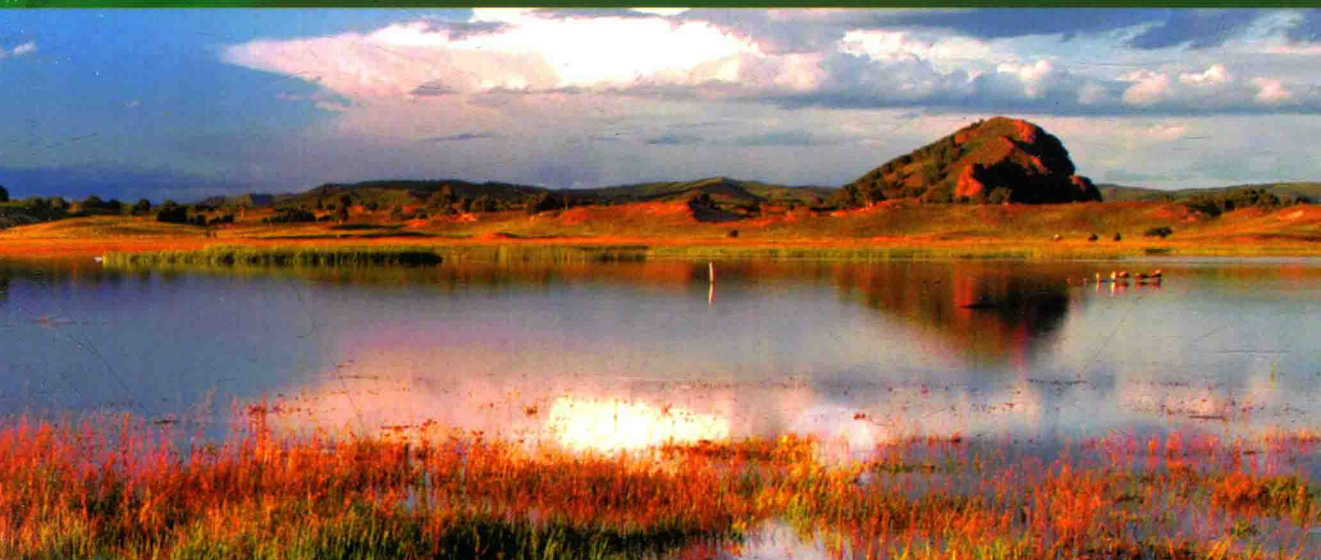




# 水系生态建设关键技术 研究与应用

● 齐春三 郑良勇 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 水系生态建设关键技术 研究与应用

© 齐春三 郑良勇 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书从研究现状、基础理论、实际应用等方面对水系生态建设技术和模式进行了深入探讨。在分析水系生态建设理论和健康评价技术的基础上,研究了生态河道治理、水土流失防治、雨洪水资源利用、水系连通调度、湿地修复等水系生态建设相关的技术。

本书适用于水利及相关专业院校教师及研究人员,相关领域科研机构、科研人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

水系生态建设关键技术研究与应用 / 齐春三, 郑良勇编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2015. 10  
ISBN 978-7-5170-3808-5

I. ①水… II. ①齐… ②郑… III. ①水系—水环境—生态环境建设 IV. ①X143

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第270722号

|      |                                                                                                                                                                                                                   |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 水系生态建设关键技术研究与应用                                                                                                                                                                                                   |
| 作 者  | 齐春三 郑良勇 编著                                                                                                                                                                                                        |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 68367658 (发行部) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>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  | 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司                                                                                                                                                                                                    |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 9.75印张 232千字                                                                                                                                                                                     |
| 版 次  | 2015年10月第1版 2015年10月第1次印刷                                                                                                                                                                                         |
| 印 数  | 0001—1000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

在近十年左右的时间中，很少有术语能够像生态文明一样引起各级政府、学术界和一般公众越来越多的关注和重视。在党的十七大报告中明确提出：“建设生态文明，保护土地和水资源，建设科学合理的能源资源利用体系，重点加强水、大气、土壤等污染防治，改善城乡人居环境，加强荒漠化和石漠化治理，促进生态修复。”党的十八大报告则提出：“建设生态文明，是关系人民福祉、关乎民族未来的长远大计。面对资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的严峻形势，必须树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念，把生态文明建设放在突出地位，融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程，努力建设美丽中国，实现中华民族永续发展。”

水是生命之源、生产之要、生态之基。水系生态建设是生态文明建设的重要组成部分。自古以来，人类便依山而作、择水而居。人类的生存发展离不开水，水在人类社会的发展进程中起到了无可替代的重要作用。然而，随着社会经济的不断进步，人类对自然资源的掠夺越来越疯狂。水作为自然资源的重要组成部分，也难以幸免。由此导致了水质污染、河流断流、生态退化、地下水位下降、海水入侵、水土流失、水系生态退化、生物多样性减少等一系列问题，严重制约了人类社会经济的可持续发展。因此，开展水系生态修复与建设工作对于改善水系生态环境、促进人水和谐发展具有重要意义。

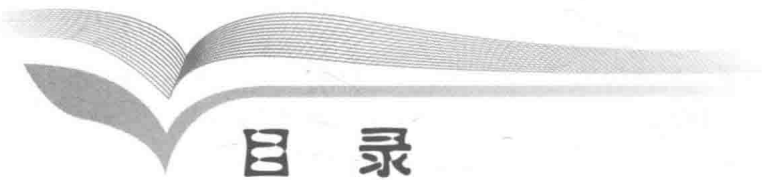
水系生态建设是一项复杂的系统工程。为了更好地研究水系生态建设关键技术，在山东省科技发展计划项目（项目编号：2011GGH21606）的支持下开展了相关研究，本书是在课题研究成果的基础上，进行必要的补充完善整编而成。书中以山东半岛蓝色经济区作为研究区域，针对水系生态建设中亟待解决的关键问题，在深入分析研究水系生态系统基本特征的基础上，提出了山东半岛蓝色经济区水系生态建设基础理论、水系生态健康评价指标体系和水系生态建设技术体系，并在此基础上凝练总结提出相应的水系生态建设模式，从而形成一套相对完整的水系生态建设技术体系，以期为全国水系生态建设提供些微参考和借鉴。

全书由齐春三、郑良勇统稿，其他参与本书编写的有王树荣（第8章）、刘德东（第7章）、宋炜（第6章）、张涛（第3章）、李楠（第2章）、刘国印（第9章）、关科（第10章）以及翟丽丽、孟令宽、陈淑媛等同志。在本书编写过程中，得到了山东省工程勘察设计大师刘长余研究员以及山东省水利厅科技与对外合作处、山东省水利勘测设计院等有关单位领导的支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促、编者水平有限，错误不妥之处在所难免，恳请读者批评斧正。

作者

2015年8月



# 目 录

## 前言

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 第1章 绪论                | 1  |
| 1.1 国内外研究现状           | 1  |
| 1.2 技术路线              | 10 |
| 1.3 研究结论概述            | 11 |
| 第2章 基础条件分析            | 13 |
| 2.1 自然经济概况            | 13 |
| 2.2 水系生态现状            | 15 |
| 2.3 制约水系生态良性发展的因素     | 15 |
| 第3章 水系生态系统健康评价技术研究    | 17 |
| 3.1 水系生态系统健康的内涵       | 17 |
| 3.2 水系生态系统健康评价体系      | 20 |
| 3.3 小清水系生态健康评价        | 29 |
| 第4章 水系生态建设理论研究        | 34 |
| 4.1 水系生态建设理论基础        | 34 |
| 4.2 人工诱导自设计水系生态建设理论   | 35 |
| 4.3 半岛蓝色经济区水系生态建设技术体系 | 37 |
| 第5章 生态河道治理技术和模式研究     | 43 |
| 5.1 生态河道治理策略          | 43 |
| 5.2 生态河道治理技术和模式       | 43 |
| 5.3 半岛蓝色经济区生态河道绿化植物   | 49 |
| 第6章 水土流失防治技术和模式研究     | 70 |
| 6.1 水土流失现状分析          | 70 |
| 6.2 水土流失防治技术          | 73 |
| 6.3 水土流失综合治理模式        | 74 |
| 6.4 半岛蓝色经济区水土保持植物     | 77 |

第7章 雨洪水资源利用技术和模式研究 ..... 92

7.1 雨洪资源利用的必要性 ..... 92

7.2 山东半岛蓝色经济区雨洪资源利用现状 ..... 93

7.3 山东半岛蓝色经济区雨洪资源利用思路 ..... 95

7.4 山东半岛雨洪资源利用技术研究 ..... 96

第8章 水系连通及调度利用技术和模式研究..... 120

8.1 水系连通的主要功能和作用 ..... 120

8.2 水系连通建设的准则和模式 ..... 121

8.3 半岛蓝色经济区重点连通工程研究 ..... 125

第9章 半岛湿地生态功能修复技术和模式研究..... 131

9.1 半岛湿地类型及生态现状 ..... 131

9.2 半岛湿地生态系统的功能与价值 ..... 132

9.3 半岛湿地生态修复技术和模式 ..... 134

第10章 海陆界面水系生态治理技术和模式研究 ..... 138

10.1 海陆界面水系生态现状及存在的主要问题 ..... 138

10.2 海陆界面水系生态治理技术和模式 ..... 140

参考文献 ..... 148

# 绪 论

## 1.1 国内外研究现状

生态建设是指对受干扰和破坏的生态系统根据生态学原理进行生态修复和重建。水系生态建设是指专门针对江、河、湖、海、水库、渠道、池塘等区域受损水系生态系统采取工程措施和生物措施进行生态修复和重建的过程。水系生态建设是一门综合技术,融合了生态学、水力学等相关学科的理论和技术,包括水生生态学、生态水文学、水文生态学、生态水力学、生态工程学与生态水利工程学等。

生态修复是生态建设的关键环节之一。所谓生态修复是指对生态系统停止人为干扰,以减轻负荷压力,依靠生态系统的自我调节能力与自组织能力使其向有序的方向进行演化,或者利用生态系统的这种自我恢复能力,辅以人工措施,使遭到破坏的生态系统逐步恢复或使生态系统向良性循环方向发展;主要指致力于那些在自然突变和人类活动活动影响下受到破坏的自然生态系统的恢复与重建工作,恢复生态系统原本的面貌等。

水系生态修复是利用生态系统原理,修复受损伤的水体生态系统的生物群体及结构,重建健康的水生生态系统,并能使生态系统实现整体协调,自我维持、自我演替的良性循环。

目前,国内外有关学者对水系生态建设进行了大量的研究,在水系生态修复理论、水系生态健康评价、水土流失治理、水资源优化配置、生态湿地建设、海水入侵防治等研究领域取得了一些成果。

### 1.1.1 国内外研究进展

#### 1.1.1.1 国外研究进展

##### 1. 水系生态修复理论

河流生态修复是利用生态系统整体性原理,采取各种方法修复受损伤的水体生态系统的生物群体及结构,重建健康的水生生态系统,修复和强化水体生态系统的主要功能,并能使生态系统实现整体协调、自我维持、有序演替的良性循环。

20 世纪 50 年代,德国首先提出了“近自然河道治理工程”的概念,注重河道的综合治理,强调植物、动物和环境的相互制约和协调作用。之后,世界各国对以追求人与自然和谐相处为目标的生态水利理论与技术展开了积极地探索。发展至今,概括起来主要有以下几点。

(1) 德国的近自然河道治理工程。以此为基础开展实施了莱茵河行动计划。

(2) 英国的河道修复工程。英国河道修复中心于 20 世纪 90 年代中期成立,旨在为河



道的生态修复提供咨询和服务。其制定的“生物多样性计划”体现了可持续的洪泛区保护与生物多样性保护的统一。

(3) 美国的自然河道设计技术。利用此技术设计实施的基西米河的生态恢复工程。

(4) 日本的近自然工事。近年来,日本逐步改造已建河道的混凝土护岸,在理论、施工及高新技术的各个领域丰富发展了“多自然型河川工法”。

(5) 随着技术方法的全面成熟,流域尺度下的河流生态修复工程逐渐增多。美国已经开始对密西西比河、伊利诺伊河和凯斯密河流域进行了整体生态修复,并规划了未来20年的河流修复计划。

国外河流生态修复多是河道形态的修复,项目多集中于生态修复材料的开发及生境斑块的设计和构建上。而关于生态修复中的生态学过程和机理的研究较少,缺乏证明受污河流生态系统在修复过程中是如何进行自我调节的理论和实验体系。<sup>[1]</sup>

## 2. 水系生态健康评价

生态系统健康是一个比较新的研究领域,目前学者们的理解不统一,河流生态健康的涵义也尚不明确。Karr将河流生态完整性当作健康,Norris等认为应考虑人类福利要求。这些关于河流健康涵义的理解都只是侧重单方面,由于河流生态健康和人类的发展有着密切的关系,在对河流健康定义时,必须考虑人类和社会的价值。Meyer的阐述相对全面,认为河流生态系统应既有生态系统功能与结构,还应包含人类与社会的价值。目前,这种定义为大多数学者认同。<sup>[2]</sup>

## 3. 近自然河道营造技术

近自然河道治理的概念是Seifert于1938年提出的,到20世纪50年代,德国创立了近自然河道治理工程理论,认为河道的整治要植物化和生命化,从而使植物栽植首先作为一种措施应用到河道治理当中。随着景观生态学的发展,多数学者认为近自然治理的实质就是景观生态学与荒溪治理学的结合,其关键在于尽量保持河流的自然状况或原始状态,强调生态多样性和生境多样性的重要性<sup>[3-4]</sup>。

近自然河道应扩大作为生物生存区域的水面和绿化带。即使河流具备生态多样性的环境条件,如果这样的区段很短,并且是孤立存在的话,其中的生态系统会很贫乏,同样威胁到种群的生存和繁衍。因此,必须将这样的区段尽量延长,跨越上下游之间,甚至扩展到支流,还要辟出绿道,在森林和原野上布下一张由流水和绿带编织成的网络。只有这样,其中的生物才有可能自由迁徙,种群不断增加,形成相对稳定的生态系统。<sup>[5]</sup>

## 4. 水资源优化配置

20世纪40年代Masse提出了水库优化调度问题;Watkins等<sup>[6]</sup>介绍了一种伴随风险和不确定性的可持续水资源规划模型框架,建立了有代表性的水资源联合调度模型;Jha MK等<sup>[7]</sup>考虑了水的多功能性和多种利益的关系,强调决策者和决策分析者间的合作,建立了Guilderland Dolente的水资源量分配问题的多层次模型,体现了水资源配置问题的多目标和层次结构的特点;Zsgona A等<sup>[8]</sup>基于大系统理论,建立了多水库联合调度模型。

随着水资源研究新技术的不断出现,水资源量与质统一管理理论研究不断深入,其管理方法的研究也有了较大发展。尤其是决策支持技术、模拟优化的模型技术和资源价值的定量方法等的应用使得水资源量与质管理方法的研究有了更好的前景<sup>[9]</sup>。Afzal, Javaid



等(1992)针对巴基斯坦某地区的灌溉系统建立了线性规划模型,对不同水质的水量使用问题进行优化。在劣质地下水和有限的运河水可供使用的条件下,模型能得出一定时期内最优的作物耕种面积和地下水开采量等成果,在一定程度上体现了水质水量优化配置的思想<sup>[10-11]</sup>。Watkins, David W Jr (1995)介绍了一种伴随风险和不确定性的可持续水资源规划模型框架,建立了有代表性的水资源联合调度模型。此模型是一个二阶段扩展模型,第一阶段可得到投资决策变量,第二阶段可得到运行决策变量,运用大系统的分解聚合算法求解最终的非线性混合整数规划模型;R A Fleming 和 R M Adams (1995)建立的地下水水质水量管理模型,建模以经济效益最大为目标,考虑了水质运移的滞后作用,并采用水力梯度作为约束条件来控制污染扩散;UPmanuLaU 等(1995)建立的地表水与地下水联合运用的多目标管理模型,模型中将两类水的处理费用纳入管理目标;Wong, Hugh S 等(1997)提出支持地表水、地下水联合运用的多目标多阶段优化管理的原理和方法,在需水预测中考虑了当地地表水、地下水、外调水等多种水源的联合运用,并考虑了针对地下水恶化的防治措施,体现了水资源利用和保护之间关系<sup>[12-14]</sup>。

### 5. 雨洪水利用研究

美国的雨洪利用以增加地面入渗为宗旨,建有大量的人工渗滤田,来下渗雨洪水。另外在建设雨洪利用工程的同时,还制定了促进雨洪利用的管理条例和法规以保证雨洪利用的实施。地下水库在美国的发展也较快,并通过对地下含水层进行人工补给来恢复湿地,发挥雨洪的生态效益。美国大型的调水工程有十多处,从工程规模、调水量、调水距离和工程效益来衡量,最有代表性的是加利福尼亚州(以下简称加州)的“北水南调”工程,加州全州年径流量 870 亿  $\text{m}^3$ ,其中 75% 在北部,而需水量的 80% 在南部,为解决南部的缺水问题,加州建设了总长 960km、年调水量 50 亿  $\text{m}^3$  的调水工程,保证了以洛杉矶市为中心的 1700 多万人的用水。

日本在 20 世纪 60 年代兴建了路面雨水收集系统和大量蓄洪池来收集雨洪水,在城市中还专门建设了下洼式绿地来下渗城市洪水,从建成当年起,日本就要求新建公共建筑必须设置雨洪就地下渗设施。1992 年颁布的“第二代城市地下水总体规划”,将雨水收集塘和透水地面建设纳入了城市规划的范围。

德国的雨水利用技术也十分先进,其生产的雨水收集、过滤、储存、渗透产品已达到标准化、产业化程度;其雨水利用的实施也有专门法律的保证,要求国内无论是工商业还是居民建筑均要有雨水就地处置设施,若无相关设施,政府会对建筑物征收额外的雨水排放税等。

### 6. 海水入侵防治研究

海水入侵已经给沿海城市的经济建设与社会发展带来了严重危害。准确划分海水入侵的范围,预报海水入侵动态发展,是当今非常重要的研究课题。海水入侵模型研究中,过渡带模型能较准确地刻画海水入侵态势。

海岸带海水入侵过渡带数值模型研究最早由 Pinder 等(1970)给出,他们提出了 Herry 模型的有限元数值解。Herry 模型是 Herry 于 1964 年首次发表的承压稳定流动条件下剖面浓度分布的解析解,并首次指出海水的环流现象。此后 Segol, Pinder 和 Gray 用有限元法求解了非稳定流状态下盐分浓度在剖面上的二维分布。Heinrich 等提出了用逆



风式有限元法求解对流占优势的海水入侵问题的建议。1987年 Huyakorn 等探讨了海咸水入侵三维模型的有限元法。这些研究均属理论上的方法性探讨,算例是理想化的,如矩形研究域、潜水作承压水处理等,而用于野外实例的计算则极为罕见,仅有的也是把实际条件大大简化了,如 Andersen 和 Huyakorn (1982) 等在美国佛罗里达州北皮尼拉斯郡研究把基底起伏含水层中的  $x-z$  二维模简化为矩形,三维模型简化为正六面体。Gupta 和 Yapa 研究泰国曼谷附近海水入侵用的仅是对流—弥散模型,忽略了浓度对流速的影响。<sup>[16]</sup>

Frind<sup>[17-18]</sup>就剖面二维承压水层中的海水入侵问题给出了一种比较有效的有限元格式,将计算结果与 Pinder 等和 Segol 等的结果进行了比较和分析,并导出了顶板向海底延伸的越流含水层中海水入侵的剖面二维有限元解,用直接积分和迭代方法构造出能够求解大时间步长的有效数值格式。Reilly 等<sup>[19]</sup>用有限元模拟了二层结构滨海含水层中的剖面二维海水入侵问题,着重讨论了弥散系统张量的不同表达形式与流向的相关性对计算结果的影响。Kakinuma 等<sup>[20]</sup>假定弥散系数为常量,用三维有限元方法分别模拟了 Naka 和 Kiki 两个承压含水层中地下不稳定流动条件下的海水入侵问题。Galeati 等提出了关于潜水含水层中的一种隐式的欧拉—拉格朗日有限元格式,并讨论了含水层的各向异性和地下建筑物对海水入侵的影响。

### 1.1.1.2 国内研究现状

#### 1. 水系生态健康评价研究

水域生态系统包括水域生物群落及其水环境,水环境是河流生物生存和发展的物质基础,而水生生物也会反作用于水环境,净化并维持水域水环境的良好状态,两者相互促进,相互依赖,共同维护水系健康。水域必须能为人类社会提供服务,这也是人类依水居住的原因,在不危及水系生存的情况下,水域应具有供水、航运、景观等社会功能;水域社会功能的实现,首先主要求得自身的生存,只有水域处于良好的状态,才能提供各种应有的功能。水域健康的目标就是要使得两者达到和谐一致,既开发利用了水系,又不威胁到其自然状态,最终实现综合价值的最大化。

水域健康评价的方法从原理上可分为两类:一类是预测模型法,有 RIVPACS 和 AUSRIVAS 等。该法是假定河流处于原始状态,预测其应具有的生物量并和实测值进行对比,根据对比结果评判河流的健康状况。但随着社会的发展和人类的进步,水域的原始状态不可能达到,也没有必要达到,且其关注的主要是水生生物,没有涉及到河道、人类福利等方面的内容,因而这种方法的使用受到其自身缺陷的限制。另一类是多指标评价法,有 IBI 法、RCE 法、ISC 法等。该类型方法选用了表征水域健康生命的指标,根据具体水域的特殊状况计算出各指标的现状值,然后采用合适的评价模型对水域进行综合评价。评价结果受指标标准和权重的影响较大,且忽视了单个指标在评价结果中所起的作用,但这一方法能较全面客观地反映水域的真实状态,是一种使用较为普遍的方法,也是水域健康评价方法发展的一种趋势。

#### 2. 生态水利工程技术研究

生态水工学的产生是对传统水利工程的反思,是满足人类社会需求的同时,兼顾水域生态系统健康与可持续需求的原理和技术方法的工程学。



水域生态修复是指通过适度人工干预,促进水域生态系统恢复到较为自然状态的过程,在这种状态下生态系统具有可持续性,并可提高生态系统价值和生物多样性。20世纪80年代阿尔卑斯山区相关国家——德国、瑞士、奥地利等国,在山区溪流生态治理方面积累了丰富的经验。随后,莱茵河“鲑鱼——2000”计划实施成功,提供了以单一物种目标的大型河流生态修复的经验。90年代欧洲的多瑙河、美国的基西米河及密苏里河的生态修复规划实施,标志着大型河流的全流域综合生态修复工程进入实践阶段。1988年成立了国际生态修复协会(Society for Ecological Restoration International),1999年成立了欧洲河流修复中心(European Center for River Restoration, ECRR),迄今已经召开了4届国际研讨会。2006年,亚洲河流修复网络成立,我国也成立了相应的河流生态修复技术协作网。我国水利部于2004年启动了水生态系统保护与修复工作,目前全国已经开展了10个试点项目,同时开展了一批河流生态修复科研和推广项目,取得了较大的进展。

对水域生态系统结构、功能和过程的理解,是水域生态修复的基础。因此,有关水域生态系统的河流泥沙过程、地貌过程、水文过程、生物过程以及生态系统相互关联的整体性研究,成为水域修复的应用基础性研究的重要方向。水利水电工程包括水坝、防洪工程、跨流域调水工程的生态影响机理分析是重要的研究领域。对于目标水域关键生态胁迫因子的识别方法研究也取得了较大进展。考虑到水域生态修复大量存在的不确定性因素,水域修复的适应性管理方法,已成为研究者关注的热点。在水生态监测与评估方法方面,包括水生态系统的综合评估方法、河流栖息地评估方法、河流健康评估方法等研究领域都十分活跃。欧盟颁布的《水框架指令》代表了水资源与水环境评估体系的国际水平。我国在河流健康评估方法研究方面尽管成果不少,但在概念上还存在着若干争议。

在水利水电工程生态影响的评价方法方面,发达国家大多是以物种或生境为对象,通过生境评价方法进行评估。我国目前已有的相关技术规范与导则主要是针对单一工程,在单一工程评价中又局限在诸如濒危、珍稀、特有物种保护和水温等局部因素问题,忽视了水文情势变化、河流地貌变化对栖息地的影响等众多因素,更缺乏对于河流生态系统完整性影响的总体评价。由于在评价的时间尺度、空间尺度和评价内容等方面均存在较大缺陷,现行的相关技术规范与导则还难以满足工程规划生态影响评价的要求。<sup>[21-22]</sup>

兼顾生态的水库调度方法,是近年来国内外一个活跃的应用研究课题。这种水库调度方法是指在实现防洪与兴利多种社会经济目标的前提下,兼顾河流生态系统需求的水库调度方法。这个问题的基本前提:认识到人工径流调节对水域生态系统的不利影响,采取改善水库调度的方法,部分恢复自然水文情势以改善水库上下游的生态系统结构与功能。兼顾生态的水库多目标调度方法是一个非线性、多目标、多约束的优化决策问题。其中生态目标是多样的,包括保护水生生物、控制有害物种、河口生态维持改善水质、泥沙输移等。胡和平等提出了基于生态流量过程线的水库生态调度方式。将此生态流量过程线作为水库调度流量变化的约束条件之一,建立水库生态调度模型,求出相对最优解。在技术开发方面,河流栖息地保护与加强技术、岸坡防护生态工程技术、受损水体的生物修复技术以及水库生态修复技术等,国内外都有长足的进展和应用。



### 3. 水土流失防治技术研究

水土流失不仅使水土资源遭到严重破坏,作为载体,是造成农药、化肥、畜禽养殖、农村垃圾等面源污染的重要原因。目前全国 1/3 以上的国土面积存在水土流失问题,江河湖泊普遍存在面源污染问题,不少地区的生态环境已超出其承载能力。据中国水土流失与生态安全科学考察估算,每年水土流失给我国带来的经济损失相当于 GDP 的 2.25% 左右,带来的生态环境损失难以估算。

水土保持生态修复是一项复杂的系统工程,已有的经验表明,应统筹做大以下六个方面:一是退耕还林还草、以粮代赈,这是生态修复的突破口;二是封山禁牧、舍饲养畜,这是生态修复的关键措施;三是综合治理、以小促大,这是生态修复的根本方法;四是调整农村产业结构、持续发展;五是生态移民、保护环境;六是发展替代能源,保护植被。

### 4. 雨洪水资源利用研究

雨洪泛指一个区域内的天然降水及其在本地形成的洪水和流经本区域的过境洪水。雨洪资源利用是将雨洪作为一种资源,运用工程和非工程的措施将常规情况下会被污染、泛滥成灾、排泄入海的雨洪水在保证区域防洪安全、经济可行、生态友好的前提下,部分地转化成存蓄于内陆地表或地下开采利用的水资源的过程。雨洪资源利用亦称雨洪资源化,其利用对象包括雨水和洪水两个方面。在表述上有雨水利用、洪水资源利用等,都属于雨洪资源利用的范畴。一般来讲山区集雨工程和城市集雨设施等对雨水的收集利用称为雨水资源利用;水库、河系、蓄滞洪区对洪水的拦蓄、调度、分流下渗等称为洪水资源利用。目前国内雨洪资源利用多集中于大城市,以城市雨洪利用为特点,如北京、上海、深圳等城市,已经开始了雨洪资源利用的实践。北京市水务局与德国埃森大学合作的“北京城区雨洪控制与利用研究”项目于 2000 年启动,该项目旨在吸收德国在雨洪利用技术方面的先进经验。北京市住宅、公共建筑区已建成了多处雨洪利用工程,从 2003 年以后要求新建建筑物雨洪利用工程应与主体工程同时设计、同时施工、同时使用,这其中就包括国家体育场“鸟巢”<sup>[15]</sup>。

深圳市分区域进行雨洪利用,在建设区收集的雨洪水直接作为景观、绿化、扫洒用水;在生态保护区进行雨洪的间接利用,以调蓄和下渗雨洪资源为目标;利用河流进行雨洪的综合利用,兼有收集、调蓄、下渗雨洪的效果。除此之外,深圳市还实施了雨污分流工程,利用雨洪资源改善了沿河生态环境。

### 5. 水系连通和调度利用技术研究

现代水网是现代水利的核心基础和根本标志。所谓现代水网,是指在现有水利工程架构的基础上,以现代治水理念为指导,以现代先进技术为支撑,通过建设一批控制性枢纽工程和河湖库渠联通工程,将水资源调配网、防洪调度网和水系生态保护网“三网”有机融合,使之形成集防洪、供水、生态等多功能于一体的复合型水利工程网络体系。

水系连通重点在维持水流连续性,水流连续可以理解为水体的径流量在满足一定需求的情况下,还有一定的水量,并且保持一定的流动性。水流连续性是水系连通的内在需求,在地表水循环过程中扮演着重要的角色,是水循环的重要组成部分。水流的连续性还表明河流健康生命的存在性,一条健康的河流必须保持能满足一定需求的水流,没有水流,就不称其为河流,河流生命就消亡;水流不能满足一定的需求,该河流就不能称为健



康的河流,连续而适量的河川径流是河流生命存在的重要标志。水系的连通状况是河流与之相连接的湿地之间的水流联系的外部条件,表明水流连通通道的通畅性。通道通畅性包括两种情况:一是通道的过流能力,主要体现在对洪水的排泄能力方面;二是通道是否受人工建筑物阻隔,主要体现在水流通道、生物通道、航运通道是否受阻等方面<sup>[23]</sup>。

#### 6. 生态湿地建设技术研究

滨海湿地是近海地区生物多样性赖以存在的基础,也是当地社会可持续发展与否的关键所在。针对滨海湿地存在的问题,应明确区分生态系统所受的胁迫状况,辨识出最危险的组分和最应该重视的问题。应强化滩涂湿地保护管理,改造滨海湿地生态环境,建立滨海湿地生态补偿机制,同时要实施动态保护,建立湿地生态系统网络监测体系。健康的生态系统应表现出多功能性,健康的滩涂湿地不但具有提供特殊功能的能力,而且具有维持自身有机组织的能力,即从各种不良的环境扰动中自行恢复的能力。湿地的监测是了解生态系统变化的重要手段和窗口,通过连续不断地监测,可以认识湿地生态系统现状及变化规律,为调整湿地开发利用模式提供科学依据。滨海湿地资源的生态环境监测可采用先进的“3s”技术手段,建立湿地数据库,利用GIS强大的空间分析功能,对滨海湿地进行空间分析,建立预测模型和指标模型,通过预定模型进行信息的运算,逐步修正和完善,以正确指导沿海湿地资源的开发利用,促进社会经济与环境协调发展<sup>[24]</sup>。

#### 1.1.1.3 水系生态建设关键问题研究

##### 1. 生态需水量

早期生态环境需水研究主要集中在河流生态环境需水方面,主要是针对河道枯水流量和鱼类水生动物等所需水量的研究<sup>[25-26]</sup>。20世纪70年代以来,澳大利亚和南非等国家都开展了许多关于鱼类生长繁殖、产量与河流流量关系的研究,提出了许多计算和评价方法。随着人们对景观旅游业和生物多样性保护的重视,又提出了景观河流流量和湿地环境用水以及海湾—三角洲出流的概念,但在当时河流管理缺乏科学的理论技术支撑<sup>[27]</sup>。

随着河流污染问题的出现,以及人类活动对河流生态系统结构和功能破坏的加剧,开始了对生态可接受流量范围的研究,并没有体现生态系统的完整性。直至20世纪90年代,随着国际水文计划等大项目的实施,研究对象才由过去仅关心物种(如鱼类和无脊椎动物等)及河道物理形态的研究,扩展到维持河道流量的研究,包括最小流量和最适宜流量,而且还考虑了河流生态系统的整体性,其研究方向也不再局限于河流生态系统,已扩展到了河流外生态系统<sup>[28-31]</sup>。

我国对生态环境需水的研究始于20世纪80年代后期,汤奇成<sup>[32]</sup>于1989年在分析塔里木盆地水资源与绿洲建设问题时首次提出了生态用水概念,即为保证塔里木盆地各绿洲的存在与发展,必须保护各绿洲的生态环境,而生态环境的保护也离不开水,这部分水可通称为生态用水。1995年,汤奇成<sup>[33]</sup>再次就生态用水问题进行了相关研究,指出针对干旱区人口增加、灌溉面积扩大、生态环境突出等问题,应该在水资源总量中专门划出一部分作为生态用水,其目的使绿洲内部及周围的生态环境不再恶化。1993年,由水利部组织编制的《江河流域规划环境影响评价》(SL 45—92)行业标准中,将生态环境用水正式作为环境脆弱地区水资源规划中必须予以考虑的用水类型,但该阶段生态环境需水的概念、理论和计算方法等都处于萌芽状态。中国工程院“21世纪中国可持续发展水资源战



略研究”项目组发表的《中国可持续发展水资源战略研究报告》中提出<sup>[34]</sup>,我国水资源的总战略必须以水资源的可持续利用支持经济的可持续发展,建议从防洪减灾、农业用水、城市和工业用水、生态环境建设用水等8个方面实行战略性改变,并界定了生态环境用水的概念、范畴及分类,该成果对我国水资源规划及其合理配置具有十分重要的指导意义,标志着生态环境需水的研究在我国已全面展开。许多学者<sup>[35-39]</sup>从不同方面对生态环境需水如河流、湿地、湖库、地下水、河口等进行了广泛研究。

## 2. 湿地修复技术

湿地是由喜水生物和过湿环境构成的特殊自然综合体,它位于大气圈、岩石圈及生物圈的交汇处,是各种能量和物质交换和作用的场所。它是地球上重要的生存环境和生态系统,具有稳定环境、物种基因保护及资源利用的功能,被誉为“自然之肾”“生物基因库”和“人类摇篮”。因而在世界自然保护大纲中,湿地与森林、海洋一起并列为全球三大生态系统。

自从有污水收集系统以来,天然湿地就成为最方便的污水排放场所。运用人工湿地处理污水可追溯到1903年,英国约克郡湿地被认作世界上第一处用于处理污水的人工湿地,一直连续运行到1992年<sup>[40]</sup>。1953年,德国的 Seidel 和 Kichuth 在其研究工作中发现芦苇能去除大量有机物和无机物,进一步试验发现,一些污水中细菌(大肠菌、肠球菌、沙门菌)在通过种植的芦苇时消失。试验表明,芦苇及其他高大植物能从水中去除重金属和碳水化合物。20世纪60—70年代,这些实验室观察开始推广至许多大规模试验用以处理工业废水、江河水、地面径流和生活污水。而人工湿地污水处理系统在世界各地逐渐受到重视并被运用,还是在 Kichuth 提出根区法(Root Zone Method)理论之后开始的<sup>[41]</sup>。根区法理论强调高等植物在湿地污水处理系统中的作用,首先是它们能够为其根周围的异养微生物供应氧气,从而在还原性基质中创造了一种富氧的微环境。

荷兰于1967年开发了一种现称为 Lelystad 工艺的大规模湿地污水处理系统,随后这种湿地在荷兰大量建成<sup>[42]</sup>。

在北美20世纪70年代,利用天然湿地的同化能力,对不同设计的人工湿地进行试验。最初人工湿地主要用于生活污水和矿山酸性废水的处理,现在也用于城市污水和各种工业废水的二线处理等<sup>[43]</sup>。

历经半个世纪的发展,湿地科学已由萌芽走上学科框架构筑阶段,并成为当前的热门研究领域。美国和加拿大在20世纪80年代完成本国湿地调查、编目的基础上,研究重点转向湿地分类、湿地生态系统及形成过程的研究,尤其重视湿地环境保护的人工控制。目前,在美国有600多处人工湿地工程用于处理市政、工业和农业废水。在欧洲应用较多的则是地下潜流系统,特别是在一些东欧国家应用较广泛<sup>[26]</sup>。在系统中种植有芦苇、菖蒲、香蒲等湿地植物,为了保证潜流,绝大多数系统还采用砾石作为填料。此类系统趋向于对近1000人口当量的乡村级社区进行二级处理,北美则趋向对人口较多的地区进行高级处理,在澳大利和南非则用于处理各类废水<sup>[44]</sup>。俄国、芬兰等在湿地演化与泥炭利用方面一直走在世界前列,当前也大力开展生态保护和环境变化的研究。“国际湿地公约”及“人与生物圈计划”等都推动湿地保护不断强化。

我国湿地研究起步于20世纪50年代,于1958年中国科学院等科研院所设立专门的



沼泽研究机构,开始进行湿地初步性研究;在70年代,东北师范大学建立了全国第一个专门性泥炭研究机构;在80年代以前,中国的湿地停留在宏观植被生态学的水平,不同类型的湿地生态系统研究比较薄弱;80年代以后,则进入湿地生态系统研究<sup>[45]</sup>,解剖其生命系统与非生命系统的内部结构;1986年建成专门从事沼泽野外生态研究的三江平原沼泽生态实验站基地,以及东湖生态站、太湖生态试验站、海北生态站等野外台站;至90年代才完成全国湿地初步调查。中国于1992年加入《国际湿地公约》,林业部组建了湿地环境监测中心,湿地保护初步受到重视。湿地保护与可持续发展等领域正在加强研究,研究方法手段也从定性走向定性与定量相结合,地面调查与遥感技术相结合,生物过程与物理、化学过程相结合。在横断山区沼泽与泥炭研究中,国内首次构筑了陆生湿地生态系统模型。三江平原、海岸河口和青藏高原开展了典型湿地物质循环和地球化学结构的研究等<sup>[46]</sup>,红树林湿地生态系统研究达到国际领先水平<sup>[29]</sup>。

经过多年的探索,近年来人工湿地作为改善水环境的一种有效方法,已经广泛应用于水库、湖泊周边面源污染的拦截和地面微污染水体的净化等<sup>[47]</sup>。同时,我国还加强了自然湿地的建设及管理,建立了大量的自然湿地保护区,列入国际重要湿地名录的湿地已达30处,如丹江湿地、丹东鸭绿江口滨海湿地、洪湖湿地、九段沙湿地、黄河湿地等国家级自然保护区。

### 3. 生物—生态修复技术

生物—生态修复技术是利用培育的植物或培养、接种的微生物的生命活动,对水中污染物进行转移、转化及降解,从而使水体得到净化的技术。近年来这种技术发展很快。水体的生物—生态修复技术具有以下优点:首先是处理效果好;其次,水体生物—生态修复技术的工程造价相对较低,不需要耗能或低耗能,运行成本低廉<sup>[48]</sup>。

广义的生物—生态修复技术主要包括水生植物修复、微生物修复、人工曝气复氧、底泥污染控制、生态护岸等,是生态修复和构建自然环境和人居环境和谐统一的主要技术。

1972年,美国宾夕法尼亚州 Ambler 管线汽油泄漏清除工程是有记录的首次采用生物方法进行污染环境修复的工程。最初,生物修复的应用范围仅限于试验阶段,直到1989年美国阿拉斯加海域受到大面积石油污染以后,才首次大规模应用生物修复技术。在1989年3月,超级油轮原油泄露,在5小时内被泄漏到美国最原始、最敏感的阿拉斯加海岸,原油的影响遍及1450km的海岸。此次修复主要采用生物修复技术来消除泄漏原油的污染,阿拉斯加海滩污染后生物修复的成功可以认为是生物修复发展的里程碑<sup>[49]</sup>。1991年3月,在美国的圣地亚哥举行了第一届原位生物修复国际研讨会,使生物修复技术的推广和应用走上了更加迅猛发展的道路<sup>[50]</sup>。1998年夏天,德国利用纯氧曝气船对 Saar 河进行曝气,白天或黑夜运行,共运行24天,每天运行2~10小时,总耗氧量10万m<sup>3</sup>,有效防止了 Saar 河水质的变坏。

我国对污染河流的生物—生态修复技术研究和应用起步较晚。于20世纪70年代开始进行了一系列生物修复技术的科研探索,主要适用于污水处理,缺乏生态概念。科技部和云南省于2000年启动了“滇池水污染治理技术研究”项目。2000年,宁波大学利用生物操纵技术成功控制了宁波月湖的蓝藻水华,该项成果在2001年国际蓝藻控制学术会议上得到了国内外同行专家的一致肯定。2002年国家“973”计划正式启动了“湖泊富营养化



过程与蓝藻水华暴发机理研究”。中国科学院南京地理与湖泊研究所、同济大学等科研院所也分别在太湖、上海苏州河等污染水体进行了卓有成效的生物—生态修复试验。

目前开发的水体生物—生态修复技术,实质上是按照仿生学的理论对自然界恢复能力与自净能力的强化。按照自然界自身规律去恢复自然界的本来面貌;强化自然界自身的自净能力去治理被污染水体,这是人与自然和谐相处的合乎逻辑的治污思路,也是一条创新的技术路线<sup>[51]</sup>。由于河流生物—生态修复技术有其巨大的优点,近年来更是备受关注。

### 1.1.2 目前研究存在的主要问题

综合国内外研究现状可知,尽管国外在水系生态修复和生态建设方面积累了较丰富的经验,但多是针对某个具体技术进行的相关试验和研究,缺乏水系生态系统整体功能修复理论和技术的研究,尚未形成完整的工程建设理论和技术方法体系,并且国外的研究多是针对本国具体情况进行的,对我国的水系生态建设工作指导作用有限,无法直接应用于我国的水系生态建设工作中。

我国水系生态修复和生态建设方面的研究起步较晚,但近年来受到越来越多学者的重视。河流整治工作基本处于水质改善和景观建设阶段,缺乏传统水利、生态系统栖息地和景观的有机结合。多数地方的河道整治,尤其对中小型河流,其理念仍停留在渠道化、硬化化、顺直化等做法。近年来,一些经济发达的城市结合河道整治开展城市园林景观设计,注重河流的美化绿化。目前,研究主要存在以下主要问题。

(1) 注重局部治理,缺乏从水系尺度进行全面规划治理。水系生态的恢复、治理,要从整个水系的尺度进行科学规划,确定整体治理方案,而现在往往只注重局部,造成治理效果不佳,不能从根本上实现整个水系生态的好转。

(2) 注重园林景观效果较多,重点放在河流岸边的绿化,而对河流生态整体恢复涉及较少,没有考虑整个水系生态状况。

(3) 发掘历史人文景观较多,建设了大量的仿古建筑物,而对于发掘河流自然美学价值和河道的自然功能较少涉及。

(4) 河流修复地域性差别较大。生态修复实验由于资金、土地及其他一些原因只限于为数不多的大城市。国内城市河道和农村河道差异性较大,在河道断面形式、水动力学特性、生物多样性、防洪标准、景观要求、功能的侧重、污染源、污染物分布状况、污染物处理方式等方面存在较大的差别。

对山东省而言,近年来高度重视水系生态建设工作,各地市也因地制宜开展了一些生态景观河道治理工作。但总体看来,尚缺乏适用于山东省省情的完整水系生态建设支撑理论和关键技术体系,各条河道治理也多是从事防洪除涝或者纯粹景观造景出发,生态性和整体性尚显不足。

## 1.2 技术路线

结合实际情况,依据科学性和可行性原则确定本书的技术路线,见图1-1。