

沿海平原城市雨洪资源利用及风险管理研究 ——以江苏省连云港市为例

方国华 朱丽向 黄显峰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

沿海平原城市雨洪资源利用及风险管理研究 ——以江苏省连云港市为例

方国华 朱丽向 黄显峰 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书以江苏省连云港市为例，研究沿海平原城市雨洪资源利用及其风险管理。主要内容包括：连云港市水资源配置及供水格局分析、连云港市雨洪资源利用潜力及模式分析、连云港市雨洪资源利用方案确定与可利用量估算、连云港市雨洪资源利用效益分析、连云港市雨洪资源安全利用风险管理、连云港洪水资源利用风险图绘制。

本书可供水利、生态、环境、农林、资源等相关领域的科学研究人员、工程技术人员、管理决策人员及大专院校、科研院所有关专业师生使用和参考。

图书在版编目（C I P）数据

沿海平原城市雨洪资源利用及风险管理研究：以江苏省连云港市为例 / 方国华，朱丽向，黄显峰著. — 北京：中国水利水电出版社，2017. 12
ISBN 978-7-5170-6161-8

I. ①沿… II. ①方… ②朱… ③黄… III. ①城市—暴雨洪水—雨水资源—资源利用—风险管理—研究—中国
IV. ①TV213. 4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第326312号

书 名	沿海平原城市雨洪资源利用及风险管理研究 ——以江苏省连云港市为例 YANHAI PINGYUAN CHENGSHI YUHONG ZIYUAN LIYONG JI FENGXIAN GUANLI YANJIU ——YI JIANGSU SHENG LIANYUNGANG SHI WEI LI
作 者	方国华 朱丽向 黄显峰 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 (营销中心)
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	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 9印张 176千字
版 次	2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

我国是一个洪涝灾害频发的国家，洪涝灾害使人类生命和社会、经济及环境资产蒙受巨大损失。同时，缺水、水污染问题也日益突出。随着社会经济的快速发展，各个领域对水资源的需求也越来越大。目前对地表水、地下水等水资源的开发利用已经不能满足生产生活的需要，开发新的淡水资源成为迫在眉睫的任务。雨洪资源就是具有极大开发潜力的淡水资源。传统意义上的雨洪资源利用是指将城市降雨所形成的洪水资源加以收集利用。随着经济社会跨越发展，特别是沿海开发快速推进，淡水资源需求量将迅猛增长，水资源供给保障面临着更加严峻的考验。如何扩大水资源配置和调蓄能力，构建安全可靠的水资源供给保障体系，是一项需要迫切解决的重大战略课题。开展雨洪资源利用研究，增强地表拦蓄能力，提高雨洪资源利用效率和水平，既是坚持统筹兼顾、综合治理，缓解城市水资源短缺和洪涝多发矛盾，促进“大水利”全面、和谐发展的有效途径，也是坚持立足自保、着眼长远，缓解未来水资源供需矛盾，事关经济社会可持续发展的战略举措。

江苏省连云港市位于淮河流域沂沭泗（沂水、沭水、泗水）水系的最下游，新沂河、新沭河从市内东流入海，是著名的“洪水走廊”。同时，连云港市处在江苏省供水网络的末梢，也是水资源较为紧缺的地区，本地水资源供需缺口约为50%，缺口主要依靠外调江淮水来解决。因此，本书以江苏省连云港市为例，研究沿海平原城市雨洪资源利用及其风险管理。主要内容包括：连云港市水资源配置及供水格局分析、连云港市雨洪资源利用潜力及模式分析、连云港市雨洪资源利用方案确定与可利用量估算、连云港市雨洪资源利用效益分析、连云港市雨洪资源安全利用风险管理、连云港洪水资源利用风险图绘制。

本书由方国华、朱丽向、黄显峰共同撰写，全书由方国华统稿。

本书的研究工作得到江苏省水利科技项目“连云港市雨洪资源利用研究”（2010018）、江苏省自然科学基金“沿海城市过境洪水资源利用效益量化及风险评估研究”（BK20130849）、江苏省水利科技项目“连云港市洪水资源利用风险管理技术与应用”（2014064）、江苏高校优势学科建设工程项目等项目的支持。参加相关课题研究工作的还有戴振伟、吴学文、贾成孝、闻昕、刘秀梅、高玉琴、孙宗凤、张鹏程、罗乾、闫轲、袁玉、林杰、唐摇影、朱晓茜、刘娇、刘展志、李宛谕等。在此向对本书撰写及研究工作给予关心、支持和帮助的所有领导、专家和同行们表示衷心的感谢！

雨洪资源利用涉及因素较多，内容复杂，研究工作难度也大，加之时间、资料的限制，本书肯定还存在一些不足之处，恳请广大读者批评指正！

作者

2017年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 雨洪资源利用的内涵与特点	3
1.2.1 雨洪资源利用的内涵	3
1.2.2 雨洪资源利用的特点	4
1.2.3 连云港市雨洪资源利用的特点	5
1.3 洪水资源利用的国内外研究动态	5
1.3.1 国外研究动态	5
1.3.2 国内研究动态	8
1.4 主要研究内容及技术路线	13
1.4.1 主要研究内容	13
1.4.2 研究技术路线	14
第 2 章 连云港市水资源配置及供水格局分析	16
2.1 连云港市供用水现状分析	16
2.1.1 连云港市供水现状分析	16
2.1.2 连云港市用水现状分析	16
2.2 连云港市供需水预测	17
2.2.1 需水预测	17
2.2.2 供水预测	22
2.3 连云港市水资源配置	23
2.3.1 连云港市水资源配置基本思想	23
2.3.2 连云港市水资源配置方案	24
2.4 连云港市供水格局分析	26
2.4.1 市区供水格局分析	26
2.4.2 各县供水格局分析	27
2.5 连云港市雨洪资源需求时空分布	27
2.5.1 全市整体雨洪资源需求时空分布分析	27

2.5.2 各缺水片区雨洪资源需求时空分布分析	29
第3章 连云港市雨洪资源利用潜力及模式分析	32
3.1 雨洪资源利用原则	32
3.2 连云港市雨洪资源利用潜力分析	33
3.2.1 连云港市本地雨水及过境洪水资源总量	33
3.2.2 城市雨水资源利用潜力估算	33
3.2.3 过境洪水资源利用潜力估算	35
3.2.4 连云港市雨洪资源利用潜力估算及成果分析	41
3.3 连云港市雨洪资源利用模式	41
3.3.1 城市雨水资源利用	41
3.3.2 现有水库、河网洪水资源利用	46
3.3.3 新建水库湖泊洪水资源利用	49
第4章 连云港市雨洪资源利用方案确定与可利用量估算	51
4.1 连云港市雨洪资源利用方案确定	51
4.1.1 连云港市城市雨水资源利用方案	51
4.1.2 连云港市过境洪水资源利用方案	52
4.2 连云港城市雨水资源可利用量估算	55
4.2.1 城市雨水资源可利用量计算的水量平衡模型	56
4.2.2 连云港城市雨水资源可利用量计算成果分析	58
4.3 连云港市现有水库、河网洪水资源可利用量估算	60
4.3.1 连云港市现有水库洪水资源可利用量估算	61
4.3.2 连云港市现有河网洪水资源可利用量估算	62
4.4 新建水库、湖泊雨洪资源可利用量估算	64
4.4.1 新建蔷薇湖	64
4.4.2 新建三洋港平原水库	65
4.4.3 新建东温庄水库	67
4.4.4 新建大兴平原水库	68
4.4.5 新建大新平原水库	69
4.4.6 新建埭子口河道型水库	69
4.4.7 新建新沐河梯级水库	71
4.4.8 新建青口河梯级水库	71
4.4.9 新建龙王河梯级水库	72
4.5 连云港市雨洪资源可利用总量估算及分配	73
4.5.1 连云港市雨洪资源可利用总量	73

4.5.2 连云港市雨洪资源可利用量分配	74
第5章 连云港市雨洪资源利用效益分析	77
5.1 工业用水效益计算	77
5.1.1 基于C-D生产函数的工业用水效益量化方法	77
5.1.2 基于C-D生产函数的工业用水效益计算	78
5.1.3 连云港市工业用水效益计算	80
5.2 农业用水效益计算	81
5.2.1 利用能值理论分析研究农业灌溉效益	81
5.2.2 能值法计算连云港市农业灌溉效益	83
5.3 生态环境用水效益计算	86
5.3.1 生态环境用水的内涵	86
5.3.2 生态环境用水效益	87
5.4 生活用水效益计算	89
5.5 雨洪资源利用多年平均效益计算及成果分析	89
第6章 连云港市雨洪资源安全利用风险分析	91
6.1 雨洪资源利用风险因素识别及等级划分	91
6.1.1 风险分析的一般步骤	91
6.1.2 连云港市雨洪资源利用风险因素识别与等级划分	92
6.2 雨洪资源利用风险估计	95
6.2.1 基于概率论与数理统计方法的风险估计	95
6.2.2 大坝安全风险率计算	96
6.2.3 下泄流量超过下游河道安全泄量风险率计算	98
6.2.4 不利生态环境影响风险率计算	100
6.3 雨洪资源安全利用风险决策分析	101
6.3.1 风险决策模型构建	101
6.3.2 风险损失计算	102
6.3.3 连云港市雨洪资源利用风险决策模型求解	103
6.4 雨洪资源利用风险规避措施	106
6.4.1 洪水灾害风险规避相关准则	106
6.4.2 连云港市雨洪资源利用风险规避措施	107
第7章 连云港市洪水资源利用风险图绘制	109
7.1 洪水分析方法选择	109
7.1.1 地貌学法	109
7.1.2 实际洪水法	109

7.1.3	水文学和水力学法	110
7.2	一维、二维耦合水文水力学模型构建	111
7.2.1	InfoWorks RS 软件简介	111
7.2.2	模型计算原理	112
7.2.3	建模基础数据	113
7.2.4	一维、二维模型耦合机制	113
7.3	参数率定及模型验证	114
7.3.1	参数率定	114
7.3.2	模型验证	117
7.4	基于 GIS 的洪水风险图绘制	117
7.4.1	洪水风险图绘制步骤	117
7.4.2	洪水风险图信息	118
7.5	石梁河水库洪水风险图绘制	119
7.5.1	一维、二维耦合模型构建	119
7.5.2	参数率定及模型验证	120
7.5.3	典型方案分析	121
7.5.4	基于 GIS 的洪水资源利用风险图绘制	127
参考文献		129

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

我国是一个干旱缺水现象严重,同时洪涝灾害频发的国家。我国的水资源时空分布极不均匀,水的供需矛盾十分突出,其特点表现在:水资源的空间分布不均匀;水资源补给的年内与年际变化较大;人均水资源占有量偏少;水资源区域分布与生产力分布极不匹配。我国水资源总量丰富,根据第二次全国水资源调查评价结果,多年平均水资源总量约为 2.8 万亿 m^3 ,但单位国土面积水资源量为全球平均水平的 83%,人均水资源量约 2200 m^3 ,仅为世界人均水平的 1/4。统计数据显示,我国正常年份缺水量约为 500 亿 m^3 ,全国 660 多座城市中有 400 多座城市供水不足,114 座城市严重缺水,在 32 座百万人口以上的特大城市中,有 30 座长期受缺水困扰,2000 多万农村人口存在饮水困难问题。干旱缺水对工业、农业生产造成不利后果的同时,也对城市、农村人民的生活带来不良影响,甚至会造成河道断流、湖泊干涸、地面沉降等恶劣后果,不仅使环境恶化,更给人类的生存带来极大威胁。

伴随社会经济的快速发展带来的是各个领域对水资源需求的全面提升,这不仅是要提高水资源的供给量,也对供水的保证率、均衡性以及水质提出了更高的要求,更要求经济社会与生态环境协调发展。预计到 2030 年,我国的人口将达到 16 亿人的峰值,人均水资源拥有量将下降到 1750 m^3 ,用水总量将达 7000 亿~8000 亿 m^3 ,而实际可能利用的水资源量约为 5000 亿~9500 亿 m^3 ,两者已十分接近。人口的增长和经济的发展要求供水能力比现状增加 1300 亿~2300 亿 m^3 ,可见我国水资源供需矛盾之突出,已接近国际公认的警戒线。当前地表水、地下水等水资源的开发利用程度已经很高,进一步开发已不能满足生产生活的需要,传统的思路、办法难以解决我国水资源短缺问题,非常规淡水资源的开发显得尤为重要。近年来的雨洪水资源利用研究与实践也表明,通过科学的采取工程措施和非工程措施,可以在不增加风险的同时,提高水资源的利用率,取得显著的经济、生态环境和社会效益。

本书以江苏省连云港市为例,研究雨洪资源利用及其风险管理。

连云港市处于江苏省供水网络末梢,是水资源紧缺地区之一,而当地过境洪水资源量充沛。通过了解连云港市基本情况,以期通过利用连云港市过境洪水资源



来改善连云港市缺水状况,为连云港市洪水资源利用风险分析的可行性和必要性提供了基础支撑。如能部分转化为可利用水量,将使连云港缺水状况大为改善。

连云港市位于鲁中南丘陵与淮北平原的结合部,整个地势自西北向东南倾斜,境内平原、海洋、高山齐观,河湖、丘陵、滩涂具备。全市地貌基本分布为中部平原区,西部岗岭区和东部沿海区三大部分。东部沿海平原海拔 3.00~5.00m,主要为山前倾斜平原、洪水冲积平原及滨海平原 3 类,总面积 5409km²,约占全市土地面积 70%。西部东海县的丘陵海拔 100.00~200.00m,主要是 700km² 盐田及 480km² 滩涂。境内山脉主要属于沂蒙山的余脉,绵亘近 300km。沿岛礁共 21 个,其中岛屿 9 个,面积为 7.57km²。连云港市处于暖温带与亚热带过渡地带,常年平均气温 14℃,历年平均降水量约 900 多 mm,常年无霜期为 220d。主导风向为东南风。由于受海洋的调节,气候类型为湿润的季风气候。

连云港经济总量近年来持续扩张。2016 年 GDP 总量达到 2376.48 亿元,增长 7.8%,总量较上年增加 215.84 亿元。人均 GDP 首超 50000 元,达到 52986 元,较上年增加 4570 元,同比增长 9.44%。结构调整取得积极成效。第一产业增加值 301.56 亿元,同比增长 1.6%;第二产业增加值 1049.90 亿元,同比增长 7.8%;第三产业增加值 1025.02 亿元,增长 9.8%。三次产业协调性增强,逐步形成第一、第二、第三产业相互促进发展的格局。三次产业结构由上年的 13.1:44.4:42.5 调整为 12.7:44.2:43.1,和上年相比第一产业下降 0.4 个百分点,第二产业下降 0.2 个百分点,第三产业提高 0.6 个百分点。

连云港市地处淮河流域沂沭泗(沂水、沭水、泗水)水系的最下游,辖区分属沂河水系、沭河水系和滨海诸小河水系。灌南、灌云县和海州区、连云区东南部属沂河水系,东海县、海州、连云区大部 and 赣榆区西南部分地区属沭河水系,赣榆区其他大部地区属滨海诸小河水系。连云港市多年平均降水量为 895.9mm,降水量等值线自西北向东南递增,在 860~960mm 之间变化,940mm 等值线位于灌云县南部、灌南县中部,860mm 等值线位于赣榆区北部。其分布特点是:从北向南,赣榆区大于沂北区,沂北区大于沂南区。按行政区分区看,连云港市区,由于濒临黄海,且建设用地占的比重较大,是本市径流值高值区,多年平均年径流深为 279.3mm;处于中西部的东海县,丘陵面积较大,多年平均年径流深为 256.1mm;南部的灌云、灌南县,虽然降水量比北部偏大,但山丘区面积只占总面积的 1.9%,基本上是黏土、亚黏土互层的平原区,所以径流值是本市的最低区,多年平均径流深为 239.5mm。多年平均地表径流量 17.6 亿 m³,人均占有水资源量约 400m³,在全国范围内处于较低水平,连云港市主要利用地表水和外调的江淮水。

连云港市主城区(指海州区、连云区)的主要水源为蔷薇河。蔷薇河发源于马陵山麓,流经东海县和海州区,为连云港市调引江淮水的通道,多年平均水位为 2.50m,河道槽蓄水量约 1410 万 m³,水质为Ⅲ类。另外主城区内有烧香河、



排淡河及一些小水库,供给市区少量的农业用水。赣榆区的地表水源主要为小塔山水库和青口河。东海县的地表水源有沐新渠和石安河。盐河流经灌南、灌云县城和市区,主要供给两县城区的农业用水和部分工业用水,灌云县城的地表水源主要为叮当河,灌南县水源原为地下水,因地下水超采形成漏斗,根据水源地建设规划,现逐步转为地表水,水源主要取自北六塘河、通榆河。

连云港市地下水开采量少。灌云、灌南主要开采深层水,年允许开采量分别为 75.4万 m^3 、 415.93万 m^3 。赣榆区、东海县主要开采浅层水和基岩裂隙水,年允许开采量为 273.07万 m^3 、 123.92万 m^3 。海州区、连云区主要开采基岩裂隙水,年允许开采量为 540.59万 m^3 。全市地下水年允许开采总量为 1428.91万 m^3 。浅层水多分布于 50m 以上,溶解性总固体多大于 3g/L ,供水意义不大。

当地雨水资源利用技术与设施较为落后,当地雨水资源主要为石梁河、小塔山、安峰山等水库利用,作为雨水调蓄池,对雨水的排放起到了一定的调蓄作用,其余部分以径流形式流失,当地雨水利用水平及设施比较落后,还没有形成较为完善的理论和技术体系。

1.2 雨洪资源利用的内涵与特点

1.2.1 雨洪资源利用的内涵

传统意义上的雨洪资源利用是指将城市降雨所形成的洪水资源加以收集利用。本书中雨洪资源利用主要包括城市雨水资源利用和过境洪水资源利用,对于有条件的地区同时考虑本地降雨径流资源利用。本书研究的重点是过境洪水资源利用。

城市雨水资源利用是针对城市开发建设区域内的屋顶、道路、庭院、广场、绿地等不同下垫面降水所产生的径流,采取相应的措施,或收集利用,或渗入地下,以达到充分利用水资源、改善生态环境、减少外排径流量、减轻城市防洪排涝压力的目的。

过境洪水资源利用指在保障防洪安全,并对自然环境不产生危害的前提下,利用现有水利工程拦蓄洪水或延长过境洪水在河道、蓄滞洪区的滞留时间,增加可利用的淡水资源量,恢复河湖、洼地水面景观,改善人居环境,并最大可能补充地下水的过程。

总体来讲,雨洪资源利用是调节降水径流的时间空间分布,将夏季汛期的雨水洪水利用工程与非工程的手段进行存蓄、净化,在降雨少的冬春季进行利用;利用调水工程将雨洪水调往水资源缺乏的流域,将地表水通过洼地、蓄滞洪区等进入地下水体,来对水资源空间分布的不均匀进行调配。雨洪资源利用可以增加全年的可利用水量,实现区域间的水量互补,并且减小河道的下泄流量。

雨洪资源利用非工程措施包括对雨洪资源进行调度和重新分配,减少雨洪资



源流失,增加其利用率,调度包括水库调度、河网调度等,或者规划蓄滞洪区湿地来存蓄下渗雨洪资源,再者可以通过制定法律法规或采取经济手段来强制和引导人们对雨洪资源的利用,唤起民众利用雨水的意识。

1.2.2 雨洪资源利用的特点

基于上述雨洪资源利用思想,结合现代社会发展要求,将雨洪资源利用的特点概述如下。

1. 对象性

对于流域内的天然降雨、洪水以及流经本区域的过境洪水都是雨洪资源利用的对象。

2. 双重性

要改变以往对洪水的认识。洪水泛滥会成为灾害,但我们同样面对水资源短缺、水环境恶化的问题,所以我们要科学的利用雨洪资源。经过调度和建设水利工程把过量的洪水疏导入海,把部分洪水留住并利用。

3. 风险性

洪水是自然界水循环的一种表现形式,人为的利用是否会影响水循环,影响的程度是否会超出自然的承受力,是我们要考虑的风险因素。针对到某一处洪水利用的工程措施,也存在风险性。决策失误往往会造成巨大的水事灾难,如库区坍塌、水库垮坝等重大事件。因此同其他的水资源利用方式相比,洪水的水资源利用风险更为突出,造成的危害也更直接,需要给予足够的重视。

4. 针对性

在水资源的利用中有很多方法是通过节约用水,转变用水观念来达到目的的。这些方法并没有致力于增加可利用的水资源量,而是采用间接的方法,减少用水量,减少不必要的浪费,从而达到可利用水资源量的相对增加。雨洪资源利用则是将重心放在了水资源的挖潜方面,直接通过工程与非工程措施的应用,将一部分非常规水资源转化为安全的可利用水资源,从而增加水资源总量。

5. 系统性

水系统是一个复杂的大系统,其影响因素众多,涉及面广。对雨洪进行资源利用所要求的技术含量高,也需要多个部门相互之间的密切合作。雨洪资源利用不仅仅是流域内部的水量调整,很多情况下是不同流域之间的调配。其系统性包括水库与水库、水库与下游河道之间的联合调度,平原区河网水量的配置,蓄滞洪区的分洪蓄洪以及雨洪资源利用对环境和生态带来的负面影响等。雨洪资源利用所涉及的因素是多方面的,需要统一规划,全盘考虑。

6. 可持续性

雨洪资源利用不能以对自然环境造成伤害为代价,应以可持续发展及系统的观点来对待它。因此,雨洪资源利用的一个重要特点就是要在保障防洪安全、确



保水环境可持续发展的前提下开展资源利用工作。对洪水实施资源利用需要结合地区的实际情况,因地制宜,量力而行,保证原有水环境的稳定性,因为一旦这种平衡被打破,人们需要付出更多代价才能使之恢复。因此在开发利用雨洪资源的过程中,坚持采用水资源可持续的良性开发方式至关重要。

1.2.3 连云港市雨洪资源利用的特点

连云港市地处江淮供水系统末梢,容易受到供水不足的影响,且水资源量占全市水资源利用总量的比例偏小,连云港市用水对外界的依赖较大。本地降水年内分布不均,70%以上集中于6—9月,期间上游洪水过境,区域防洪压力大。而在非汛期又因降水少、用水多、上游无来水,使缺水矛盾突显。境内地表径流拦蓄能力不足,地下水资源水质较差。当地过境洪水资源量充沛,但由于缺乏成熟的理论与技术,过境洪水资源尚未得到利用。

连云港市承接沂沭泗上中游8.0万 km^2 的来水,过境水量比较丰沛,全市多年平均过境水量60.48亿 m^3 ,其中沂南区25.40亿 m^3 ,占总量的42.0%,沂北区33.72亿 m^3 ,占55.8%,赣榆区1.36亿 m^3 ,占2.2%。连云港市过境洪水通道主要有流域性河道新沂河、新沭河、沭河及区域性骨干河道灌河、善后河、蔷薇河、青口河、龙王河等。连云港市新沂河、新沭河、蔷薇河、石安河、龙梁河、青口河等河道建有沿线闸站,具有较好的取水规模,可利用闸站调度,充分利用汛期洪水。但灌河、烧香河、武障河、义泽河等河道缺乏控制性闸站,无法在汛期充分利用过境洪水。连云港市总面积为7615 km^2 ,全市多年平均径流深为256.9mm,以此计算连云港市本地雨水资源量理论值为19.3亿 m^3 ,开发利用城市雨水具有水量保障。目前,我国一些城市出台了《城市供水和节约用水管理条例》开始实施,明确规定规划用地面积2万 m^2 以上的新建建筑应当配套建设雨水收集利用系统,如果小区规划方案中没有雨水收集利用系统,将无法通过审批。连云港已在城建法规中加入了雨水资源利用的内容,但目前市区和各县只有一些零星的雨水资源利用设施,尚无形成规模,城市雨水资源利用尚待进一步开发。

1.3 洪水资源利用的国内外研究动态

1.3.1 国外研究动态

由于全球范围内水资源紧缺和暴雨洪水灾害频繁,近几十年来美国、日本、德国等40多个国家和地区在城市开展了不同程度的雨洪资源利用研究与实践。

美国的雨洪资源利用是以提高天然入渗能力为其宗旨。美国加利福尼亚州富雷斯诺市的“Leaky Areas”,地下水回灌系统,1971—1980年10年间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的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。



日本于1963年开始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路面、灌溉绿地等城市杂用水。这些设施大多建在地下,以充分利用地下空间。而建在地面上的也尽可能满足多种用途,如在调洪池内修建运动场,雨季用来蓄洪,平时用作运动场。地下蓄洪池形式也是多样的,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 。1992年,日本颁布了“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。

德国是欧洲雨洪资源利用工程建设最好的国家之一。目前德国的雨洪资源利用技术已经进入标准化、产业化阶段,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以下三种:

(1) 屋面雨水集蓄系统,集下来的雨水采用简单的处理后达到杂用水水质标准主要用于家庭、公共场所和企业的非饮用水,如街区公寓的厕所冲洗和庭院浇洒。法兰克福一个苹果榨汁厂,把屋顶集下来的雨水作为工业冷却循环用水,成为工业项目雨水利用的典范。

(2) 雨水截污与渗透系统。道路雨洪通过下水道排入沿途大型蓄水池或通过渗透补充地下水。德国城市街道雨洪管道口均设有截污挂篮,以拦截雨洪径流携带的污染物。城市地面使用可渗透的地砖,以减小径流。行道树周围以疏松的树皮、木屑、碎石、镂空金属盖板覆盖。

(3) 生态小区雨水利用系统。小区沿着排水道修建有渗透浅沟,表面植有草皮,供雨水径流流过时下渗。超过渗透能力的雨水则进入雨洪池或人工湿地,作为水景或继续下渗。德国还制定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、以色列、丹麦、瑞典、荷兰、澳大利亚等国在洪水资源利用方面已进行了相关研究与实践。

美国加利福尼亚州北水南调工程是美国西部洪水资源利用的一个典型,有效解决了该州地区水资源短缺问题。调水工程从该州北部山区奥罗维尔市开始。奥罗维尔土石坝把上游3个湖的湖水和一些山涧河流的水拦截储蓄在这里,使奥罗维尔湖成为调水工程中的最大蓄水水库,其库容量达到了43.17亿 m^3 。水库建成后既可以控制北部经常泛滥的洪水,又可引水向南经费瑟河、萨克拉门托河及人工沟渠水道逐步将水调到南部。北水南调工程年调水量近50亿 m^3 ,供该州2000万人使用,调水量的70%用于城市,30%用于灌溉360多万亩农田,是目前世界距离最长扬程最高的调水工程。另外,美国还十分重视应用洪水资源补给地下水资源,例如芝加哥市兴建的地下隧道蓄水系统,一方面可以解决城市防洪



问题；另一方面可以发挥洪水资源补给地下水的作用。

以色列国土呈南北狭长分布，面积约 1.5 万 km^2 ，北部为地中海气候降雨充沛，南部为沙漠地区水资源短缺。但是南部地区阳光充足，适合发展农业。以色列北水南调工程起始水源地为以色列东北部的太巴列湖，高水位时太巴列湖可蓄水 4.3 亿 m^3 ，除去损耗及下泄约旦河的 0.4 亿 m^3 水量，调水工程年均可从太巴列湖抽水 3.9 亿 m^3 左右。该工程利用北方充足的洪水资源，使以色列水资源配置不均的不利状况得到了改善，把大片不毛之地的荒漠变为绿洲，扩大了以色列国家的生存空间。

丹麦将洪水作为可替代水源，以减少地下水的消耗。丹麦 98% 以上的供水是地下水，一些地区的含水层已被过度开采，丹麦从洪水的利用方面寻找突破口，收集洪水，收集后的洪水通过过滤设备进入储水池进行储存。使用时利用泵经进水口的浮筒式过滤器过滤后用于冲洗厕所和洗浴。

瑞典、荷兰、德国、澳大利亚、伊朗等国也在实施地下水人工补给，以解决水资源短缺问题。瑞典、荷兰和德国的人工补给含水层工程，在总供水中所占的份额分别达到了 20%、15% 和 10%。20 世纪 50 年代起，荷兰在沿海人口稠密的城市地区开展了大规模的地下水人工补给工程，到 1990 年地下水补给量达到了 $1.8 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。

国外雨洪资源利用方式汇总见表 1.1。

表 1.1 国外雨洪资源利用方式汇总

雨洪资源	利用方式	备 注
城市雨水资源	利用城市雨洪资源	德国、日本、美国城市雨水利用
洪水资源	建设调水工程利用洪水资源	美国、以色列的北水南调等跨区域调水
	利用雨洪水资源回灌地下水	美国加利福尼亚州弗雷斯诺市的地下水回灌系统

洪水资源作为一种非常规资源，在利用过程中，必须保持审慎客观的态度，要在保证水利工程安全、水质安全、生态环境不受影响的前提下开展洪水利用。为满足这些条件，必须进行洪水资源利用风险分析研究。当前洪水资源利用风险分析研究最多的方面是水库汛限水位调整，包括动态汛限水位控制的研究和抬高现有水库汛限水位的研究等。

1978 年，美国总统卡特在对美国水利资源委员会的工作强调了对水资源工程进行风险分析的必要性和重要性。世界各国对水资源工程中的风险决策以及水资源系统的风险分析都高度重视，开展了广泛的研究。水库调度中的风险概念和分析方法于 20 世纪 80 年代才提出。Rackwitz (1976) 在水库防洪风险计算中首次运用一次二阶矩法。Houck (1979) 提出了一个有机遇约束的线性规划风险模型，是以预报可靠性作为输入，包含与未来径流预报有关的决策模型。Simocvic



和 Marino (1980) 在前人研究的基础上, 对水库调度的可靠性进行了系统的研究。Loucks (1981) 等在研究水库来水洪量与防洪库容之间关联的基础上, 得出了在一定防洪库容情况下不同频率洪水与其造成损失间的关系。Yazicigil (1983) 等通过分析入库洪水与最大库容之间的关系, 认为通过现有典型年设计洪水方法计算出来的水库最高防洪水位, 会因典型年选择不合适而造成水库存在很大的超校核洪水位的风险。Vogel 等 (1987) 考量了决策者对风险所持的态度, 构建了水库在运行时的防洪与兴利的效用函数, 最后利用对策论来指导水库运行。Karlsson 和 Haimes (1989) 运用多目标风险理论对大坝运行安全问题进行了风险分析, 使用了 5 种不同类型的概率分布函数, 并对结果进行了对比。Salmon 和 Hartford (1995) 介绍了目前国外盛行的“允许风险分析法”, 将风险定义为大坝溃坝的破坏概率和溃坝损失的乘积。Anselmo 等 (1996) 介绍了构建水文水力耦合模型来对意大利某洪水泛滥区进行洪水风险评估的详细过程。目前国外风险分析研究主要集中在洪水保险、洪泛区管理及风险决策等方面。Bouma 等 (2005) 通过对决策者对待风险的态度将如何最大程度影响评估结果的研究中, 得出对待风险的态度和对风险概念的理解将对水管理领域的决策过程和结果产生影响。Li 等 (2005) 的研究表明在非稳定条件下的情况下, 随机过程理论可作为有效的工具对水资源系统进行风险分析的有效工具。Feng 等 (2007) 首次运用季节性 AR (1) 模型模拟水库洪水入流, 在考虑水库泄流不确定性、不同典型代表年和历史大洪水的情况下对水库汛限水位调整进行风险分析, 确定最佳均衡汛限水位。Cao 等 (2008) 指出选择合理可行的方法来计算水库汛限水位调整的风险和效益具有很重要的理论和实践意义。Wang 等 (2011) 基于对某水库 11 年汛期期间 1342d 的降雨预报信息和降雨观测数据的比较, 验证了贝叶斯理论在水库汛限水位调整风险分析中的适用性。Dong 等 (2013) 提出了一种数值分析方法来计算由水库汛限水位调整所造成的水库下游风险, 与传统方法对比, 验证了其正确性。Wang 等 (2015) 在对水库不同频率设计洪水进行调洪演算和统计水库长系列供水的基础上, 构建风险效益决策模型来进行水库汛限水位调整。

1.3.2 国内研究动态

我国城市雨水利用研究与应用始于 20 世纪 80 年代, 发展在 20 世纪 90 年代。总的来说技术还较落后, 缺乏系统性, 也缺少法律法规保障体系。20 世纪 80 年代, 岑国平在根据北京市百万庄小区的实测资料, 用 ILLUDAS 模型做了一些检验。并于 1990 年提出了城市雨水径流计算模型, 这是我国最早自己开发程序对城市雨水径流进行比较精确的模拟模型。罗红梅 (2007) 以北京浅山区生态村为研究对象, 计算了北京山区可利用的雨洪资源量, 提出了北京浅山区生态村的雨洪控制与利用模式。王情 (2009) 分析了中国北方城市雨水利用的必要性