效率的影响规律及相互之间的关系。研究表明:1.北京市雨水集蓄利用的效率不高,住宅屋面系统的雨水收集效率介于 10%-45%之间,替代效率介于 30%-65%之间,设施农业系统的雨水收集效率介于 45%-80%之间,而替代效率介于 40%-65%之间;2.雨水集蓄利用系统的蓄水池容积越大则雨水的收集和替代效率越高,但单位蓄水池容积的集雨效率下降。用水量越大则集雨效率越高,但雨水替代效率下降。集雨面面积越大,则收集利用的雨水量越多,替代效率越高,但雨水的收集效率下降;3.设施农业雨水集蓄利用系统水文性能模拟结果与实际集雨利用情况十分接近,证明 YBS 取水模式能够准确模拟蓄水池的流量过程,在模拟雨水集蓄利用系统长期性能表现方面具有可靠性;4.探讨了模型步距选择对模拟精度的影响,并确定了北京地区的存储系数 θ 值,提供了一种采用月步距数据仍然能够准确模拟雨水集蓄利用系统水文性能的方法。月步距水文性能模拟误差与蓄水池容积和日用水量比值之间存在很强的相关性,两者的比值越大,则月步距模拟的误差越小, θ 值越大。

(3) 作为一项亟待推广应用的系统集成技术,雨水集蓄利用的技术经济可行性备受关注。基于这一现实需求,本文构建了全成本评价方法,综合考虑了雨水集蓄利用系统寿命期内的各项成本和收益,创建了雨水集蓄利用的经济评价指标。对北京市典型集雨利用类型的效益成本分析表明:1.受北京市低水价的影响,住宅屋面系统用户层面的微观经济效益极不明显,推广该系统缺乏经济利益驱动力;2.集雨面面积、用水量、蓄水池容积以及降雨量不仅影响住宅屋面系统的雨水收集利用效率,也显著影响系统的经济效益,具体表现为:集雨面面积增大则雨水替代效率和经济效益提高,但雨水收集效率下降。用水量增加则雨水收集效率和经济效益提高,但替代效率下降。蓄水池容积增加,则雨水的收集利用效率提高,但系统的效益呈现先增后减的规律,即存在最优蓄水池规模。在 12 种住宅屋面雨水集蓄利用类型中, RWH8 的经济可行性最优,但雨水收集和替代效率仅为 17.7%和 45.5%,表明雨水集蓄利用系统的效率和效益之间存在矛盾;3.设施农业雨水集蓄利用系统的微观经济评价表明:在无政府资金资助情况下,雨水集蓄利用技术对农户缺乏经济吸引力。当政府资助比例为初期投资 50%时,雨水集蓄利用技术的推广应用仍然缺乏利益驱动力。只有当政府资助比例提高到 70%时,雨水集蓄利用才表现出显著的微观经济效益。农业水资源费征收对设施农业系统的微观经济效益能产生明显影响,但只有当水资源费达到一定高值时才足以促使农民独立投资以节约水费。因此,农业水资源费的征收只能起到一定的促进作用,但无法替代政府资助的作用。充分发挥蓄水池的多功能作用对于提高系统的整体效益十分重要,如果不加以重视,则农业雨水集蓄利用技术的推广将缺乏经济基础;4.设施农业雨水集蓄

利用的宏观经济效益评价结果表明,各种类型的雨水集蓄利用系统都具有良好的经济可行性。政府应当通过制定各项政策措施大力支持雨水的集蓄和利用。

(4) 北京市雨水集蓄利用空间化研究表明,雨水收集利用的潜力存在空间分布规律,具体表现在:1.北京市住宅屋面雨水集蓄利用系统雨水收集利用潜力的空间分布与降雨的时空分布规律显著相关,多年平均降雨量越大则雨水集蓄利用的潜力越大,因此形成了北京市东北、西南集雨利用潜力高值区和西北、中南集雨利用潜力一般区的格局。但雨水收集利用的空间潜力差异并不如降雨的空间差异明显。究其原因,在住宅屋面系统蓄水池规模受限的情况下,降雨的高度集中导致大量雨水资源溢流损失,对年降雨量大的区域的雨水集蓄利用潜力影响强烈,缩小了区域间雨水集蓄利用潜力的差异;2.北京市住宅屋面雨水集蓄利用系统经济可行性的空间差异与潜力的空间差异相类似。总体上呈现东北部、西南部高于中、南部的趋势。但除了怀柔、密云和房山等几个区县外,其它区县集雨利用的效益成本比值都在 1.0 左右,表明北京市住宅屋面雨水集蓄利用工程的推广总体上缺乏经济驱动力。因此,需尽快建立各种扶持和倾斜政策,推动屋面雨水的集蓄利用;3.北京市设施农业雨水集蓄利用空间潜力评价结果显示,市区以北平原区雨水集蓄利用的潜力普遍较高,而市区以南除房山区以外,其它区县的雨水收集利用潜力偏低;4.北京市设施农业雨水集蓄利用的空间适宜性研究表明,受降雨时空分布规律和北京市平原区地下水分布规律支配,设施农业系统的空间经济适宜性表现出很强的规律,经济适宜区主要分布在密云、怀柔、昌平、海淀、石景山、丰台和房山等靠近山区的区县,而平谷、顺义、朝阳、通州及大兴等 5 区县的经济适宜性较差。

(5) 北京市水资源短缺、雨水资源丰富与雨水利用进展缓慢之间的矛盾日益加剧。这是人们对雨水资源认识不足,开发利用雨水资源的研究和能力不到位所导致的。因此,为了加快北京市雨水利用的进程,本文总结了创建雨水利用信息系统的方法,提出了一系列有针对性的政策措施。总之,北京市雨水利用应以政策法规为导向,以税费制度为手段,以宣传教育为方法,以信息系统为平台,以产业化发展为目标,以科学研究为支撑全面推进。

7.2 不足与展望

在北京市雨水集蓄利用的优化与管理研究过程中,由于国内雨水利用相关研究和实践的滞后性、本人知识水平的有限性以及研究时间的紧迫性,导致论文虽然初步建立了雨水集蓄利用优化研究的基本框架,但研究的理论、方法、广度和深度仍需进一步完善:

(1) 作为城市水资源综合利用与管理的重要组成部分,雨水利用的顺利推进必然要求与城市现有水资源综合管理相衔接。仅从雨水利用角度探讨技术的可行性和适用性略显不足。本研究缺乏与其它水资源利用与管理方式进行对

比分析,有必要开展雨水利用目标下的城市水资源综合管理研究;

(2) 本文通过构建典型雨水集蓄利用系统开展水文性能模拟研究。但由于北京市开展雨水利用实践的时间较短,具体案例的数据记录多不完整,影响了水文性能模拟结果与实际情况之间的对比分析。因此,模拟结果的可靠性分析略显不足;

(3) 本文以北京市为例对雨水集蓄利用进行了实证研究,研究结果在一定地域内具有代表性。但中国幅员辽阔,各地区、各城市的水资源利用与管理现状各不相同。因此,本文的研究理论、方法和结论只能起到抛砖引玉的作用;

(4) 研究和调查表明,收集雨水的水质对于雨水的适用性具有很大的影响。雨水水质是国内外雨水利用研究的重点,但限于研究条件和个人能力所限,本文没能对雨水水质及其可能产生的影响展开研究;

(5) 雨水利用以人为方式改变了原有的水文水循环,必然会造成一定的环境影响,带来一定的社会和环境风险。一方面受限于国内外这一领域的研究不足,另一方面受制于我国城市雨水利用的落后,论文对雨水利用的环境影响及风险并未展开研究,但在今后的研究中应当给予足够的重视。

鉴于雨水利用研究的理论与实践意义以及论文研究的不足,认为下一步应该重点开展以下内容的研究:

(1) 雨水优化利用目标下的水资源综合管理研究。作为一种古老而又崭新的水资源开发利用方式,现代城市雨水利用的开展必须协调好与城市水资源综合管理体系之间的关系。雨水利用涉及到城市供水、排水和需水管理的各个方面,只有通过雨水利用与传统水资源管理方式间的对比分析,才能真正认识到雨水利用的作用、价值及其局限性;

(2) 城市雨水利用信息系统建设。在城市雨水利用的实践中,雨水收集利用潜力区的识别需要进行大量的调查研究。缺乏对雨水利用潜力空间的科学区划将导致雨水利用建设的盲目性,从而引起投资建设的浪费。本文在潜力区划上进行了初步的探讨和研究,但限于研究资料不全面的原因,潜力空间区划还不够细致,需要加强研究。从长远来看,城市雨水利用信息系统的建设不仅可以解决雨水利用潜力区的识别问题,还有助于用户优选出雨水利用的模式;

(3) 随着国内外雨水利用实践的快速推进,雨水利用的环境影响和风险管理逐渐引起了重视。但目前总体上研究的深度不足,从而影响了人们对雨水利用的正确认识。因此,今后应加强这一领域的研究。

参考文献

- [1] Abdinam A. Estimation of run-off volume for rainwater utilization planning, using GIS & Remote sensing technics[A]. Proceeding of International Symposium & 2nd Chinese National Conference on Rainwater Utilization. Xuzhou:1998.374-383.
- [2] Abu-Zreig M, Attom M, Hamasha N. Rainfall harvesting using sand ditches in Jordan [J]. Agricultural Water Management,2000,46:183-192.
- [3] Alegre N., Jeffrey P., McIntosh B., Thomas J.S., Hardwick I., Riley S.. Strategic options for sustainable water management at new developments: the application of a simulation model to explore potential water savings[J]. Water, Science and Technology, 2004, 50(2):9-15.
- [4] Alley, W.M. and Smith, P.E., 1982a. Distributed Routing Rainfall-Runoff Model: Version II. US Geological Survey, Geological Survey Open File Report 82-344.
- [5] Alley, W.M. and Smith, P.E., 1982b. Multi-Event Urban Runoff Quality Model. US Geological Survey, Open File Report 82-764, Reston, Virginia.
- [6] Anderson J.M.. Blueprint for a greener city: growth need not cost the earth[J]. Water, Science and Technology, 2005, 52(9):61-67.
- [7] Appan A.. The utilization of rainfall in airports for non-potable uses[A]. Proc. of 6th International Conference on Rainwater Catchment Systems, Nairobi, Kenya, 1993.
- [8] Appelgren B. and Klohn W. Management of water scarcity: a focus on social capacities and options [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1999, 24(4):361-373.
- [9] Ashley R.M., Blackwood D., Butler D., Jowitt P.. Sustainable water services: a procedural guide[M]. IWA Publishing. London, 2004.
- [10] B.P. Mbilinyi, S.D. Tumbo. GIS-based decision support system for identifying potential sites for rainwater harvesting[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007 (32) 1074 – 1081
- [11] Balram Panigrahi, Sudhindra N Panda. Rainwater conservation and recycling by optimal size on-farm reservoir[J]. Resources, Conservation and Recycling 2007 (50) 459–474
- [12] Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Donigan, A.S. and Johanson, R.C., 1993. Hydrologic Simulation Program: Fortran User's Manual for Release 10. US Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, Report EPA/600/R-93/174.
- [13] Boers Th M, Ben-Asher J. A review of rainwater harvesting [J]. Agricultural Water Management,1982,5:145-158.
- [14] Boers Th M, De Graaf M, Feddes R A. A linear regression model combined with a soil water balance model to design micro-catchments for water harvesting in arid zones[J]. Agricultural Water Management, 1986,11:187-206.
- [15] Box G.E.P.. The collected works of George E.P. Box. Vol.1, Tiao G.C., Granger, C.W., Wadsworth, Belmont, California,1984.
- [16] Brewer D., Brown R., Stanfield G.. Rainwater and greywater in buildings: project report and case studies[M]. Technical Note TN 7, BSRIA, Berkshire, 2001.
- [17] Bryan Ellis, Mike Revitt and Lian Scholes et al. Review of the adaptability and sensitivity of current stormwater control technologies to extreme environmental and socio-economic drivers. Sixth Framework Programme (2002-2006). SWITCH. 2006.
- [18] Caroline Sullivan. Calculating a Water Poverty Index [J]. World Development, 2002, 30(7):

1195-1210.

- [19] Christopher Zoppou. Review of urban storm water models[J]. Environmental Modelling & Software. 16 (2001) 19-231.
- [20] Chu S.C., Liaw C.H., Huang S.K., Tsai Y.L., Kuo J.J.. The study for influencing factors of urban rainwater catchment system capacity[A]. Proc. of 9th International Rainwater Catchment Systems Conference, Petrolina, Brazil, 1999.
- [21] Chu S.C., Liaw C.H., Tsai Y.L. Chen J.C., Chen J.T., Lee S.C.. Planning strategy study for roof rainwater catchment systems[A]. Proc. of 8th International Conference on Rainwater Catchment Systems, Tehran, Iran, 1997.
- [22] Coombes P., Frost A., Kuczera G.. Impact of rainwater tank and on-site detention options on stormwater management in the Upper Parramatta river catchment[J]. University of Newcastle, Callaghan, Australia, 2001.
- [23] Coombes P.J., Kuczera G., Kalma J.D.. Economic, water quantity and quality impacts from the use of a rainwater tank in the inner city[J]. Australian Journal of Water Resources, 2003b, 7(2):101-110.
- [24] Coombes P.J.. Rainwater tanks revisited: new opportunities for urban water cycle management[A]. PhD thesis. Newcastle University, New South Wales, Australia, 2002.
- [25] Critchley W, Siegert K. Water Harvesting [M]. Rome: FAO,1991.
- [26] Cunliffe D.A.. Guidance on the use of rainwater tanks[M]. National Environmental Health Forum Monographs, Water Series No.3. Openbook Publishers, Australia,1998.
- [27] Dandy G. Assessing the economic cost of restrictions on outdoor water use. Water Resources Research, 1992, 28(7):1759.
- [28] DEHAA [Department for Environment Heritage and Aboriginal Affairs, South Australia]. Rainwater tanks: their selection, use and maintenance[M]. Revised edition, Government of South Australia, 1999.
- [29] Dharmabalan P.. High water bills: can rain water supplement part or whole of it[A]. Proc. of 4th International Conference on Rain Water Cistern Systems Manila, Philippines, 1989.
- [30] Dixon A., Butler D., Fewkes A.. Water saving potential of domestic water reuse systems using greywater and rainwater in combination[J]. Water, Science and Technology, 1999, 39(5):25-32.
- [31] Dominguez M.A., Schiller E., Serpokylov S.. Sizing of rainwater storage tanks in urban zones[A]. Proc. of 10th International Rainwater Catchment Systems Conference, Mannheim, Germany, 2001.
- [32] E. Sazakli, A. Alexopoulos, M. Leotsinidis. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece[J]. Water Research. 2007.(41):2039-2047.
- [33] Edgar L. Villarreal, Andrew Dixon. Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden[J]. Building and Environment 40 (2005) 1174 – 1184
- [34] Eleni Chouli, Emmanuel Aftias, Jean-Claude Deutsch. Applying storm water management in Greek cities learning from the European experience[J]. Desalination 210 (2007) 61-68.
- [35] EneDir Ghisi, Andreza Montibeller, Richard W. Schmidt. Potential for potable water savings by using rainwater An analysis over 62 cities in southern Brazil[J]. Building and Environment. 2005(41):204-210.
- [36] Environment Agency. Harvesting rainwater for domestic uses: an information guide[M]. 2003b.
- [37] Eran Feitelson, Jonathan Chenoweth. Water poverty: towards a meaningful indicator [J]. Water

- Policy, 2002 (4):263-281.
- [38] Fane S., Robinson J., White S.. The use of levelised cost in comparing supply and demand side options[J]. Water, Science and Technology, Water Supply, IWA Publishing. 2003, 3(3):185-192.
- [39] Fewkes A, Warm P.. A method of modeling the performance of rainwater collecting systems in the United Kingdom[J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2000, 21:257-265.
- [40] Fewkes A., Butler D.. Simulating the performance of rainwater collection and reuse systems using behavioural models[J]. Building Services Engineering Research and Technology, 2000, 21:99-106.
- [41] Fewkes A., Butler D.. The sizing of rainwater stores using behavioural models[A]. Proc. of 9th International Rainwater Catchment Systems Conference, Petrolina, Brazil, 1999.
- [42] Fewkes A., Ferris S.A.. Rain and waste water reuse for toilet flushing: a simulation model[A]. Proc. of 1st International Conference on Rain Water Cistern Systems, Honolulu, Hawaii, USA, 1982.
- [43] Fewkes A., Warm P.. A method of modeling the performance of rainwater collection systems in the UK[A]. Proc. of 1st Nat. Conf. on Sustainable Drainage. Coventry university, UK, 2001, 232-242.
- [44] Fewkes A.. Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalized approach[J]. Urban Water , 1999b, 1:323-333.
- [45] Fewkes A.. The field testing of a rainwater collector[A]. Proc. of 7th International Rainwater Catchment Systems Conference, Beijing, China, 1995.
- [46] Fewkes A.. The instrumentation and field testing of a rainwater collector[A]. Proc. of 8th International Conference on Rainwater Catchment Systems, Tehran, Iran, 1997.
- [47] Fewkes A.. The technology, design and utility of rainwater catchment systems[J]. In: Butler D., Memon F.A.(Eds). Water Demand Management. IWA Publishing. London, 2006, 27-61.
- [48] Fewkes A.. The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system[J]. Building and Environment, 1999a, 34:765-772.
- [49] Fink D H, Frasier G W, Cooley K R. Water harvesting by wax-treated soil surfaces: progress, problems, and potential [J]. Agricultural Water Management, 1980,3:125-134.
- [50] Fink D H, Frasier G W. Evaluating weathering characteristics of water-harvesting catchments from rainfall-runoff analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977,41:618-622.
- [51] Fink D H. Division S-6—Soil and water management and conservation—Laboratory testing of water-repellent soil treatments for water harvesting[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976,40:562-566.
- [52] Fink D H. Wter replency and infiltration resistance of organic-filmcoated soils[J]. Soil Science Society of America Proc., 1970,34:189-194.
- [53] Fox P, Rockstrom J. Supplmental irrigation for dry-spell mitigation of rainfed agriculture in the Sahe [J].Agricultural Water Management,2003,61:29-50.
- [54] Geiger, W.P., Dorsch, H.R., 1980. Quantity–Quality Simulation (QQS): A Detailed Continuous Planning Model for Urban Runoff Control, Volume 1, Model Description, Testing and Applications. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. Report EPA/600/2-80-011.
- [55] Ghisi E., Montibeller A., Schmidt R.W.. Potential for potable water savings by using rainwater: an analysis over 62 cities in southern Brazil[J]. Building and Environment, 2006, 41:204-210.

- [56] Ghisi E., Oliveira S.M.. Potential for potable water savings by combining the use of rainwater and greywater in houses in southern Brazil[J]. Building and Environment, 2007, 42:1731-1742.
- [57] Gleick P. Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources, New York, Oxford University Press. 1993:40-55.
- [58] Gould B.W.. Statistical methods for estimating the design capacity of dams[J]. Journal of the Institution of Engineers, Australia, 1961, 33(12):405-416.
- [59] Gould J., Nissen-Peterson E.. Rainwater catchment systems for domestic supply: design, construction and implementation[M]. Intermediate Technology Publications, London, 1999.
- [60] Grant N.. The economics of water efficient products in the household[M]. Environment Agency report EA/BR/E/STD/V1, 2003.
- [61] Grant N.. Water conservation products[J]. In: Butler D., Memon F.A.(ed). Water Demand Management. IWA Publishing. London. 2006, 236-279.
- [62] Hardy M.J., Coombes P.J., Kuczera G.. An investigation of estate level impacts of spatially distributed rainwater tanks[A]. Proc. of the International Conference on Water Sensitive Urban Design, Adelaide, South Australia, 21st-25th, 2004.
- [63] Havno, K., Madsen, M.N., Dorge, J., 1995. MIKE 11 — A generalised river modelling package. In: Singh, V.P. (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Colorado, pp. 733–782.
- [64] Hazen A.. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1914, 77:15-39.
- [65] He X B. Down-scale analysis for water scarcity in response to soil-water conservation on Loess Plateau of China agriculture[J]. Ecosystems and Environment, 2003,94:355-361.
- [66] Heggen R.J.. Rainwater catchment and the challenges of sustainable development[J]. Water, Science and Technology, 2000, 42(1-2):141-145.
- [67] Heggen R.J.. Value of daily data for rainwater catchment[A]. Proc. of 6th International Conference on Rainwater Catchment Systems, Nairobi, Kenya, 1993.
- [68] Herrington P.R.. The economics of water demand management[M]. In: Butler D., Memon F.A.(ed). Water Demand Management. IWA Publishing. London. 2006, 236-279.
- [69] Herrmann T., Hasse K.. Ways to get water: rainwater utilization or long-distance water supply[J]. A holistic assessment. Water, Science and Technology, 1997, 36(8-9):131-318.
- [70] Hillel D, Berliner, P. Waterproofing surface-zone soil aggregates for water conservation[J]. Soil Science, 1974,118(2):131-135.
- [71] Hiroaki Furumai. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use [J]. Physics and Chemistry of the Earth. 2008. 33:340-346.
- [72] Hiroaki Furumai. Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use[J]. Physics and Chemistry of the Earth 33 (2008) 340 – 346
- [73] HM Treasury. The Green Book: Appraisal and Evaluation in Central Government. 2003.
- [74] Huber, W.C., Heaney, J.P, Nix, S.J., Dickinson, R.E. and Polmann, D.J., 1984. Storm Water Management Model, User's Manual, Version III. US Environmental Protection Agency, Athens, Georgia. Report EPA/600/2-84-109a.
- [75] Hurst H.E., Black R.P., Simaika Y.M.. Long term storage[M]. Constable, London, 1965.
- [76] J. Mwenge Kahinda, E.S.B. Lillie, A.E. Taigbenu. Developing suitability maps for rainwater harvesting in South Africa[J]. Physics and Chemistry of the Earth 2008 (33) 788 – 799

-
- [77] James A.. An introduction to water quality modeling[M]. John Wiley and Sons, Chichester, 1984.
 - [78] Janusz Niemczynowicz. Urban hydrology and water management —present and future challenges. Urban Water,1999,(1):1-14.
 - [79] Jean-marc Mwenge Kahinda, Johan, Akpofure E. Rainwater harvesting to enhance water productivity of rainfed agriculture in the semi-arid Zimbabwe[J]. Physics and Chemistry of the Earth2007 (32) 1068-1073
 - [80] Jenkins D., Pearson F., Moore E., Sun J.K., Valentine R.. Feasibility of rainwater collection systems in California[J]. Contribution No.173(California Water Resources Center), University of California, 1978.
 - [81] Jeroen Mentens, Dirk Raes, Martin Hermy. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century[J]. Landscape and Urban Planning 77 (2006) 217–226
 - [82] Jeroen Mentens,Dirk Raes,Martin Hermy. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urban ized 21st century? [J]. Landscape and Urban Planning ,2006,(77):217～226.
 - [83] Johanson, R.C., Imhoff, J.C. and Dana, H.. Users Manual for Hydrological Simulation Program — Fortran (HSPF). US Environmental Protection Agency. Report EPA/9-80-015, Athens Georgia, 1980.
 - [84] Johanson, R.C., Imhoff, J.C. and Davis, H.H.. User's Manual for Hydrological Simulation Program: Fortran. HSPF: User's Manual Release 8.0. US Environmental Protection Agency, Athens, Georgia. Report EPA/600/3-84-066, 1984.
 - [85] Kemper W D, Noonan L. Runoff as affected by salt treatments and soil texture [J]. Soil Science Society of America Proc., 1970,34:126-130.
 - [86] Konig K.W.. The rainwater technology handbook: rainharvesting in building[M]. Wilo-Brain, Dortmund, Germany, 2001.
 - [87] Kudakwashe E., Edward Chuma, Billy B.. Rainwater harvesting for sustainable agriculture in communal lands of Zimbabwe[J]. Physics and Chemistry of the Earth ,2004 (29) 1069–1073
 - [88] Latham B.G.. Rainwater collection systems: the design of single purpose reservoirs[M]. MSc thesis, University of Ottawa, Canada, 1983.
 - [89] Lau T.L., Majid T.A., Choong K.K., Zakaria N.A., Ghani A.A.. Study on a high rise building incorporated with rainwater harvesting storage tank towards building a sustainable urban environment in Malaysia[A]. The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokyo, 27th-29th,2005.
 - [90] Leggett D.J., Brown R., Brewer D., Stanfield G., Holliday E.. Rainwater and greywater use in buildings: best practice guidance[M]. CIRIA report C539, London, 2001b.
 - [91] Leo Stroosnijder. Modifying land management in order to improve efficiency of rainwater use in the African highlands[J]. Soil & Tillage Research 2008(25) 1 – 10
 - [92] Li X Y, Gong J D. Effects of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting systems with mulches [J]. Agricultural Water Management,2002,54:243-254.
 - [93] Li X., Xie Z., Yan X.. Runoff characteristics of artificial catchment materials for rainwater harvesting in the semiarid regions of China[J]. Agriculture Water Management, 2004, 65:211-224.

- [94] Liaw C., Tsai Y.. Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic use[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40(4):901-912.
- [95] Liu S., Butler D., Makropoulos C., Memon F.. An Excel-Matlab based decision making framework and its application in urban water management[A]. CWWI, Exeter, UK, 2005, 21-26.
- [96] M. Zaizen, T. Urakawa, Y. Matsumoto. The collection of rainwater from dome stadiums in Japan[J]. Urban Water 1 (1999) 355±359
- [97] M.B. Hauger, C. de Roo, G.D. Geldof. Whitepaper on Risk Perception, Risk Assessment and Risk Management in the DayWater Context. 2003. WP4 / T 4.1 / D 4.1 – CO Final draft. www.daywater.org.
- [98] M.Zaizen, T.Urakawa, Y.Matsumoto, H.Takai. The collecti0n of rainwater from dome stadiums in Japan[J]. UrbanWater. 1999. (1):355~359.
- [99] Martin T.J.. Supply aspects of domestic rainwater tanks[M]. South Australian Department for the Environment. 1980.
- [100] McMahon T.A., Mein R.G.. Reservoir capacity and yield[J]. In: Chow, V.T.(Ed). Developments in Water Science, Elsevier, London, 1978, 9:71-106.
- [101] McMahon T.A., Pegram G.G.S., Voge R.M., Peel M.C.. Revisiting reservoir storage-yield relationships using a global streamflow database[J]. Advances in Water Resources, 2007, 30:1858-1872.
- [102] Mehdizadeh P, Kowsar A, Vaziri E. Water harvesting for afforestation I. Efficiency and life span of Asphalt cover [J]. Soil Science Society of America Journal, 1978,42:644-649.
- [103] Melesse A M, Shih S F. Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2002,37:173-183.
- [104] Mitchell V.G.. How important is the selection of computational analysis method to the accuracy of rainwater tank behaviour modeling[J]. Journal of Hydrological Processes, 2007.
- [105] MJA. The cost-effectiveness of rainwater tanks in urban Australia[A]. Report prepared by Marsden Jacob Associates for the National Water Commission, 2007.
- [106] Moran P.A.P.. The theory of storage[M]. Methuen, London, 1959.
- [107] Mustow S., Grey R.. Greywater and rainwater systems: recommended UK requirements[M]. Report No. 13034/2, BSRIA, 1997.
- [108] Myers L E. Reecent advances in water harvesting[J].Journal of Soil Water Conservation, 1967,22:95-97.
- [109] Myers L E. Sprayed asphalt pavements for water harvesting[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1967,3:79-97.
- [110] N. Hatibu, K. Mutabazi, E.M. Senkondo. Economics of rainwater harvesting for crop enterprises in semi-arid areas of East Africa[J]. Agricultural Water Management 80 (2006) 74–86
- [111] NSWG. Integrated water cycle management: rainwater tank model manual(version RTM 2.1)[M]. New South Wales Government, Department of Energy, Utilities and Sustainability, 2006.
- [112] Oweis T, Hachum A, Kijne J. Water harvesting and supplementary irrigation for improved water use efficiency in dry areas [M]. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 1999.
- [113] Panigrahi B, Panda S N, Mull R. Simulation of water harvesting potential in rain-fed ricelands using water balance model[J]. Agricultural Systems, 2001,69:165-182.

-
- [114] Patricia Gobel, Holger Stubbe, Mareike Weinert, et al. Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of the hydrogeological conditions[J]. *Journal of Hydrology*. 2004. (299):267-283.
 - [115] Pratt C.J., Parker M.A.. Rainfall loss estimation on experimental surfaces[A]. The 4th International Conference on Urban Storm Drainage, Lausanne, 1987.
 - [116] Price, R.K., Kidd, C.H.R., 1978. A design and simulation method for storm sewers. In: Halliwell, P.R. (Ed.), *International Conference on Urban Storm Drainage*. Pentech Press, London, pp. 327–337.
 - [117] Prinz D, Wolfer S, Siegert K. Water harvesting for crop production[M]. Rome: FAO Training Course, 2000.
 - [118] Ragab R., Austin B., Moidinis D.. The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs 3: reservoir storage capacity and probability of failure model[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2001, 5(4):563-568.
 - [119] Rahman M.M., Yusaf F.M.S.. Rainwater harvesting and the reliability concept[A]. Proc. of 8th ASCE Speciality Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability, University of Notre Dame, Paris, France, 2000.
 - [120] Ree-Ho Kim, Sangho Leea, Jinwoo Jeongb, et al.. Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane[J]. *Desalination*, 2007, (202):326-332.
 - [121] Rippl W.. The capacity of storage reservoirs for water supply[A]. Proc. of the Institute of Civil Engineers, 1883, 71:270-278.
 - [122] Rockstrom J. On-farm green water estimates as a tool for increased food production in water scarce regions [J]. *Phys. Chem. Earth(B)*, 1999, 24(4):375-383.
 - [123] S.K. Ambast, N.K. Tyagi, S.K. Raul. Management of declining groundwater in the Trans Indo-Gangetic Plain (India) Some options[J]. *Agricultural Water Management* 82 (2006) 279–296
 - [124] Sanchez-Cohen I, Lopes V L, Slack D C. Water balance model for small-scale water harvesting systems[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1997, 123(2):123-128.
 - [125] Savenije H.H.G. Water scarcity indicators; the deception of the numbers [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000, 25(3): 199-204.
 - [126] Schemenauer R.S., Cereceda P.. The Complementary Aspects of Rainwater Catchment and Fog Collection[A]. Proc. of 6th International conference on Rainwater Catchment Systems, Nairobi, Kenya, 1993.
 - [127] Schiller E., Latham B.. Rainwater roof catchment systems[M]. Information and Training for Low-Cost Water Supply and Sanitation, Ch4.1, Trattles D., World Bank, 1982, p198.
 - [128] Sekar I., Randhir T.O.. Spatial assessment of conjunctive water harvesting potential in watershed systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 9(24):1-14.
 - [129] Shaaban A.J.B., Appan A.. Utilizing rainwater for non-potable domestic uses and reducing peak urban runoff in Malaysia[A]. Proc. of 11th International Rainwater Catchment Systems Conference, Texcoco, Mexico, 2003.
 - [130] Stephen N. Ngigi. What is the limit of up-scaling rainwater harvesting in a river basin[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003 (28) 943–956
 - [131] Stephen N., Hubert H.G., Josephine N.. Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya[J]. *Agricultural Water Management*, 2005 (73) 21–41

- [132]Theib Oweis , Ahmed Hachum. Optimizing supplemental irrigation Tradeoffs between profitability and sustainability[J]. agricultural water management 2008, (26)84–89.
- [133]Theib Oweis, Ahmed Hachum. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa[J]. Agricultural Water Management ,2006 (80) 57–73
- [134]Thilo Herrmann,Uwe Schmida. Rainwater utilisation in Germany efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects [J]. Urban Water,1999(1):307-316.
- [135]Thomas H.A., Burden R.P.. Operations research in water quality management[M]. Harvard Water Resources Group, 1963.
- [136]Thomas T.. RWH performance predictor for use with coarse(i.e. monthly) rainfall data[A]. Domestic Roofwater Harvesting Research Programme Report RN-RWH04, Development Technology Unit, University of Warwick, 2002a.
- [137]Tina Butler. China’s Imminent Water Crisis. mongabay.com, May 30, 2005.
- [138]UN. Assessment of Freshwater Resources. 1997. <http://www.un.org/>.
- [139]UNEP. Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm, 5-16 June 1972. <http://www.unep.org/Documents.multilingual/Default.asp/>.
- [140]UNESCO. The 2nd UN World Water Development Report: Water, a shared responsibility. http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr2/table_contents.shtml/, March 2006.
- [141]Vaes G., Berlamont J.. The effect of rainwater storage tanks on design storms[J]. Urban Water, 2001, 3:303-307.
- [142]Voinov A., Farley J.. Reconciling sustainability, systems theory and discounting[J]. Journal of Ecological Economics, 2006.
- [143]Wainwright J, Mulligan M.. Environmental modeling: finding simplicity in complexity[A]. John Wiley and Sons, West Sussex, UK, 2004.
- [144]Woods-Ballard B., Kellagher R., Martin P., Jefferies C., Bray R., Shaffer P.. The SUDS manual[M]. CIRIA Report C697. London, 2007.
- [145]Woods-Ballard B., Kellagher R.. Whole life costing for sustainable drainage[M]. HR Wallingford report SR 627. 2004a.
- [146]World Bank. Report released 7 August 1995.
- [147]WWC. Water Crisis. 2006. <http://www.worldwatercouncil.org/index.php?id=25/>.
- [148]Xia Jun, et al. Water problems and opportunities in hydrological Sciences in China [J]. Hydrological Science Journal, 2001, 46(6):907-921.
- [149]Yaziz M.I., Gunting N., Sapari N., Ghazali A.. Variations in rainwater quality from roof catchments[J]. Water Research, 1989, 23(6):761-765.
- [150]Young M D B, Gowing J W, Wyseure G C L. Parched- thirst: development and validation of a process-based model of rainwater harvesting [J]. Agricultural Water Management, 2002,55:121-140.
- [151]Yuan T, Li F M, Liu P H. Economic analysis of rainwater harvesting and irrigation methods, with an example from China[J]. Agricultural Wate Management. 2003,60:217-226.
- [152]Yusuf F.M.S.. Rainwater harvesting potential in Bangladesh[M]. M.Eng thesis, Department of Civil Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, 1999.
- [153]Zhang Y Q. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the north China Plain[J]. Agricultural Wate Management,2004,64:107-122.

- [154] Zhu Q., Liu C.. Rainwater utilization for sustainable development of water resources in China[A]. The Stockholm Water International Symposium, Stockholm, Sweden, 1998.
- [155] 白清俊. 流域坡面综合产流数学模型的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报. 1999. 5(3):54-58.
- [156] 包存宽, 尚金城, 陆雍森. 西部开发中水资源利用可持续性评价[J]. 水科学进展, 2001, 12(4):530-534.
- [157] 鲍超. 黑河流域用水结构与产业结构的双向优化调控研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2004.
- [158] 北京市气象局. 北京气候资料(1841-1980)[M]. 1982:370-417.
- [159] 北京市水利局中德合作雨洪利用项目办公室, 首都社会经济发展研究所. 优化城市水资源配置建设小区雨水利用系统[J]. 北京水利. 2003. 3: 13-15.
- [160] 北京市水务局. 北京水资源公报 1996-2006.
- [161] 北京市统计局. 北京统计年鉴(2006-2008 年)[Z]. 北京: 中国统计出版社.
- [162] 车伍, 李俊奇. 城市雨水利用技术与管理[M]. 中国建筑业出版社. 2006. 155-157
- [163] 车伍, 李俊奇. 从第十届国际雨水利用大会看城市雨水利用的现状与趋势[J]. 给水排水. 2002. 28(3):12-14.
- [164] 车伍, 唐宁远, 张炜等. 我国城市降雨特点与雨水利用[J]. 给水排水. 2007. 33(6):45-48.
- [165] 车伍, 张炜, 李俊奇等. 城市雨水径流污染的初期弃流控制[J]. 中国给水排水. 2007. 23(6):1-5.
- [166] 陈守煜. 区域水资源可持续利用评价理论模型与方法[J]. 中国工程科学, 2001, 3(2):33-38.
- [167] 陈耀文, 蒋正文, 刘学军. 集雨节灌工程投资管理机制研究[J]. 中国农村水利水电. 2004. (12): 32-33.
- [168] 陈志恺. 中国大百科全书-水利[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1992:267-269
- [169] 成自勇, 杨具瑞. 论雨水利用的若干问题和发展趋势[A]. 中国雨水利用研究文集[C]. 北京: 中国矿业大学出版社. 1998. 29~31.
- [170] 丛翔宇, 倪广恒, 惠士博等. 基于 SWMM 的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析[J]. 水利水电技术. 2006. 37(4):64-67.
- [171] 丁跃元, 黄玉璋, 马智杰. 城区雨洪利用中可渗透路面砖配合比的最优化研究[J]. 北京水利. 2003. (1):12-14.
- [172] 方国华, 钟淋涓, 毛春梅. 水污染经济损失计算方法述评[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(3):54-56.
- [173] 冯尚友, 刘国全. 水资源持续利用的框架[J]. 水科学进展, 1997, 8(4):301-307.
- [174] 顾斌杰, 张郭强, 潘云生等. 雨水集蓄利用技术与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001
- [175] 韩宇平, 阮本清. 中国区域发展的水资源压力及空间分布[J]. 四川师范学院学报(自然科学版), 2002, 23(3):219-224.
- [176] 胡先琼, 李艳. 深圳机场扩建工程雨洪利用可行性研究[J]. 中国农村水利水电. 2008. (5): 17-19.
- [177] 胡晓亮, 王启山, 王效琴等. 城市雨水利用的技术经济与环境的影响分析[J]. 海河水利. 2007. (4): 37-41.
- [178] 贾绍凤, 张军岩. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展, 2002, 21(6):538-545.
- [179] 贾绍凤, 张士锋, 王浩. 用水合理性评价指标探讨[J]. 水科学进展, 2003, 14(3):260-264.
- [180] 贾绍凤, 张士锋. 海河流域水资源安全评价[J]. 地理科学进展, 2003, 22(4):379-387.

- [181]姜文来.中国21世纪水资源安全对策研究[J].水科学进展,2001,12(1):66-71.
- [182]金菊良,张礼兵,魏一鸣.水资源可持续利用评价的改进层次分析法[J].水科学进展,2004,15(2):227-232.
- [183]李红军,曹建生,张万军.流域雨水资源化目标潜力计算模型研究[J].2005.23(2):159-163.
- [184]李俊奇,车伍,孟光辉等.城市雨水利用方案设计与技术经济分析[J].给水排水.2001.27(12):25-28.
- [185]李俊奇,孟光辉,车伍.城市雨水利用调蓄方式及调蓄容积实用算法的探讨[J].给水排水.2007.33(2):42-46.
- [186]李俊奇,余苹,车伍等.城市雨水利用工程的评价与科学决策[J].给水排水.2007.33(增刊):18-22.
- [187]李令跃,甘泓.试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J].水科学进展,2000,11(3):307-313.
- [188]李梅,李佩成.城市雨水收集模式和处理技术[J].山东建筑大学学报.2007.22(6):517-520.
- [189]李书恒,周寅康.中国西北干旱地区水资源安全评价初探——以新疆尉犁县为例[J].干旱区研究,2004,21(3):230-234.
- [190]李小雁,龚家栋.半干旱区雨水集流研究进展及其现状[J].中国沙漠.2002.22(1):88-93.
- [191]李晓凯,石海峰.地下水超采的经济损失计算方法及其在典型地区的应用[J].水利水电科技进展,2003,23(6):13-20.
- [192]李养龙,赵凯,金林等.城市化发展面临的水文问题.山西水利科技,2001,(4)86-88
- [193]李永根.河北省现实及中长期缺水损失评价[J].河北水利水电技术,2004,(3):7-10.
- [194]李有华.晋西山地区果园集流节水保墒栽培技术研究[J].水土保持学报.2000.14(5):7-13.
- [195]梁天刚.基于GIS栅格系统的集水农业地表产流模拟分析[J].水利学报.1998.7:26-29.
- [196]刘昌明,牟海省.雨水资源以及在农业生态中的应用[J].生态农业研究,1993,1(3):20-26
- [197]刘恒,耿雷华,陈晓燕.区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J].水科学进展,2003,14(3):265-270.
- [198]刘小勇,吴普特.雨水资源集蓄利用研究综述[J].自然资源学报.2000.15(2):189-193.
- [199]刘一.旱地地膜玉米有限供水效应研究[J].水土保持研究.2003.10(1):101-103.
- [200]刘毅,贾若祥,侯晓丽.中国区域水资源可持续利用评价及类型划分[J].环境科学,2005,26(1):42-46.
- [201]龙腾锐,姜文超,何强.水资源承载力内涵的新认识[J].水利学报,2004,(1):38-45.
- [202]龙腾锐,姜文超.水资源(环境)承载力研究进展[J].水科学进展,2003,14(2):249-253.
- [203]马耀光,张保军,罗志成.旱地农业节水技术[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [204]门宝辉,梁川.属性识别方法在水资源系统可持续发展程度综合评价中的应用[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2002,28(6):675-678.
- [205]闵庆文,成升魁.全球化背景下的中国水资源安全与对策.资源科学.2002.24(2):49-55.
- [206]牟海省.国内外雨水利用的历史、现状与趋势[A].中国雨水利用研究文集[C].北京:中国矿业大学出版社,1998,44-52.
- [207]倪红珍,王浩,汪党献,等.基于水资源绿色核算的北京市水价[J].水利学报,2006,37(2):210-217.
- [208]聂发辉,李田,宁静.概率分析法计算下凹式绿地对雨水径流的截留效率[J].中国给水排水.2008.24(12):53-56.
- [209]牛有权.雨水集蓄设施经济容积的确定方法[J].西北农林科技大学学报,2004,32(8):125-129
- [210]潘峰等.模糊物元模型在区域水资源可持续利用综合评价中的应用[J].水科学进

- 展,2003,14(3):271-275.
- [211] 潘国庆,车伍,李海燕等. 雨水管道沉积物对径流初期冲刷的影响[J]. 环境科学学报. 2009. 29(4):771-776.
- [212] 潘国庆,车伍,李俊奇等. 中国城市径流污染控制量及其设计降雨量[J]. 中国给水排水. 2008. 24(22):25-29.
- [213] 钱易,刘昌明,邵益生. 中国城市水资源可持续开发利用. 中国水利水电出版社. 2002,207-229
- [214] 冉茂玉. 论城市化的水文效应[J]. 四川师范大学学报,2000 (4):436-439
- [215] 任鲁川. 区域自然灾害风险分析研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(3):243-246.
- [216] 阮本清,魏传江.首都圈水资源安全保障体系建设[M].北京:科学出版社,2004.
- [217] 宋松柏,蔡焕杰.区域水资源可持续利用的Bossel指标体系及评价方法[J].水利学报,2004,(6):68-74.
- [218] 宋松柏,蔡焕杰等.水资源可持续利用指标体系及评价方法研究[J].水科学进展,2003,14(5):647-652.
- [219] 孙雨虹.立交桥雨水利用方式探索[J]. 北京水务. 2007. (4): 27-28.
- [220] 田翠杰,李艳萍. 设施农业研究综述[J]. 世界农业. 2009. 3:56-57.
- [221] 王本德等.考虑权重折衷系数的模糊识别方法及在水资源评价中的应用[J].水利学报, 2004,(1):6-10.
- [222] 王浩,秦大庸,王建华,周祖昊.区域缺水状态的识别及其多维调控[J].资源科学,2003,25(6):2-7.
- [223] 王红瑞,刘昌明,毛广全,等. 水资源短缺对北京农业的不利影响分析与对策[J].自然资源学报, 2004, 19(2):160-169
- [224] 王宏江,陆桂华.区域水资源组成、潜力及其可持续利用分析[J].水利学报,2003,(8):122-126.
- [225] 王晓青.中国水资源短缺地域差异研究[J].自然资源学报,2002,16(6):516-520.
- [226] 王亚军. 甘肃砂田西瓜覆膜补灌效应研究[J]. 中国沙漠. 2003. 23(3): 300-305.
- [227] 王彦红,韩芸,彭党聪. 城市雨水径流水质特性及分析[J]. 环境工程. 2006. 24(3):84-86.
- [228] 王义成等. 城市降雨径流模型—修正RRL法及其改进[J]. 水利水电技术. 2007. 38(6):19-23.
- [229] 王勇. 旱原地膜冬小麦集雨节水灌溉研究[J]. 干旱地区农业研究. 1997. 15(3): 57-63.
- [230] 魏飒,郭永辰,王军. 城市雨水径流水质监测及影响因素[J]. 河北师范大学学报. 2009. 33(1):124-127.
- [231] 魏兴琥,谢忠奎,李小雁,王亚军. 温室集雨与集雨水高效利用研究[J]. 干旱地区农业研究. 2003. 21(1): 11-16.
- [232] 吴季松.现代水资源管理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002
- [233] 吴佩林. 中国城市化进程与城镇水资源保障[M].中国财政经济出版社,北京,2005
- [234] 吴普特. 人工汇集雨水利用技术研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002.
- [235] 夏军.华北地区水循环与水资源安全:问题与挑战[J].地理科学进展,2002,21(6):517-526.
- [236] 熊波,宫福生,常晓莲. 北京的设施农业现状及存在问题[J]. 北京农业. 2007. 4:1-4.
- [237] 徐秋宁. 小型集水区降雨径流计算模型研究[J]. 水土保持研究. 2002. 9(1): 139-142.
- [238] 徐晓红. 集雨节灌工程利用模式及经济可行性分析[J]. 中国农村水利水电. 2007. (11):30-33.
- [239] 徐雨清. 遥感和地理信息系统在半干旱地区降雨—径流关系模拟中的应用[J]. 遥感技术与应用. 2000. 15(1): 28-31.
- [240] 徐中民,龙爱华.中国社会化水资源稀缺评价[J].地理学报, 2004,59(6):982 - 988.
- [241] 杨明庆,周振民. 城市雨水利用若干问题研究[J]. 华北水利水电学院学报. 2005. 26(2):12-14.

- [242] 叶永毅. 中国大百科全书·大气科学-海洋科学-水文科学卷. 北京:中国大百科全书出版社,1987:354-357
- [243] 尹光华. 旱地春小麦集雨补灌增产机制初探[J]. 干旱地区农业研究. 2001. 19(2): 55-60.
- [244] 尹光华. 旱农区不同种植模式作物最佳补灌时期和适宜补灌量研究[J]. 干旱地区农业研究. 2000. 18(1): 85-90.
- [245] 余卫东,汤景华,杨淑萍. 城市雨水资源化潜力研究[J]. 气象与环境科学. 2007. 30(3): 29-32.
- [246] 於凡. 北京市城市水价发展及居民用水承受能力分析[J].海河水利.2006,3:67-70
- [247] 张光辉,陈树娥,费宇红,聂振龙. 海河流域水资源紧缺属性与对策[J]. 水利学报,2003,(10):113-118.
- [248] 张巧显,欧阳志云,王如松等. 中国水安全系统模拟及对策比较研究[J]. 水科学进展,2002,13(5):569-577.
- [249] 张世本,彭岳津,迟鹏超. 用模糊理论评价松辽河流域城市缺水状况[J]. 东北水利水电,1998,(1):27-29.
- [250] 张书函,李月霞,陈建刚. 我国城市雨水利用相关规定综述[J]. 北京水利. 2004. (4): 43~46.
- [251] 张书函,陈建刚,丁跃元. 城市雨水利用的基本形式与效益分析方法[J]. 水利学报. 2007. 10: 399-404.
- [252] 张思聪,惠士博,谢森传等. 北京市雨水利用[J]. 北京水利. 2003. (4): 20-22.
- [253] 张新燕. 降雨聚集条件下系统优化模拟模型的设计[J]. 干旱地区农业研究. 2000.18(2):91-96.
- [254] 张新燕. 降雨聚集条件下蓄水工程优化研究[J]. 干旱地区农业研究. 2000. 18(4): 84-86.
- [255] 张源沛,张益明. 集雨节灌旱地春小麦最佳补灌时期的研究[J]. 灌溉排水. 2002. 21(2):44-46.
- [256] 张祖新等.雨水集蓄利用工程技术[M]. 中国水利水电出版社,1999
- [257] 赵生才.面向生态的水资源合理配置与调控—香山科学会议第158次学术讨论会观点摘要[J]. 地球科学进展,2002, 17(3):457-460.
- [258] 赵世明,赵锂,王耀堂等. 建筑与小区雨水利用工程规模的分析[J]. 中国给水排水. 2007. 23(24): 84~87.
- [259] 赵卫,胡和平. 中国水资源管理及其法规建设[J]. 水利水电技术. 1999. (10):1-2.
- [260] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2008.
- [261] 朱强.水资源可持续发展和雨水集蓄利用[J].防渗技术,2002,1:1-5
- [262] 朱宜平,张海平,姜卫星. 城市快速干道雨水收集处理系统设计[J]. 中国给水排水. 2007. 23(20): 35-39.
- [263] 朱照宇,黄宁生,欧阳婷萍. 可持续发展中水资源压力原因分析[J]. 科技通报,2003,19(4):265-268.
- [264] 左建兵,刘昌明,郑红星等. 北京市城区雨水利用及对策[J]. 资源科学. 2008, 30(7):990-998.
- [265] 左其亭等. 城市水资源承载能力—理论、方法、应用[M].北京:化学工业出版社,2005

附件 1

立式平底塑胶储水罐性能价格表

型号	直径（mm）	高度（mm）	盖直径（mm）	价格（元）
PT-250L	650	930	400	156
PT-400L	760	1080	400	250
PT-500L	800	1250	400	308
PT-1000L	1070	1365	400	610
PT-1500L	1200	1630	400	900
PT-2000L	1300	1820	400	1180
PT-3000L	1580	2040	400	1760
PT-5000L	1800	2350	600	2900
PT-6000L	1900	2440	600	3500
PT-8000L	2100	2750	600	4580
PT-10000L	2270	3060	600	5650
PT-15000L	2580	3380	600	8400
PT-20000L	2780	3800	600	10800
PT-30000L	3050	4550	600	16500
PT-40000L	3050	5700	600	21400

立式 304 不锈钢储罐性能价格表

型号	直径（mm）	高度（mm）	价格（元）	厚度（mm）
ST-500L	730/880	1310/1020	900	0.5
ST-800L	900	1400	1180	0.5
ST-1000L	880	1650	1360	0.5
ST-1000L	960/1050	1650/1420	2100	0.5
ST-1500L	1050	1650	2850	0.5
ST-2000L	1320	1680	3400	0.8
ST-2500L	1320	1950	3950	0.8
ST-3000L	1320	2420	5660	0.8
ST-4000L	1660	2050	7080	1
ST-5000L	1830	2100	8480	1
ST-6000L	1830	2500	11500	1
ST-8000L	2050	2750	14200	1
ST-10000L	2220	2750	21000	1
ST-15000L	2520	3290	28100	1.2
ST-20000L	2880	3500	900	1.5

附件表 2

区县	建设地点	汇流面积 (m ²)	蓄水池体积 (m ³)	建筑材料	造价 (元)
昌平	兴寿镇香屯村	1334	60	砖混	28000
昌平	马池口镇白浮村	12006	525	砖混	120000
昌平	崔村镇绵山村	26680	1225	砖混	240000
大兴区	永和庄良种场	3335	80	砖混	20000
房山	石楼镇石楼村	2001	150	砖混	34500
怀柔	庙城镇赵各庄村	1334	98	砖混	32000
怀柔	庙城镇赵各庄村	1334	98	砖混	32000
怀柔	庙城镇赵各庄村	1334	98	砖混	51000
怀柔	赵各庄村	1334	98	砖混	51000
怀柔	郭庄	667	98	砖混	26000
怀柔	赵各庄村	2001	196	砖混	51000
怀柔	赵各庄村	2001	196	砖混	51000
怀柔	赵各庄村	2668	196	砖混	51000
怀柔	赵各庄村	2001	500	砖混	98000
平谷	城关镇	6003	300	砖混	90000
平谷	金海湖镇	4669	525	砖混	70000
平谷	夏各庄镇	10005	750	砖混	130000
顺义	顺义农科所	2001	200	砖混	60000
顺义	杨镇农优站	2668	400	砖混	60000
顺义	大孙各庄绿奥合作社	5336	400	砖混	80000
顺义	北务镇闫家渠村	6670	480	砖混	80000
顺义	大孙各庄前陆马基地	8671	500	砖混	150000
通州区	新世纪农场	6670	450	砖混	132000
通州区	成果展示基地	6670	512	砖混	115000

附件表 3

型号	额定 扬程 m	实际扬程 (70%) m	地下水 水位 m	额定流 量 m ³ /h	实际流量 (70%) m ³ /h	额定功 率 (kW)	单位水量耗 电 (kWh/m ³)
150QJ20-30/5	30	21	11	20	14	3	0.21
150QJ20-36/6	36	25	15	20	14	4	0.29
150QJ20-42/7	42	29	19	20	14	4	0.29
150QJ20-48/8	48	34	24	20	14	5.5	0.39
150QJ20-54/9	54	38	28	20	14	5.5	0.39
150QJ20-60/10	60	42	32	20	14	7.5	0.54

150QJ20-66/11	66	46	36	20	14	7.5	0.54
150QJ20-72/12	72	50	40	20	14	7.5	0.54
150QJ20-78/13	78	55	45	20	14	7.5	0.54
150QJ20-84/14	84	59	49	20	14	9.2	0.66
150QJ20-90/15	90	63	53	20	14	9.2	0.66
150QJ20-96/16	96	67	57	20	14	9.2	0.66
150QJ20-102/17	102	71	61	20	14	11	0.79
150QJ20-108/18	108	76	66	20	14	11	0.79
150QJ20-114/19	114	80	70	20	14	11	0.79
150QJ20-120/20	120	84	74	20	14	11	0.79
150QJ20-126/21	126	88	78	20	14	13	0.93
150QJ20-132/22	132	92	82	20	14	13	0.93
150QJ20-138/23	138	97	87	20	14	13	0.93
150QJ20-144/24	144	101	91	20	14	15	1.07
150QJ20-150/25	150	105	95	20	14	15	1.07
150QJ20-156/26	156	109	99	20	14	15	1.07
150QJ20-162/27	162	113	103	20	14	15	1.07
200QJ20-40/3	40	28	18	20	14	4	0.29
200QJ20-54/4	54	38	28	20	14	5.5	0.39
200QJ20-67-5	67	47	37	20	14	7.5	0.54
200QJ20-81/6	81	57	47	20	14	7.5	0.54
200QJ20-93/7	93	65	55	20	14	9.2	0.66
200QJ20-108/8	108	76	66	20	14	11	0.79
200QJ20-121/9	121	85	75	20	14	13	0.93
200QJ20-133/10	133	93	83	20	14	15	1.07
200QJ20-148/11	148	104	94	20	14	15	1.07
200QJ20-175/13	175	123	113	20	14	18.5	1.32
200QJ20-202/15	202	141	131	20	14	22	1.57
200QJ20-243/18	243	170	160	20	14	25	1.79
200QJ20-270/20	270	189	179	20	14	30	2.14
200QJ20-297/22	297	208	198	20	14	30	2.14
200QJ20-338/25	338	237	227	20	14	37	2.64
200QJ20-350/26	350	245	235	20	14	37	2.64
200QJ20-363/27	363	254	244	20	14	37	2.64
200QJ20-400/30	400	280	270	20	14	45	3.21

注：1.资料来源于水泵供应商；2.实际扬程和实际流量按额定值 70%计算；单位水量耗电等于额定功率和实际流量的比值。

博士期间发表的学术论文

- 季文华, 蔡建明, 王志平等. 北京市设施农业集雨利用典型模式及效益研究[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15 (1): 99-105.
- 季文华, 蔡建明, 和克俭等. 北京市居住区屋面集雨资源的潜力分析[J]. 资源科学, 2010, 32 (2): 282-289.
- 季文华, 王克武, 蔡建明等. 设施农业雨水集蓄利用工程规模之优化[J]. 农业工程学报. 待刊出.
- Ji Wen-hua, Cai Jian-ming, Rene van Veenhuizen. Efficiency and Economy of a New Agricultural Rainwater Harvesting System [J]. Chinese Journal of Population, Resources and Environment. Adopted.
- Ji Wen-hua, Cai Jian-ming. Adapting to Water Scarcity: Improving water sources and use in urban agriculture in Beijing. Urban Agriculture. 2008, 20:11-13.
- Zhang Fei-fei, Cai Jian-ming, Ji Wen-hua. Innovations in Greenhouse Rainwater Harvesting System in Beijing, China. Urban Agriculture. 2007,19:20-21.

作者简介

1997 年-2001 年	北京师范大学	地理学专业 理学学士
2001 年-2002 年	江苏省锡山高级中学	中学教师
2003 年-2006 年	北京师范大学	人文地理学专业 理学硕士
2007 年-2010 年	中科院地理科学与资源研究所	人文地理学专业

致 谢

当我落下博士论文的最后句点后，蓦然发现，我的学生生涯行将结束。还记得，奋战论文的时候，犹如埋首踽踽前行的赶路人，忘记头上的阳光和身边无数关心我的亲人、老师和朋友……抬起头，仰望浩瀚的星空，回想我二十多年的求学历程，有欢笑、有汗水。还记得，十三年前，懵懂无知的我第一次坐上进京的火车，慈爱的父亲用布满老茧的手述说他的关爱和不舍；大学老师让我从一个羞涩的青年变成一个自信的人；硕士老师开启了我求知的大门；博士老师开阔了我的视野和胸襟，指引了我人生的道路。同学的关心，朋友的支持，学习生活中的点点滴滴如电影片段般不断在我眼前闪现……望着夜空，心头的百般滋味，难以描述，二十多年的求学历程，要感谢的人如天上的繁星一样多，是身边每一个关心我支持我的人照亮了我的求学之路，让我顺利走完我的博士之路！

忠心感谢我的导师蔡建明研究员。多年来，您不仅在学业上给我指明正确方向，而且在生活上给了我莫大关怀，更重要的是从您身上我学到了很多做人的道理。您严谨求实的科学态度、艰苦拼搏的钻研精神、做事果断的人格魅力都深深地影响着我。您在学习和工作目标上对我严格要求，而在实际生活中又对我极度信任；您一方面为我提供了许多难得的学习机会，另一方面又为我创造了足够的自由发展空间。能够成为您的博士研究生，是我今生的最大的幸福。忠心感谢我的外籍导师Rene先生，Rene先生不仅在我论文写作过程中给予了很大的帮助，而且在科研项目中对我进行了全面指导。Rene先生性格幽默风趣、工作态度认真严谨，是我的良师益友。

衷心感谢我所陈田研究员、刘盛和研究员、刘家明研究员、郭焕成先生在论文开题中给予的指导；感谢毛汉英先生在论文写作、修改过程中提供的指导；感谢每一位审稿老师提出的宝贵批评和建议；感谢北京市农业技术推广站的王克武站长、王志平科长在项目合作中提供的帮助；感谢怀柔区果蔬合作社社长胥小晶女士及其丈夫提供的帮助。

衷心感谢我的同门杨振山博士、渠涛博士、张菲菲硕士、韩非博士以及在读的博士研究生张理茜、王妍、郭华和杜姗姗等，能与你们共同学习生活，是我的幸运。感谢1633办公室已经毕业的王先文博士、张超阳博士、宋增文硕士、陈甲全硕士，他们在生活、学习和科研上都是我学习的好榜样。感谢我所支持和帮助过我的所有老师和同学，特别感谢研究生部谭寨璐老师、王淑强老师、陈力老师和储小红老师等给予的各方面帮助和关照！

忠心感谢我的女朋友杨杨，博士三年也正是我与她从相识到相知，患难与共的三年。三年里她给予我的支持和帮助令我终生难忘，而我能够给予她的却少之又少，对此我深感愧疚。

最后，我要忠心感谢我的家人和朋友。年迈的父母对我默默的支持以及无私的奉献是我不断前进的坚强后盾，哥哥、姐姐、嫂子和姐夫对我的关爱以及亲戚好友对我的期待都让我倍感珍惜眼前的机遇。对你们的感激之情难以用语言表达，唯有

将其化作我继续奋斗的力量之源。

最后，感谢在我成长道路上所有给予我关心、爱护和帮助的人。

季文华

2010-5-27 夜 于中科院地理所