

水利部公益性项目“变化环境下贵州旱灾形成机理及管理信息系统
(项目编号: 201301039)”经费支持

城市化地区水系管理 理论与方法

张泽中 商崇菊 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水利部公益性项目“变化环境下贵州旱灾形成机理及管理信息系统
(项目编号: 201301039)”经费支持

城市化地区水系管理 理论与方法

张泽中 商崇菊 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了城市化背景下城市水系健康这一领域部分研究成果,探讨了城市化对水系水文水资源影响、城市水系健康及调度理论,以及郑州城市水系健康调度实际。丰富了城市水系健康理论,并给出大量实例说明理论与方法的应用及其可行性。书中成果不仅构建了城市水系健康评价动态指标体系,而且建立了城市水系健康调控模型,并给出了郑州水系健康调控方案,为其实现社会、经济、生态环境可持续发展,为中部崛起战略提供科学支撑。

本书可供城市水系管理参考与应用,也可供从事水资源管理及相关专业的高等院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市化地区水系管理理论与方法 / 张泽中, 商崇菊
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014.7
ISBN 978-7-5170-2303-6

I. ①城… II. ①张… ②商… III. ①城市水利—水利系统—研究—郑州市 IV. ①F426.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第181750号

书 名	城市化地区水系管理理论与方法
作 者	张泽中 商崇菊 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	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 9印张 254千字
版 次	2014年7月第1版 2014年7月第1次印刷
印 数	0001—1200册
定 价	36.00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

水是生命之源、生产之要、生态之基，水系是生命的源泉。河流湖泊等水系为人类提供生活和生产资源，健康的水系不但支撑和维系地球生命保障系统，而且更与人类福祉息息相关，是人类现代文明的基础和生态文明发展的需求。城市化改变了城市自然水循环规律，导致了水资源时空分布的变异，水资源演变中伴生了一系列的生态环境问题，直接威胁到城市水系健康，并加大了水资源调控的复杂性。

坚持科学发展，以人水和谐为原则维系水系健康，已经成为当代国际社会的共识。如何协调水系健康与社会经济发展，促进城市水资源在生态环境与社会经济可持续发展中取得长久的最大效益，是一个巨复杂的大系统问题，需要以科学发展观为指导，运用系统学和管理学等多学科理论来处理。

为全面贯彻中共中央建设“生态文明”精神和落实水利部最严格水资源管理制度，保障城市河湖水系健康，实现水资源的可持续利用，针对目前由于水资源不合理开发利用引发的河道断流、湖泊萎缩、生物多样性减少、水生态系统失衡、水景观丧失和功能退化等问题，研究人员采取“城市化对水系水文水资源影响——构建城市水系健康评价指标体系——确立城市水系健康评估指标赋分标准及评估方法——典型城市水系健康评价——城市水系健康调度措施”的技术路线，进行了历时3年多的科学攻关。不仅研究了城市化对城市水文及水资源的影响，识别了影响城市水系健康的关键要素，而且探讨了城市水系健康管理，包括城市水系健康评价和健康调度理论与实践，兼顾生活、生产和生态，把水质水量配置有机地结合，水资源配置与生态修复相辅相成，以郑州市水系进行实例研究。本书成果不仅为城市河流健康管理理论方法研究提供了新的思路，并且为维护城市河流健康、建设水生态文明城市提供了技术支撑。

本书由华北水利水电大学张泽中和贵州省水利科学研究院商崇菊撰写，得到水利部公益性行业科研专项（201301039）、国家自然科学基金（51309098）、河南省教育厅自然科学研究计划项目（2011B570003、2011B570005）、郑州市2010年度技术与开发经费支持项目（10PTGS507-1）、贵州省水利厅科技专项经费项目（KT201313）和华北水利水电大学高层次人才引进项目（201338）的支撑和资助。全书共分8章，第1章，绪论，由张泽中撰写；第2章，郑州城市化分析与城市水系概况，由商崇菊撰写；第3章，城市化对郑州水文水资源影响研究，由商崇菊撰写；第4章，城市化影响下郑州城市水文效应研究，由张泽中和商崇菊共同撰写；第5章，城市水系健康理论与健康综合评价，由张泽中撰写；第6章，城市水系健康调控理论研究，由张泽中撰写；第7章，城市水系健康调控方案研究，由张泽中和商崇菊共同撰写；第8章，结论和建议，由张泽中撰写。

本书共计25.4万字，其中：张泽中撰写10.3万余字，商崇菊撰写15.1万余字。在研究和数据收集过程中得到华北水利水电大学徐建新、陈南祥，郑州市水务局张中锋、

王永高，河南黄河河务局供水局刘尊黎的指导和大力帮助，同时本书在编写过程中还借鉴了许多专家学者城市化方面的成果，均已在参考文献中列出，在此对他们表示由衷的感谢。

城市水系健康管理是水文学及水资源学科中一个处于发展中的新兴科技领域，加之作者知识水平有限，书中难免存在谬误和不足之处，敬请读者批评指正。

作 者

2014 年 5 月 12 日于郑州华水龙子湖校区

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究进展	4
1.2.1 城市化对水系水文及水资源影响研究进展	4
1.2.2 水系生态健康研究进展	6
1.2.3 水系生态健康调度研究进展	9
1.3 研究内容和技术路线	13
1.3.1 研究内容	13
1.3.2 技术路线	14
第2章 郑州城市化分析与城市水系概况	15
2.1 郑州自然地理和水文气象概况	15
2.1.1 郑州自然地理概况	15
2.1.2 郑州水文气象概况	15
2.2 郑州社会经济概况	15
2.3 郑州城市化发展	16
2.3.1 郑州古代城市化及其城市化资源	17
2.3.2 郑州城市化过程特点和驱动力	17
2.3.3 郑州城市化土地利用特征	19
2.3.4 郑州城市化主要表现	22
2.4 郑州水系概况	24
2.4.1 郑州水系格局	25
2.4.2 存在问题	31
2.5 小结	33
第3章 城市化对郑州水文水资源影响研究	34
3.1 城市化对郑州水系水文影响	34
3.1.1 城市化对水系水文影响	34
3.1.2 城市化对郑州水系水文影响	36
3.2 城市化对郑州水系水资源影响	45
3.2.1 城市化对城市水资源影响	45

3.2.2 城市化对郑州水系水资源影响	46
3.3 小结	56
第4章 城市化影响下郑州城市水文效应研究	58
4.1 SWAT 模型及原理	58
4.1.1 SWAT 模型的结构与控制	58
4.1.2 SWAT 的水文过程模型	60
4.1.3 蒸散发	62
4.1.4 SWAT 模型与 GIS 的集成应用系统 AVSWAT	65
4.2 郑州城市水系基础数据处理与数据库构建	66
4.2.1 流域数字高程模型 (DEM) 生成	66
4.2.2 土地利用	67
4.2.3 土壤数据	68
4.2.4 气象资料	73
4.3 郑州城市水系径流模拟及验证	74
4.3.1 模型数据输入	75
4.3.2 模拟方法的选择	76
4.3.3 模型率定	76
4.3.4 模型验证	80
4.4 郑州城市水系对城市化建设水文响应	81
4.4.1 郑州城市化对城市水系多年平均净流量响应变化	82
4.4.2 郑州城市水系典型年径流量受城市化影响的响应变化	82
4.5 小结	83
第5章 城市水系健康理论与健康综合评价	84
5.1 城市水系健康概念与内涵	85
5.2 郑州城市水系健康评价指标体系	86
5.2.1 构建郑州城市水系健康指标体系原则	86
5.2.2 构建郑州城市水系健康指标体系	87
5.3 郑州城市水系健康评价标准	89
5.4 城市水系健康评价理论与综合评价模型	92
5.4.1 城市水系健康评价理论——改进集对分析	92
5.4.2 集对分析多元模糊综合评价模型	93
5.5 郑州城市水系健康综合评价	96
5.6 小结	98
第6章 城市水系健康调控理论研究	99
6.1 城市水系健康调度	99
6.1.1 城市水系健康调度概念和基本内涵	100
6.1.2 闸坝生态调度的基本原则	101
6.1.3 水系健康调度的基本措施	103

6.2 城市水系分质水量联合健康调度模型	104
6.2.1 水动力学模型	104
6.2.2 水质模型	106
6.2.3 多目标水质水量联合调度模型	107
6.3 郑州城市水系模型求解及计算结果分析	109
6.3.1 模型求解	109
6.3.2 计算结果分析	109
6.4 小结	115
第7章 城市水系健康调控方案研究	117
7.1 非汛期不同供水方式的联合健康调度方案	117
7.1.1 间断供水联合健康调度方案	117
7.1.2 不间断供水联合调度方案	118
7.2 考虑中水利用的联合调度方案	121
7.2.1 中水进入河道方案	121
7.2.2 中水不进入河道方案	122
7.3 汛期水系健康调度方案	124
7.4 生态水系水质水量联合调度运行方案	125
7.4.1 补换水方案	125
7.4.2 调度运行方案	126
7.5 小结	126
第8章 结论和建议	127
8.1 结论	127
8.2 建议	128
参考文献	130

第1章 绪 论

1.1 研究背景

我国自改革开放以来,城市化进程逐步加快,2005 年底我国城市人口已由 1980 年的 19% 增长到 43%, 预测 2010 年我国城市化水平将达到 40%, 2020 年达到 50% 左右。城市化进程的加快,导致城市化地区资源短缺、环境污染、生态恶化等一系列问题。2004 年据建设部统计,全国有 11 个省(自治区、直辖市)的 100 余座县级以上城市供水短缺,其中严重缺水城市已占 56%, 水资源短缺问题已成为城市化进程加快和社会经济持续发展的重要制约因素。城市水资源短缺、水质恶化、洪涝灾害已成为当今世界城市水系健康发展与水资源安全的三大问题,严重制约着城市社会经济的可持续发展。尤其是近些年来,随着人们生活水平的提高和城市化进程的加快,城市水环境恶化和生态系统退化越来越严重。我国城市出现水危机和生态环境恶化的原因众多,其中气候变化和快速的城市化改变了自然水循环规律导致的水文生态过程变异是其主要原因之一。

郑州市地处中原中心腹地,历史悠久,文化古迹荟萃,是国家历史文化名城、中部地区重要的区域性中心城市、全国重要的综合交通和通信枢纽、现代化商贸城市;特别是改革开放 30 多年来,经济和社会都得到了长足的发展,城市化出现飞跃式发展,城市化率由 1978 年的 18.1% 提升到 2010 年的 63.6%。但是,随着城市人口的急剧膨胀、工农业与服务业的迅猛发展、城市化进程的不断加快,城市水环境污染、生态恶化等问题日益突出,已严重制约了郑州城市社会和经济的可持续健康发展。

水是生命之源、生产之要、生态之基。水不仅孕育了生命,涵养了生态,而且缔造了人类文明。四大文明古国的兴衰不仅佐证了水孕育了人类文明,而且铮铮地印鉴了水与人类文明的关系。从茹毛饮血时代到信息高速化时代,人类一直逐水而居,傍水而息,无论是部落村寨还是繁华都市,无不因“有水而生,无水而废”。山不在高有仙则名,城不在大有水则秀;灵随水起,福因水聚。因此,古往今来有名的城镇、繁华的都市或在大河大江之滨,或在明湖静泊之畔,承踞水泽之地。城市范围内河流、湖泊、水库、沟渠、泉水、井塘、湿地以及其他水体构成脉络相通的水域系统称为“城市水系”,城市水系是城市的血脉,城市水系作为城市自然生态的基础“通道”,是城市地理格局的“经络”,是自然河流生态系统的重要组成部分,是连接城市人工环境与自然环境的重要纽带。因此,城市水系已经成为城市发展的资源廊道,成为优先发展的区域。城市水系作为城市环境的重要构成要素和城市环境格局的基础,是城市生态文明建设的主要对象之一和重要内容。水是城市基础,没有水的城市是都市的“木乃伊”,没有良好水环境的城市终将成为废墟



鬼蜮。生态文明城市既是人类文明进步的表征之一又是人类重要的栖息地。

汉语中“城市”一词最早出现于《韩非子·爱臣》,“是故大臣之禄虽大,不得藉威城市。”城市,在《辞源》中被解释为人口密集、工商业发达的地方。在百度中搜索“城市”,百科名片定义为“城市是以非农业产业和非农业人口集聚形成的较大居民点”。城市不仅包括住宅、工业和商业三大功能区,而且具备行政管辖功能,其行政管辖功能可能涉及较其本身更广泛的区域,其显著特点是公共设施齐全。城市的出现是人类发展过程走向成熟和文明的标志,也是人类群居生活的高级形式,城市不断地进行着演变、运转与社会、经济空间等各个子系统间的相互作用,为人类提供更为理想的栖息地。城市发展变化,特别是城市发展的区域化现象被称之为“城市化”,其表现为城市社会生产力比较发达,商贸经济活动与基础设施日趋发达,逐步形成与发展成为设施完善、交通便利、信息灵活的更高级都市。“城市化”最早是由西班牙民用工程师 ldefonso Cerda 在 1860—1861 年提出的,城市化现象是与地区经济发达水平相联系的,是一个内涵极为丰富的社会、经济和空间变化过程,是一个国家或地区不断获得“城市物资”的过程。当前世界普遍认为城市是人们政治中心、经济中心、物流中心、文化中心和信息中心,在人类社会经济生产、生活中发挥着重要的作用,标志着文明的程度;城市化程度不仅能衡量一个国家和地区的经济、社会、文化、科技水平,而且能衡量国家和地区社会组织程度和管理水平,标志着现代化目标的实现,以及人类的新时代。

城市化带来的丰硕成果使人类赞叹不已、弹冠相庆,但是,现实的城市化过程并不是一曲完美奇妙的乐章,城市化过程中也夹杂着许多不和谐之音,一些发展措施不符合和谐发展理念和可持续发展理论。随着城市化进程加快,城市人口膨胀,产业集中,社会经济活动强度增大对社会、经济、资源、生态与环境产生重大影响,使城市资源不足、影响工业生产和人民生活,城市化主要不利影响可归纳为:①社会问题,如住房紧张,就业困难,交通拥挤,社会秩序混乱,社会保障压力快速加压等;②可利用土地紧张,地价上涨,建筑成本上升;③资源问题,资源短缺,水电气食品全靠外来供给,安全性可靠性低;④生态问题,生态系统越来越脆弱,生态物种不断降低,生物物种多样性减少,食物链网状萎缩、结构关系简单化;⑤环境问题,大气污染、土壤污染和水环境污染加重,热岛效应剧烈,水循环多元化,水系结构和水文过程不断被破坏,空间减少,地下漏斗致使地面沉降等。这些问题严重制约城市的发展,严重影响生活环境质量,严重威胁人的生命和财产安全。

城市的起源、发展及湮没与水系变迁是密切相关的,犹如齿唇相依的关系,水系是城市发展动力之一,又是制约和影响城市空间结构的重要因素之一。在城市化驱动下,水系水文与水动力条件相互影响,影响水体自净能力,水文—形态的多样性以及水质自净能力的改善是促进水系生态系统恢复和水景观提升的必需条件。在影响城市发展的各种因素中,城市化已经成为对水系产生影响最主要的因素之一,截至 20 世纪末,世界上 60% 的河流在城市化影响下发生剧烈变化。人类为了更好地在城市生活,因对自然规律缺乏全面科学合理认识,城市化过程中城市水系河渠硬化、取直化、闸坝分割化、污水直排、围水造陆等过度治理措施,强烈干扰城市水系水文和水资源演变规律;城市化硬化面积比率不断上升,改变了土地利用方式,造成了水循环的下垫面产汇流条件和地表水地下水相互转

化关系突变,大幅度影响了水文过程,造成水流、水量和水质等水循环各方面和水资源演变;通过城市水系建设,城市化使得水系形态改变,水域空间减少,水系结构改变,造成水系网络形态萎缩、结构变化和分布格局突变等。快速城市化在给城市水系带来大量工业和生活污水,造成严重的水环境污染问题,间接对城市水系自然生态系统造成强迫干扰;城市河流与湿地的侵占化、主干化、园林化、非生态硬化,忽视城市水系对城市的自然美化和净化环境的作用,轻视其降低污染,促进物质和能量循环等不可替代的功能和价值,打破了原城市水系生态系统的结构和平衡,由此带来的生态和环境影响已经引起人们的高度重视。城市水系水文和水资源演变规律改变又造成水系功能改变以及产出生态与环境问题,进而影响城市健康与社会和谐发展。

近30多年来的科学研究促使人们充分认识到,城市水系保护管理必须走城市水系健康管理之路,特别是针对城市水系健康具体问题进行的城市水系健康调度是城市水系健康管理的核心。关于城市化造成河网水系变化引发的相关问题,许多国家和地方政府极为重视,联合国把2006年“世界水日”的主题确定为“水与文化”,水文化开始成为水资源保护的新理念,其对解决水资源问题的重要性,日益得到关注;我国政府积极参与世界水环境保护科学研究与实践,特别是生态文明建设,按照国际水环境保护目标,河网水系保护与管理不仅要控制水污染,而且通过合理的水系通道进行健康调度来保护水生态系统。各地方政府因地制宜地开展对城市水系建设、水环境治理技术和健康管理研究与实践。城市水系生态问题被各界日益重视,越来越多城市通过城市生态水系建设和管理来解决城市水系生态问题,日本、美国、德国、瑞士、澳大利亚等发达国家现已进入了生态水利的高级阶段,以尊重河流系统的自然规律,进行河流回归自然的改造,注重河流自然生态和自然环境的恢复与保护作为河流建设管理理念。在20世纪70年代以后美国确立了与自然相协调的可持续的河流管理理念,实现了河流水资源管理模式的转换。Gerald和Galloway在1993年提出了与经济、生态、文化可持续性相融合的河流管理新模式代替传统洪水河流管理模式。20世纪90年代以来,我国开始重视对城市生态环境整治建设和管理。成都市集防洪、排水、交通、绿化、生态、文化于一体完成了对府南河的整治,获得“人居奖”和“改善居住环境最佳范例奖”;苏州市对城市水系进行了生态化治理,治理中保持了三纵三横加一环的河网水系及小桥流水的水城特色。北京市、武汉市和桂林市等大都市花了约10年时间以建设“水清、流畅、岸绿、通航”的现代城市水系为目标,对城市水系进行了大规模的生态整治。郑州市从2006年开始,按照“水通水清、健康安全、生态环保、人水和谐”的理念,以市区及周边地区范围内的河、库、湖湿地为对象,拟构建“六纵六横河渠、七中五小水库、三湖泊两湿地”的生态水系格局,要实现防洪、供水、生态、景观、旅游等综合利用功能的城市生态水系健康管理的理论与实际研究。

可见,国内外在城市化对城市水系影响方面的研究方兴未艾,从研究发展趋势看,城市化环境下的城市水文和水资源影响研究是当今国际水科学研究的前沿,识别城市化因素对水循环的影响是国际水文学研究的热点和难点,寻求城市生态水系健康调控的方法和途径是城市水安全和可持续发展保障的重大需求。因此,该研究,不仅对推动本学科发展意义重大,也符合国家的中部崛起战略需求和长远规划,响应国家水安全保障和水危机防治的重大战略举措,可为郑州制定重大发展战略决策、保障社会经济可持续发展提供坚实的

科学支撑。因此,开展本项目的研究具有重要的理论和现实意义。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 城市化对水系水文及水资源影响研究进展

以人口数量增长急剧、经济发展迅速、土地利用变化超常和人工建筑密集为特征的城市化加速发展对城市水系的自然水文循环造成严重的干扰、破坏,不仅变一元水循环为二元水循环,而且发生淡水资源短缺、洪涝灾害频繁、水体污染、河道断流、湿地萎缩、荒漠化扩展、地下水超采、海水入侵、水土流失以及水系结构和生态系统破坏等问题。这些城市化对水系水文及水资源影响问题既是限制国家和区域可持续发展的关键性因子,又是水文科学问题,早已引起世界专家、学术组织和政府的关注。

20 世纪 60 年代发达国家快速城市化给城市水系带来了一系列复杂的水文生态问题,城市下垫面改变对城市小气候、城市降水、城市产汇流、雨洪过程及其分布、水土流失以及对城市水系水质的影响等。针对这些水文生态问题,联合国教科文组织 1971 年推出了著名 MAB 计划,提出加强开展城市水系生态研究。从 20 世纪 70 年代中后期起,美国、苏联等发达国家就对城市规模、经济增长、人口变化等因素对生态和环境造成的影响进行了研究与评价,到 90 年代,人类活动对城市水文、生态和环境的胁迫效应和自然生态系统的响应机制成为现代国际城市水文生态领域研究的主要内容,兴起和发展了许多新学科和方法论。1971—1975 年美国在圣路易斯做了大量的大城市气象观测实验和研究,得出城市对降水量的分布有影响,夏季降雨次数、总雨量和暴雨的平均雨强都明显增加,雷雨发生次数增多^[36]。Atkinson、Parry 和 Harnack 等对伦敦、雷丁、华盛顿等城市的研究表明城市热环境是增加城市降水的重要因素。刘俊分析了 1952—1998 年城市降水资料,得出在同一纬度上城区较周边县区多年平均年降水量偏多 9.58%。洪亚华对杭州市研究得出城区不仅降水量增加,而且降水日数也逐渐增加。城市化造成的大气污染不仅致使城区降水污染物增多,而且形成酸雨。张学真针对西安市城市大气污染成分的变化对城市降雨酸性值产生的影响进行了研究,得出西安市春冬季节酸雨出现频率大,夏秋季节酸雨出现频率小的结论。

城市化土地利用发生改变不仅影响城区降水,而且影响城市下垫面产汇流及城市洪灾。城市化极大程度地改变了土地利用方式,建筑物、广场和道路等不仅硬化了下垫面,而且还减少了农田、绿地和水域面积,挤占了城市水系空间。硬化的下垫面增加不透水面积,在很大程度上阻止了降水向土壤的渗透,削弱或切断了地下水和城市水系基流补给来源;同时增多了暴雨时地表径流,增大了城市下水管网排水及城市防洪排涝压力。1998 年底我国城市建成区的平均绿化覆盖率只有 26.6%,人均公共绿地面积仅为 6.1m^2 ,大多数城市的人均占有绿地面积不足 4m^2 ,低于我国规定的人均绿地国家标准 $7\sim 11\text{m}^2$,更远低于国际标准 $50\sim 60\text{m}^2$ 。北美洲安大略环境部对城市化前后降水、径流、入渗和蒸发进行研究,天然流域的蒸发量占降水量的比例达 40%,入渗地下水量所占比例为 50%;城市化后流域降水量增多,但渗入地下部分减少,只占降水量的 32%,填洼量减少,蒸发减少为 25%,而产生的地面径流增大,同时地表径流有 43% 排入地下水道迅速排走。美国

水土保持局考虑土壤的下渗特性、土壤的前期含水量和土地利用方式等3种土壤因素与降水因素来确定径流总量,提出用降水径流计算方法来计算径流系数(SCS法),这种径流系数求解方法被广泛应用,国内应用该方法具有代表性的是贺宝根等,利用多个城市的实测暴雨径流资料,采用不同方法修正SCS法,使这种方法更适用城市径流系数求解。城市化后下垫面改变,大量水系空间被填埋、被街区住宅区等硬化面代替,径流系数几乎翻倍增大,大量滞水空间的消失使城市汇流和入河径流量大幅度增加,洪峰汇流时间缩短,加剧了城市水涝灾害的频繁发生。杨士弘对北京市郊区和城市大雨的径流系数进行研究,发现郊区径流系数在0.2以下,城区径流系数一般为0.4~0.52;陈云浩和吴林祖等对多个城市降雨径流进行研究,发现南方城市城市化前后地表径流系数明显改变,1960—1965年间地表径流系数平均0.33,最大次降水径流系数0.41;而1991—1993年雨期径流系数3年平均值为0.62,最大次降水的径流系数达0.82。杭州市20世纪90年代城建面积是60年代的2倍,在同等降水强度下,90年代地表径流量会增大到60年代的4倍,城市洪灾概率大幅度升高。Lepold研究当城市有20%的面积由下水道排水和不透水盖层时,溢岸洪水的发生频率将增加一倍,汇流量将增加0.6倍。1970年罗伯特和克林格曼采用流域模型论证了城市硬化面积分别为0%、50%、100%时对单位线的作用和城市洪水过程。Z. Tang, B. A. Engel等预测了城市化模式对流域径流的影响,通过模拟得出,如果采用非蔓延扩散的城市增长方式,城市土地利用面积比例从4.0%增加到8.0%会导致径流量增加5%;如果采用蔓延扩散增长方式,城市用地比例增加到11.5%,径流量就会增加12%。文立道等对北京市城市化研究发现在通惠河乐家花园站以上流域内,径流系数已超过0.50,洪峰流速由20世纪50年代的0.40m/s左右增至90年代的0.65m/s左右。高俊峰等研究发现城市化前后在相同降雨类型条件下,1996年流域下垫面的产水量比1986年多1.018亿 m^3 。城市化下垫面硬化等变化导致径流糙率相对减少,下渗通量和壤中流减少,汇流速度加快,地表产流量增加,基流减少,地下水位降低;城市洪水过程的影响主要表现为使洪峰及洪量增大,过程线峰型尖瘦,陡涨陡落,洪峰频率及其分布形式发生变化。

城市化不仅影响城市降雨和径流分割产汇流,而且影响城市水循环,变一元自然水循环为二元水循环。城市中大规模的人类取水排水活动形成了与天然“坡面—河道”主循环相耦合的“取水—供水—用水—耗水—排水”的社会水循环,构成了二元水循环,王浩、王建华、黄强、蒋晓辉和齐青青等对人类活动构造的二元水循环进行了深入研究,研究表明我国北方的许多流域侧支循环通量甚至超过了主循环的实测通量。杨凯等利用上海市中心气象站和周边9个郊区气象站1970—2000年蒸发资料进行研究,得出20世纪90年代以后市区蒸发量总体明显下降,这与郊县蒸发量变化趋势相背离,城郊蒸发的差异及变化与区域下垫面状况关系密切。丹利用1960—2009年北京地区20个气象台站的观测资料,分析了北京城区和郊区蒸发皿蒸发量的变化趋势和特点,得出近50年北京地区蒸发量有明显减小趋势,城区值 $-88.1\text{mm}/10\text{a}$,郊区值 $-76.0\text{mm}/10\text{a}$,受城市化影响,相对湿度、日照时数、最低气温、气温日较差和平均风速的变化对城区蒸发量的变化有显著影响。

城市化对城市水文影响的后果就是水资源短缺、水环境污染和城市洪灾严重。城市化除了影响城市降水、径流分割、蒸发之外,还通过社会水循环影响城市水资源的水量和水



质。社会水循环是指自然水循环过程中受人类活动的影响,通常把人类活动影响或参与的这部分水循环过程称为社会水循环。社会水循环是自然水循环服务人类社会的有效拓展。人类参与社会水循环的主要表现分为给水过程和排水过程两大部分:给水过程是自然水的提取、加工、供应和使用过程,它是水从自然界流入到人类社会的入口;排水过程是将水从人类社会经过收集、处理,然后排放到自然界的出口。我国是世界上水资源紧张的国家之一,特别是城市水资源,20世纪末每年用水缺口达到5.8亿 m^3 ,城市化更加加剧城市水资源紧张。城市人口增多、规模扩大,城市用水量会随之增加,城市建设中地表的硬化导致雨水入渗量减少,地下水得不到充分补给,城市生产和生活对城市水体的污染,都导致城市本身可利用水资源减少,城市不合理的地下水开采造成地下漏斗群。城市人口增加,经济快速发展,用水量急剧上升,落后的城市污水处理能力导致城市生活污水和生产废水排放量的增加,城市水系成为污水的排放渠道。据统计2004年我国有80%的城市污水未经处理就直接排入水域,90%以上的城市水域污染严重,近50%的城市供水水源达不到卫生饮用水标准、城市鱼虾绝迹,部分湖泊富营养化严重。随着水处理技术的提高和经济实力的增加,城市生活和工业点源污染可以得到有效控制,但是城市非点源污染成为城市水体污染的主要污染源。早在20世纪60—70年代,国际上很多专家学者对非点源污染就已经开始关注并研究,80—90年代研究进展迅猛,研究不仅涉及非点源污染的特征、负荷、地域范围机理以及相关的影响因子等,而且更涉及研究技术手段——野外调查与监测、土地利用方式分析、数学模型、遥感与地理信息系统等,21世纪以来研究趋向于城市非点源污染管理政策和控制方法方面。城市地表径流早在20世纪90年代初就被美国EPA列为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源,城市产汇流产生的非点源污染被列为主导污染源的占18%以上。随着生活点源和工业点源的有效控制,我国城市非点源污染也已成为水体污染的主要因素之一。城市化程度、土地利用特征、交通状况、人口密度和空气污染程度不同会使得城市径流污染主要成分构成和分布不同,降水淋洗空气中的污染物,特别是工业区及空气污染严重的城市,城市降水和径流都产生污水,降水甚至是酸雨。城市地表沉积物决定城市地表径流污染的性质,赵剑强等对西安城市道路路面径流水质的测试表明,城市道路降雨初期路面径流雨水污染物浓度 COD_{Cr} 高达1230mg/L、BOD高达204mg/L、SS高达2288mg/L,石油类高达161mg/L。现有研究成果表明城市土地覆被和空间格局是影响城市面源污染的关键性因素,不同土地利用方式所产生的城市面源污染的差别很大。

城市化下经济快速发展还增加了城市外引水资源、节水、水系生态修复工程等建设能力,以及水资源承载力的提高。为解决缺水城市和地区水资源紧张状况,国内外都进行了外调水工程。从20世纪80年代起我国陆续修建了数十项给城市供水的大型跨流域调水工程,如引滦入津、引黄济青、南水北调、东深供水工程等;调水工程在国外更不乏其例,大多分布在经济发达国家和地区或者降水不均匀地区,如美国加利福尼亚州北水南调工程、加拿大魁北克调水工程、伏尔加—莫斯科调水工程、巴基斯坦西水东调工程和澳大利亚雪山工程等,2005年经不完全统计表明世界上调水工程分布在24个国家,多达160多项。跨流域调水工程主要向缺水城市供水,提高城市水资源承载力。

1.2.2 水系生态健康研究进展

20世纪80年代末,由于大量人类非理性活动和生存需求,造成大量的水环境问题和

水生态问题,水生生物频繁灭亡,为了合理开发利用水资源、保护水生态,河流健康的概念开始出现在文献报道上,且备受各国政府和学者广泛关注。澳大利亚在1993年最早启动国家河流健康计划(NRHP),通过相关研究构建了流域健康状况评价体系。同期,美国、新西兰、日本、英国、南非、加拿大等国也陆续开展了有关河流健康评价与恢复方面的研究。有人把河流健康阐述为河流生态系统健康,有人认为河流结构、形态和功能完善为河流健康,河流健康概念是仁者见仁智者见智,处于百家争鸣状态。Simpson等认为河流健康是指河流生态系统支持与维持主要生态过程,健康河流具有一定的种类组成、多样性,以及功能组织的生物群落无限接近受扰前状态,建议把河流受扰前的原始状态当做健康状态。Karr以河流价值作为参考,认为只要其当前与未来的使用价值不退化且不影响其他与之相联系系统的功能,就可认为此生态系统是健康的,与生态系统的完整性是否破坏无关。Fairweather认为健康河流生态系统不受损害的状态应包含公众对河流的环境期望,在定义河流健康时社会、经济和政治观点是必不可少的;持相似观点还有Norris等则认为河流健康应考虑人类福利要求。Meyer理解综合了前面两种观点,在健康的概念中涵盖了生态完整性与人类价值,认为健康的河流生态系统不但要维持生态系统的结构与功能,且应包括其人类与社会价值。我国严峻的水问题使得专家学者对河流健康领域更为关注,李国英指出黄河健康生命是在基本保障人类社会安全和经济发展的同时,其河川径流条件基本满足河流生态系统健康需要时的生命状态。维持好黄河的生命功能就维护住了黄河的健康生命,主要体现在水资源总量、洪水造床能力、水流挟沙能力、水流自净能力、河道生态维护能力等方面。孙治仁等认为健康的珠江具有3个基本特征:①具有良好的恢复能力和自我维持能力;②能满足原生生态系统基本的水需求;③具有相对稳定性,河流特征不发生突变,对人类和岸边生态系统不造成重大危害。文伏波认为河流在人类开发利用与自身对干扰所具有抵抗力和恢复力的共同作用下,能保持合理的自然结构状态,实现正常的水、物质及能量的循环及健全的功能,满足人类社会的可持续发展需求,最终形成人类对河流的开发与保护平衡的良性循环,这样的河流才是健康河流。刘昌明等认为河流健康反映的是人类对河流功能发挥的认可程度。高永胜认为河流生态健康是指人类干扰下河流生态系统不仅能保持化学、物理及生物完整性,还能维持其对人类社会提供的各种服务功能。庞治国等指出健康河流生态系统应该具有合理的组织结构和良好的运转功能,系统内部的物质循环和能量流动未受到损害,外界扰动能保持着弹性、相对稳定性和一定的恢复能力,能够满足所有受益者的合理目标要求;其内涵是动态变化的,在不同时间尺度和不同空间尺度具有不同涵义。张可刚等认为河流生态系统的能量流动和物质循环没有受到损害,系统对自然干扰的长期效应具有抵抗力和恢复能力,系统能维持自身的组织结构长期稳定,系统具有较强的社会服务功能等谓之健康河流生态系统。

董哲仁提出河流健康是一种河流管理的评估工具,其作用是建立相对基准点和评估准则体系,对于在自然力与人类活动双重作用下的河流生态系统状况进行动态监测与评估来研究河流发展趋势,通过适当管理措施促进河流向良性发展。南非于1994年发起了“河流健康计划”(RHP),选用七大类河流生境状况作为河流健康的评价指标,提供了建立在等级基础上可以广泛应用于河流生物监测的框架。英国河流生境调查法(RHS),通过调查背景信息和土地利用等六大类指标来评价河流生境的自然特征和质量,并判断河流生境



现状与纯自然状态之间的差距。其中的不足在于部分用于评价的数据以定性为主,使得数理统计较为困难。澳大利亚的溪流状况指数法(ISC)构建了基于河流水文学、形态特征、河岸带状况、水质及水生生物5方面的指标体系,将每条河流的每项指标与参照点对比评分,总分作为评价的综合指数。该法将河流状态的主要表征因子融合在一起,而为河流科学管理提供指导,其不足是缺乏对单个指标相应变化的反映,参考河段的选择较为主观。在河流健康评价指标体系建立与评价方法等理论研究方面,我国专家学者积极探索,成果丰硕。吴阿娜^[128]选择河流水文、河流形态、河岸带状况、理化指标、河流生物5类指标对上海市城市河流健康进行了评价研究。赵彦伟等针对黄河多泥沙问题,提出健康黄河要有一定的自我维持与更新能力,具有相对的生态完整性,河流生态过程基本能够延续,物质循环与能量流动未受严重损伤,关键生态组分如河漫滩、生物栖息地得以保存。张可刚等从河流水文学、物理构造特征、河岸带状况、水体污染状况以及水生生物等5个方面,提出了河岸抗冲性、河岸人口密度、国民经济取水率、娱乐项目、航运等14个河流健康评价指标。吴道喜提出的健康长江指标体系分3个系统,在生态环境保护系统层下设置水资源利用水平、河流完整性与稳定性、水生生物多样性3个状态层,在每个状态层下设置指标,如水资源利用率、生态需水量满足程度、水功能区水质达标率、输沙模数、水系连通性、水面率、河床稳定性、河岸稳定性、河岸植被覆盖率、生物完整性指数、珍稀水生动物存活状况定量或定性指标。王琳等用ISC法基于河流水文学、形态特征、河岸带状况、水质及水生生物5个方面,建立了涵盖环境、水文、水利、生态、物理结构和社会功能等多方面的综合指标体系,在原评价指标体系的基础上,增加了公众态度、河流管理、防洪安全等社会指标。吴春华等提出了河流生态系统健康的生态特征指标、水资源状况指标、河流基本状况指标、功能整合性指标、社会政治环境指标、社会经济指标等共计45个具体指标。如何选取河流健康的基准状态是河流健康作为管理工具的四大关键问题之一,它取决于社会所追求的最优河流的价值。可以选取同一条河流历史上的自然状况作为理想参照系统,也有许多学者认为,在人类进行大规模经济活动前的自然河流是原始状态。普遍承认的基本观点是:自然系统优于人工系统,人类活动干扰前的自然状态优于干扰后的状况。刘晓燕认为河流健康的标准即是相应时期或河段的人类利益和其他生物利益的平衡或妥协,河流健康只能是相对意义上的健康,不同背景下的河流健康标准实际上是一种社会选择。张洪波等给出河流生态水文系统健康的五点标志。赵彦伟等对城市河流生态系统健康提出了包含物理结构与河岸带等5大要素的指标体系及其“很健康、健康、亚健康、不健康、病态”5级评价标准,明确各河流生态系统的健康状况及限制因子,为其保护、维育与修复提供了决策依据。综上所述,可以看出我国河流健康研究更注重人水关系探讨,重点在平衡利益冲突、满足人类社会需求等方面,加之水环境恶化问题普遍严重,河流健康评价仍主要是借助化学分析手段和少量生物监测评估的水质状况,较少从系统健康的角度认识河流健康,缺乏流域和水系案例研究,多是研究单条河流或湖泊为主。河流健康评价理论研究成果丰硕,而作为有效手段用于指导并完善河流管理的研究仍处于探索阶段,因此,选择不同典型自然地理区域,具体情况具体分析,构建体现地域特色和管理要求的河流健康理论与方法,广泛开展健康评价实践,是我国河流管理研究的重要方向之一。

总体而言,国外的河流健康评价多侧重于对河流生态状况的评价,是以河流生态系统作为评价的对象;国内的研究较晚,也主要侧重于借助物理、化学手段以及少量生物监测评估河流水质状况。但近年来,一些研究已经逐渐超出了河流生态健康的范畴,开始从河流系统健康的角度认识河流状态,进行河流健康评价,这意味着河流健康评价正在从河流生态系统健康向河流流域系统健康方向发展。这为流域水系水资源健康调控奠定了较好的基础。

1.2.3 水系生态健康调度研究进展

20 世纪初,随着人类对河流开发利用力度的加大,在河流上修建了大量的水库和水电站,出于对修库建坝的需要,河川径流理论得到了快速发展,并开始应用经验的方法,充分利用水库进行洪水调节,从而开始了对于闸坝调度的研究。1926 年,苏联莫洛佐夫提出水电站水库调配调节的概念,随后,以水库的调度图为指导的水库调度方法逐步发展形成。调度图调度具有简单直观、概念清晰以及可靠性高的优点,至今许多水库的调度仍采用这种方法。20 世纪 40 年代,Masse 又提出优化调度的概念,随后许多专家学者就此进行了大量的研究。同期,美国开始强调河川径流作为生态因子的重要性。从此,随着系统工程理论及优化模型的引入以及电子计算机技术及实时控制技术的迅速发展,闸坝调度理论和应用取得了长足的发展。

人们对生态调度的研究最先是关注河流生态需水量开始的。在具体生态需水理论研究方面,1971 年,Schlueter 首先提出水利工程不但要满足人类对河流资源的利用要求,而且要同时注重维护和创造河流的生态多样性。1982 年,Junk 在研究 Amazonian 洪泛区的物种多样性时,第一次提出生态洪水脉冲的概念。在生态需水与闸坝调度相结合方面,Richter 等指出恢复河流生态流量可以通过改变大坝运行规则来实现,并针对大坝的不同用途制定了与之相适应的生态调度准则。Hughes 建立了满足生态需水的水库调度模型等。Johnson Brett 等提出要减轻大坝对河流生态所产生的负面影响,满足下游河道的生态需水要求,起码在短期内人们应努力集中于改变现有的水库调度方式,通过合理的水库调度,使大坝对河流的影响尽可能地降到最低。2005 年,墨尔本大学对河道最小生态流量及河流脉冲事件的优化调度进行了研究。

在生态调度实践应用方面,1937 年,美国的农垦法明确提出,中央河谷工程(CVP)的大坝与水库“首先应用于调节河流、改善航运和防洪,其次用于灌溉和生活用水,第三是用于发电。”最近 CVP 对法规进行了修订,增加了满足鱼类与野生动物需要的内容。从 1959 年在伏尔加河上修建伏尔加格勒大坝时起,俄罗斯为确保大坝下游农业灌溉用水量、放水过程线及放水期限和鱼类产卵场淹水的需要,每年汛期需根据气象部门提供的水量预报以及对国民经济发展的情势预测,模拟春汛向大坝下游进行目的性放水,同时组织专家开展了放水可行性研究。1970—1972 年南非潘勾拉水库通过水库调整闸坝生成人造洪峰,为鱼类产卵创造条件。到 20 世纪 80 年代后,以美国及欧洲等为代表的一些发达国家的管理和决策部门针对大坝对河流产生的诸多不利影响,在保证大坝航运、防洪、发电等原有重要功能的同时,对原来的水库调度运行方式进行调整,以达到改善区域水质、增强河流娱乐功能和为经济发展提供重要保证的目的。1978 年卡特总统提出了改革水资源政策的咨文,指示改善现有工程的运行和管理,以保护江河用水。田纳西流域管理局(简称 TVA)