



城市雨洪资源生态学 管理研究与应用

郭文献 刘武艺 王鸿翔 黄智华 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

城市雨洪资源生态学 管理研究与应用

郭文献 刘武艺 王鸿翔 黄智华 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

城市雨洪资源化利用,对于解决当前城市水资源紧缺、水环境恶化以及洪涝灾害等问题,建设节水防污型生态城市具有重要研究意义。本书以郑州市雨洪资源利用为背景,构建了城市雨洪资源生态学管理理论及技术方法体系;分析了郑州市雨洪资源特性与开发利用潜力;结合国外先进管理模式,构建了郑州市雨洪资源生态学管理模式;最后对郑州市雨洪资源利用效益进行了综合评价。

本书可供从事城市水务、水文水资源相关专业的科研和管理人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

城市雨洪资源生态学管理研究与应用 / 郭文献等著

— 北京:中国水利水电出版社,2015.11

ISBN 978-7-5170-3824-5

I. ①城… II. ①郭… III. ①城市—暴雨洪水—雨水资源—水资源管理—研究 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第275282号

书 名	城市雨洪资源生态学管理研究与应用
作 者	郭文献 刘武艺 王鸿翔 黄智华 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.75印张 231千字
版 次	2015年11月第1版 2015年11月第1次印刷
定 价	39.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

城市化促使社会经济飞速发展、城市规模不断扩大、城市人工构筑物不断增加,但同时也使得城市内河水系不断萎缩、河湖富营养化不断加重、水环境质量不断恶化,城市水生态系统不断衰退,人居环境品味不断下降。如何解决城市化带来的水生态问题,寻求解决水污染与水资源不足双重困境的有效途径,日益成为政府决策者和专家学者共同关注的问题。此外,城市建设改变了原有的自然环境,大量道路楼房的建设、路面硬化、不透水地面增加、工业污染产生的局部大气环境变化,使得城区内的降雨过程都发生了明显变化。暴雨增多,径流形成洪峰,速度加快,洪峰过程时短、峰高。以上变化给城市防洪、市政排水都带来了新的问题。

在上述大背景下,加强水资源管理、开源节流是实现水资源持续开发和永续利用的关键。城市雨水资源化利用作为一种潜在水资源受到了社会各界的普遍关注,也是一条治理污染,解决水危机的必由之路。因此,对城市水资源进行综合利用,积极稳妥地开展雨水利用工作是十分必要和紧迫的。

本书针对郑州市雨洪资源利用背景情况,提出了城市雨洪资源生态学管理理论技术体系,综述了城市雨洪生态机理以及雨洪管理模型,构建了城市洪水管理生态学原则;分析了城市雨洪资源利用的收集、截污、渗透、贮存、调蓄等相关技术,结合美国最佳雨洪管理措施 BMPs、低影响开发 LID、英国可持续排水系统 SUDs 以及澳大利亚的水敏感设计 WSUD 等管理技术体系,提出了源头、过程以及末端控制的三位一体的综合管理体系;综合分析了郑州市雨洪资源特性和雨洪资源潜力,选取郑州市典型区域,构建郑州市雨洪资源生态学管理技术体系,最后对郑州市雨洪资源效益进行了综合评价,郑州市在雨洪资源利用上还存在较大提升空间。

本书在编写过程中得到了众多人士的帮助和支持。感谢华北水利水电大学徐建新教授、张丽教授、武汉大学邵东国教授在本书编写过程中给予的指导和帮助。此外,华北水利水电大学硕士研究生张弘晖参与了本书部分章节的编制工作,编写过程中参考和引用了大量国内外专家和学者的研究成果,在此向他们表示感谢!同时,中国水利水电出版社给予了大力支持,并提出了宝贵意

见，在此表示感谢！

本书研究工作得到了国家自然科学基金（51209091）、郑州市普通科技攻关项目（编号：10PTG507-7）和华北水利水电大学重点学科建设基金的共同资助。

由于作者水平所限，书中所列理论、方法、结构安排、文献引用等方面难免存在不合理之处，恳请各位读者对本书的不足之处给予批评指正。

作 者

2015 年 7 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 国内外研究进展	3
1.2.1 城市雨水资源利用	3
1.2.2 城市雨洪资源管理	5
1.2.3 城市雨洪排水系统模型	7
1.2.4 城市雨水利用效益评价	9
1.2.5 城市水生态系统建设管理	10
1.3 主要研究内容及思路	11
1.3.1 研究内容	11
1.3.2 研究思路	12
第2章 城市化雨洪资源生态学管理理论基础	13
2.1 城市化对城市水系的影响	13
2.1.1 城市水系统概述	13
2.1.2 城市化对水系的影响	14
2.2 城市雨洪特性及生态机理分析	17
2.2.1 城市雨洪特性	17
2.2.2 城市雨洪生态机理分析	20
2.3 城市雨洪排水系统构成形式	20
2.3.1 传统构成形式	20
2.3.2 面向生态的构成形式	21
2.3.3 城市雨洪排水系统比较	23
2.4 城市雨洪资源管理模拟模型	23
2.4.1 城市雨洪径流传输过程模拟模型概述	23

2.4.2	城市雨洪径流传输过程模拟模型 (SWMM) 原理	24
2.5	城市河流洪水资源生态学管理	30
2.5.1	洪水管理概念提出及内涵	30
2.5.2	洪水资源化利用	32
2.5.3	洪水管理生态学原则	36
2.6	城市雨洪资源集中利用风险分析	38
2.6.1	城市雨洪资源集中利用类别	38
2.6.2	城市雨洪资源集中利用分析方法	39
2.6.3	城市雨洪排水系统风险分析	41
2.7	小结	47
第3章	城市雨洪资源利用与管理技术体系	48
3.1	城市雨洪资源利用技术体系	48
3.1.1	雨水收集技术	48
3.1.2	雨洪截污技术	49
3.1.3	雨洪弃流技术	50
3.1.4	雨洪处理与净化技术	50
3.1.5	雨洪渗透技术	51
3.1.6	雨洪贮存技术和径流传输	52
3.1.7	雨洪调蓄技术	52
3.1.8	雨洪回灌技术	53
3.1.9	雨洪综合利用技术	53
3.2	城市雨洪资源管理技术体系	54
3.2.1	最佳雨洪管理措施 (BMPs)	54
3.2.2	低影响开发 (LID)	59
3.2.3	可持续排水系统 (SUDS)	65
3.2.4	水敏性城市设计 (WSUD)	67
3.2.5	防汛风险决策支持系统	69
3.3	小结	69
第4章	郑州市雨洪资源概况	70
4.1	自然地理概况	70
4.1.1	地理位置	70
4.1.2	水文气象	71
4.1.3	河流水系	71
4.2	社会经济概况	75
4.3	水资源水环境概况	76

4.3.1	水资源	76
4.3.2	水环境	78
4.3.3	水资源环境问题	79
4.4	城市雨洪资源利用和管理概况	80
4.4.1	城市洪涝灾害	80
4.4.2	城市雨洪资源利用和管理必要性	81
4.5	小结	82
第5章	郑州市降雨径流特征及雨水资源潜力	83
5.1	城市降雨特征变化分析	83
5.1.1	年降雨特征变化	83
5.1.2	月降雨特征变化	89
5.1.3	日降雨特征变化	91
5.2	城市径流特征变化分析	92
5.3	城市化对降雨径流特征影响分析	94
5.4	城市雨水资源化潜力分析	94
5.5	小结	95
第6章	郑州市雨洪资源利用与管理模式	96
6.1	郑州市雨洪资源就地利用模式	96
6.1.1	雨洪资源就地利用措施	96
6.1.2	郑东新区 CBD 雨洪资源就地利用分析	102
6.1.3	华北水利水电大学龙子湖校区雨洪资源利用	106
6.2	郑州市行洪河道洪水综合管理模式	113
6.2.1	郑州市河流洪水管理体系	113
6.2.2	郑州市行洪河道生态需水量	113
6.2.3	郑州市生态水系运行管理	123
6.3	小结	127
第7章	郑州市雨洪资源利用效益综合评价	128
7.1	城市雨洪资源利用效益评价理论	128
7.2	城市雨洪资源利用效益评价方法	129
7.2.1	经济效益评价	129
7.2.2	社会效益评价	130
7.2.3	生态效益评价	131
7.2.4	综合效益评价	132
7.3	郑州市雨洪利用效益综合分析	136

7.3.1 效益指标体系	136
7.3.2 评价模型	136
7.3.3 评价结论	138
7.4 小结	138
第8章 结论与展望	139
8.1 结论	139
8.2 展望	140
参考文献	141

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

城市是人类文明发展和技术进步的产物,是人类社会物质文明和精神文明产品生产、聚集和传播的中心。社会、经济和科学技术的进步促进了城市化的发展。新中国成立以来,我国的城市化进程具有明显的阶段性,1949 年城市化水平为 10.6%、1978 年为 17.9%,29 年增加了 7.3 个百分点;改革开放后城市化水平明显增加,据国家统计局提供的数字,1990—2001 年 11 年间,我国地级城市数量由 188 个增加到 269 个,城市覆盖的面积达 408.9 万 km^2 ,比 1990 年增加了 219.2 万 km^2 ,占全国国土面积的比重由 1990 年的 20%增加到 42.6%。

城市化促使社会经济飞速发展、城市规模不断扩大、城市人工构筑物不断增加,但同时也使得城市内河水系不断萎缩、河湖富营养化不断加重、水环境质量不断恶化,城市水生态系统不断衰退,人居环境品味不断下降。城市水生态系统已成为城市发展的制约因素,主要表现在以下几个方面。

(1) 城市水资源短缺,制约了城市的发展。城市规模的急剧扩大,居民生活、工业生产和服务业用水量增加的要求不断加大,“资源型”缺水日益突出。据 2000 年的统计资料显示,我国目前有 14 个省、自治区、直辖市的人均水资源拥有量低于国际公认的 1750m^3 用水紧张线,其中低于 500m^3 严重缺水线的有北京、天津、河北、山西、上海、江苏、山东、河南、宁夏等 9 个省市区,在全国 669 个城市中,其中有 400 个城市常年供水不足,110 个城市严重缺水,日缺水量达 1600 万 m^3 。污染物排放量不断增加,水环境质量日渐下降,供水水源水质得不到保障,造成“水质型”缺水。据 2004 年中国发展研究院的一项调研,在长江干流 21 个城市中,重庆、岳阳、武汉、南京、镇江、上海 6 个城市累计形成了近 600km 的污染带,污染带长度占长江干流污染带总长度的 73%;沿江城市 500 多个主要取水口均受到不同程度岸边污染带的影响,上海等 26 座城市已成水质型缺水城市。此外,水资源时空分布不均、水量调控措施不力,城市净水设施和输配水管网系统不完善,也可以造成“工程型”缺水。值得注意的是,特别是在

我国经济比较发达、人口比较集中的地区（如海河及黄河下游平原、山东半岛、辽河平原及辽东半岛、汾渭地堑、淮北平原、四川盆地等）水资源短缺尤为严重，如北京市每年缺水 11.4 亿 m^3 ，天津市缺水 26.2 亿 m^3 ，唐山与秦皇岛市缺水近 7 亿 m^3 ，辽宁浑河太子河一带的城市总计每年缺水 28 亿 m^3 ，每年由于可供给水资源的不足，造成城市工业经济损失达 2300 亿元。同时水资源短缺也给城市居民生活造成许多困难和不便，成为城市社会发展的隐忧。

（2）城市防洪排涝安全得不到保障。长期以来，我国城市防洪标准不高，洪涝灾害始终是城市的心腹之患。特别是近年来随着城市规模的不断扩大，原来较低标准的防洪设施，加之城市化率提高带来的下垫面大幅度改变，使得产流过程发生较大变化。同时，城市排水设施不完善，加上城市建设挤占河道，造成内河水系行洪不畅，由此给城市防洪排涝带来更大压力，加剧了城市洪涝灾害的频繁发生，威胁着人们正常的生产、生活安全。仅在 2004 年期间，我国主要城区中的北京、成都、南京、武汉等重大城市都出现过严重的暴雨内涝灾害，暴雨内涝灾害不仅使得城市内部交通中断、停水、停电，甚至淹没住房、工厂，影响整个社会的正常秩序。特别值得关注是北京“7.10”暴雨灾害，7 月 10 日 16 时的一场暴雨使得本来不堪重负的北京市交通顿时瘫痪，而且不少地区的排水不畅更使北京市区交通“堵上添堵”，更有部分地区出现了电力中断。据水文气象部门统计，此次暴雨虽是北京市 10 多年来少有的高强度短时降水，但从北京 100 多年的日降水资料看，只属一般性的大暴雨过程，其一小时内的降水强度仅 40~50mm，与北京城区一小时降水 126.4mm 的极值（1959 年 7 月 31 日，海淀五塔寺）相比还差甚远，仅为 5 年一遇的暴雨。由此可见，现代城市在城市化进程中抵御暴雨致使的雨洪灾害能力日显脆弱，暴雨灾害对城市功能发挥的影响也越来越大。

（3）城市水环境质量严重恶化。根据全国水环境质量公报统计，我国城市河流的 80% 以上河段水质均低于Ⅳ类水质标准，河道水体黑臭现象十分普遍。城市生活污水和工业废水排放量有增无减，面污染控制不力，许多城市生产的废物和生活垃圾倾倒河流现象较为普遍，暴雨径流不加处理的排入水体导致河流的非点源污染，加剧了城市河湖水体水质恶化，影响了城市景观环境，造成水生态系统功能退化。

（4）水景观不被重视，城市水面面积严重不足。在城市规划建设中，仅注重高楼大厦的建设，不重视亲水景观，河湖沿岸景观空间严重不足，临水建筑物不仅破坏城市景观，而且加重了水环境管理难度。城市水面面积日益减少，调节气候的作用逐渐消失，市区“热岛”“雨岛”效应加剧。

（5）城市水资源管理混乱，水资源利用程度和效率较低。除输水和用水器具技术、管理方面原因造成大量“水量型”浪费外，传统的城市排水系统（包括污水系统和雨水系统）采取“尽快排出了事”的原则，造成水资源单向流动，“随用随弃”，直接将未加处理的雨水、污水排放至水体引起地表水、地下水严重污染，造成大量“水质型”浪费；同时，大部分城市不能够分质用水，城市市政用水（包括道路浇洒、市政养护、园林绿化、环境卫生用水等）直接取自来水水源，造成城市清洁水资源短缺，城市用水矛盾更为突出。

如何解决城市化带来的水生态问题，寻求解决水污染与水资源不足双重困境的有效途

径, 日益成为政府决策者和专家学者共同关注的问题。此外, 城市建设改变了原有的自然环境, 大量道路楼房的建设、路面硬化、不透水地面增加、工业污染产生的局部大气环境变化, 使得城区内的降雨过程都发生了明显变化。暴雨增多, 径流形成洪峰, 速度加快, 洪峰过程时短、峰高。以上变化给城市防洪、市政排水都带来了新的问题。

在上述大背景下, 加强水资源管理、开源节流是实现水资源持续开发和永续利用的关键。城市雨水资源化利用作为一种潜在水资源受到了社会各界的普遍关注, 也是一条治理污染, 解决水危机的必由之路。因此, 对城市水资源进行综合利用, 积极稳妥地开展雨水利用工作是十分必要和紧迫的。

1.1.2 研究意义

郑州市为河南省省会, 地处中原腹地、黄河南岸, 是全省的政治、经济、文化、科技中心, 全国重要交通、通信枢纽, 国家级历史文化名城, 省域城镇体系的中心城市和首位城市, 也是洛(阳)、焦(作)、新(乡)、汴(开封)、许(昌)等中原城市群的核心城市。京广、陇海两大铁路干线在此交汇, 是全国最大的交通枢纽之一, 交通和地理位置十分优越。

随着人口的增长和社会经济的发展, 水资源短缺日益突出, 成为郑州市进一步发展的限制性因素。据测算, 多年平均情况下, 郑州市人均水资源为 212m^3 , 且时空分布不均, 多集中在 6~9 月, 加之工业、生活污水大量排放, 造成水资源污染、水质恶化, 进一步加剧了水资源的紧缺局面。同时, 随着郑州市城市化进程的加快, 大量道路楼房的建设、路面硬化、不透水面积大幅度增加, 致使相同降雨条件下, 径流系数增大, 洪峰提前, 洪量增大, 对城市排水和河道行洪构成巨大的压力。合理利用雨水资源既能缓解缺水局面, 又能减少暴雨径流带来的危害。在确保安全的基础上, 对雨洪资源进行科学合理充分的运用, 尽最大可能蓄滞雨洪, 实现雨水资源化, 重新配制水资源, 是解决郑州市水资源矛盾的一个有效途径, 同时可以增加地下水回补量, 改善地下水生态环境; 削减洪峰, 减轻防洪压力; 减少市区排水等多重效益。

因此, 郑州市迫切需要深入研究并开展雨水的资源化利用, 以缓解省会城市水资源短缺、水污染严重、防洪防涝压力大的态势。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 城市雨水资源利用

国内外城市雨水集蓄利用开展较晚。随着城市化进程步伐的加快、城市发展规模的不断扩大带来了一系列资源、环境问题, 这时城市雨水集蓄利用才越来越多地受到人们的重

视。雨水资源化是指通过规划和设计,采取相应的工程措施,将雨水转为可利用水资源的过程。城市雨水具有收集、控制和处理困难而且复杂的特点,因此城市雨水资源化是一项复杂的系统工程。

近20年来,美国、加拿大、意大利、德国、法国、墨西哥、印度、土耳其、以色列、日本、泰国、苏丹、也门、澳大利亚等世界上40多个国家和地区在不同城市开展了不同规模的雨水利用研究,并召开多届国际会议。其中德国、美国和日本经济发达,城市化的进程发展较早,因此雨水利用的起步较早,也较完善。

德国是欧洲开展雨洪利用工程最好的国家之一。目前德国的雨洪利用技术已经进入标准化、产业化阶段,并逐步向集成化发展,市场上已大量存在收集、过滤、储存、渗透雨水的产品。德国的城市雨水利用方式有三种,分别是屋面雨水集蓄系统、雨水截污与渗透系统和生态小区的雨水利用系统。柏林广场就是雨水利用生态系统的成功范例,该工程通过绿色屋顶收集雨水,贮存到雨水调蓄池,用于冲洗厕所和浇灌绿地;通过水体基层、水生植物和微生物等来净化雨水;并综合考虑鸟类等动植物依水栖息,达到自然的和谐统一。德国还制订了一系列有关雨水利用的法律法规。如目前德国在新建小区之前,无论是工业、商业还是居民小区,均要设计雨水利用设施,若无雨水利用措施,政府将征收雨水排放设施费和雨水排放费。

美国的雨洪利用是以提高天然入渗能力为其宗旨。作为土地利用规划的一部分,在新开发区实施的极为成功。美国加州富雷斯诺市的“Leaky Areas”,地下水回灌系统,10年间(1971—1980年)的地下水回灌总量为1.338亿 m^3 ,其年回灌量占该市年用水量1/5。在芝加哥市兴建了著名的地下隧道蓄水系统,以解决城市防洪和雨水利用问题。此外,还在众多的州研究屋顶蓄水和由入渗池、井、草地、透水路面组成的地表回灌系统。美国不仅重视工程措施,并制定相应的立法对雨洪利用给予支持。针对城市化引起河道下游洪水泛滥的问题,美国的科罗拉多州(1974年)、佛罗里达州(1974年)和宾夕法尼亚州(1978年)分别制定了雨洪管理条例。这些条例规定新开发区的暴雨洪水洪峰流量必须保持在开发前的水平。所有新开发区必须实行强制的“就地”滞洪蓄水。滞洪设施的最低容量均能控制5年一遇的暴雨径流。除制定雨洪管理条例外,联邦和各州还采取了一系列政策,如使用总税收,发行义务债券,联邦和州给予补贴、联邦贷款、投资分扣方式鼓励人们采用新的雨洪处理方法。

1963年始日本兴建滞洪和储蓄雨洪的蓄洪池,还将蓄洪池的雨水用作喷洒灌溉等城市杂用水。为充分利用地下空间,这类设施大多建在地下。地下蓄洪池形式是多样的,如大阪市的隧洞式地下防洪调节池,可蓄水112万 m^3 。名古屋市的方形地下蓄洪池,可容纳洪水10万 m^3 。近年来,各种雨水入渗设施在日本得到迅速发展,包括渗井、渗沟、渗池等,这些设施占地面积小型、分散、占地面积小,可因地制宜地修建在楼前屋后。也有在屋顶修建蓄水系统、或修建屋顶蓄水和渗井、渗沟相结合的回补系统,雨水在屋顶集蓄后,逐步放入渗井或渗沟,再回补地下,使地下水得到补给,阻止地面沉降。日本于1992年颁布了“第二代城市地下水总体规划”,正式将雨水渗沟、渗塘及透水地面作为城市总体规划的组成部分,要求新建和改建的大型公共建筑群必须设置雨洪就地下渗设施。

雨洪利用在我国西部干旱半干旱地区已非常广泛,主要用于收集雨水灌溉农田和解



决居民生活用水,如内蒙古的“112 集雨节水灌溉工程”、甘肃的“121 雨水集流工程”、陕西的“甘露工程”、山西的“123”工程等。我国城市雨洪利用起步较晚,在理论与技术方面尚不十分成熟。我国城市雨水利用的研究与应用始于 20 世纪 80 年代。90 年代以后,北京、上海、大连、哈尔滨、西安及郑州市等许多城市都相继开展研究。特大城市的许多建筑物已建有较完善的雨水收集系统,如上海浦东国际机场航站楼已经建有完善的雨水收集系统。大连是典型的严重缺水型城市,在雨水集蓄利用方面取得了很好的成绩。20 世纪 90 年代初,北京市水利科学研究所等单位开展了雨洪资源利用研究,对屋顶—渗井系统和草坪的拦蓄雨洪效果进行了研究,提出北京一些城区雨洪利用的对策和技术措施。首都“二四八”重大科技创新工程之一的“首都水资源可持续利用工程”提出了“北京城区雨洪控制与利用技术与示范”课题,取得了一系列的基础性和应用性的研究成果。西安市为实现雨水资源开发利用的稳定持续发展,对区域内雨水下渗和贮存、实现雨水资源化及其利用等方面做了探索。

综上所述,国外城市雨洪利用的应用范围广,雨水资源化技术比较成熟,设施齐全、利用方法多种多样,同时制定了一系列关于雨洪利用的政策法规,建立比较完善的雨洪收集和雨水渗透系统。而我国在城市雨水利用方面与发达国家相比仍有较大差距,应该尽快开展城市雨水利用相关基础研究和实践,以缓解城市水资源短缺问题。

1.2.2 城市雨洪资源管理

国外对洪水和雨水的管理都经历了相似的发展历程,总体来说是从对水的恐惧到以水为友的转变,从单纯以工程方式解决向以工程和非工程相结合的方式转变。具体来讲,是从建设以防洪为目的管渠工程将雨水直接排入河流,到修建大量的处理设施集中对雨水进行处理,最后到分散式处理、尽量将雨水就地解决和处理的过程。我国城市面临的洪涝灾害和水资源紧缺状况,需要通过整体的、综合的、多目标的解决途径,而非单一目标或工程的方式来解决。

为了解决城市地表径流污染、水资源短缺、洪涝灾害和生态环境破坏等问题,发达国家很早就开始了雨水资源化利用与管理体的研究。日本在 20 世纪 90 年代已建立基于分布式水文模型的城市雨洪管理模型,利用气象雷达预报降雨强度及分布,通过水文模型进行降雨产流的模拟。美国利用天气雷达估算降雨和水文预报的工作达到了全面业务化水平,并于 20 世纪 90 年代初提出了“最佳管理措施”(Best Management Practices, BMP)的概念,用于对城市雨水径流及其污染的全面控制。BMP 包括一系列工程技术方法和非工程技术方法,强调与植物和水体等自然条件结合的生态设计和非工程性管理,目前已在许多城市得到成功应用。在 BMP 的基础上,美国的暴雨管理专家又开始研究建立基于源头径流控制与污染负荷控制的多点微观暴雨控制策略(Low Impact Development, LID),LID 模式在一些发达国家雨水资源化利用与管理体中已取得了较大的成效;英国的(Sustainable Discharge System, SuDS)和澳大利亚的(Water Sensitive Urban Drainage, WSUD)在本国雨水资源化利用与管理实施中也起到了较好的成效,已逐渐被应用于其他国家城市雨水资源化利用与管理体。在上述城市雨水资源化管理体的指导下,



已建成了较多运行良好的雨洪工程,例如:美国波特兰市进行绿色街道改造,形成一个集雨水收集、滞留、净化、渗透等功能于一体的生态处理系统;英国贝丁顿生态村收集利用屋面雨水冲厕和灌溉植物,减少了自来水的應用;澳大利亚的圣伊丽莎白教堂通过雨水收集利用解决了地面积水和植物灌溉等问题。

国内对城市雨洪管理的研究起步较晚,目前侧重于建筑与小区的雨水利用和城市防汛决策支持系统的建立。上海、天津、深圳、沈阳、石家庄、西安等许多城市都已经开始研究和推广雨水利用,取得了很好地削减局地径流、增加地下水补给、节约自来水等效果。上海市建立的防汛风险决策支持系统集成成了计算机网络、通信遥测、地理信息系统、遥感、大型数据库、系统工程等技术,形成了一张动态的网上防汛电子地图,实时反映防汛水情、防汛水利设施和灾情险情信息,并在此基础上应用计算机数学模拟技术对城市暴雨积水、台风高潮和全市河网水位实现预测预报、模拟分析,对可能出现的灾害进行评估,从而为市、区县二级防汛指挥中心提供网上全覆盖、全过程防汛信息决策支持。广州市建立了城市洪水空间动力仿真模型(Urban Flood Dynamic Simulation Model, UFDSM),它是一种基于GIS分布的新型空间洪水数值计算模型系统,包括产流模型、地表二维非恒定流模型、地下管网一维非恒定流模型、地表和地下管网交互模型、河湖联合调度模型、洪水灾害损失计算模型、降雨潮位设计模型和其他相关模型。

我国传统的雨水系统以快排为主要原则,现代意义的城市雨水资源化利用系统起步较晚,最初是在一些缺水地区有些小型的、局部的贮存与应用,随着城市水资源短缺和雨洪灾害问题的严重,近年来,城市雨水资源化利用的研究逐渐成为热点。城市雨水资源化利用的研究在北京、上海、武汉等城市已经陆续展开,1998年北京建筑工程学院开始对城市雨水利用技术展开系统性的研究,2003年中国科学院生态环境研究中心开始了国家水专项城市面源污染控制研究,2005年中国建筑设计研究院开始对建筑与小区雨水的利用展开系统性的研究。随着上述研究的进行,我国也逐渐开始建设城市雨水资源化利用示范工程,如:北京奥运场馆雨水利用率可达80%,上海世博园采用多国雨水收集利用技术,上海虹桥机场雨水回用量占日用水量的60%。

在这种背景下,我国陆续出台了相关的标准、规范和手册,其中《建筑与小区雨水利用工程技术规范》(GB 50400—2006)、《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2006)和《中国生态住区技术评估手册》对推动我国城市雨水利用的发展,规范技术应用和工程实施起到积极的作用。

目前城市雨洪管理领域的发展趋势主要表现在以下几个方面:①通过雷达测雨、各种尺度气候模式的联合应用,逐步提前降雨预报的预见期,不断提高预报精度。在此基础上,提高降雨产流、洪水预报预警水平;②在遥感遥测、地理信息系统技术支持下获取对城市下垫面更精细、高效的描述,实现对水流运动更精确的真实数值求解;③在防洪决策过程中,需要综合大量水文、气象、工程、社会经济等方面的信息,决策支持系统的应用已成为一个必然的趋势。通过多模型计算和实时校正技术以及人机交互等方式,得到洪水预报方案,为决策提供及时、可靠的依据;④地下商场、地铁等地下建筑物是城市的重要组成部分,如何增强其雨洪应对能力是研究的重点问题之一;⑤提出了各种工程和非工程性措施,增强城市下垫面的下渗能力和蓄滞洪水能力、应急处理城市局部的洪水淹没积

水。同时,雨洪管理措施的规划、各种措施效果评价、应急预案制定、永久解决方案等对城市雨洪模型的需求不断增强;⑥引进现代化信息传输手段,增加气象、水文、雨洪过程及其人工影响的监测,为雨洪管理积累数据和经验,为模型验证提供数据。

1.2.3 城市雨洪排水系统模型

城市排水系统的产生及发展与工业化及城市化的进程密不可分,其发展进程大致可以分为以下几个阶段:

(1) 创建阶段。19 世纪中期西方国家的工业和城市迅速发展,为了避免水污染所带来的疾病威胁,先后发展了城市排水系统。但由于早期的城市排水系统只局限于建造管渠工程,收集、输送污废水及雨水,并直接排入水体,造成了城市河流水体的大量污染。

(2) 发展阶段。自 21 世纪 60 年代开始,西方国家早期排水系统所导致的城市水环境恶化问题日益严重。以美国、日本为首的部分国家在城市排水系统规划设计时,采取了“点源”治理措施,具体就是铺设城市污水管网,改已往的雨、污合流制排水系统为雨、污分流制排水系统,并建造污水处理厂,城区污水先治污后排放,以确保城区河流的水体水质。

(3) 暴雨雨水管理阶段。为进一步改善城市河流水体水质,自 20 世纪 70 年代起部分国家在城市排水系统设计时除考虑将以往排水系统改制外,还强化了暴雨雨水管理意识。采取“非点源”措施减少汛期雨洪径流量,在排水系统上游的各子流域内,采取工程措施增加雨水渗透,或建雨水调蓄池以延长雨洪排涝时间,达到削减洪峰以及净化雨水的目的。近期随着城市水资源量的短缺和由暴雨雨洪所导致的城市环境及生态问题日益突出,以美国为首的部分国家采取 BMPs (Best management practices) 的方法用于城市暴雨管理,具体就是改变以往将城市暴雨尽快排除的思路,将城市暴雨作为城市水资源来源之一,加以综合利用。

近年来,随着世界性城市化引起雨洪水涝灾害的突出,人们开始对城市防灾予以关注,并由于电子计算机技术的飞速发展,城市雨洪排水系统研究也进入了一个蓬勃发展阶段。

对城市雨洪排水系统的研究包括水文学方法和水力学方法,这两种方法在解决城市雨洪排水某些方面都有另一种方法不可比拟的优点,因此两种方法在研究城市雨洪排水系统中常常交织在一起,难以完全分裂开来。

从水文学的角度来讲,城市雨水径流过程研究可以分为三个阶段:

1850—1967 年为形成城市水文学的孕育阶段,基本上是运用一些常规定水文学方法来解决有关城市水文问题,如推理公式、下渗曲线、单位线等方法。在 1967—1974 年期间,建立了一些具有特色的分析方法,先后提出了一些适用于不同问题的、大型综合性的模拟模型,经过试用修正,形成了几个通用性很强的模型软件包,如 STORM、SWMM 和 ILLUDAS 等,这个时期被称为“方法研制时期”(Tool making),是城市水文研究发展最快并逐渐形成独立学科的时期。1975 年以后,进入较为定型成熟的阶段,主要的工作是应用、推广和完善上述一些通用模型程序,称为“方法推广时期”(Tool wielding)。水力学方法研究基本上与水文学方法同步,特别是第二阶段开始,水力学的方法在城市径流过程的研究中占据了主导地位。



水力学的方法主要运用在城市管道和渠道的计算中，城市排水管道的径流过程研究发展分为以下几个阶段：

60 年代以前排水系统内流动的计算主要是为雨洪排水管道设计服务，一般采用设定洪峰流量的恒定明渠流解法。原则是设计洪水能够全部以明渠流的形式通过排水管网。设计洪水的洪峰流量一般由水文学方法确定，而排水管网中管道断面几何尺寸则通过简单的恒定均匀明渠流计算来求得。

从 60 年代到 80 年代，基于简化的非恒定流方法的近似洪水演进计算模型有较大的发展，如运动波模型，其不足之处是无法计入动力影响，难以应用于下游壅水的情况。

80 年代，计算机的飞速发展使得在雨洪管网计算中能够采用更复杂的非恒定流数学方程更加明确定义的边界和初始条件。城市水文学的进步也为排水管网的人流条件提供了更准确详尽的资料。这两点都推动了排水管网计算中使用非恒定流方程的完整形式。

总体上，雨洪排水管网径流数值计算方法的历史发展可以分为以下三个阶段：

(1) 恒定流算法：一般采用推理公式法来计算洪峰流量。据称是由 Mulavany1850 年首次运用，以后得到广泛的发展和应用。

(2) 简化的非恒定流算法：基于运动波或扩散波方程的解法。相应的计算雨洪过程线时采用单位线方法。Cunge (1969) 和 Bettess 和 Price (1976) 等人对基于运动波方程的解法进行过研究。Ali Osman Akan 和 Ben Chie Yen (1981) 采用扩散波法求解并与其他解法进行比较，Ben Chie Yen (1986) 对排水管内流动计算中的许多问题，包括已有的各种解法及其历史发展进行了详尽的综述。在这阶段由于计算机的内存、计算速度的限制，所作的简化比较多，模拟的精度不高。

(3) 非恒定流算法：基于质量守恒和动量守恒方程的完整形式，与之相匹配的是采用先进的洪水预报方法和数值计算方法。如 M. B. ABBOTT 采用六点隐式差分格式。Choi 和 Molians (1993) 采用隐式有限差分格式。Sivalogannathan 采用特征线法求解完整形式的动力波方程。

通过大量阅读国内外的相关文献，归纳与分析可知，模拟城市雨水管理效果的软件模型大概有 40 多种，其中 10 种模型目前最为常用，其功能特征见表 1-1。

表 1-1 常见模拟城市雨水管理效果模型简介

模型名称	主要功能
MOUSE	城市排水的详细模拟；广泛用于美国之外
MUSIC	强调对雨水处理的城市排水系统的概念设计，主要应用澳大利亚
PS-UCM	对城市雨水污染负荷的评估
PURRS	单一场地模型，最初用于研究现在也用于商业
RUNQUAL	最初的规划与教育
SLAMM	主要用于对污染物的评估
STORMTAC	对湖体的管理及对雨水处理的概念设计
SWMM	对于最初的规划和设计进行模拟，应用广泛
UVQ	将水循环与水回用结为一体
WBM	对水量进行规划层面的评价