

南开大学

硕士学位论文

海河流域平原河流生态修复模式研究

姓名：汪雯

申请学位级别：硕士

专业：环境工程

指导教师：黄岁樑

20090601

摘要

由于水量不足,水质恶化以及河流天然形态遭到破坏,海河流域大多数平原河流生态健康受到相当程度的破坏。因而,对它们进行生态修复,需要建立相应的生态修复模式体系进行指导。总结现有的河流生态修复技术,从中筛选出十三种适宜于海河流域的修复技术。依据功能的不同,将其分为水量调整技术、水质净化技术和生境改善技术三类。在此基础上,从水量入手,综合考虑河流水质与生境现状,提出海河流域平原河流生态修复模式体系。体系包括“管理保护”、“直接修复”、“补水修复”、“生态系统替代”四种修复类型共计九种修复模式。其中,直接修复包括“生境恢复模式”,“水质改善模式”和“强化净化模式”,补水修复包括“直接补水模式”、“水量-生境改善模式”、“水量-水质”改善模式”、“复合模式”。

应用海河流域平原河流生态修复模式,研究海河流域平原河流的生态修复。北运河、永定河、滦河和卫河是海河流域具有代表意义的生态受损河流。以这四条河流为例,通过分析它们的水量、水质、生境现状,结合建立修复模式体系,提出相应的生态修复模式,在此基础上,讨论并推荐海河流域其它 17 条平原河流的的生态修复技术。

关键词: 海河流域; 平原河流; 生态修复; 模式

Abstract

Because of water shortage, pollution and destruction of natural river morphology, ecological health of plain rivers in Haihe River Basin have been suffered from a large degree of damage. It is significantly necessary for us to establish a system of ecological restoration modes in restoring these rivers ecologically. After a detailed review of the current research papers and technical reports, thirteen ecological restoration technologies, which were considered to be usable and suitable for ecological restoration of plain rivers in Haihe River Basin, were selected. In view of their functionalities, the thirteen technologies were divided into three categories, and they are technologies for adjusting water quantity, technologies for purifying water and technologies for improving habitats. Due to the fact that the water quantity is the key in defining the ecological health of plain rivers in Haihe River Basin, the system of ecological restoration for Haihe River Basin was comprised of four types and nine modes of ecological restoration with consideration of water quality and habitats.

Then, we discussed application of the established ecological restoration model to remediate and restore ecologically plain rivers in Haihe River Basin. The Beiyunhe River, Yongding River, Luan River and Wei River are four typical ecologically damaged rivers of Haihe river basin. Applying the established ecological restoration model and analyzing water quantities, water qualities and ecological status in the four rivers, we discussed their ecological restoration modes and recommended feasible technologies, respectively. Moreover, as an extension of the study, ecological restoration modes for other 17 plain rivers in Haihe River basin were presented.

Key word: Haihe River Basin, ecological restoration, mode

南开大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

南开大学学位论文使用授权书

根据《南开大学关于研究生学位论文收藏和利用管理办法》，我校的博士、硕士学位获得者均须向南开大学提交本人的学位论文纸质本及相应电子版。

本人完全了解南开大学有关研究生学位论文收藏和利用的管理规定。南开大学拥有在《著作权法》规定范围内的学位论文使用权，即：(1)学位获得者必须按规定提交学位论文(包括纸质印刷本及电子版)，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生学位论文，并编入《南开大学博硕士学位论文全文数据库》；(2)为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆等场所提供校内师生阅读，在校园网上提供论文目录检索、文摘以及论文全文浏览、下载等免费信息服务；(3)根据教育部有关规定，南开大学向教育部指定单位提交公开的学位论文；(4)学位论文作者授权学校向中国科技信息研究所和中国学术期刊(光盘)电子出版社提交规定范围的学位论文及其电子版并收入相应学位论文数据库，通过其相关网站对外进行信息服务。同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。

非公开学位论文，保密期限内不向外提交和提供服务，解密后提交和服务同公开论文。

论文电子版提交至校图书馆网站：<http://202.113.20.161:8001/index.htm>。

本人承诺：本人的学位论文是在南开大学学习期间创作完成的作品，并已通过论文答辩；提交的学位论文电子版与纸质本论文的内容一致，如因不同造成不良后果由本人自负。

本人同意遵守上述规定。本授权书签署一式两份，由研究生院和图书馆留存。

作者暨授权人签字：_____

20 年 月 日

南开大学研究生学位论文作者信息

论文题目					
姓 名		学号		答辩日期	年 月 日
论文类别	博士 <input type="checkbox"/> 学历硕士 <input type="checkbox"/> 硕士专业学位 <input type="checkbox"/> 高校教师 <input type="checkbox"/> 同等学力硕士 <input type="checkbox"/>				
院 / 系 / 所			专 业		
联系电话			Email		
通信地址(邮编):					
备注:				是否批准为非公开论文	

注：本授权书适用我校授予的所有博士、硕士的学位论文。由作者填写(一式两份)签字后交校图书馆，非公开学位论文须附《南开大学研究生申请非公开学位论文审批表》。

第一章 海河流域平原河流生态现状

第一节 流域概况

海河流域位于北纬 $35^{\circ}\sim 43^{\circ}$ ，东经 $112^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 之间，东临渤海，南界黄河，西靠云中、太岳山，北依蒙古高原。地跨北京、天津、河北、山西、河南、山东、内蒙古、辽宁 8 个省（自治区、直辖市），总面积 31.8 万 km^2 。海河流域包括海河、滦河、徒骇马颊河三大水系（见图 1.1）。平原区地势自西、北、西南三面向渤海湾倾斜，依次为山前平原、中部平原和滨海平原。平原区坡降变化较大，山前平原一般为 $1/300\sim 1/2000$ ，中部平原 $1/2000\sim 1/10000$ ，滨海平原 $1/10000\sim 1/15000$ 。

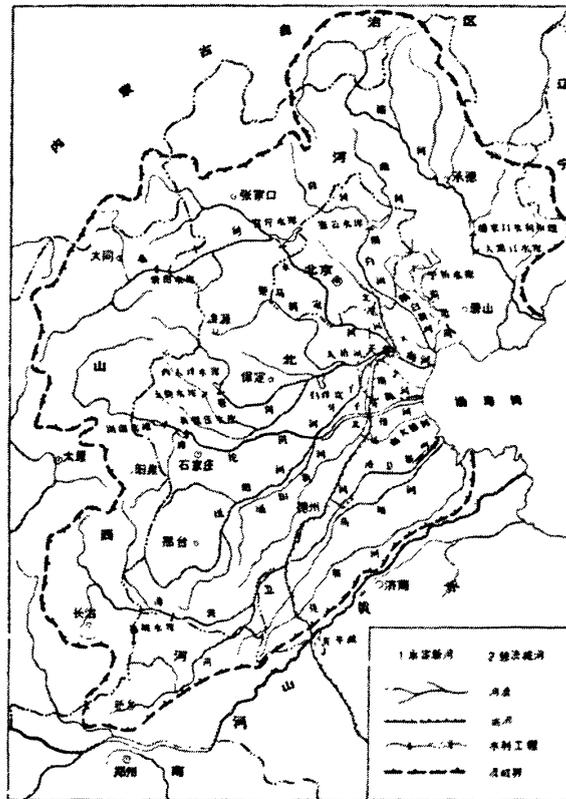


图 1.1 海河流域示意图

海河流域属温带半湿润、半干旱大陆性季风气候。降水量年内年际分布不

均匀, 全年 80%降水量集中在 6-9 月的汛期。最大降水量在 1964 年, 降水量为 800mm; 最小降水量出现在 1965 年, 降水量为 357mm。其中, 平原区年平均气温 1.4~14℃; 多年平均降水量为 500~550mm, 年平均降水量 552mm; 年水面蒸发量介于 1000~1300mm 之间, 年陆面蒸发量大于 500mm。

2005 年, 海河流域总人口 1.22 亿, 其中, 平原区人口 1 亿, 人口密度 747 人/km², 城镇化率 39.6%。京津平原地区和水资源条件较好的山前平原地区是流域内人口最集中的地区, 总人口数达到 6392 万, 占流域人口的近一半。其中京津平原地区是流域人口密度和城镇化率最高的区域, 总人口数 2295 万, 人口密度 1304 人/km², 城镇化率 83%。其次是河南河北的山前平原, 总人口数 3505 万, 人口密度 847 人/km²。再次是河北唐山、秦皇岛的山前平原, 总人口数 592 万, 人口密度 556 人/km², 城镇化率达 51%。

2005 年, 海河流域国内生产总值 25850 亿元。平原区经济发达, 2005 年国内生产总值 21197 亿元, 占全流域的 82%, 占全国的 11.6%; 人均国内生产总值 2.11 万元, 是全国平均水平的 1.52 倍。海河流域平原区土地、光热资源丰富, 适于农作物生长, 是我国三大粮食生产基地之一。粮食总产量 3754 万吨, 占全国的 7.8%。

第二节 流域内平原河流生态问题

海河流域人口众多而水资源极其短缺, 人均水资源量 305m³, 仅为全国平均值 1/6^[1]。随着社会发展以及一系列为保证防洪和供水安全的大规模水利工程兴建, 流域内河流生态系统受到越来越大的压力, 出现河道断流、湿地萎缩、地下水位下降、水污染及河口生态恶化等一系列生态环境问题^[2]。由于占流域面积的 40%平原地区承担着流域 73%的人口, 具有 65%的耕地和 83%的GDP产出, 其河流生态健康问题尤为严重, 主要表现在河流断流与干涸、水体污染加剧、河道人工化与生态系统严重退化、崩溃等几个方面。

1.2.1 水量问题

由于水资源过度开发利用, 海河流域平原河流普遍断流干涸, 部分河段沙化严重。据实测径流统计(见表 1.1), 2000 年至 2005 年, 流域内 23 条主要平原河流, 年均断流 216 天, 年均断流天数大于 300 天的河流有 11 条; 3883km 的总河长中, 河道年均干涸长度 1721km, 占总河长的 44%。

第一章 海河流域平原河流生态现状

表 1.1 主要平原河流断流干涸情况统计表

河名	河段	河段长度 (km)	2000~2005 年平均			05 年径流量 (万m ³)
			干涸天数	断流天数	干涸长度 (km)	
滦河	大黑汀水库~海口	158	51.17	51.3	7.3	46510
陡河	陡河水库~海口	120	36.67	40	11.8	8189
蓟运河	九王庄~新防潮闸	189	365	316.5	105	32690
潮白河	苏庄~宁车沽	140	224	311	107	23780
北运河	通县~屈家店	147		55		16170
永定河	卢沟桥~海口	199	365.3	365	199	0
海河干流	耳闸~海河闸	73	0	337.5	0	6433
独流减河	进洪闸~东风大桥	61	298	365	32	0
白沟河	东茨村~白沟镇	54	94.17	321.5	54	1582
南拒马河	张坊~新盖房	84	242.7	303.5	70	7539
唐河	西大洋~白洋淀	132	326.7	326.67	124	0
猪龙河	北郭村~白洋淀	96	345	361.67	93.3	0
滹沱河	黄壁庄水库~献县	190	353.5	359.33	130.8	0
滏阳河	京广铁路桥~献县	343	318.5	325.67	317.7	0
子牙河	献县~第六堡	147	332	341.33	155.9	1910
漳河	京广铁路桥~徐方仓	103	297.5	313.67	101	20030
卫河	合河~徐方仓	264	13.83	21.667	0	18010
卫运河	徐方仓~四女寺	157	55	81	17.8	12768
南运河	四女寺~第六堡	306	199.8	309.83	87	6986
漳卫新河	四女寺~辛集闸	175	50.67	167.33	75.5	88752
徒骇河	毕屯~坝上挡水闸	339	0	231	63	45125
马颊河	沙王庄~大道王闸	275	28.6	219	39	16105
德惠新河	王凤楼闸~白鹤观闸	131	92.5	296	69	1806
合计		3883				

长期干涸使平原河流(段)逐步沙化,沙化趋势明显的有永定河、大清河及子牙河水系、滏阳河及漳河。由于河漫滩部分被开垦和永定河、潮白河、滹沱河、南拒马河、漳河等河上人为采砂活动进一步破坏河漫滩植被,加剧河道沙化,造成河流自身的生态系统发生退化且成为区域风沙源。

1.2.2 水质问题

海河流域年废污水排放总量约为 60 亿吨,其中 60%为工业废水,40%城镇生活污水。全流域 COD 排放总量约为 220 万吨,氨氮排放总量约为 21 万吨。目前,流域已建成城市污水处理厂 33 座,总处理能力 520.7 万吨/天,年处理能力 19 亿吨,全流域实际污水处理量 16 亿吨。污水集中处理率仅为 36%。年入

河废污水总量约为 48 亿吨。

由于流量匮乏和大量污水排入，海河流域平原河流水污染极其严重，大部分河段水质为劣V类，部分河流或河段，如北京排污河、天津的大沽排污河和北塘排污河、沧州的沧浪渠、保定的府河、石家庄的洺河以及河南至山东段的卫河与卫运河等已经成为或退化成为城镇排污河流。主要的超标项目有氨氮、COD、BOD₅、挥发酚和总磷，部分河段氟化物、镉、汞、铅等超标。

据 2005 年水质调查，主要平原河流 27 个代表断面中，21 个断面水质均为劣 V 类，仅有滦河下游、永定河卢沟桥段和南拒马河张坊段 3 个断面水质达到 III 类。滦河、永定河水质状况相对较好，约有 70% 河长达到水功能区水质目标。子牙河、漳卫南运河、黑龙港运东和徒骇马颊河水系水质劣于 V 类的河长均超过 90%。卫河、卫运河、南运河、共产主义渠、子牙河、子牙新河、洺河、滏阳河、徒骇河、马颊河等，全河全年处于严重污染状态。

1.2.3 生境问题

由于防洪减灾和水资源开发利用，海河流域河流人工化严重，河流天然形态遭到破坏，自然水文节律逐步消失。

中东部子牙新河、永定新河等一系列人工减河的开挖改变了海河流域原有的汇流入海自然流势，中西部平原区天然河道也由于防洪堤防的加固失去了大水泛滥小水归槽的天然河道特性。

20 世纪 50 年代至 60 年代中期，为控制洪水和蓄水灌溉。在流域山区相继建成了官厅、密云、岳城、岗南、黄壁庄等 25 座大型水库、47 座中型水库和众多小型水库，并先后修建了石津、民有、沙河、唐河、易水、潮白河灌区等大型灌区。1980 以后，为满足城市用水的需要，先后建设了潘家口、大黑汀、桃林口、大浪淀等以城市供水为主的水库，兴建了引滦入津、引滦入唐、引青济秦、引黄济冀等城市供水工程。从此，海河流域的水资源基本处于人工调配之下。山区大型水库控制的主要河流进入平原地区的水量逐步减少，河流的自然水文节律开始消失（如图 1.2）。

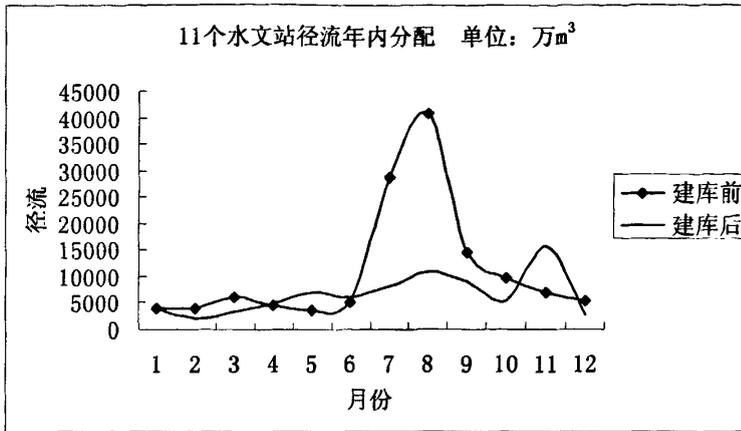


图 1.2 海河流域平原地区水文节律变化情况

流域约有闸坝 2846 座绝大多数处于平原地区，河流被分割截断，部分河段蓄水形成静止水面；城市河流硬化、渠道化严重；海河流域流经平原地区主要城市城区段河长 830km，其中涉及水功能区城区段河长度达到 247km。在进行河道景观建设时，为充分利用有限的水源，维持城市景观水量，城市河流大多被水闸或橡胶坝截留拦蓄且采用水泥等材料进行硬化，形成不透水的规则河床。

目前，海河流域平原河道基本人工化，河流流量完全处于人工调度之下，而节制涵闸隔断了河流与湿地湖沼之间的水力联系，泄洪减河缩短了洪水脉冲效应。

在河道断流、水体污染、河道人工化三方面因素共同影响下，海河流域平原河流生态健康恶化。河道内水生生态系统和河岸生态系统均遭到破坏，生物多样性降低，生物量锐减。为修复受损河流生态系统，改善流域水环境现状，必须对其进行生态修复。本论文作为水利部公益性行业科研专项子课题（200801135）的一部分，根据海河流域现状，建立一套针对性的平原河流生态修复模式体系，能够为下一步的生态修复实践工作提供必要的指导和支持。

第二章 河流生态修复的基本理论

第一节 河流生态系统及人类活动对河流生态系统的影响

河流生态系统是由河岸生态系统、水生生态系统、湿地及沼泽生态系统等一系列子系统组成的复合系统^[3]。随着不同河段水文、地形、动力等因素在时间上的变化，河流生态系统在时间和空间上也随之发生变化。河流生态系统健康需要多因素共同作用才能实现，而进行生态修复必须将河流看作一个完整的、可实现动态平衡的生态系统。

河流生态系统健康必须同时满足四方面的要求：第一、河流要有充足的流量和天然的水流流态，并保持良好的水质；第二，河岸带和河床条件符合自然、稳定、渐变的要求、第三，水生生物群落丰富，生物多样性良好；第四，能够维持河流功能，满足流域经济社会发展要求^[4]。

在河流生态系统的发展演变过程中，受到自然和人类活动的双重干扰。河流生态系统具有自我恢复的能力，当受到自然界如火山、地震等重大干扰时，能够恢复到原有状态或形成新的动态平衡，这是河流生态系统的良性演变。而向河道内排放污水和废水、过量用水、挤占河滩地、砍伐森林、引入外来物种以及由于大规模的工农业生产、采矿和为防洪、航运等进行筑坝、修建水库、渠道化等人类活动的干扰，会对河流生态系统的健康产生极大的负面影响，如表 2.1。实践表明，如果不采取人工辅助措施减少或消除这些影响，仅凭河流生态系统自身恢复需要相当长的时间。

第二章 河流生态修复的基本理论

表 2.1 河道内外人类活动引起的潜在生态影响

人类活动与潜在物理影响		潜在生态影响
筑坝	改变河流	洪水流量下降, 导致河道洪峰流量减少
	天然径流	洪水流量下降, 河道冲刷减少
	过程	基流增大、抬高坝上游冲积河床
		水库淹没现存植被
		拦截上游带来的沙石、下游河道断面卵石减少
渠道化	改变河道天然形态及河岸(床)组成	河道拓宽、清淤
		河道拓宽、清淤导致淤泥减少或再淤积
		淤泥和泥沙填满河床沙砾层
		低速生境减少
		池塘、浅滩和沙洲消失
		深水生境减少
		水温增加、极端温度增加
		大型植物残骸数量减少
		水生植物清除
		河岸淤泥堆积
裁直河道、河岸总长度减少		

续表 2.1 河道内外人类活动引起的潜在生态影响

砍伐森林	河岸带森林消失	直接减少树木, 减少鸟类、哺乳类和昆虫生境的结构复杂性, 尤其是使河道大量木质碎屑消失
	河岸腐蚀与河道形态单调化	生境复杂性下降, 相应对鱼类产生潜在影响
	砍伐山坡树木导致形成最大径流与侵蚀	河岸侵蚀, 改变植被覆盖的河滩地和开放的砾石河床河道及物种组成
城市化	定居于河岸边和河滩地	河岸带生境消失代之以城市建筑
	增加的硬质河道使下游洪峰流量增加, 减少河道宽度与断面积	增大流速对鱼类、微型无脊椎动物产生巨大的压力, 地下水位降低增加对河岸植被的压力
	陆地排水系统	改变自然状态下的河流流量、影响河内动物群落并使河岸带植被萎缩

注: 引自 Perrow, M.R. 和 Davy, A. J., 2002

过量用水和排污以直接破坏水体的形式影响河流生态系统的健康。水是河流生态系统存在最重要的因子, 河流本身无法满足生态需水的最低要求或河流水质恶化致大部分水生生物难以生存都将最终导致河流生态系统崩溃; 外来物种入侵以破坏食物链与营养级平衡的形式影响河流生态健康; 大坝水库、堤防、以及河道城市化、渠道化、硬化等水利工程以改变河流地貌特征以及水文、水力条件等形式, 造成栖息地质量变差, 最终影响河流生态系统健康。河流面对这些干扰, 可能需要上百年才能形成新的动态平衡, 甚至永远也无法恢复原有的生态平衡。

河流是一个连续体, 在水文和营养物质传输转移上具有连续性。随着自然水文周期的变化和营养物质的传输, 河流自上游而下形成多样、连续分布的生物群落。河流生态系统正是由这些生物群落与生境共同组成^[5]。

大坝水库改变了河流的连续性, 河流被节点化、台阶化, 其自然径流和正常的地质作用过程都将被破坏。由于河水由流动状态变为相对静止, 必将导致河流流速、水温、水深以及水流边界条件发生变化。河水流速降低, 河流自净能力削弱, 水质下降, 河道内外生物丰度以物种多样性下降。另外, 水库由于泥沙淤积, 截留了大量营养物质, 易发生水华现象, 而大坝如无鱼道则会成为洄游

鱼类的致命障碍^[6]。

堤防和浆砌等河岸护坡硬化措施虽然能够使岸坡稳定，防止水土流失，却也对景观和河流生态产生不良影响，它们破坏了水陆生态系统的连续性，即河流侧向的连续性。由于堤防截断了汛期主流与岔流之间的沟通，阻止了水流的横向扩展，干流与洪泛区之间的物质能量交换被阻隔，洪水、泥沙和营养物质被限制在河道内，致使沿河湿地大量消失、植被面积减少、洪泛区功能退化。这种情况相当不利于水生动植物繁衍，鱼类无法进入滩地产卵和觅食，同时也失去了避难场所，导致鱼类、无脊椎动物等大幅减少^[4-6]。

河床硬化措施严重影响河流水质并导致其它生态环境问题。水泥或其它形式的硬质河床破坏河流生态系统的垂直连续性，截断了河流与地下水之间、地下土壤有机质与河床表面营养物质之间的物质能量交换，破坏了水资源自然循环的过程，河流无法对地下水进行自然补给，致使地下水位下降，地下水也就无法通过毛细作用，保持地表的湿润，造成河滩湿地萎缩，植被面积减少。且由于河床没有底质层，缺乏对河流水质具有净化作用的微生物、植物和底栖动物群落。生物的种类与数量也会相对减少，致使河流生态系统严重退化，河流失去自净能力。另外，硬质河床会迅速改变河流的水温条件，滋生传染性病菌^[4]。

河流整治的水利工程中常存在将河流直线化、渠道化的问题，即将天然河流蜿蜒曲折的河道改造成直线或折线型的人工河流或人工河网，将自然复杂形状的河道断面改造成梯形、矩形或弧形的规则几何断面。这种做法改变了河流急流、缓流、弯道及深潭、浅滩相间的格局，降低生境空间的异质性，而河流生态系统只有在具有丰富多变的生境条件时才会维持生物多样性。可见，随着河流直线化、渠道化造成适宜鱼类等水生动物栖息产卵的河道结构丧失，河流生态系统的结构与功能将发生变化，生物多样性将降低，最终必然会导致河流生态系统发生退化。同时，河流直线化、渠道化会减少河床与河岸的表面积，导致部分有污染物消解能力的微小动物和微生物死亡，进而带来一系列生态学问题

第二节 主要的河流生态学理论

河流的基本结构和动力学特征是河流在其水文、水化学、光合作用及河道本身共同作用下形成的。随着自然条件的变化，河流中植物群落在集水区下游

和横向的分布及其生产力均会发生规律性的变化。有关河流生态系统的理论主要有河流连续统理论、洪水脉冲理论和河流四维模型^[7]，其中河流连续统理论是河流生态学的重大发展，近二十多年相关理论的研究和发展都是在该理论的基础上进行。

2.2.1 河流连续统理论

1980年，Vannote等基于空间尺度观念提出了河流连续统理论^[7-9]。该理论认为，河流由源头集水区的第一级溪流起，与向下流经各级河流流域，形成一个连续的、流动的、独特而完整的系统。该系统在整个流域呈狭长的树枝状，反映了构成河流生态系统的各要素按照生物群落的结构和功能而发展变化的规律。系统的连续性表现为河流地理空间上的连续和河流生物学过程及其物理环境的连续，后者的连续性比前者更为重要。

根据河流连续统理论，下游河流中的生态系统过程同上游河流直接相关。这一理论还概括了沿河流纵向有机物数量和时空变化、水体摄食功能类群的结构和资源的分配，使得河流生态系统特征的预测成为可能。

河流连续统理论将河流划分为从低到高的三个沿纵向分布的基本系统模式，分别为低级别的河流、中级别的河流和高级别的河流。低级别的河流自身的初级生产量相对较小，主要的能量来源于异源性的有机物输入；中级别的河流具有较高的自源初级生产能力，主要的能量来自大型水生植物和附着生物；高级别河流自源初级生产量相对较低，主要的能量源是源自上游河段的有机颗粒物。这种纵向的格局比较理想化，只可能存在于未受干扰的河流中。一般情况下，这三种模式呈斑块分布于整个河流系统中，某一河段的具体特征由占数量优势的那种模式体现。

2.2.2 洪水脉冲理论

由于河流连续统理论忽视对洪水与洪泛区的研究，不能说明一切河流洪泛湿地环境。Junk等在对热带亚马逊河观察试验的基础上，于1997年提出了洪水脉冲理论^[7-10]。该理论主要描述由河流河道系统到洪泛区系统季节性水流消长导致的河流洪泛区干湿交替的水文情势变化，以及河流洪泛区系统生物对这种水文情势变化的适应。洪水脉冲理论有助于更好地理解河流洪泛区系统的相互作用，是激流生态学重要的理论框架。

洪水脉冲理论强调周期性的洪水脉冲是河流洪泛区系统进程最主要的驱动力,决定着洪泛区生物区系的存在、生产力和相互作用。洪水是河流洪泛区湿地系统得以维持的因素之一。天然的河流洪泛区系统是一个动态统一体,周期性洪水脉冲塑造了河流与其洪泛区系统之间不同程度和性质的水文连通性,水生有机体的物种数量和种群结构随着水文连通性的不同发生变化。洪泛区系统具有高的生物量,这一点与河流连续统理论所强调的上游陆源物质输入有所不同。它指出,河流洪泛区系统的绝大部分初级和次级生产力都集中在洪泛区,河流只是水及溶解性物质的传输通道。河流洪泛区系统动、静水生境的交替,不是河流连续统理论所关注的空间上的变化,而是在时间上的变化。

2.2.3 河流四维模型理论

1989年,Ward在将河流生态系统描述为四维系统,即具有纵向、横向、竖向和时间尺度的生态系统^[6,8]。

在沿水流方向的纵向上,河流是一个线性系统,从河源到河口均发生物理、化学、微生物、植物、动物的变化。河流生物物种和群落随上、中和下游河道物理条件的连续变化而不断进行调整和适应。保持河流纵向连续性,是河流生态均衡的一个重要性质。

在横向上,河道内水体与陆地存在连续性。水位涨落的区间是水域和陆域之间的过渡带,河流生态系统在横向上通过河滩、死水区深潭、浅潭、河岔、岸坡上集水区与陆地生态系统相连通,形成了水域—湿地—陆地的连续形式,保证了水陆生态系统的连续性和水生物—两栖生物—陆地动物的连续通道。

在沿水深方向的竖向上,河流生态系统的连续性表现在地下水和河川径流的相互转化上,这一过程伴随土壤、地下水与地表径流物质和能量的迁移转换。在自然条件下,非干旱区域内地表水和地下水是连续的,地下水通过毛细作用可以保持地表的湿润,地表水也可以通过正常渗透补充地下水。

河流系统的时间尺度在许多方面也是很重要的。河流生态系统修复是漫长的河流演变过程。河流演变也是生态系统进化、调整 and 适应过程。

第三节 河流生态修复的内涵、目标与原则

2.3.1 修复的内涵

河流生态系统恶化主要表现为水与其中营养物质的物理化学性质、水文特性和河流生态系统动力学特性等发生变化并破坏河流生态系统的结构与功能进而对生物的生存繁衍造成巨大压力。所谓河流生态修复是使河流生态系统恢复到与未被破坏前的近似状态，且能够自我维持动态均衡的复杂过程。

其内涵是运用河流生态学的各种理论，采用综合方法，通过改善河流水文与地貌等条件，恢复河流由于人类活动干扰而退化或丧失的结构与功能，使河流生态系统形成新的动态平衡，重新回到健康状态^[11]。

河流生态修复的内涵包括两方面内容，一方面是对河道内水生态系统的修复，另一方面是河岸生态系统的修复。河道内水生态系统主要由河床内水生生物和其生境组成，其中水生植物是河流生态系统营养级中的生产者，浮游动物、大型无脊椎动物和鱼类等水生动物是营养级中的消费者，细菌、真菌、放线菌等微生物及原生动物等则是营养级的分解者，而其它影响水生生物生存的环境条件、物质代谢原料等因素构成了它们的生境。对河道内水生态系统进行生态修复主要是通过改变影响水生生物生存的生境条件来完成的。

河岸是水体与陆地的过渡带，是河道稳定的关键地带和水体运动的外边界条件。河岸带生态系统由岸坡和其上生长的植被、小型哺乳动物、两栖类动物以及微生物构成。河岸带不仅影响河道的泥沙搬运和沉积，降低河水的侵蚀速度，增强河岸的稳定性，还可以通过物理、化学和生物过程控制进入河道水体的径流污染物。对河岸带生态系统的修复主要是通过去除城市化和流域水土流失以及水利工程措施等造成的不利影响来实现的^[12]。

2.3.2 修复的目标

生态修复的行动包括被动修复和主动修复。被动修复是指去掉或减缓长期的人类扰动活动，利用生态系统自我修复功能恢复到原来的状态结构和功能；主动修复则是指人类通过安装相关设施等工程措施来修复河道结构，从而使河道恢复生态系统结构和功能。

河流生态系统的生态平衡遭到人类活动干扰破坏后重新建立新的动态平衡是一个漫长的历史过程，有的需要上百年或者更多时间，严重破坏的甚至永远都无法实现自然修复。对破坏的河流生态系统进行生态修复，首先要停止引起河流生态系统继续恶化的活动，再根据河流具体情况，在自然恢复的基础上采取辅助性的技术措施，最终实现河流生态系统健康的目的。

河流生态修复目标是多层次、分阶段的。

生态修复的理想目标是使受损生态系统结构和功能恢复到受干扰前状态^[13]。但由于河流生态系统在受干扰前后均在不断的变化,在实践上很难实现。目前,国内外进行的各项河流生态修复只是以生境改善作为目标。国内大多数学者认同的生态修复目标是在承认河流开发现状的基础上,部分恢复河流生态系统的结构和功能,这也是客观和可能达到的目标。

在这一目标之下又包括水文条件、生物栖息地以及物种保护三方面的修复目标。水文条件修复的目标主要是改变水量、水质和水文情势以及水温、流速、水深等水文要素以适宜生物群落生长。生物栖息地修复的主要目标是恢复河流廊道的生境多样性进而改善河流生态系统的结构和功能。生物物种保护的目标主要是保护濒危珍稀和特有物种,恢复乡土种^[14]。

河流生态修复作为生态系统寻求动态平衡的一个过程,不可能一蹴而就,需要分阶段进行,相应的修复目标也应该根据河流的受损情况和约束条件来分阶段制定^[15]。

国内水污染比较严重的河流,一般把治理河流污染作为初期目标,在尚未完成污染治理阶段目标以前,不可能有效地再造生物的栖息环境、招徕本土生物和增加系统生物多样性。下一步目标是对某一种指示生物进行修复,让指示生物返回河流。最后再来实现修复河流生态系统的完整性,提高生物群落的多样性的目标^[16]。

2.3.3 生态修复的原则

河流生态系统的恢复需要在遵循自然发展规律的基础上,借助人类辅助措施,同时满足技术适用、经济社会可行、美学原则的要求,使退化的河流生态系统结构与功能得到修复,恢复健康^[17]。河流生态系统修复的原则分为生态学原则和实践原则。

生态学原则包括自然循环原则、生物多样性原则和景观生态学原则。

自然循环原则是生态修复的基本原则。河流生态修复必须在河流生态学理论的指导下,利用河流生态系统的自我调节能力,因势利导地采取适当的人为措施,使河流系统朝着自然和健康的方向发展,最大限度地构造人类和河流融洽和谐的环境。自然循环受到众多条件的约束,如气候、地质地貌、植被条件、河流状况、土地利用、城市规划、人口社会、产业结构、污染特征和管理机制

等。全面综合考虑这些因素方可查明河流受损的程度和原因,并据此明确河流治理修复的阶段和相应措施。即使对于一条河流的不同河段,也可能在河道比降、河道断面和平面形态等方面存在很大差异,而且各项功能在不同河段的受损程度也不尽相同。因此,在进行河流修复时,应该分河段进行考察,选择最具优先权的河段入手进行生态修复,通过局部细化与整体优化的结合达到满意的修复效果^[18]。

保护河流生态系统生物群落的完整,对实现河流生态系统的良性循环起着关键作用。生物多样性,是生命有机体及其赖以存在的生态复合体的多样性和变异性,即所有生物种类,种内遗传变异和它们的生存环境的总称。河流生态修复应该遵循生态学中的生物多样性原则,在防止生物入侵的前提下,引入本土生物,构建生境廊道,保护和增加河流系统生物多样性。保护和恢复生物群落多样性有两条路线:一种是加强濒危、珍稀和特有物种的保护以及其它物种的恢复,一种是通过改善景观多样性实现生物群落多样性的恢复。

根据景观生态学的原理,河流廊道网络不是孤立存在的。在特定的基底背景下,通过河流廊道与其它形式的廊道,如林带、峡谷、道路等,将不同性质和特征的缀块,如湖泊、水塘、植被、等连通起来,共同形成基底-廊道-缀块式的空间景观格局。河流生态系统的复杂性与多样性是由河流形态的景观多样性及空间异质性决定的。提高河流形态多样性是提高生物群落多样性的重要前提之一。河流形态的多样性形成了流速、流量、水深、水温、水质和水文情势等多种生态因子的异质性,造就了丰富多样的生境,形成多样性的河流生物群落。另外,河流生态修复的结果应该带给人们美好的享受,应该按照景观生态学原理,增加景观异质性,保留原河道的自然线形,运用植物以及其它自然材料构造河流景观^[19],在城区的河段,还应结合城市的整体景观特点进行修复。

河流生态修复的实践原则包括安全原则、多目标兼顾原则、流域整体修复原则、人工干预辅助河流自我修复原则

河流生态修复要兼顾安全原则。洪水在维持河流生态系统纵向连续性方面起到了重要作用,但同时也会对人类的生命财产造成威胁。因此,河流生态修复应协调好它与防洪的关系。无论采取何种生态修复技术,都必须满足对一定重现频率洪水的防洪要求,不能片面强调河流的天然形态和自我修复作用而忽视水利防护工程措施的重要性。另外,在进行河流生态修复时,要保证进入河流生态系统的生物无危害性。

河流兼具社会经济与生态双重功能，健康的河流应该满足特定的防洪、供水、发电、旅游等社会经济功能，同时还应具备良好的生态服务功能。因此，河流生态修复要遵循多目标兼顾的原则，同时考虑社会经济与生态两方面的要求，合理配置生产、生活与生态用水。

河流生态修复应在流域的尺度上进行，遵循流域内整体修复的原则。河流生态系统物质能量循环的完整过程通常是在流域或更大的尺度范围内完成。气候、水文等生境因子往往在大的尺度上影响空间异质性，进而影响河流生态系统的生态过程，而域内人类的经济社会活动也会对河流生态系统产生巨大影响。在具体的河流生态修复实践中，如果仅仅基于受损河流本身考虑修复方案，则修复实践很有可能达不到预期目标。流域内的自然过程和人类活动都有可能对正在进行修复的河流生态系统产生负面效应。在一般情况下，一个局部的修复工程很难改变整个流域的生态现状，但可以按照流域内整体修复的原则设计河流生态修复，使之能够更好的适应流域内的变化。

河流生态系统受到外来干扰时，总是力图恢复到河流未受干扰前的状态，表现为自我修复的功能。自我修复的过程表现为食物网随时间的发展过程和生物群落的自适应能力。其结果是在新的条件下形成动态平衡，恢复原有系统结构和功能的某些特征。著名生态学家 H.T.Odum 认为：“生态工程的本质是对自组织功能实施管理。”依靠生态系统自设计、自组织功能，由自然界选择合适的物种，形成合理的结构，从而完成设计和实现设计。退田还林、封山育林等措施，充分发挥自然界自我修复功能，实践证明十分有效的。如果破坏没有超过河流生态系统本身恢复力时，去除人类活动造成的胁迫因子，通过采取污染控制、改善水文条件、改造河流的人工渠道化工程等措施后，有可能实现河流生态系统的自我修复。当破坏超过河流生态系统自我修复的能力时，还需要在去除胁迫因子后辅助人工措施来创造生境条件，进而发挥自然修复功能，实现河流生态系统的修复。

经济性原则。社会经济技术条件是河流生态修复的基础。河流生态系统的复杂性决定了最终修复结果和演替方向的不确定性，而现有各个修复技术，特别是对河道自然形态的恢复等技术，更需要巨大的资金投入，使得河流生态修复具有周期长、风险大、投资高的特点。因此，必须按照综合效益最大化原则，从流域系统出发进行整体分析，将近期利益与远期利益相结合，根据河流所处的治理修复阶段提出河流修复的最佳方案，获得最大的河流修复成效，实现社

会、经济和生态环境效益的最大化。

第三章 主要河流生态修复技术

所谓河流生态修复是使河流生态系统恢复到与未被破坏前的近似状态，且能够自我维持动态均衡的复杂过程。对破坏的河流生态系统进行生态修复，首先要停止引起河流生态系统继续恶化的活动，再根据河流的具体情况，采取适宜的修复技术，恢复与加强河流的自净能力，创造出良好的生境条件，最终达到恢复与重建河流生态系统，净化水质的目的^[20-28]。

第一节 物理修复技术

目前采用的物理修复的方法主要有河道补水技术，河道防渗技术，底泥清淤与覆盖技术以及人工增氧技术等。

3.1.1 河道补水

河道补水是通过水利设施（闸门、泵站等）的调控，引入上游或者附近水源，一方面补充河道水量，另一方面还可以冲刷稀释污染水域，置换死水区的河水，使河流由厌氧状态变为好氧，在短时期内降低水体的污染负荷，改善水生动物、水生植物的生存环境，提高河流的自净能力，改善水环境质量。

3.1.2 河道防渗技术

对于水资源稀少的河道，一方面要考虑防止下渗引起的水资源损失，有必要对河道进行全衬砌，改善透水特性；另一方面也要创造适宜水生生物生长的环境，维持河道内生态系统的完整性，保持一定的自我恢复能力。利用植生型防渗砌块技术可以较好地解决这一矛盾，它是由不透水的混凝土块体和供水生植物生长的“#”形无砂混凝土框格组成。在对河道进行防渗衬砌时，砌块之间通过凸块和凹槽的联结紧密地排列于河床底部，可以有效地防止渗漏；在“#”形无砂混凝土框格中填土，种植适宜的水生植物，水生植物的生长又为其它微型生物提供了生长环境，构成的水生生物系统还可以吸收降解水体中污染物质，提供水体的自净能力。

3.1.3 底泥疏浚与覆盖技术

底泥疏浚与覆盖技术是河流污染治理中普遍采用的措施之一，可以较大程度的消减底泥对上覆水体的污染贡献率，进而解决内源释放而造成的二次污染问题，并为后续的生物技术介入创造出良好的生态条件。但这种方法的工程量较大，费用高，且由于河流底泥中通常还生长着一定的动植物，为避免对底质生态系统的破坏，对疏浚的精度要求也比较高。

3.1.4 人工增氧技术

通过提高水中溶解氧浓度，能够加快溶解氧与污染物质之间氧化还原反应的速度，而且能够提高水体中好氧微生物的活性，促进有机污染物的降解速度。同时也创造了适宜于水生动植物生存的环境，具有比较好的生态效益。部分欧美国家的成功经验和我国的一些试验结果表明人工复氧是河流修复的有效措施，多用于应急措施以及加快河流修复的进程。具体的曝气形式有固定式曝气和移动式曝气，移动曝气的形式曾在德国 saar 河，英国泰晤士河以及澳大利亚 Swan 河治理有成功的应用。另外，还可以利用河流上已有的水坝水闸等水利设施的跌水，泄流以及水上娱乐设施进行增氧。采用这种措施还能同时起到调整水量和水位的作用。

第二节、化学修复技术

主要是针对水体污染物的特征投加化学药剂以强制性去除或固定污染物，改善水质以恢复河流生态的方法，如投加絮凝剂促进污染物沉淀、加石灰脱氮、投加化学药剂除藻、调节 pH 值对重金属进行化学固定等。采用化学修复技术，操作比较简单，短期效果好，但非常容易造成二次污染。

第三节、生物~生态修复技术

这类修复技术的范畴比较广，是近年最具发展前景的河流生态修复技术，在美国，日本等发达国家已用于实践。主要通过培育水生动植物，投放微生物，修复受损生态系统的结构以及恢复河道天然形态实现河流的生态修复。其关键在于强化自然界自身的净化能力，形成河流生态系统的良性演替。具体而言又有微生物修复技术，水生动植物修复技术，人工湿地和土地处理技术以及多自然型河流构建技术等。

3.3.1 微生物修复技术

微生物修复技术是利用微生物对有机污染物的降解作用净化水质，修复水体生态的技术。具体有微生物强化技术，又称投菌法，即向污染严重却又缺乏有效微生物作用的河流投加高效微生物以降解污染物，净化水质进而恢复其生态。该法的主要缺点是高效微生物的选育周期长，净化效果受到诸多外界环境因素的限制。生物膜技术指在河道铺设卵石等天然材料或适宜的合成材料，为微生物附着提供介质，在其表面形成生物膜，通过降解，物理吸附，沉降，过滤等作用加强对污染物的净化。这种技术设备简单，投资较低，无生态风险，对轻度污染的水体净化效果较好。目前在日本，韩国已有广泛的应用。高效微生物固定化技术则是指将经过培养的高效率微生物或酶或菌藻共生群落限制在特定的材料区域内部，达到提高微生物或酶的浓度，创造有利的生物代谢环境，减少微生物流失的目的。这类技术对治理富营养化的水体效果较好。

3.3.2 水生动植物修复技术

主要是利用水生动植物及其共生的微环境去除水体中的污染物质并恢复水生生态系统。水生植物主要通过根系的吸收与吸附作用，吸收水体中的营养元素，在实现自身生长的同时，净化水质，而由水生植物本身所构成的水生植物群落不仅能有效的降低污染物质浓度，提高水体透明度和溶解氧，同时也是健康的水生态系统的重要组成部分。同样的，水生动物也能够通过食物链吸收并转化水中的营养元素或污染物质，净化水质，其所构成的水生动物群落亦是健康的水生态系统的重要组成部分。典型的水生动植物修复技术有生物浮床技术（人工浮岛技术），生物沉床技术，水生态修复技术，生物操纵技术等。

生物浮床技术，或称人工浮岛技术，是指人工构建生物浮床，为水生植物，水生动物提供良好的生存环境，在接近自然的条件下，消减水中的污染物质以达到净化水质的效果。生物沉床技术是将沉水植物种植在有基质材料的沉床载体上，通过可升降装置将沉床在水体中固定，利用沉水植物吸收营养物质而对营养物质含量高的水体进行净化。针对水下光照强度不足对沉水植物生存的限制作用，可以结合河道水流特点，调节沉床在水体中的相对位置，使沉水植物生存区间内的光照能够满足植物生长的需要。水生态修复技术则是根据河流的水质状况及生态结构，有步骤地恢复或重建水生植物群落和水生动物群落，在修复河流生态系统，增强河流的自净能力的同时，利用水生动植物的生长繁殖

消减污染物，净化水质。生物操纵技术实质是通过改变食物链的方式来净化水质。如对富营养化水体，通过操纵植食性浮游动物的群落结构，促进滤食效率高的食性浮游动物生长，进而降低藻类生物量。使用该技术，必须注意改变食物链后系统的稳定性问题。

使用水生动植物修复技术时应注意河流水质对水生动植物生长的影响，对于污染严重的水域，必须首先治理水污染问题，为生物生长提供适宜的生境，以后才能进行动植物群落的恢复。选择适宜的物种，尤其要注意避免外来物种入侵。另外，根据动植物的生命周期，及时地适度地收割，捕获，将污染元素输出，以减少由自然死亡腐烂分解引起的二次污染。

3.3.3 人工湿地技术和土地处理技术

主要是利用填料或土壤将污染物沉淀，过滤，吸附与截留，进而被微生物和植物降解。可消减点源和面源污染负荷，处理河流中的重金属，农药以及营养物质等。然而，该技术受到水流流态，水力负荷，植物种类与数量，温度，pH，填充介质类型，运行方式等诸多因素的影响。

3.3.4 湿地河漫滩与河岸带修复技术

湿地河漫滩是沟通陆地生态系统和河流生态系统的重要中介，同时也是重要的动植物栖息地。恢复河岸的湿地河漫滩，对控制面源污染，保持物种多样性，恢复和重建健康的河流生态系统具有重要意义。河岸带具有三个重要的功能：自然河岸廊道以及与之相联系的对地表和地下水径流的保护功能；对开放的野生动植物生境及其它特殊地和迁移廊道的保护功能；可提供多用途的娱乐场所和舒适的生活环境。

3.3.5 生态护岸技术

3.3.5.1 河岸带的功能

河岸带，又称岸坡，是指高低水位之间的河床及高水位之上直至河水影响完全消失为止的地带。

河岸带是水陆相互作用的地带，是介于水陆生态系统之间的独立生态系统。它由坡顶、坡面和坡脚三个部分组成。坡顶为陆地生态系统；坡脚常年浸没于水下，属于河流生态系统的一部分；坡面则为水陆生态系统的过渡带，兼

具水陆生态系统的双重特征和功能。

河岸带从景观生态学的角度看,属于生态交错带的一种,具有空间异质性、生物多样性、生态脆弱性、动态平衡性等特征。空间异质性是指,在一定空间尺度上,水陆交错带具有相邻景观的部分特点,同时在生物力和非生物力的作用下,其环境条件比单纯的河流生态系统或陆地生态系统都要多样化和复杂化。由于两种生境交错,空间异质性高,生物群落多样性水平也随之增高。除了含有两个相邻群落中偏爱边缘生境的物种,而且其特殊化的生境导致出现某些特有种或边缘种,物种数目一般比相邻斑块内部丰富,生产力高。水生态脆弱性是指组成、空间结构和时空分布对外界环境条件变化十分敏感。动态平衡性是指河岸带中,水、陆生态系统成分处在激烈竞争的动态平衡之中

河岸带具有廊道功能、缓冲带功能和护岸功能。具体体现在:过滤和截留沉积物、水分和营养物质;为两岸内部物种提供足够的生境和通道;不维持水温低、含氧高的水生生境条件,有利于某些水生生物生存并为水生植物、水生动物、其他两栖类动物以及水生微生物提供了栖息、繁衍和避难的场所;为水生生态系统提供物质、能量和生物来源。保护堤防与岸线的安全;控制河势变化,加强河道纵深冲刷以扩大泄洪能力等。

3.3.5.2 传统护岸的不足

传统的河道护岸常常是以防止水流和波浪对岸坡的冲蚀和淘刷为目的进行设计的。护岸设计时首先满足河流的防洪、排涝、蓄水等功能,主要考虑河道行洪速度、河道冲刷、岸坡稳定等因素,而较少考虑环境因素。在护岸结构上,传统的河道护岸主要采用浆砌或干砌块石护岸、现浇混凝土护岸、预制混凝土块体护岸、土工模袋混凝土护岸等以混凝土、石料以及土工膜等为主料的各种形式的护岸,形式上也大多为重力式。

硬质护岸具有耐水流冲刷、结构稳定、技术成熟等优点,但其阻断了堤内外的物质和能量的交换,从而引发一系列生态环境问题。硬化河岸割裂了土壤与水体的关系,使水系与土地及其生物环境相分离。造成原先生长在岸坡上的生物难以生存,动物巢穴栖息地破坏、两栖动物无法上岸觅食、产卵繁衍,河流的自然生物链和水生生态系统被破坏,造成生物种类单一化或使水生动物濒临灭绝。河流自净能力大量降低。此外,还会中断土壤肥力的培育过程,破坏土壤表层盐分和溶洗。在城市河道中,由于地表径流与两岸土壤水和潜水的联系

被割断，洪水在护岸内不能正常蓄积，抬高水位，增大流速，带来更大的洪水隐患，并且影响河道景观。

3.3.5.3 生态护岸的涵义

针对这些不足，十九世纪八十年代欧洲开始兴起生态护岸的理念。德国、法国、瑞士和奥地利等国均开展了河岸水边植物群落与河畔林的复原工作。美国常采用的是“土壤生物工程”护岸技术，并已形成成熟的技术理论及施工方法。90年代初期日本开展了“创造多自然型河川计划”。

生态护岸是河流生态修复的重要措施之一。它主要是采用植物、植物与自然材料或土木工程相结合的方式对河岸进行防护，减轻坡面及坡脚的不稳定性和侵蚀并同时实现多种生物的共生与繁荣。采用生态护岸技术修复后的河岸应该拥有天然河岸的可渗透性，能够充分保证河岸与河流水体之间的物质能量交换，并建立起河岸生态系统，同时，还要具有一定的抗洪强度，能够起到抗冲刷侵蚀的作用。

生态护岸首先需要具有护堤、抗洪的基本功能，阻止水体的波浪和洪水对岸线的侵蚀。此外，还对河流水文过程、生物过程等具有滞洪补枯、调节水位，增强水体的自净，促进水陆生态系统平衡和景观等功能。

生态护岸以自然材料形成可渗透性的界面。河水与地下水连通，丰水期河水向地下水渗透储存缓解洪灾；枯水期地下水反渗入河。同时，大量植被也有涵养水分的作用。生态护岸能减缓流速，对水体中的无机污染物颗粒进行过滤、沉积和吸附，通过微生物和动植物降解有机污染物。生态护岸能够保证水陆两大生态系统的连通性，水生动植物和两栖动物提供繁衍空间，形成完整的水陆多生物共生的生态系统。

3.3.5.4 生态护岸的设计原则

进行生态护岸设计时，首先需要了解当地的气候、水文条件、河势的变化规律和趋势、岸坡土体的物理和力学性质等，调查该地区关键物种的分布、土壤和水质现状。综合考虑防洪排涝、生态保护、环境景观等的要求。设计时需遵循以下原则：

稳定性：生态护岸具有稳定、安全的结构组成。河岸能长期经受水体的侵蚀和冲刷；可合理缓冲水体运动系统中的弯道螺旋流，具有协调河道宽度、深

度和弯曲形态以及河床结构等作用，并经过抗倾覆验算、变形验算、稳定性验算以及承载力验算，较处理好水平轴环流产生的侵蚀和堆积。

生态性：尽量减少人为的改造，保持天然的河岸或采用模拟自然生态系统的工程措施，尽量采用石、木、竹、植物等天然材料进行护岸。保证河岸良好的渗透性，设置多孔性构造，为生物生存繁衍提供空间。

植物性：进行水文分析，根据不同水位，将河流岸坡分为干燥、偶然的洪泛带及潮湿、季节性洪泛带和沿岸水位变化带与淹没带等几个区域分别选择合适的植物。引入湿地植物品种，招徕鸟类、两栖类、爬行类、鱼类、哺乳类等湿地动物，并为之提供清洁的水体、丰富的食物来源和营造极为良好的避敌、栖息环境。

景观性：尽量减少刚性结构，美化工程环境。城市河道生态护岸设计时，考虑人类的亲水要求，将生态护岸与景观文化融为一体。

经济性：就地取材，降低经济成本。

3.3.5.5 生态护岸的构建方法

根据岸坡的生态结构，可将生态护岸分为堆岸、铺设层、护岸和缓冲带等几个主要部分分别加以构造。

堆岸和铺设层主要作用是抵制河道水流作用力的侵蚀。一般可选用纯天然的柔性材料，如石块、多孔性预制砖及木头等，也可以直接利用当地一些废旧材料。常用棕纤维生态垫、柔性护岸排、净水箱护岸砌块、净水箱护岸砌块、植被型生态混凝土、生态植草砖等刚性护岸材料和结构作为生态护岸的堆岸和铺设层。

护岸位于堆岸和铺设层上方，是河流两栖动物及其他生物的重要栖息地。单纯的植被护岸可能会造成较高的水力糙率，应选择柔好的植物以免影响河道的行洪能力。为了防止洪水将植物连根拔起，导致岸坡局部失稳，一般应在洪水水下采取植被与工程措施结合的结构。采用本地土回填，并使用透水性能好的材料，上面覆土种植草、芦苇等护坡的形式。

生态缓冲带的构建主要以恢复植被为主。植被带的宽度需要根据河流的具体情况而定。植物以乡土植物为主，避免外来物种入侵空间配置上综合利用乔灌木和草皮。乔灌木以利于稳固河岸、抵御洪水，草地有助于过滤截留污染物和营养物质。

另外，由于生态护岸可渗透性的要求，在构造时需要用到一些透气透水的材料。为了保证河岸的稳固，应尽量将生态材料和植被设计在正常水位以上。采用石笼、间插植被的堆石、空心混凝土块、生态砖、鱼巢砖等护岸结构，应在其下铺设土工布、碎石等作为反滤层，以防止下垫土层在植被完全发育之前受到水流和波浪的淘刷侵蚀，影响防护工程的稳定性。反滤层材料应结合土壤条件、气候条件等选择，如黄麻、椰壳纤维、木棉、稻草、亚麻等天然纤维制成的可被生物降解的土工合成材料作为反滤层比较恰当。

对于不同类型的河岸，生态护岸构建的方法也不尽相同。对于受到河水冲刷严重的河岸，应以稳固岸堤为首要措施。对于河水流动相对缓慢，河岸主要起缓冲作用的回水型河岸，应主要考虑其生态景观作用。

3.3.5.6 生态护岸的主要形式

生态护岸具有多种多样的形式。根据断面的形式不同可以分为直立式护岸、斜坡式护岸和复式护岸。直立式护岸包括松木桩护岸、干砌直立驳坎、石笼护岸、混凝土沉箱挡墙和生态砌块驳坎等形式。斜坡式护岸包括自然原型护岸、植物护岸、植草砖、土框架护岸、介质筛护岸、生态混凝土护岸、生态砌块护坡等形式。复式护岸是将直立式护岸和斜坡式护岸有效结合，布置成二级亲水平台，局部地段进行台阶式护岸，增强其亲水性。在两岸亲水平台以上斜坡种植草皮，保护河岸不受冲刷，又绿化河道，保护生态。这种护岸形式一般多用于城市河道。

根据所使用的材料不同，可以分为生物护岸，天然材料护岸，绿色混凝土护岸、土工合成材料护岸、网笼护岸、生态砌块护岸等形式。生物护岸包括芦苇菖蒲等水生植物护岸、柳、杨、水杉、水松等湿地植物护岸，乔灌木等边坡植物护岸，萤火虫护岸，鱼巢护岸等动物的形式。天然材料护岸木桩、竹笼、石笼、块石护岸等。绿色混凝土护岸是由粗砂砾料或碎石、水泥加混合剂压制而成一种无砂大孔混凝土进行护岸，它既有透水透气性，又有较大的抗拔力，可以长草生根，满足植物生长。土工合成材料护岸主要有三维土工网，三维植被网，土工织物袋，土工格栅等。网笼护岸主要有蜂箱护岸、格宾网护岸等。根据人工化的程度，可以分为自然原型护岸，半自然护岸和多自然护岸三种形式。自然原型护岸只采用种植植被保护河岸、保持河岸自然特性，抵抗洪水的能力较差；半自然护岸不但种植植被，还采用石材、木材等天然材料，增强了护岸抗

洪能力；多自然护岸是在自然型护岸的基础上再用混凝土、钢筋混凝土等材料确保了护岸抗洪能力。

3.3.6 河道内栖息地的修复技术

主要是修复鱼类和水生无脊椎动物的生活场所，包括产卵场，索饵场，停歇地和通道。常用的技术手段有鱼道，浅滩-深潭结构，基质恢复，河岸覆盖物和设置乱石堆、丁字坝等模拟水生动物偏好的场所。浅滩和深潭的形成可通过挖掘和垫高的方式来实现，也可以采用植石和浮石带来形成。植石法是将直径0.8~1.0m的砾石经排列埋入河床，以形成浅滩和深潭。植石法一般适用于比降大于1/500，水流湍急且河床基础坚固的地区。浮石带是将既能抵抗洪水袭击又可兼作鱼巢的钢筋混凝土框架与植石相结合的一种方法。它一般适用于那些河床为厚砂砾层、平时水流平缓、洪水来时凶猛的地区。

3.3.7 河道空间再造技术

包括蜿蜒度，河漫滩的修复和横断面的修复等。恢复河道的蜿蜒性是采取工程措施，恢复河道至裁弯取直前的蜿蜒性原貌，通常是依据已有的水文资料或参照河道的历史资料来实施。对被裁弯取直的河道恢复其弯曲度，将规则化的矩形或梯形的河道断面修整为自然形式，可有效地增加溶解氧，为动植物生长提供良好的生境，恢复和增强河流的自净能力，大幅度的提高水生态系统承受冲击的能力。在河道恢复的弯曲段，水流交替地将凹岸的泥沙“搬运”到凸岸，形成自然河流的冲刷和沉积过程。这种变化为河流的生物多样性提供了条件，与直线河流相比，弯曲河流拥有更复杂的动植物群落。其丰富的生态环境类型，也构成了河流水系自净能力的重要部分。另外，人工设置落差能减缓坡降，降低洪水流速，起到保护河床的作用；而且能在河道水量较少时通过拦蓄水流维持枯水期河道所需生态水量和生态水位，保持一定的河道水面面积。但在设置落差时必须考虑鱼类的迁徙，最大设计落差不得超过1.5m。可以将坡降过大的河段设置成坡度为1/10的阶梯状，阶梯间高差为30cm，在每节阶梯间设置约50cm深的池塘；横断面方向设1/30的倾斜坡度，以维持流量发生变化时鱼类上溯的流速和水深。这样的人工落差易于鱼类迁徙，而且可以增强水体的复氧能力和自净能力，也有利于水流和河相形成多种变化，保持生物的多样性。

3.3.8 生态系统构建技术

对于水量严重不足，常年干涸的河道，即使通过调度或采用其它技术手段也难以保证其基本生态流量，在这种情况下，该河道基本不能继续保持其河流生态系统的属性，生态系统退化，可以根据具体情况，构建其它类型的生态系统进行替代，如在沙化河床构建草原生态系统替代退化的河流生态系统，在没有流速的水域构建湖泊生态系统等。

第四章 生态修复模式体系

第一节 国内外河流生态修复实践

不同的河流在水文地貌、河道形态、生物群落以及可能恢复目标等方面有所不同。国内外大量河流生态修复与重建的实例均表明，河流生态修复不存在简单而又行之有效的固定的修复模式。比如美国密歇根州 Pere Marquette 流域修复采用的专门闲置这样一种非构造型的方法；奥地利的 Danube 修复工程、美国佛罗里达州的 Kissimmee 河修复工程以及法国莱茵河各大支流的修复则采用了改善网络连通性的功能的方法，即通过增加河漫滩洪水脉冲的持久性来改善河流侧向的连通性以实现生态修复；日本治河多采用自然型河流的方法。通过研究国内外与海河流域平原河流具有一定共性的河流生态修复的实践经验，对确定海河流域平原河流的生态修复方法具有重要意义。

4.1.1 国外的生态修复实践

国外河流生态修复的研究实践始于 1938 年。多年来，在河流生态修复理论与重塑河道天然形态、恢复生物栖息地等修复实践方面取得了相当大的成功。丹麦斯凯恩河和美国基米西河均为通过重塑河道蜿蜒性、增加河流与洪泛区之间连续性方式实现生态修复的成功案例，对海河流域平原河流生态修复模式的研究具有借鉴意义。

4.1.1.1 丹麦斯凯恩(Skjern)河下游河流及河谷生态修复

斯凯恩河是丹麦最大的一条河流，由丹麦西部的日德兰半岛流向灵克宾海湾，流域面积 2490km²。河流水质良好，水量有季节性的波动。上游约 80km 的河流基本保持天然状态，生物多样性丰富，存在一些珍稀物种。下游 19km 的河道在 20 世纪 60 年代进行了开挖和渠化，约有 40km² 的河谷被改造成农田，部分农业污水直接排入河道，造成河流生态系统破坏。1987 年，丹麦议会通过决议对斯凯恩河下游河道及河谷进行修复。

斯凯恩河生态修复的目标是恢复河流及河谷截留营养物质的能力、恢复湿地和鸟类的栖息地、发展下游渔业与旅游业。该目标主要通过恢复河流与洪泛区的物理与水文动力过程，即河流与其洪泛区之间的连通性来实现。具体包括：

重塑河道蜿蜒性、调整河流水位以及河流与河谷之间的水位波动以改善下游生境和水质；改善洄游鱼类和珍稀物种生成环境，如鲑鱼的生存条件；提高湿地与河漫滩植被覆盖率。

斯凯恩河生态修复的工程措施于 1999 年六月启动，2002 年秋基本完成。修复时尽可能将斯凯恩河恢复到 1960 年前的状态。除了在下游 40km²的河谷进行退耕还林、还草外，重新开挖河道，对河口进行清淤，拆除 1960 年围垦的堤防、两个泵站和一个堰。工程实施后，河流的蜿蜒性增加，河流与河谷之间的联系更加紧密，部分河谷低地成为永久性的浅水湖。另外，为了减少梭鱼等对鲑鱼类珍稀物种的捕食，在工程设计时尽量避免河流穿过湖泊。

斯凯恩河生态修复取得比较好的效果。修复区域每年大约能够截留 200 吨氮、5-10 吨磷，修复后斯凯恩河每年流入灵克宾海湾的营养物质比修复前大约减少了 10%。

重塑河道蜿蜒性的措施，在修复河段共构造 46 个河湾与浅滩，使河长由修复前的 19km 增加到 26km，有效地提高了生境的差异性。动物的数量和物种多样性随之增加。如进行生态修复后，斯凯恩河鲑鱼的数量有显著增加。2000 年约有 5800 条，到 2002 年则增加到约 26200 条。河内与河岸的大型植被覆盖率虽然在短期没有增加，其物种多样性却大大提高了^[29]。

4.1.1.2 美国基西米河生态修复工程

基西米河位于美国佛罗里达州中南部，经基米西湖流至奥基桥湖，河道全长 166km，流域面积 7800km²。流域内湖泊众多，沼泽湿地面积大。

1962-1971 年，由于防洪排涝的需要，基米西河两湖之间的干流逐渐被渠化，对河流生态产生了一定负面影响。渠化前，该河段河道自然蜿蜒，长约 166km，河漫滩展至 116-312km，水深 0.13-0.17m。由于降雨丰沛、水流具有明显的季节差异且河水流动缓慢，在两岸滩地上形成了约 140km²的沼泽和湿地，使流域内形成丰富多样的生物群落。渠化后，该河段成为一条 90km 长、9m 深、100km 宽的人工河道，河长缩短约 38%。另外，为满足航运需要，沿河修建了六级拦河坝，最上游的一级控制基米西湖出流，其余拦河坝沿河形成 5 级河道型水库。这些工程破坏了河流自然的水力水文条件，河流水位的季节性变化消失，致使两岸湿地和沼泽的面积减少了 105-125km²；部分河槽内由于长期低流量或无流量，使得大量外来浮游生物及生物残骸堆积，消耗大量溶解氧，致使水质恶化；

各种水生生物和两栖生物由于生存环境被破坏而消失，河流生态系统的结构与功能受到破坏。

基米西河生态修复是通过采用工程措施调整上游来水以及回填渠化河道、恢复河道蜿蜒性来实现的。整个修复工程包括上游生态复兴工程与下游二级回填工程两部分。上游生态复兴工程主要是通过调整上游一系列湖泊间湖水的调节方式与措施，恢复渠化前的水位波动，从而使基米西河下游重新形成季节性变化的水流。下游二级回填工程是在上游水流调整的基础上进行。通过回填约14.5km的渠化河道并与残余的天然河道连接的方式恢复河流的蜿蜒状态；拆除拦河坝并对相应的堤防和附属设施进行改造和更替^[30-31]。这些工程措施加上上游来水调整，修复了基米西河下游水位的季节性浮动，有效地改善了河流生境进而实现全面改善河流生态系统的目的。

总体来说，国外大多数河流水量充沛、水质问题不突出，河流生态修复主要是恢复和改善河流自然形态和生物栖息地。

4.1.2 国内生态修复实践

我国河流生态修复的研究还处于起步阶段。近些年实施了一些卓有成效的河流生态修复示范工程，对研究海河流域河流生态修复模式具有一定的启示作用，如借鉴塔里木河生态修复的经验研究解决海河流域河流干涸、沙化问题；借鉴杭州长桥溪生态修复示范工程的经验研究解决河流水污染问题；借鉴桂林环城水系生态修复的经验研究解决河流水系连通性的问题等。在海河流域已进行的生态修复实践中，转河作为城市河流，其在河道景观生态修复方面的经验对流域内其它河流的修复具有一定的借鉴意义。

4.1.2.1 塔里木河河道输水生态修复

目前，国内、外有关河流生态修复的研究与实践大多是针对水量比较丰沛的河流。但海河流域兼具有资源性缺水和水质性缺水的特点，流域内河流普遍存在断流、干涸现象，河流生态系统退化比较严重。因此，对其进行生态修复与修复水量充足的河流有很大的不同。目前我国关于此类河流的修复实践还比较少，比较有代表意义的是塔里木河采用河道输水的方式进行流域生态修复的实践。

塔里木河全长 1321km，是我国最长的内陆河，干流自身不产流，来水主要

由阿克苏河、和田河和叶尔羌河三大源流汇入。塔里木河地处干旱区，具有自然资源丰富和生态脆弱的双重特点。水资源开发强度过大，将对流域的自然生态环境造成严重破坏。

塔里木河上游的总来水量自 1958 年来呈增加趋势，但由于耗水量增加，干流量只相当于平水年或略偏枯水年的水量。1972 年大西海子水库建成后，由于水流被拦截，致使塔里木河下游从大西海子水库至台特玛湖 321km 河道断流，地下水位下降，河岸植被严重退化，以芦苇、大花罗布麻、骆驼刺等为主的草本植物大片死亡，怪柳、胡杨大面积衰败，风蚀沙化加剧。因此，对塔里木河进行生态修复应首先保护上游水源地和对中游进行生态治理，下游主要在“生态输水”后，以自然恢复的方法实现生态系统的重建与修复。

从 2000 年 4 月至 2005 年 6 月，利用开都河天然来水连续偏丰，博斯腾湖持续高水位的有利时机，从大西海子水库向塔里木河下游进行了 7 次生态输水，形式为沿河道直接输水。自博斯腾湖至台特玛湖输水线路总长 927.59km，输水 $20.44 \times 10^8 \text{m}^3$ ，使得台特玛湖形成约 200 km^2 的湖面；同时，为尽可能地向下游提供更多径流，在河水容易漫溢的中游地区沿河修建堤防且在堤防地段设置“生态闸”以消除对中游生态的不利影响；这些措施有效抑制了由于河道断流，地下水位下降导致的生态退化态势，取得了良好的生态效益。

生态输水后，下游河道两侧 300 的范围内地下水水位回升较快，水质也得到较大改善，为河岸植被的恢复与生态系统的重建创造了必要条件。停滞多年的胡杨开始长出新枝，距河 300m 以内，植物种类及数量明显增加，植被覆盖率显著增加，英苏断面，植被覆盖率从 27.% 增加到 40%，阿布达勒断面从 36% 增加到 47%。

另外，修复采取了“生态闸”与输水堤防相结合的措施，能在保证下游水量的同时避免堤防带来的一些诸如地下水位下降、矿化度升高和植被群落衰退等的环境问题^[32-34]。

海河流域的许多平原河流或河段，如永定河下游、潞龙河、子牙河等均存在严重的河道断流、河床沙化、生态系统退化等问题。本节认为，可以参考塔里木河流域生态修复的方法，通过季节性的生态输水，恢复河岸植被，修复退化的生态系统以实现改善生态环境的目的。

4.1.2.1 杭州长桥溪污水处理生态修复

杭州长桥溪的生态修复主要是针对水污染严重问题,采取生活污水集中处理和人工湿地等技术实现。研究海河流域一些严重污染的河流或河段,如卫河、卫运河以及徒骇河等的生态修复模式时,可借鉴该示范工程的一些做法。

杭州长桥溪是西湖上游的四大溪流之一。由于流经居民区和林田,点源污染和面源污染均比较严重,流入西湖的水常年为劣V类,加之河床任意倾倒垃圾,蚊蝇滋生,严重破坏长桥溪的生态环境。2003年生物多样性调查仅发现16科的20种植物,且多为小草本植物,上游溪中以水芹为绝对优势种,下游以范草形成单一的优势种群。

长桥溪生态修复主要是在长桥溪流域构建湿地公园,将流域内的污水集中汇入地理式污水处理系统进行净化处理,出水进入湿地公园中的初级人工湿地,经多级跌水,进入二级人工湿地,最后汇入西湖。

地理式污水处理系统的主体部分建造在地下,大大降低了对环境的影响;地上部分则与园林景观建设相结合。人工湿地的植物主要根据长桥溪流域的气候、地形和人文景观条件,选择耐污净化能力强并具有一定观赏价值的植物,如挺水植物主要选择水毛茛、黄营蒲、再力花、芦竹、芦苇、千屈菜、野菱白、香蒲、水竹、泽泻、慈姑、石营蒲、荷花等品种;浮水植物有睡莲;沉水植物选择了黑藻、金鱼藻、苦草、范草、狐尾藻等品种。

长桥溪生态修复工程取得了明显的成效,通过污水处理系统和人工湿地处理系统,长桥溪的水质得到明显改善,2006年主要污染物总磷、总氮、氨氮和高锰酸盐浓度分别降至0.067mg/L、3.54 mg/L、0.59 mg/L和2.11 mg/L,高锰酸盐指数达到地表水I类标准,总磷达到II类标准,氨氮达到III类标准。而由乔灌木、湿生植物、挺水植物和沉水植物共同组成约44455m²的湿地生态系统,提高了长桥溪水生态公园的生物多样性水平^[35]。

4.1.2.3 桂林环城水系河网沟通与截污清淤生态修复

桂林环城水系的生态修复工程是国内使用沟通水系的方法实现河湖水体生态修复的成功范例之一,对海河流域河流的生态修复研究具有一定的参考意义。

天然的河流湖泊与历代人工开凿的壕塘沟渠相互贯通形成交织水系是桂林环城水系的一大特点。漓江是桂林环城水系的主动脉,在城区有49.3km长的河段,其主要支流桃花江在城区河长为18.4km,此外还有小东江、灵剑溪、南溪等支流。桂湖、榕湖和杉湖构成水系的环城三湖,城内还有芳莲池、清塘、阳

塘等较小的湖塘。

近些年，由于维护不利，水道壅滞，水系中断，造成环城水系支离破碎和水环境恶化等一系列问题，主要表现在内湖湖床淤积、水体污染和“驳岸”失修三方面。湖水污染有三方面的原因：一是常年积淀的底质造成的内源污染；二是内湖水位高于漓江、桃花江，成为死水，缺乏自净能力；三是大量生活污水和工业废水排入。

针对这些问题，对桂林环城水系进行生态修复应区别于以往引水入湖的做法，必须考到整个城市水环境的综合修复与改善。采取“两江四湖”的水利工程措施实现“沟通水系，分流调水；清淤截污，防洪排涝；水系通航，环城旅游”的目标。具体的修复措施包括沟通水系、控制水污染和景观建设等。

桂林环城水系中，南端榕湖西侧的春天湖与桃花江相通，在象山脚下桃花江汇入漓江，北端却不与漓江连通，通过开挖古水道，重建木龙湖的形式连通内湖北端与漓江，沟通环城水系。另外，对内湖进行输水，改善水质。增强水体自净能力并增大河湖的水环境容量。

解决水系水污染，必须切断污染源并清除内源污染，采用吸泥泵远距离输送的方式进行清淤，基本清除内源污染。控制外源污染，首先将沿河湖的污水排放口全部截流和实现雨污分流，再进行生态护岸建设，重修生态岸线 10.6km。治理后各项水质指标均达到地表水Ⅲ类水质标准，改善了水系的水环境。

另外，为实现环城旅游，还采取拆除旧桥等航行障碍，衔接江湖水位，改善周边景观环境等措施。

海河流域的河流中，大多数平原河道均存在一定程度的淤积问题，且由于用水和防洪的要求，河流水系之间，以及河流与水库、洪泛区之间的联通性遭到很大程度的破坏。桂林环城水系生态修复虽然在空间尺度上要比海河流域河流生态修复要小，但其采用的沟通水系以实现生态修复的方法和成功经验对海河流域河流的生态修复却具有借鉴意义。另外，海河流域的部分河流还存在水质污染严重，沿河仍有排污的情况，在对其进行生态修复的研究中应该考虑采用实例中截留排污口、实现雨污分流、清除内源污染、构建河岸生态屏障的方法^[36-38]。

4.1.2.4 北京转河生态修复

2003 年底，北京北环水系转河治理工程完工后，治理后的转河西起长河的

高粱桥，东到北护城河，是北环水系的一段，全长 3.7km。从历史上看，转河的形成和发展大体经历了三个阶段。

转河来源于古高粱河。1905 年，由于修建京张铁路，需要在长河高粱桥东侧修筑西直门火车站。为保证站区铁路安全运行和河道正常输水，将长河过高粱桥后改道，北转约一公里，在静土寺南向东过京张铁路桥、车辆段铁路至索家坟之后重新向南折返原河道，在东小村分水入西北护城河、西护城河。改道后，河道平面呈“几”字形，西起西直门高粱桥东到北护城河，连接长河的下游，全长约 2km，称为转河。转河是北京城北地区防洪、供水的主要河道，兼具涵养生态的作用。

1975 年至 1982 年，北京修建地铁，对北护城河进行改道。转河被裁弯取直改为暗沟，与北护城河的暗沟相连，转河逐渐失去向下游输水的功能，这一带的生态环境也随之受到影响。

2002 年，为改善北京市北部地区生态环境，治理环城水系，重新对转河进行整治。新建转河从长河北展后湖至北护城河，河道全长 3.7km。其治理和生态修复的经验，特别是关于截污和生态景观建设方面的经验对海河流域河流的生态修复具有借鉴意义。

1998 年以来，北京开始进行城市中心水系整治，以实现“水清、流畅、岸绿、通航”的目标。西直门暗渠为清污混流暗渠，有附近密集楼群排放的污水汇入，造成从京密引水渠引入北护城河的清水，在这里水质降了一到两个等级，影响着北海、中南海和半个北京城的水质。

西直门暗沟的防洪标准为 20 年一遇、流量为 $65\text{m}^3/\text{s}$ ，50 年一遇流量为 $80\text{m}^3/\text{s}$ 。上游河道经整治排水通畅后，给下游暗沟的排洪带来巨大压力。由于暗沟本身已没有扩大排洪的可能，所以必须另辟行洪通道，开挖转河提高防洪排洪能力。

另外，暗沟所流经的西直门地区，人口居住集中，经济繁华，是北京交通枢纽之一，有必要实现污水截流，还清河水，增加景观生态水面，进而改善生态环境^[39]。因此，北京 2002 年 5 月开始实施转河综合治理工程。

转河的治理以建设生态河道，为生物提供栖息繁衍的自然环境，恢复生物多样性，提高河道自净能力为目标。提出并遵循以下五个设计原则：保护水质、扩大水面；恢复生物多样性、回归自然；以亲水为目的、与城市相协调的景观设计；尊重历史、传统与现代共存；以人为本，提供沟通与交流的平台。在治理方法上采取的主要措施有，截留污水与雨污分流，软化河底边坡与生态护岸，

扩大水面面积并恢复水生动植物，沟通水系，促进河水循环，重塑河流蜿蜒度，构建生态景观。

转河旧有的雨水线路大多属于雨污合流，污水不容易分离出来。每年雨季，大量雨水、污水进入污水管线。由于污水管线管径小，不能及时排泄，导致污水上溢进入雨水管线，流入河流污染水体。为了避免污水入河，首先对转河沿线的污水口进行了彻底截流。沿河两岸铺设雨、污管线，改移污水管线 5407 米，铺设雨水管线 3200 米，实现了雨污分流。分流后，污水通过污水管线汇流到污水干线进入市政管网，雨水通过雨水管线、雨水口入河^[40]。

软化河底及河坡，可以促进地表水和地下水的交换。滞洪补枯、调节水位，恢复河中动植物的生长的环境，恢复生物多样性，进而借助动植物自身的功能净化水体。转河采用驳石护岸、牢固空心砖护岸、仿木桩护岸、旧轮胎护岸等生态护岸的措施，促进地表水与地下水的交换。河道两岸种植了大量的柳树、白杨、棒树等喜水特性的植物，通过其发达的根系稳固河堤，有效抵御汛期洪水的冲刷。采用卵石、木桩等天然材料护岸既能稳定河床，又能避免等带来的负面作用，为水生动物和两栖动物提供筑巢、产卵的场所，同时还能起到良好的景观作用装点环境。河底和河坡铺设了透水砖和鹅卵石，两岸路面采用透水砖，利于水生植物生长，也利于地表水和地下水的互相补充。园路采用透水的嵌草、青石板、汀步石，设置卵石排水沟，便于利用雨洪资源。使雨水迅速渗入地下，补充土壤水和地下水，保持土壤湿度，改善城市地面植物和土壤微生物的生存条件。

转河土工结构档土墙设在常水位以下，在墙顶外侧形成浅水湾种植台，浅水湾的设计增大水面面积 9000m²，使转河的水面面积达到 7 万m²。

河道内种植荷花、菱白、曹蒲、芦苇、茅草等几十种水生植物，促进水生植物群落形成。不仅为水生动物和昆虫等提供栖息和繁衍的场所，同时，还能够吸附降解水中的污染物质，净化水体

变暗沟为明河，打通北环水系，从根本上解决了北环水系通航的问题。沿河设置多处瀑布、水帘洞、溪流、水墙、水槽，通过循环流动，实现河流水体的自我净化，同时达到良好的景观效果。

转河的修复整治工程全长 3.7km，新建桥梁 13 座、船闸 1 座、码头 2 座和补水闸 1 座，新建滨河路 3.7km，护岸 7.4km，建设景点 40 余处，水生植物近百种，约 2.4 万余株。新增水面 5.7 万m²，新增绿地 8 万m²，投资 6.3 亿元^[41]。修

复整治后的转河，连通北环水系，维护北京中心水系景观。将原来的暗渠改成明河，有效遏制沿河两岸的污水侵入。河道与边坡各种生态工程的建设为生物提供更多栖息空间，进而在相当大的程度上改善了城市生态环境。另外，通过景观建设和历史文化古迹恢复，为市民提供了良好的滨河休闲场所。

第二节 生态修复技术的适用性分析

海河流域作为北方重要的工农业基地，人口 1.22 亿，用水量巨大，对河流的安全要求高。应在现有的水文条件、河道形态以及水利设施的基础上采用适宜的修复技术来实现生态修复的目标。因此，有根据海河流域的河流的特点及其功能要求对目前国内外广泛应用的修复技术进行分析研究，筛选出有条件在海河流域应用且能取得良好效果的修复技术并重新进行分类。

4.2.1 生态修复技术筛选

流域平原河流普遍断流干涸，河道补水是进行生态修复的基础和关键，这与海河流域严重缺水的现状相矛盾。因此，应优先在有补水条件（如滦河）或有相当历史文化及经济意义（如永定河卢沟桥河段和北运河）的河流（段）使用。补水水源应多样化，科学统筹上下游合理分配水资源，使用南水北调客水，充分利用雨洪资源和中水资源^[42]。对部分渗漏严重的沙质河床，可采用防渗技术减少渗透量并为河道补水技术创造必要条件。实在保证基本生态流量，河流生态系统退化的，可应用生态系统构建技术。如在永定河沙化河床构建草原生态系统替代退化的河流生态系统。

海河干流、卫河等由于河道淤积和承接污水，存在底质污染，可以采用底泥清淤与覆盖技术处理。化学修复技术的短期效果好，但存在二次污染的问题，应慎重使用该技术，优先使用生物净化技术或通过提高河流自净能力的方式实现水质改善。只有在污染特别严重，可生物降解性差的河流中，如卫河和卫运河等，可以考虑使用化学修复技术。人工湿地技术净化效果好，在海河流域温榆河、永定河、滹沱河等的生态修复实践中多有应用；由于流域冬季气温低，人工湿地生态系统运行困难，需要采取辅助措施。

生态护岸在海河流域应用的关键在于与防洪工程相结合，应尽可能选择安全系数高的复式护岸、土工格室护岸、石材散抛护岸形式。河岸带、河滩地被

农田和建筑用地挤占的情况比较严重，如北运河，应综合考虑流域经济发展与河流生态健康的需要，针对不同河流或河段的具体情况，制定切实可行的河岸带修复的范围。天然湿地修复可以利用水利工程的旧河道，河岸开阔地，河道弯曲处等进行。

针对不同河段的河流特点选择适宜的护岸形式。在水流流速比较缓慢的平原河网地区，以自然原型护岸为主。尽可能保留河道的自然土质岸坡，河岸植草种树。对于人工河道的生态治理应尽量采取土质岸坡、缓坡，以植物护岸为主。在城市河道，由于可利用空间少，防洪标准高，大多采用直立式护岸的形式，可以选择生态砌块护岸的形式。在水流较急的河段，必须采取工程措施。应以保持地表水与地下水有效交流为基点，采用块石堆砌、石笼格网、空心混凝土块等方式护岸，为水生植物的生长、水生动物的繁育、两栖动物的栖息繁衍活动创造条件。在河岸边坡较陡的地方，可采用木护岸、抛石护岸等工程措施护岸。在稳定河床的同时改善生态和美化环境，避免了混凝土工程带来的负面作用。在应用草皮、木桩护坡时也可以借助土工编袋，袋内灌泥土、粗沙及草籽的混合物，既抗冲刷，又能长出绿草。没有通航要求的河道可采用自然原型护岸，防止水土流失，还可在正常水位以下采用衬砌空心异型块、预制鱼巢等结构形式，提供鱼类等水生动物安身栖息的地方。有通航要求的河道，正常水位以下可采用生态砌块等直立形式护岸，正常水位以上采用斜坡护岸，以增加水生动物生存空间，削减船行波对河道冲刷的影响，有利于堤防保护和生态环境的改善。在面源污染比较严重的河道可以在河岸构建多阶梯、潜流型或表面流型人工湿地护岸系统，在保证岸坡稳定的同时着重控制入河面源污染。在水位变化较大的河段，采用复式护岸，常水位以下采用生态砖/鱼巢砖等构件、石笼席、天然材料垫、土工布包裹、混凝土块、土工格室、间插枝条的抛石护岸、木框墙、三维土工网垫等形式保证堤案的安全。水位变化区，除冲刷严重河岸需筑硬质堤护坡外，可采用大块鹅卵石堆砌、干砌块石等构件等护岸方式，使河岸趋于自然形态。在受冲河岸堤防内侧也可采用种植水杉等根系为直根的树种或草坪护坡等植物护堤措施。水位变化区以上的部位采用自然原型护岸。

流域河流河岸带、河滩地被农田和建筑用地挤占的情况比较严重，给湿地、河漫滩与河岸带修复技术使用带来相当难度。应综合考虑流域经济发展与河流生态健康的需要，针对不同河流或河段的具体情况，制定切实可行的河岸带修

复的范围。天然湿地修复可以利用的水利工程的旧河道，河岸开阔地，河道弯曲处等有利条件进行。

人工曝气技术、微生物修复技术和水生动植物修复技术在国内、外河流修复实践中被广泛应用。它们在污染净化，水生态恢复方面效果显著，且应用的限制条件比较少，能够用于海河流域的河流修复。

河道内栖息地修复技术和河道空间再造技术均为改善河流生境的技术，应用的限制因素比较多。考虑海河流域的水资源现状和社会、经济发展的要求，这些技术要在保留现有闸坝水库和保证河道安全的基础上进行。

4.2.2 生态修复技术分类

从海河流域平原河流的现状看，水量不足，河流干涸严重与水污染问题是造成河流生态恶化的主要因素；而且河流已建大量水库闸坝，河流的纵向联系被切断，河道渠化，直线化，硬化等，致使原有的自然河道被破坏或部分消失，水生生物生存和繁衍的空间大幅度减少，水体自然净化能力降低，加重了河流生态破坏的程度。因此，可以将流域内河流生态环境恶化解为水量减少，水污染和生境破坏三方面。因此，进行生态修复也应该从这三方面入手。为便于对修复模式进行研究，按照修复技术的功能，将修复技术分为水量调整，水质净化和生境改善技术三类，如表 4.1。

表 4.1 河流生态修复技术分类

水量调整技术	水质净化技术	生境改善技术
河道补水	河道补水	河道补水
	人工增氧	河道防渗技术
河道防渗技术	底泥疏浚或覆盖	水生动植物修复技术
	化学修复技术	生态护岸
生态系统构建技术	微生物修复技术	湿地河漫滩与河岸带修复
	水生动植物修复技术	河道内栖息地修复技术
河道空间再造技术	人工湿地技术和氧化塘技术	
	生态护岸	河道空间再造技术
	河道空间再造	

需要指出，多数修复技术在应用于具体河流时，其功能是多方面的。如河道补水技术，其主要作用在于解决河道水量不足；同时也能稀释水体中污染物

质，增加溶解氧，有利于改善水质；对恢复河岸带植被，加强生态系统的连通性也能起到有利的作用。河道空间再造技术不仅能够创造出丰富多样的生境，其断面修复技术亦能够通过拦蓄水的方式调整河流水量。蜿蜒度重塑等技术则能够增加溶解氧并改善水质。生态护岸技术不仅能消减面源污染，还能沟通水陆生态系统的联系，为恢复健康的河流生态系统创造条件。水生动植物修复技术则在恢复河流生态系统的同时净化污染物。由此可见，这三类技术的划分并不是绝对的。

由于河流生态系统具有复杂性，单一利用某一种修复技术不一定会取得良好的修复效果，必须根据河流的特点，污染程度及其生境现状联用多种修复技术才能取得理想的修复效果。

第三节 生态修复模式的确定

水是河流生态系统最重要的组成部分。没有了水河流生态系统也就不复存在；河道内流量不足，不能满足生态基流的要求，河流生态系统也必然受损并最终退化。从海河流域的现状看，对流域内河流生态环境影响最大的是河道断流干涸、生态水量不足。目前流域内的 21 条平原河道，常年有水的河段仅占 16%，常年断流的河段高达 45%。除北部的滦河常年有水外，其余平原河流已全部成为季节性河流。可见，海河流域生态修复模式的研究应该从水量问题入手，进一步再考虑水质和生境问题，如图 4.1。

根据河流流量是否满足该河生态基流的要求，可分为满足生态基流和不满足生态基流两种情况；根据河流水功能区的要求，结合考虑污染物浓度以及水量和生境对其的耦合作用，水质可分为达标、补水稀释后可达标、提高自净能力后可达标和不达标四种情况；根据河道人工化的程度和生物栖息地现状，结合考虑水量现状的影响，可分为良好，补水后可自然恢复和破坏三种情况。

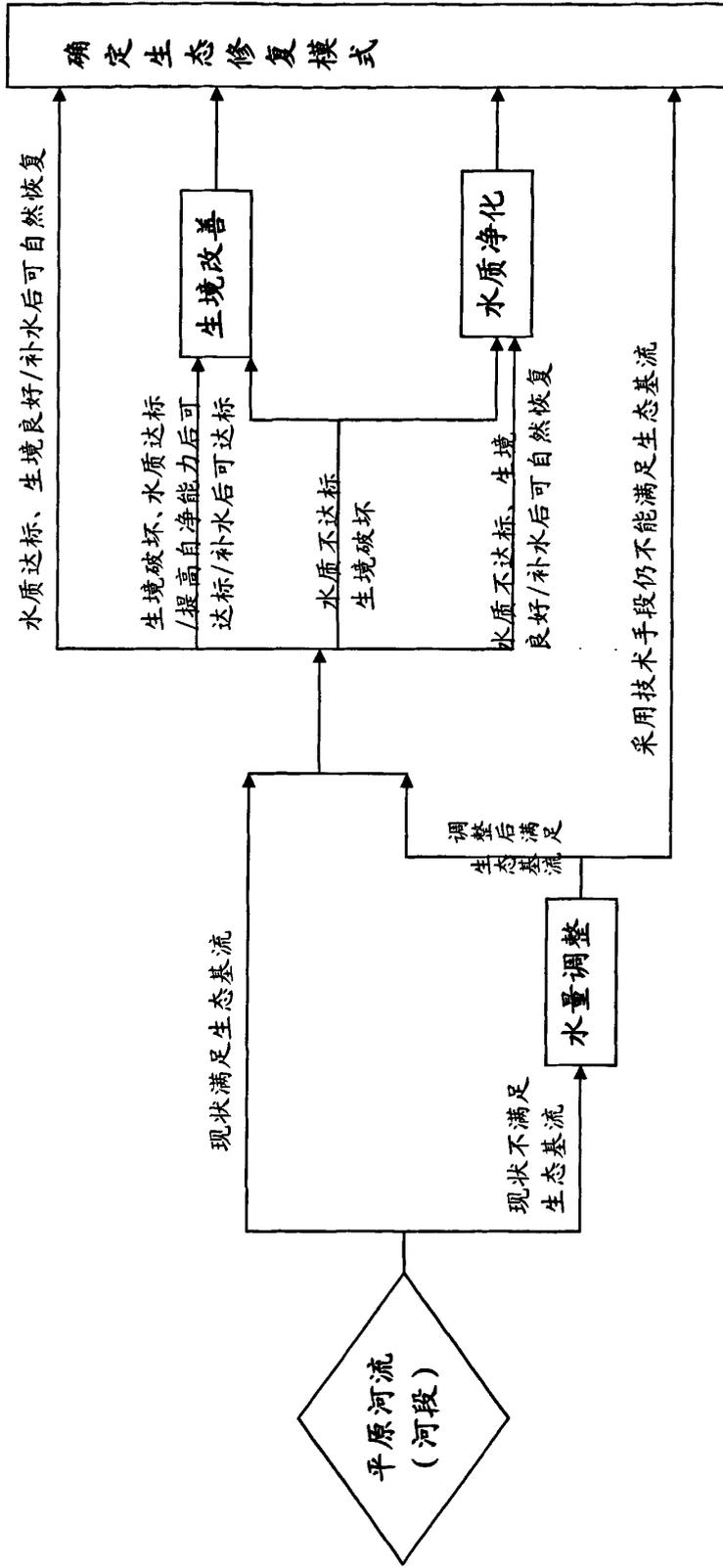


图 4.1 海河流域平原模式修复模式技术路线图

如表 4.2, 对于水量严重不足、常年干涸的河流(段), 在没有足够的水源对其进行补水或采用其它技术手段也不能保证其生态基流的情况下, 该河基本不能继续保持其河流生态系统的属性。不应再以恢复河流生态系统作为修复目标, 应构建其它类型的生态系统进行替代, 以确保其不对周边环境产生破坏。如在沙化河床构建草甸生态系统替代退化的河流生态系统, 在没有流速的水域构建湖泊生态系统等, 即“生态系统替代模式”。

对于能够通过水量调整方法满足生态基流的河流(段), 如有补水水源或能够有效改变河床透水性能等, 应先考虑采用“水量调整技术”满足其生态基流, 再考虑水质和生境的问题, 即“补水修复”。进行补水修复的河道, 其水质一方面取决于来水水质, 另一方面取决于河流本底水质。本节认为, 修复时, 来水水质达标, 主要考虑本底水质存在的问题及生境现状来确定修复模式。

本底水质良好或有轻、中度污染、无严重底质污染的河流(段), 如其生境没有遭到大的破坏和或仅由于流量不足造成的破坏, 只需适量补水即可稀释污染物并自然恢复其生境, 即为“直接补水模式”。如果生境破坏比较严重, 在满足生态基流后也难以自然恢复, 则应在水量调整技术基础上采取改善生境技术对河道形态进行修复, 即为“水量-生境改善模式”。如本底水质严重恶化、存在大的污染源或底质污染严重的河流(段), 仅通过“水量调整技术”不能确保水质, 还应采取适宜的“水质净化技术”。如不需改善生境则为“水量-水质改善模式”, 如需改善生境则为“复合模式”。

对于能够满足生态基流的河流(段), 可进行“直接修复”。如水质良好, 但水利设施如闸、坝等影响河道的连通性, 造成生境破坏; 或水质有轻、中度污染, 且污染物以易降解的污染物为主时, 均可采用“生境改善技术”恢复河流的活力和自净能力以实现生态修复, 即为“生境恢复模式”。如果河流水污染严重, 存在大的污染源, 但河道天然形态保持较好的, 可以采取“水质净化技术”改善水质以修复河流生态系统, 称为“水质改善模式”; 如河道人工化严重, 还需进一步采用“生境改善技术”进行修复, 则为“强化净化模式”。

对于不存在水量、水质和生境三方面问题的河流(段), 则只需加强管理保护, 即为“管理保护模式”。

表 4.2 生态修复模式分类汇总

修复类型	修复模式	河流生态现状			修复技术
		水量	水质	生境	
管理保护	管理保护模式	满足生态基流	达标	良好	加强河流的管理保护
直接修复	生境恢复模式		达标	破坏	生境恢复技术
			提高自净能力后可达标		
	水质改善模式		不达标	良好	水质净化技术
	强化净化模式	不达标	破坏	水质净化+生境恢复技术	
补水修复	直接补水模式	不满足生态基流	达标	良好/补水后可自然恢复	水量调整技术
			补水稀释后可达标		
	水量—生境改善模式		达标	破坏	水量调整+生境恢复技术
			补水稀释后可达标		
			提高自净能力后可达标		
	水量—水质改善模式		不达标	良好	水量调整+水质净化技术
复合模式	不达标	破坏	水量调整+水质净化+生境恢复技术		
生态系统替代	生态系统替代模式	常年断流干涸，河道沙化，现有经济技术条件不能满足水量要求			构建新的生态系统替代，避免影响周边环境

综上，海河流域平原河流的修复模式可分为四种修复类型、九种修复模式。“管理保护”针对生态系统基本健康的河流（段），相应修复模式为“管理保护”；“直接修复”针对满足生态基流的河流（段），包括“生境恢复模式”、“水质改

善模式”和“强化净化模式”三种修复模式；“补水修复”针对能通过水量调整技术满足生态基流的河流（段），包括“直接补水模式”、“水量-生境改善模式”、“水量-水质改善模式”和“复合型模式”四种；“生态系统替代”针对现有条件下不能满足生态基流的河流（段），对应的修复模式为“生态系统替代”。

第五章 典型河流生态修复模式研究

第一节 北运河生态修复模式研究

北运河属京杭大运河的一部分，具有较高的历史、文化和经济价值。永定河是海河五大的支流之一，流经地域广，下游河道断流、沙化严重。滦河是海河流域水量比较丰沛的一条河流，常年有水支流达 300 多条。卫河是海河流域漳卫河水系的一大支流、目前水污染十分严重。本章讨论上述四条河流的修复模式。

5.1.1 概述

北运河发源于燕山北部、军都山南麓，昌平、延庆一带，西界永定河，东临潮白河，在通州区北关闸以上被称为温榆河，有东沙河、北沙河、南沙河、清河、坝河等支流汇入，以下称为北运河，如图 5.1。

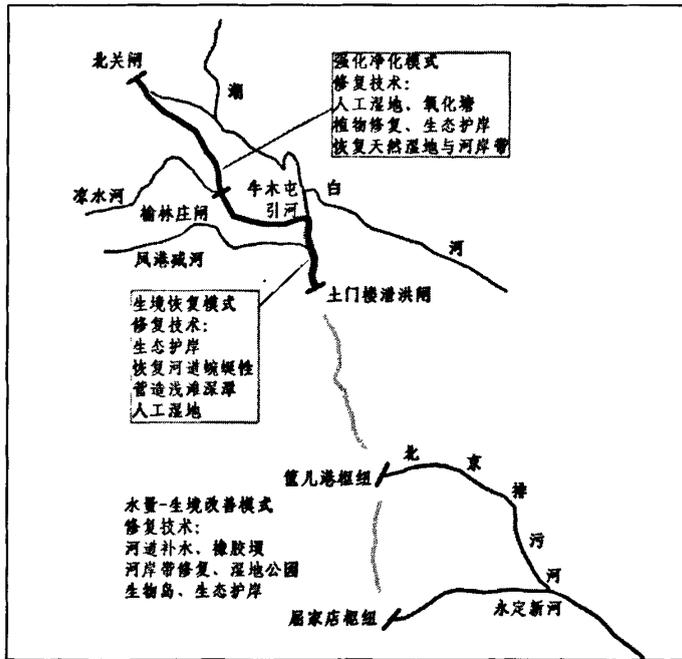


图 5.1 北运河生态修复模式示意图

北运河自西北向东南流经北京市通州区、河北省廊坊市香河县和天津市武

清区、北辰区和红桥区，沿途有通惠河、凉水河、凤港减河等汇入，于屈家店与永定河交汇，至子北汇合口入海河。从北关闸至天津市市区子北汇流口，河道全长 142.7km，流域面积 6166km²，上游（沙河镇以上）为山区及丘陵区，面积 952km²，占流域总面积的 16%，建有十三陵、桃峪口、响潭、德胜口、王家园等 5 座中小型水库，下游为平原区，面积 5214km²，占流域总面积的 84%，建有北关闸、榆林庄闸、杨洼闸、木厂闸等 4 座拦河闸以及土门楼泄洪闸和筐儿港枢纽工程^[43]。

北运河流域属于大陆性季风气候，多年平均降水量为 643mm，降水量年内年际分配很不均匀，主要集中在 6-9 月，约占全年的 84%。1956-2000 年多年平均径流量为 4.81 亿 m³，其中山区年均径流量为 1.29 亿 m³、平原为 3.52 亿 m³。水源主要是温榆河和北京城市河湖退水和污水处理厂出水^[44]。

北运河干流位于湖积泛滥平原上，地势开阔，由西北向东南微倾斜，地面坡度约 2‰。河道蜿蜒曲折，滩地多为农田，堤防外侧为农田、村庄，滩地高程与堤外地面基本一致，下游两侧多洼地。土门楼以上土质多为粉土和粉细沙，土门楼以下以粉土和壤土为主。

5.1.2 生态现状

北运河作为京杭大运河重要的组成部分，曾在我国经济社会文化发展中发挥重要作用。近几十年，随着上游地区水资源开发利用，下游来水量日益减少甚至断流。80 年代以后，大量未经处理的工业废水和城镇生活污水排入河道，北运河水质变差。加上治理力度不足等一些人为原因，河流生态环境不断恶化。目前，北运河停航已久，仅以行洪排涝为主要功能。

相对而言，北运河上游水量是比较充分的，其上游温榆河是北京地区唯一一条常年有水河道，以下还有清河、坝河、通惠河、凉水河等几条大的支流汇入。在北京界内，1961-1998 年北运河多年平均出境水量为 9.31 亿 m³。1999 年以来北京地区连续 7 年干旱，到 2005 年北运河的出境水量依然较大。1999-2005 年的平均出境水量为 4.87 亿 m³。下游却由于自然气候条件变化和用水量的激增，水量明显减少，甚至出现断流河干的情况。根据历史资料，1963 年土门楼-屈家店河段即出现断流，74.3km 的河道断流 60 天，河干 30 天。到 2000 年，北运河下游断流河干的情况更加严重，表 5.1 统计 2000 年北运河断流河干的情况。可以看出，和 1963 年相比，尽管北运河断流干涸的河段没有发生变化，断流天数

及河干天数却大幅增加，基本上是全河断流干涸。这种状况不仅导致北运河的航道功能尽失，还在很大程度影响了下游河流的生态状况，造成河道淤积、湿地萎缩、生境破坏、物种多样性下降等一系列问题。

表 5.1 2000 年北运河断流干涸情况

河流名称	起始断面名称	终止断面名称	河道长度 (km)	断流情况		河干情况	
				断流天数 (d)	实测年径流量 (万m ³)	河干天数 (d)	最大河干长度 (km)
北运河	北关闸	土门楼	54.5	0	0	0	0
北运河	土门楼	屈家店闸	74.3	366	0	366	74.3

水质问题一直是影响北运河生态环境的重要问题。北运河自 20 世纪 80 年代末期以来就受到严重污染，水质远远超标，近年来虽然得到逐步改善，但全河段仍为劣 V 类水，只在每年 6~9 月汛期，污染物得到稀释，河水得到置换后水质稍有好转。根据 2007 年 7 月北运河水质监测数据，如表 5.2，北运河水质为劣五类，主要表现为营养物质超标，主要的污染物为氨氮，并且上游的污染更严重。

表 5.2 北运河各监测断面污染物指标监测结果

项目 取样点	氨氮 (mg/l)	总氮 (mg/l)	总磷 (mg/l)	高锰酸盐指数	挥发酚 (mg/l)	六价铬 (mg/l)
坝河	12.74	14.62	0.558	6.73	0.0000284	0.0447
曹坝上游	9.17	13.58	1.156	6.54	未检出	0.0066
曹坝下游	7.91	15.19	0.653	6.67	未检出	0.0170
风港减河	22.40	23.04	1.687	7.67	未检出	0.0759
筐儿港枢纽	6.84	8.03	1.275	7.19	未检出	0.0257
武清城区	4.97	5.69	1.615	6.99	未检出	0.0413
黄庄橡胶坝	5.58	5.78	0.677	6.95	未检出	0.0291

北运河河滩有一定比例的植被覆盖，除城区景观河道外，堤防护坡衬砌的比例小，与陆地生态系统的连通性较好，物种多样性尚佳。但由于北运河近些年断流污染严重，对河滩湿地，水生动植物群落造成了一定的破坏，且一些水利工程设施影响河道的天然形态。仅以植被覆盖率为例，1994-2004年间北运河河岸植被发生了比较严重的退化，高植被覆盖区面积减少了331.04 km²，而无植被覆盖的区域面积增加了280.12 km²[45]。

5.1.3 生态修复模式研究

北运河作为人工运河，其河道的历史功能是漕运、防洪、排涝和灌溉，目前的主要功能是防洪排涝和灌溉。从河道功能的角度分析，北运河生态修复的目标是：第一，保证北运河下游不断流，部分恢复大运河的历史风采；第二，缓解水质严重污染，减小污染物对河流生态健康的不利影响；第三，使河道形态更近自然，改善生态环境，使北运河本身不对周围环境造成负面影响。

北运河生态健康评价的结果，如表 5.3。总体上看，北运河的生态属亚健康，但不同河段生态状况不同，每个河段的水量，水质以及生境条件不同。可见，各河段生态恶化的成因不同；因此，采用的生态修复技术不同，需要分段修复北运河。

表 5.3 北运河生态健康状况评价结果

河段	生物评价	水量评价	水质评价	主要问题
北关闸-牛牧屯	生物多样性较丰富	季节性 有水	中度污染	存在污染源、水质差、生境需要改善
牛牧屯-土门楼	生物多样性丰富		中度污染	上游来水水质差、生境需要改善
土门楼-筐儿港	生物多样性丰富		中度污染	河道断流、生境需要改善
筐儿港-屈家店	生物多样性丰富		轻微污染	要改善

从表 5.3 可见，北关闸~牛牧屯河段的生态状况最差。造成该河段生态恶化的主要原因是水污染严重。牛牧屯~土门楼主要是受到上游来水水质的影响。土门楼-筐儿港和筐儿港-屈家店水质评价结果不同，但这两段河段的主要问题都是水量不足、断流导致的生态恶化。因此，将北运河划分为北关闸-牛牧屯，牛牧屯-土门楼以及土门楼-屈家店三段确定修复模式。

5.1.3.1 北关闸-牛牧屯河段生态修复模式研究

北关闸向下至牛牧屯，河道全长 40.1km，其上游为温榆河，沿途有坝河、通惠河、凉水河汇入，水量比较丰沛，尤其是在汛期，北运河作为重要的排水河道，承担着北京城区 90%的排洪任务。根据 2005 年的监测资料^[46]，北运河通州站径流量为 3.3 亿 m^3 ，榆林庄站径流量为 2.1 亿 m^3 ，能够满足其生态环境需水量。

尽管北关闸-牛牧屯河段不缺水，但水质却远远达不到该河段 V 和 IV 水的要求。从监测的情况看，水质为劣 V 类，氮、磷等营养元素污染比较严重，氨氮

超标将近十倍。这主要因为本河段水源由两部分组成，一是北京城区涝水；二是北京城市河湖退水及部分废污水。北京城区的污水除部分经北京排污河下泄入永定新河外，大量排入温榆河，而坝河、通惠河、凉水河等一些大的支流本身就是北京市污水排放系统的一部分，承接北小河污水处理厂、酒仙桥污水处理厂、东坝污水处理厂、高碑店污水处理厂、定福庄污水处理厂、卢沟桥污水处理厂、吴家村污水处理厂、郑王坟污水处理厂、小红门污水处理厂、方庄污水处理厂、岱头污水处理厂等污水处理厂的出水。由于城镇污水处理厂出水排入Ⅳ类、Ⅴ类功能水域，执行污水排放二级标准，即氨氮小于25mg/L，总磷小于3mg/L；而地表水Ⅴ类氨氮和总磷的标准是2.0mg/L和0.4mg/L。因此，北运河水质很难达标，给北运河生态环境造成巨大压力，必须采取有效措施改善水质。

因此，从北运河水污染的成因看，采用污染源控制手段最有效，即通过控制支流水质和排污口水质，确保干流水质达标。由于主要污染物是氮、磷等营养物质，可以选择人工湿地，氧化塘，植物修复技术，生物膜技术等。在河岸较为开阔的地带或地势较低的洼地构筑人工湿地，将污染的河水引入，利用湿地的过滤，吸附，络合以及附着在填料和植物根系的微生物降解和植物的吸收转化去除污染物质，净化水质。同样，也可以将污染的河水引入氧化塘，通过沉淀与生物降解等作用去除污染物质。对于污染特别严重的区域，如排污口附近或污染物积累的水域可以采用生物膜技术、构筑生物滤池等进行处理；对水质要求高的区域，可以采用膜技术等深度处理技术。另外，还可以通过设置曝气机，移动式曝气船等形式，增加河流溶解氧，加快氮、磷降解。或者沿河道栽种芦苇、蒲草等耐污的水生植物，在河水流动的同时对其进行净化。

北运河上游通州城区河段已建成城市景观河段。采用阶梯式生态护岸，沿河栽种荷花、香蒲等耐污植物，增加河滩、岸的植被覆盖率，具有较好的去污和景观效果，应予以保留。通州以下乡村河段两岸除护堤林外，多为农田，生物多样性有所不足，河流自净能力有限，生境相对比较单一，可采用生态护岸技术中的抛石或石笼护岸、鱼巢护岸等形式，既加固河岸，又不影响水、陆生态系统间交换，还能够有效的拦截面源污染。

在条件成熟时，恢复天然湿地，可将蓄、滞洪区改造为复合流湿地，通过河水季节性的淹没，营造多样的生物栖息地，同时起到提高河流自净能力的作用。在有条件的区域进行退耕，恢复河岸带。由于恢复河岸带的廊道功能至少要保证两岸140-190m的残林，实行的难度和经济压力比较大，可以主要恢复河

岸的缓冲功能。根据具体河道的情况，保证 5-50m 宽的灌丛或 50-200m 的草地，可以达到比较好的效果。沿河布置水生植物，或采用设置生物沉床和生物浮床等形式，一方面恢复水生生物群落，一方面截流降解污染物质，还有一定的景观效果。

基于以上分析可见，造成北关闸-牛牧屯河段生态恶化的主要原因是严重的水污染。因此，该河段适宜的修复模式属于直接修复中的“强化净化模式”，即控制污染源，并通过改善生境的方法提高河流自净能力以及营造健康的生态系统。

5.1.3.2 牛牧屯~土门楼河段生态修复模式研究

这一河段承接北京的来水，整个河段无断流情况。从评价结果看，水量能够满足生态要求。根据调查，该河段存在的主要问题是水污染和河流天然形态遭到破坏，即生境问题。根据土门楼的监测资料，超标项目主要是营养盐类污染物，和上游基本一致，但水质略有改善。这可能是由于上游污染物质经过 50km 左右的河道得到部分自然净化。可见，上游来水水质太差是该河段水质不达标的主要原因，另外该河段农业生产活动也有一定影响。如果上游水质达标，控制住农业面源污染后，水质应该基本达到要求。该河段的天然形态受人为因素影响比较大，河岸带基本被农田占用，其廊道功能，缓冲带功能和护岸功能也随之受到严重影响；河道曾裁弯取直，影响了河道的蜿蜒性；河上闸坝众多，河流连通性受到破坏。

因此，对牛牧屯~土门楼河段进行生态修复，关键是通过恢复河道的天然形态来实现，同时提高该河段的自净能力，改善水质，即为直接修复中的“生境恢复模式”可以采用的措施有：

生态护岸，选用网格植被护岸，石笼柳干复合护岸，植生抛石护岸等形式，勾通水域生态系统和陆地生态系统的物质能量交换，促进生物多样性形成，并有效的截流面源污染。

按宜弯则弯，宜宽则宽的原则设置河道形态，伴随河道的弯曲，使用挖掘法或植石法连续布置浅滩深潭，营造丰富多样的水生动植物生存环境并能有效地增加溶解氧。

对现有的闸坝进行生态改造。在现有的丁坝上覆土并栽种植物。在河流拐弯处增加丁坝数量，加固河岸的同时营造水生动物的栖息场所。对水闸，水坝

进行改造,预留鱼道,用闸门控制进出水,中间填充天然砂料,培养附着微生物,设置人工曝气装置,进行生物过滤^[47]。这些措施其效果相当于1个大型曝气生物滤池,不仅对去除悬浮固体、色度有明显作用,而且通过曝气生物处理还能去除一部分的有机物和氨氮等。

利用废弃的河道、河滩洼地、河心沙洲等恢复天然湿地,布置多种水陆过渡形式,增加河滩植被覆盖率。在新河河口,龙凤河河口以及青龙湾减河河口等水源汇入口处,恢复天然湿地或设置人工湿地系统,作为生态屏障,增加入河水源。

5.1.3.3 土门楼-屈家店河段生态修复模式研究

该河段主要问题是河流断流,除汛期外,水流基本不流动,市区等景观河道依靠橡胶坝壅高水位,能够保证一定的水深。北运河作为大运河的一部分,具有相当大的历史文化价值,有必要进行补水。补水的水源主要有南水北调客水,雨洪资源和中水。北运河6-9月汛期径流量占全年的2/3,大部分没有得到有效利用,可以通过科学调度管理加以利用;加大污水的处理力度,将中水补入河道、增加水量。鉴于海河流域水资源严重紧缺状况,如果采取以上措施仍不成功,则可以在现有水闸梯级拦蓄基础上补充建设橡胶坝,控制断续水流,使之阶梯式下泄以形成连续水面。

该河段应保持天然河道形态。可有选择的采用河岸带修复,修建湿地公园,设置生物岛等技术方法。天津市武清区振华道上游已建成3.73km的城市景观河段,设置了亲水平台,布置荷花等水生植物,取得的良好景观效果和一定的生态效果,但其采取垂直浆砌护岸的形式还有改进的余地,如采用阶梯式植被护岸或网格植被护岸将能取到更好的生态效果。

综上,北运河土门楼-屈家店河段的生态修复模式应为补水修复中的“水量-生境改善模式”。

第二节 永定河修复模式研究

5.2.1 概述

永定河是海河最大的支流,在两河,即发源于山西省宁武县的桑干河和发源于内蒙古兴和县的洋河,于河北省怀来县朱官屯汇合后称永定河。它流经山

西、河北、北京、天津，东邻潮白河、北运河，西接黄河流域，南界大清河。永定河流域面积47066km²，地处内蒙古高原与华北平原之间，气候为北寒带大陆性半干旱气候，多年平均降水量为406mm。降水量年际变化较大且年内分配不均匀，80%的雨量主要集中在6、7、8三个月^[48]。

永定河自桑干河发源地宁武县至天津市武清区屈家店闸汇入北运河，河长680km；官厅水库以上为上游，官厅水库至京西三家店为中游，三家店以下为下游，如图6.2；多年平均（天然）径流量为21.7×10⁸m³。上游地处黄土高原，土质疏松，植被覆盖率低，水土流失严重。中游两岸山势雄伟，山坡陡峭，谷深岸窄，水在峡谷中迂回前进。总体上说中上游水能资源比较丰富。下游河流进入平原，地势变缓，泥沙大量沉积，河床淤高。由于河床渗透较大，加上中、上游水库拦蓄，目前永定河下游基本干涸。

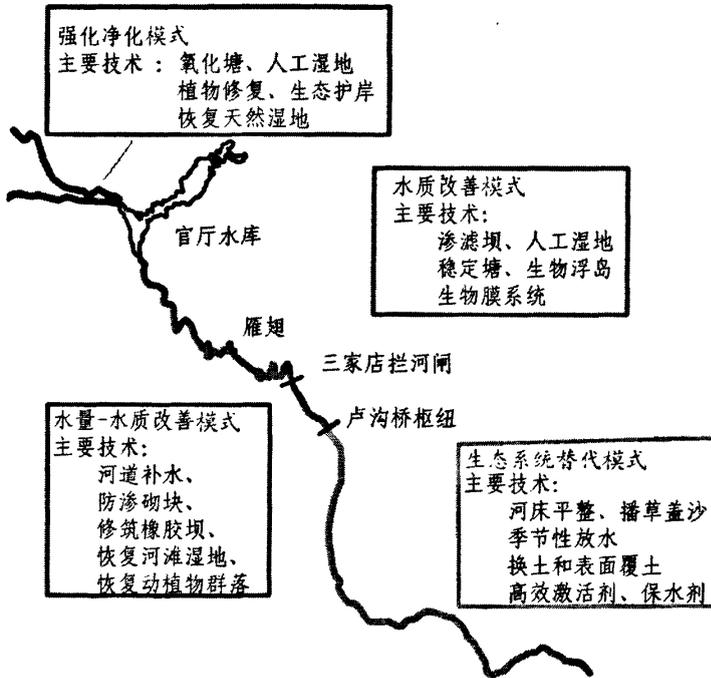


图 5.2 永定河生态修复模式示意图

5.2.2 水量、水质及生态现状

从近半个世纪的情况来看，永定河主要面临着河道断流干涸，水污染和生物多样性锐减等严重问题，如表 5.4。

表 5.4 永定河生态健康状况评价结果

河段	生物评价	水量评价	评价	主要问题
官厅坝下一三家店	生物多样性一般	季节性有水	水质清洁	有轻微污染
三家店—市界	生物物种单一	常年干涸	轻微污染	河道断流
河北界—东州大桥	生物物种单一	常年干涸	轻微污染	河床沙化
东州大桥—屈家店	生物多样性一般	季节性有水	水质尚可	生境遭到破坏

上世纪六十年代开始,一方面永定河自然降水大幅减少,另一方面社会经济发展对水资源的需求剧增,永定河上游修建官厅水库等一系列拦蓄水设施。80年代后,由于永定河三家店以上可用水量全部引入北京市区,导致三家店以下河道基本常年断流,周边土地沙化,生态遭到严重破坏,已经成为北京主要的风沙源之一^[49]。

从整体上看,永定河的水质属于轻度污染。主要污染物质为N、P,水体呈富营养化,重金属和有机氯等指标均能达到水质标准的要求^[50]。永定河的污染源分点源污染和面源污染两类。点源污染主要分布在永定河流经的张家口,宣化等地。这些地方建有工业区,其工业废水和城镇生活污水集中排放进入永定河。农业面源污染主要分布在流域的山间盆地及丘陵区,主要是由降水、土地利用结构、地质、土壤、植被、化肥农药的过量使用等因素引起。

永定河由蒙古高原经山峡流入华北平原,生境有比较大的变化,上游较差,中游较好,下游则遭到比较严重的破坏。由于河道干涸,河床形态遭到破坏,河滩湿地基本退化,鱼、鸟等野生动物基本绝迹,植物种类少,数量锐减。

5.2.3 修复模式

根据水量,水质及生态现状,结合水文地质条件,永定河平原段分为官厅水库-三家店,三间店-卢沟桥,卢沟桥以下四段分别进行生态修复。

5.2.3.1 官厅水库至三家店生态修复

这一河段主要在山峡中流过,河流形态变化多样,加上近几年一系列生态整治工作,生境相对较好。水质一方面受上游污染物排放的影响,另一方面受当地农业生产的影响,有轻微程度的污染。现有的资料表明:该河段污染物的降解速率比较快。水体pH值在7.60~8.18之间,F⁻的量在0.24~0.60mg/L,重金属和有机氯大部分未检出,均低于国家标准。COD_{Cr}在3.9~18.1mg/L之间,且与沿

岸居民人数呈正相关。BOD₅在Ⅲ类水和Ⅴ类水之间^[51]。水质问题主要为营养元素超标，这也是河流生物多样性遭到破坏最主要的原因。

因此，永定官厅水库至三家店河段生态修复应为控制污染源，并进一步改善水质，相应地，其生态修复模式为直接修复中的“水质改善模式”。具体措施包括：

对两岸农业垃圾进行清理，防止渗滤液污染水体。

选择比较开阔的河岸设置人工湿地，沿河构建丰富的水生动植物群落，通过吸附，过滤，吸收，转换等一系列作用截流农业面源污染。

采用组合式水质净化技术。利用河道形态多变的特点，沿河道逐级、分段布置渗滤坝、生物膜系统，人工湿地和稳定塘等生态修复工程。

在水位变化大的河段设置湖心岛，形成生物浮岛，利用水位变化交替形成表面流型湿地和潜流型湿地，净化水质。

5.2.3.2 三家店至卢沟桥段河道的生态修复

由于长年干旱少雨、上游官厅水库拦蓄水和三家店水闸拦截，永定河三家店以下常年断流，河道淤积严重，河床沙化，河滩植被退化，严重影响到周围的生态环境。缺水 and 环境恶化使得永定河上著名的历史文化景点，曾被誉为“燕京八景”之一的“卢沟晓月”风采不再，而且这一河段流经的北京市石景山区休闲娱乐的功能定位。因此，保证三家店至卢沟桥河段的生态基流，改善河流生境并进行景观建设具有重要的意义。相应地，该河段的生态修复模式定位为补水修复中的“水量-生境改善模式”。

为了重现“卢沟晓月”，实现两岸生态景观建设，首先要确保该河段不断流和良好的水质条件。

对于水量不足的问题，须采取多种措施解决。首先应寻找合适的水源，可以通过上游季节性向下游放水，利用南水北调客水或附近中水对河道进行补水。其次，由于河床泥沙淤积严重，基本无地表径流汇入，河床渗透性强，加上私采沙石现象屡禁不止，严重破坏了河床的形态。可以采用植生型防渗砌块技术对该河段的河床进行修整，在降低渗漏的同时，减少对水生生物群落的影响。另外，可在卢沟桥以下修筑橡胶坝，滞留河水，达到存水造景的效果，并能形成大片湿地。

生境改善与景观建设主要是恢复河滩植被，建设湿地公园，大力恢复水生

植物，形成观赏性植物群落和鸟类栖息地，建设河滨生态旅游景点。由于永定河是重要的防洪河道，对护岸的安全要求比较高，生态护岸应主要通过通过对现有护岸进行生态改造的方式来实现。

5.2.3.3 卢沟桥以下河段的生态修复模式

历史上永定河洪水泛滥，河道多次变迁。长期以来，下游形成了以沙土为基质的沙垄、沙地相间的冲积-沉积平原地貌类型。近几十年来，自然降雨量骤减以及上世纪50年代在上游修建了官厅水库等自然和人为因素影响，导致永定河下游河段季节性断流。80年代后由于永定河三家店以上可用水量全部引入市区，下游常年断流。

沙质河床常年裸露，冬春季节河道内外沙尘飞扬，夏秋季节野草丛生，稍有好转，遇有大的降雨，河道积水难以排出，成为死水，严重破化周边环境。盗采砂石现象也屡禁不止，对河道主槽、滩地造成了极大的破坏，造成自然环境和生态环境恶化。目前，永定河下游沙化的河床、河滩已成为北京地区主要的风沙源之一。然而，保证该河段生态基流需要巨大的输水量，目前很难保证稳定的水源。因此，现阶段应该对沙化河床、滩地进行固沙处理，即进行“以绿代水”型生态修复，构建草地生态系统。对永定河下游沙化河道滩地进行固沙防风的研究实践表明，改善地表植被及土壤性质可以有效地控制风沙。通过对起沙风速、粗糙度大小等方面的研究可知，在固沙效果上，林地>荒草地>耕地>稀疏荒草地>河滩地。永定河下游河道滩地基本上是植被覆盖率比较低的稀疏荒草地和河滩地，可以通过改变地表植被覆盖类型与密度达到固沙的目的^[52]。

治沙常用的高大乔木，适宜在水分条件好的轻沙质壤土上生长，在沙地上生长较差，同时这些树种蒸腾强度大，抗干旱抗风蚀、耐高温耐低湿的能力弱，再考虑到河道的行洪要求，是不宜使用的。可以综合利用灌木，草本植物和沙生植物在河道滩地进行播草盖沙。如灌木可以选择沙地柏、黄刺玫、紫穗槐和珍珠梅等具有耐干旱、耐严寒、耐瘠薄、不择土壤、喜光等特点的品种；草本植物可以选择多年生、耐干旱、耐严寒、耐瘠薄和固沙能力强的马蔺、冰草、黑麦等品种混播，还可以选择花期较长且对土壤要求不严的波斯菊。另外可以引种沙蒿一类的沙生植物，这类植物主根短小，侧根非常发达，在地下交织成网，能增加土壤抗冲性，并能很好地储蓄水分、固定沙丘，枝条被沙覆盖后可形成不定根，具有极强的抗旱和抗风沙性，而且耐贫瘠、寒、干旱、水湿和耐

盐碱能力。

在播草固沙的基础上，还要尽可能地提高植被覆盖率。根据研究，在永定河下游，河滩土植被覆盖率为30%时比裸露地表要减少风蚀量的18.97%~54.55%，覆盖率为60%时则要减少70.69%~80.0%。因此，应保证植被覆盖率在60%以上，对于土壤条件太差，采取各种措施都无法达到的，至少要保证30%的覆盖率。

永定河下游土壤的抗风蚀能力很差，而在干燥状态下最容易被风所吹蚀的纯净沙粒含量占了大部分。可以使用客土，采取换土和表面覆土的形式加以改善，这种方法可以改变土壤组成，提高植被的成活率和覆盖率，实现固沙的目的。相关研究表明，客土地表植被覆盖率为30%时比裸露地表减少风蚀量的34.55%~58.0%，覆盖率为60%时可减少70.48%~84.0%，固沙效率要高于原土^[53]。这种做法成本很比较高，不宜大量的使用，可主要选择应用在土壤条件过差，植被成活率和覆盖率低的段落。另外，还可以结合农业上常用的高效激活剂、保水剂、地膜覆盖保墒等技术提高植被成活率，增加地表覆盖率。

为了保证播草固沙的效果，还应加强管理，可从上游布设灌溉与排水管道，或通过季节性放水，保证这一由灌木、草本植物和沙生植物形成的群落健康发展。

由于河道内常年无序开采沙石料，主河道分布着许多大小砂石坑。对于在河道河滩乱采沙石的现象，要加强管理，建立科学有序的采挖制度。对于被破坏河床要进行治理，由于砂坑边坡陡直，植被难以生长，需要根据植被生长及固沙要求进行平整和削缓坡处理。对于大的沙坑，可以进行蓄水，在一定程度上恢复河道内的湿地景观。

第三节 滦河生态修复模式研究

5.3.1 概况

滦河古称濡水，在历史上即以源远流长，水量丰沛著称于北方。它发源于河北省丰宁县骆驼沟乡小梁山南坡大古道沟，流经内蒙古、辽宁、河北3个省（自治区）、27个县（旗），于河北省乐亭县兜网铺注入渤海，如图5.3。河道全长888km，流域面积44750km²，其中，山区占98%、平原占2%；滦县城关以上为山区河段，以下为平原河段。滦河流经高原、山地、平原三种地貌。滦河多伦以

上属草原，地势平坦，海拔高程 1300~1400m；郭家屯至潘家口河段穿行于燕山峡谷中，河谷宽为 200-300m；由潘家口到滦县，河道进入浅山丘陵区，地貌逐渐开阔；两岸阶地发育，在迁西境内，河床宽 500m左右，迁安县至滦县城关段河床宽约 1000m，比降为 1/1000；至滦县进入下游平原，海拔在 20m以下，地势平坦、河谷宽展，河床宽 2000~3000m，河道比降为 1/4000。潘家口以下河宽 200-500m，过桑园峡谷进入迁安盆地，河谷展宽至 1000m以上^[54]。渤海潮汐在滦河入海口附近为不规则半日潮，潮差较小，多年平均潮差约为 0.75m。滦河潮汐作用仅影响到乐亭以东 15km的标上村附近河段。滦河在迁西县境内为沙卵石河床，在滦县上、下游均为沙质河床。

滦河流域属典型的温带大陆性气候，自南向北由湿润、半湿润气候向半干旱气候过渡。降雨量年际变化大，多年平均降水量自北向南约 498-800mm，雨量年内分配很不均匀，6-9 月份占 75%-85%。流域北部为张北、围场高原区，中部为冀北、燕山丘陵区，南部为燕山山前和滦河三角洲平原区。流域土壤内蒙古高原以栗钙土、草甸土、风沙土和沼泽土为主体，植被主要由多年生草本植物组成；冀北山地以棕壤和褐土分布最广，植被主要是针阔混交林、灌木和草本植物^[55]。

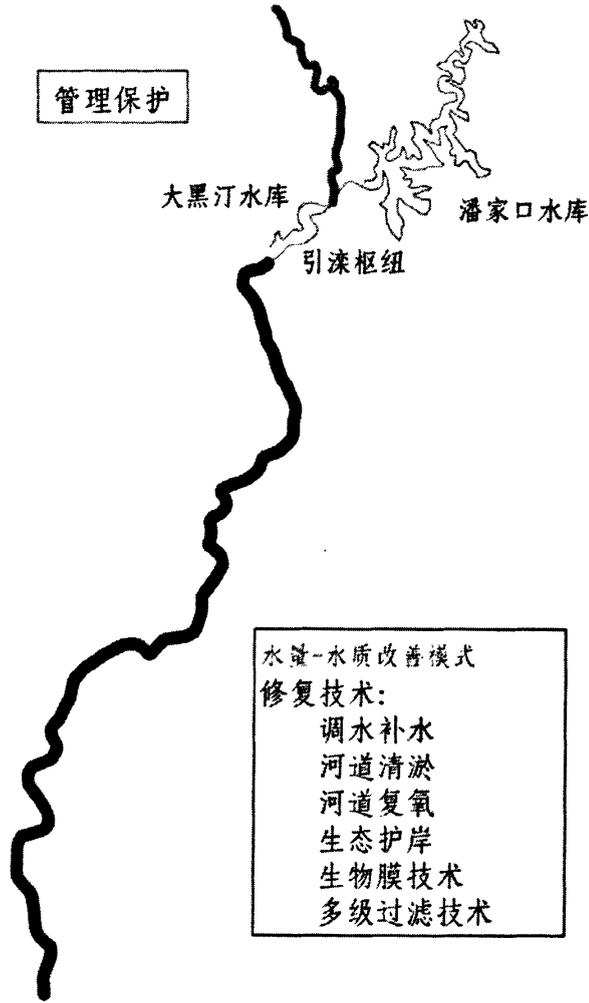


图 5.3 滦河生态修复模式示意图

滦河是海河流域水量比较丰沛的一条河流，常年有水支流达 300 多条，多年平均降雨量达 700mm，多年平均径流量 46.94 亿 m^3 。滦河主要由季节性雨水补给，使得滦河水量具有年内分配集中的特点，来水主要集中在每年 7~9 月内，往往可占全年来水量的 80%以上。年际丰枯变化悬殊，年径流变差系数为 0.7~0.8，而且常常出现连丰连枯年现象。如，1980~1986 年滦河流域连续丰水，而 1997~2001 年又连续干旱^[56]。

流域内有著名的重工业城市唐山、港口旅游城市秦皇岛和全国最大的皇家

园林城市承德,主要经济活动集中在下游平原地区。

5.3.2 生态现状

滦河的开发利用比较晚,生态环境优美,直到20世纪40年代以前,仍处于比较原始的状态,除中下游局部地区筑有防洪堤和承德为保护避暑山庄修建少量石坝(现称清坝)外,没有大型水利工程。在80年代建设潘家口水库以前,由于流域人口较少,工业企业不多,除有少量的工业及生活废污水排入外,流域自然水生态环境保持较好。滦河常年有水,平均年入海水量达 $24 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

随着经济社会的快速发展,滦河水资源得到迅速开发利用,滦河的用水量剧增。80年代,滦河中下游潘家口水库、大黑汀水库作为滦河流域骨干控制性工程建成使用后,通过汛期拦蓄洪水大大减轻洪水对滦河下游的威胁。作为“引滦工程”,截止到2003年底已累计完成供水 $287 \times 10^8 \text{m}^3$,其中向天津市供水 $115 \times 10^8 \text{m}^3$,向唐山市及滦河下游农业供水 $172 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[57]。在产生巨大经济效益的同时也带来一些负面影响。特别是近年来,由于滦河流域持续干旱,潘、大水库蓄水量严重不足,给滦河下游的生态环境造成相当的影响。

由于滦河用水量剧增,加上潘家口、大黑汀水库的修建在相当程度上改变河流的天然属性,导致滦河的自然水生态平衡发生变化。潘家口水库以上水量充沛,形成人工湖泊,水面烟波浩淼,风景优美,有塞上漓江和北方小三峡之称;但是,滦河中下游却由原来的常年性河流逐渐变成季节性河流,大大降低了滦河的活力,导致滦河下游的生态环境逐渐恶化,河道干涸、地下水位下降、湿地减少、河口淤积等问题。1997年桃林口水库一期工程建成后,滦河上最后一条较大的支流青龙河也得到控制,此后除丰水年汛期以外,一般年份滦河入海水量近于零。滦河下游平原河流与海河南系的河流一样,长期处于干涸状态,生态环境进一步恶化^[57]。由于滦河下游河道径流锐减,河道及滩地失去了维系生态环境及景观的水体,造成大范围土地干化、沙化,而且河水补给地下水的的能力亦明显降低。由于缺乏应有的冲刷,河道、河口淤积严重,对河口生态环境产生极为不利的影晌^[58]。

总体上说,滦河水质尚属清洁,但有逐年下降的趋势。1997年水质监测评价为清洁和尚清洁的河长占66%,中度污染的河长占15%,重度污染的河长占19%。据有关水质检测结果统计,80年代多数监测断面是I类水,少数是III类水;2000年,多数监测断面是II类水,少数断面是I类水。主要是矿化度和硝酸盐

氮和氨氮含量增大^[59-61]。

造成滦河水质下降的原因在于滦河下游平原是北方重要的工农业基地，随着经济发展，流域内工矿企业、城镇废污水大量排入河道、水库，而化肥、农药大量使用加重滦河的农业面源污染。由于滦河下游流量不足，缺乏对污染物的稀释能力；同时生态环境的恶化也进一步降低河流的自净能力，导致滦河水质逐年下降。在非汛期滦河下游部分河段中流动的只是工业和生活污水。

5.3.3 生态修复修复模式研究

滦河下游平原河道全长75km。流域内有利用滦河水源进行灌溉的唐海县柏各庄灌区、滦南县群众灌区、乐亭县滦乐灌、陡河灌区、卢龙引青灌区、洋河灌区、昌黎引滦灌区等大型的水稻灌区，是华北地区著名的产粮基地，还是著名的工业基地，用水量巨大。加之近年由于自然原因，滦河进入连续几年的枯水年份，造成潘家口、大黑汀水库以下河段几乎全年断流，从而引发一系列严重的生态问题。滦河平原段生态健康评价结果见表5.5。

表 5.5 滦河河流生态健康评价结果

河段	生物评价	水量评价	水质评价	主要问题
大黑汀-滦县	生物多样性较丰富	常年干涸	水质尚可	河道干涸
滦县-河口	生物多样性丰富	常年干涸	水质清洁	存在工业排污

由于水量不足，不能满足基本的生态流量，造成滦河下游河滩湿地萎缩，大量的水生动、植物由于失去生存环境而灭绝，严重影响到滦河的生物多样性。同时河流的自净能力减弱，对排入的污染物质稀释降解的能力下降，加重了河流的污染。另外，由于冲刷不足，滦河下游的河床以及河口存在比较严重的淤积，部分河床出现沙化^[62]。

可见，滦河下游的生态问题是由量不足引起。尽管目前滦河下游处于常年断流的情况，但和海河流域南系常年断流的河流有很大的不同。这主要是滦河上游的水量是比较丰沛的，通过上下游统筹管理调度，合理利用汛期洪水资源，应该可以实现对下游输水，保证基本的生态流量。

滦河下游断流始于80年代初潘家口，大黑汀水库修建和引滦工程投入使用。该河段年径流量由建库前的年均 $26.74 \times 10^8 \text{m}^3$ ，减少到建库后的年均 $10.57 \times 10^8 \text{m}^3$ ，减少 63.2%。月平均最小流量由原来的 $10.5 \text{m}^3/\text{s}$ 减少到 $1.07 \text{m}^3/\text{s}$ ，减少 89.8%。随之而来湿地萎缩，地下水位下降，河床河岸沙化，河口淤积等问题。到1997年桃林水库建成使用后，滦河下游基本全面断流。但滦河上游一直

保持比较丰沛的水量，且滦河作为季节性雨水补给河流，具有年内水量集中，年纪变化悬殊的特点，其洪水资源目前还未得到充分利用，存在巨大的开发空间^[63]。充分利用这些条件，以潘、大水库控制性工程和桃林水库对汛期洪水实施资源化调度，使向滦河下游提供环境用水量成为可能。另外，在滦河下游河段可以建设一些橡胶坝，抬高枯水期水位并起到一定的景观作用。这些已在滦河迁安段的整治中得到应用并取得一定的效果。

滦河下游平原是北方重要的工、农业基地，每年向滦河排入大量的污水，在河流稀释、降解能力不足的情况下，不仅破坏滦河本身的生态，还对入海口附近生态造成很大影响。如 2000 年 10 月，由于迁安、唐山造纸、化工企业排放废水，造成滦河入海口水域严重污染，多种鱼类受到影响死亡^[64]。根据研究，依靠调度补水，增加下游流量来处理水质、下游断流、湿地萎缩和物种多样性下降等问题，至少需要 $15\text{m}^3/\text{s}$ 的基本流量。这远远超过潘家口、大黑汀水库修建以前，滦河枯水期 $2\text{--}10\text{m}^3/\text{s}$ 的流量。因此，在滦河现有情况下，实现 $15\text{m}^3/\text{s}$ 基本显然困难很大，应该采取其它的河流生态修复措施，协助在削减补水量的同时实现生态恢复的目的。

从水质条件看，上游的潘家口、大黑汀水库的水质一直保持在三类以上，来水水质基本可以得到保证。因此，应加强本河段排污口的管理力度，确保工业废水和城镇污水达标排放。其次，可以充分利用滦河下游河道宽浅，河床卵石、砾石，粗沙、细沙含量丰富的特点净化污染物。卵石、砾石孔隙率大、比表面积大，适宜于微生物附着，可利用生物膜技术构建微生物净化系统；卵石、砾石、粗沙、细沙的渗透性强，可用以构建多级过滤系统。另外，将调整水位的橡胶坝阶梯设置，可以有效地增加溶解氧，改善水质。控制农业面源污染，从河流生态恢复的角度讲，可以通过改善生境，提高河流自净能力的办法来实现。

由于滦河开发利用比较晚，且断流时间不长，其生境破坏的程度不严重，恢复的弹性大。据调查资料，滦河中基本没有洄游性鱼类^[65]，不存在水利设施截断鱼道的问题。滦河下游建有上百座丁坝^[66]，大多数损坏不用，可以用来营造适宜水生动植物生存的环境。在保证滦河下游基本生态流量和水质后，大多数被破坏的生境，如湿地、河滩等即可得到修复，物种多样性能得到提高。对于不能自行恢复的，辅以适宜的修复技术。

滦河河床、入海口的淤积比较严重，主河床普遍淤积 $0.6\text{--}1.9\text{m}$ 。河口淤积造

成滦河入海口沙坎以每年6-8m的速度内移，同时降低滦河入海口的造地速度，沿海陆地向海中推进的速度明显降低，由原来的年均90-100mm降为40-60mm，使沿海地区降雨排水不畅，容易形成内涝^[67]，应该在补水之前进行清淤。

丁坝是滦河下游护岸工程的主要形式，两岸现有控导型丁坝18道，治导型丁坝427道。另外，迁西、迁安、滦县、滦南、乐亭五县现有滦河大堤长近58km，其中右岸大堤长45km。为抵御中小洪水在滦南县大李庄以下修建的防洪小捻，长119.2km^[68]。大堤基础和滩地为透水性强的鹅卵石，河流生态系统与陆地生态系统之间存在一定的物质能量交换，河流横向连通性可以通过对现有堤防进行生态改造加强。在坡度较缓的地段，常水位以下采用砌石护坡，常水位以上采用草皮植被与灌木相结合的自然式绿地护坡；在坡度较陡，土质较差的地段，全部采用砌石镶草护坡形式或砌石台阶护坡形式；在文化景观区或游憩活动区等地段，结合游人活动需求，采用常水位以下砌石护坡，常水位以上设置亲水平台的护坡形式，其上地势，铺路、植树、种草、设置休息设施，与岸坡两侧绿地相连形成游园。同时起到安全、生态、景观多重作用^[69]。

综上，对滦河下游平原河道生态修复应选择补水修复中的“水量-水质改善型模式”，综合使用水量调整、水质改善和生境恢复的技术实现河流生态修复的目的。

第四节 卫河修复模式研究

5.4.1 概况

卫河是海河流域漳卫河水系的一大支流，发源于山西省临川县夺火镇南岭，自上而下流经山西、河南、河北、山东四省，于河北省馆陶县徐万仓与漳河汇流后进入卫运河，如图5.4，河道全长344.50km，流域面积14970km²^[74]。卫河的主要支流有共产主义渠、淇河、汤河、安阳河等。其中，共产主义渠系1958年人工开挖河道，全长102km，卫河左岸合河至老观嘴段山区支流均经该渠注入卫河，是卫河上中游地区的主要泄洪排涝河道之一。

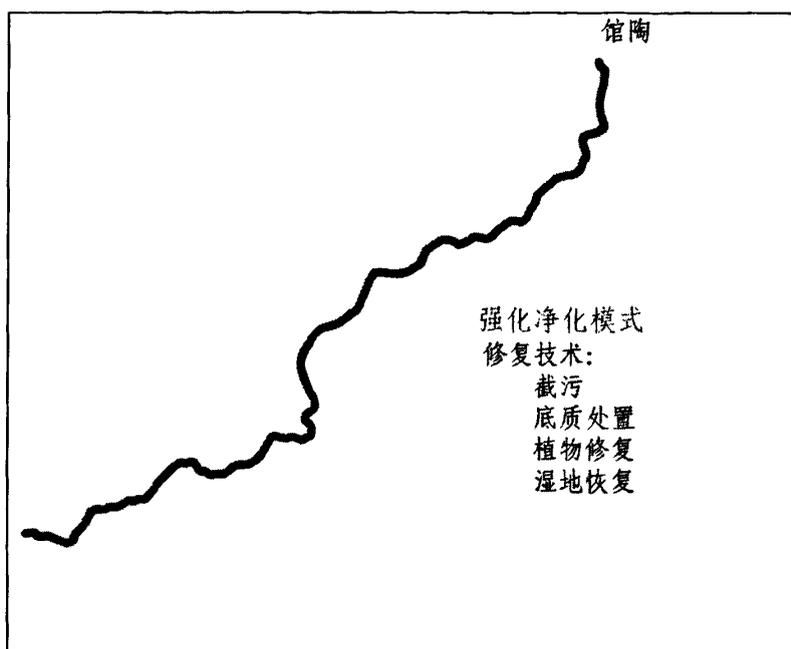


图 5.4 卫河生态修复模式示意图

卫河流域山区面积占 1/3，平原占 2/3，左岸大部分为山区、右岸全部为平原。卫河流域属温带季风型大陆性气候，气温由南往北、由平原向山区递减。平原区多年平均降雨量约为 600mm，降水量年际变化很大，早年有的地区降雨仅 200mm，涝年则可达 1000~1400mm^[70, 71]。流域多年平均水资源总量为 $27.26 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中地表水资源量 $16.51 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

5.4.2 生态现状

卫河是海河流域少有的几条水量充沛的河流之一。20世纪60年代合河节制闸分流前，流量一般达到 $23\text{-}30 \text{m}^3/\text{s}$ 。这以后虽然由于水资源开发利用强度增大，水量减小，但河流只在特枯水年份部分河段断流。结合卫河生态健康评价的结果，如表5.6，可见，卫河能满足河流生态基流的要求，一般情况下不需专门进行补水处理。

表 5.6 卫河河流生态健康评价结果

河段	生物评价	水量评价	水质评价	主要问题
合河闸-西孟入口	生物多样性单一	水量充沛 常年流动	严重污染	水污染严重 生境遭到破坏
西孟入口-洪庄	生物多样性一般			
洪庄-元村水文站	生物多样性单一			
元村-龙王庙	生物多样性一般			
龙王庙-馆陶	生物多样性一般			

卫河现有的水量能够满足河流生态健康的要求，水质却远远达不到要求，卫河生态健康评价的结果为严重污染，如表 5.6，属典型的水质型缺水。根据 2005 年的水质监测资料，卫河水质为劣 V 类，以耗氧有机物污染为主，其中淇门段 COD_{Mn} 超标 27.2 倍（均按五类水标准）、氨氮超标 24.5 倍、挥发酚超标 47.4 倍；武陵段 COD_{Mn} 超标 4.9 倍、氨氮超标 19.6 倍^[72]，而且地下水污染严重，河滩湿地等生物栖息地受到破坏、水生生物量减少。

5.4.3 生态修复模式研究

从上可见，卫河生态修复的关键在于改善水污染。

卫河的水源包括天然径流、沿河城市污水和引黄灌溉退水等，造成水质恶化的主要是城市污水^[73]。70 年代以来，卫河天然来水量日益减少，大量未经处理的工业废水和生活污水直接排入河道，使得卫河实际成为一条排污河道，水质严重恶化。卫河的污染范围广，超标物质多且超标倍数大^[74]。因此，首先应治理入河排污口，严格控制入河水质，实现截污。为此，卫河流经的城镇应建立相应规模的污水处理厂，近河工矿企业实施废水处理，实现达标排放。

由于卫河长期接纳污水及引黄退水，河床淤积，底质污染严重，在控制了外源污染之后，应对河床污泥进行处置，以解决内源污染。可以采用清淤或覆盖的形式，但应注意不破坏底栖生物群落的繁衍生存。

卫河两岸由于地形的原因，形成了一些诸如良相坡、白寺坡、长虹渠、柳卫坡、小滩坡、任固坡等自然蓄滞洪水的洼地^[80]，作为天然湿地进行恢复不仅能起到控制面源污染，净化河水的作用，还能实现河流~漫滩效应，创造丰富多变的生境，提高物种多样性水平，建立健康稳定的生态系统。另外，利用裁弯取直的旧河道恢复湿地，也能得到良好的生态效益。而卫河干流及主要支流形态迂回蜿蜒，为卫河水生动植物群落的恢复提供了良好的条件，可以采用

人工配置与自然恢复相结合的方式实现。

综上所述，卫河存在的生态环境问题主要是水污染严重，对其进行生态修复应采用“无补水强化净化型”修复模式，选用截污、底质处置、天然湿地恢复，水生动植物修复等技术。

第五节 其它河流生态修复模式

为简洁起见，将本次研究的其它 17 条河流生态健康评价结果和存在的主要问题进行汇总，如表 5.7。在此基础上，根据前面对修复模式和技术分析，确定这十七条河流生态修复模式。

表 5.7 其余河流生态健康评价结果

河名	河段	生物评价	水量评价	水质评价	主要问题
陡河	陡河水库坝下—河口	生物多样性较丰富	常年干涸	轻微污染	河道干涸
白沟河	东茨村—新盖房	生物多样性一般	季节性有水	中度污染	河道断流 水质污染
南拒马河	落宝滩—新盖房	生物多样性丰富	常年干涸	水质清洁	河道干涸
唐河	西大洋水库—温仁	生物多样性丰富	季节性有水	轻微污染	河道断流
	温仁—白洋淀	生物物种单一	季节性有水	轻微污染	河道断流 生境破坏
潞龙河	北郭村—白洋淀	生物物种单一	常年干涸	轻微污染	河道干涸
滹沱河	黄壁庄—石家庄、衡水交界	生物绝迹	常年干涸	严重污染	河道干涸
	石家庄、衡水界—衡水、沧州界	生物物种单一	常年干涸	严重污染	
	衡水、沧州交界—献县	生物绝迹	常年干涸	轻微污染	
盗阳河	出库口—邯郸、邢台交界	生物多样性较丰富	常年干涸	轻微污染	河道干涸
	邯郸、邢台界—邢台、衡水界	生物物种单一	常年干涸	严重污染	
子牙河	献县—南赵扶	生物多样性一般	常年干涸	严重污染	河道干涸
	南赵扶—省界	生物物种单一	常年干涸	轻微污染	
	入天津界—三岔口	生物多样性较丰富	常年干涸	中度污染	
南运河	省界—静海界	生物多样性一般	常年干涸	中度污染	河道干涸

第五章 典型河流生态修复模式研究

漳河	岳城水库—馆陶	生物物种单一	季节性有水	水质清洁	河道断流 生境破坏
漳卫新河	河北段—四女寺	生物物种单一	水量充沛, 常年流动	严重污染	水质污染 生境破坏
蓟运河	新安镇—江洼口	生物多样性较丰富	常年干涸	轻微污染	河道干涸
海河干流	三岔口—二道闸	生物多样性一般	水量尚可, 间歇性断流	轻微污染	生境破坏
	二道闸—海河闸	生物多样性一般	水量一般, 季节性干涸	水质尚可	河道断流 生境破坏
潮白河	河槽—苏庄	生物物种单一	常年干涸	轻微污染	河道干涸
	苏庄—牛牧屯	生物多样性丰富	常年干涸	轻微污染	
徒骇河	文明寨—东延营桥	生物多样性丰富	水量尚可, 间歇性断流	轻微污染	水质污染
	东延营桥—杨庄闸	生物多样性丰富	水量尚可, 间歇性断流	中度污染	
	杨庄闸—王堤口闸	生物多样性较丰富	水量尚可, 间歇性断流	严重污染	
	王堤口闸—羊角河入徒骇河处	生物多样性较丰富	水量尚可, 间歇性断流	中度污染	
	羊角河入徒骇河处—昌东橡胶坝	生物多样性较丰富	水量尚可, 间歇性断流	中度污染	
	昌东橡胶坝—西新河入徒骇河	生物多样性较丰富	水量尚可, 间歇性断流	中度污染	
	西新河入徒骇河处—禹城前油坊	生物多样性一般	水量尚可, 间歇性断流	严重污染	水质污染 生境破坏
	禹城前油坊—临邑夏口	生物多样性较丰富	水量尚可, 间歇性断流	中度污染	水质污染
	临邑夏口—淄角镇靠河郑村	生物多样性较丰富	水量尚可, 间歇性断流	严重污染	
	淄角镇靠河郑村—入海口	生物多样性丰富	水量尚可, 间歇性断流	中度污染	
马颊河	濮阳县金堤闸—清丰县马庄桥	生物多样性一般	季节性有水	严重污染	河道断流 水质污染 生境破坏
	清丰县马庄桥—沙王庄	生物多样性丰富	季节性有水	中度污染	河流断流 水质污染
	沙王庄—薛王刘闸	生物多样性丰富	季节性有水	轻微污染	水质污染
	薛王刘闸—津期店闸	生物多样性较丰富	季节性有水	严重污染	河道断流 水质污染
	津期店闸—入海口	生物多样性一般	季节性有水	严重污染	生境破坏

5.5.1 陡河

陡河水库到河口，存在的主要问题是缺水。因此采用补水修复中的“直接补水模式”，通过补水实现河流生态修复。

5.5.2 白沟河

白沟河是大清河北支的主要行洪河道，从上游二龙坑起经涿州、固安和高碑店等三市县，全长 53km。河道为复式河槽，主槽宽 200m 左右，两堤距在代屯以上为 270~540m，代屯至白沟为 540~2840m，最窄处在东茨村不足 300m，河底纵坡约 1/4000。白沟河存在的主要问题是河道断流，水量不满足生态基流的要求和水污染，因此选择补水修复中的“水量-水质改善模式”。

5.5.3 南拒马河

南拒马河自铁锁崖至新盖房枢纽全长 83.7km。其中北河店以上为地下河，两岸无堤，河道长 51km，河宽 100~200m，纵坡 1/300~1/800；北河店至新盖房枢纽河道长 32.7km，河底纵坡 1/4000~1/6000，堤距 500~2300m。其右堤为主堤，自北河店至新盖房枢纽白沟引河闸，长 35.69km，堤顶宽 8m，设计超高 2m；左堤为次堤，自北河店至东马营，长 27.27km，堤顶宽 8m，设计超高 1.5m。左右两堤纵坡分别为 1/4200 和 1/4000，内外边坡均为 1:3。南拒马河存在的主要问题是河道干涸，现阶段进行补水修复还存在困难，因此，生态修复选择“生态系统替代模式”。

5.5.4 唐河

唐河是大清河南支的主要支流，发源于山西省浑源县，于安新县韩村入白洋淀，全长 273km，流域面积 4990km²，其中，西大洋水库控制面积 4420km²。西大洋水库以下至东石桥段称唐河，长 101.7km。西大洋水库至清苑县温仁段为地下河，自清苑县王力村起筑有堤埝。唐河的水量不足，不能满足生态基流的要求，温仁-白洋淀段还存在生境破坏问题。因此，应对唐河西大洋水库~温仁段采用补水修复中的“直接补水模式”，对温仁~白洋淀段采取补水修复中的“水量-生境改善模式”。

5.5.5 潞龙河

沙河、磁河及孟良河在河北省安国县北郭村汇流后称潞龙河，是大清河南

支的主要行洪河道。潞龙河自北郭村至白洋淀入口马棚淀全长 80.5km，流域面积 9430km²。其右堤（千里堤）为主堤，是河北省一级堤防。潞龙河常年干涸，造成河流生态系统崩溃，应选择“生态系统替代模式”对其进行治理。

5.5.6 滹沱河

滹沱河发源于山西省繁峙县泰戏山孤山村一带，向西南流经恒山与五台山之间，至界河折向东流，切穿系舟山和太行山，至河北省献县臧桥与子牙河另一支流滏阳河相会入海。滹沱河全长 587km，流域面积 2.73 万 km²。主要支流有阳武河、云中河、牧马河、清水河、南坪河、冶河等，呈羽状排列，主要集中在黄壁庄以上，以下无支流汇入。流域内地势自西向东呈阶梯状倾斜，西部地处山西高原，地势高，黄土分布较厚；中部为太行山背斜形成的山地，富煤矿；东部为平原。流域内天然植被稀少，水土流失较重。滹沱河流经山区、山地和丘陵的面积约占全流域面积的 86%，河流总落差达 1800 余米。瑶池以上为上游，沿五台山向西南流淌于带状盆地中，河槽宽自一二百米至千米不等，水流缓慢。瑶池至岗南为中游，流经太行山区，河谷深切，呈“V”形谷，宽度均在 200m 以下，落差大，水流湍急。黄壁庄以下为下游，流经平原，河道宽广，最宽可达 6000m，水流缓慢，泥沙淤积，渐成地上河或半地上河，两岸筑有堤防。滹沱河的主要存在缺水和水质差的问题，选择“生态系统替代模式”对河道进行治理。

5.5.7 滏阳河

滏阳河发源于邯郸峰峰矿区滏山南麓，流经邯郸、邢台、衡水，在沧州地区的献县与滹沱河汇流后称子牙河。河道全长 402km，历史上曾是一条集防洪、灌溉、排涝、航运等功能于一体的骨干河道。七十年代以来，由于上游工农业生产大量用水，河水减少，目前滏阳河常年干涸。鉴于水量缺乏是滏阳河的主要症结所在，故选择“生态系统替代模式”修复。

5.5.8 子牙河

子牙河为海河水系五大河之一，是海河水系西南支，由发源于太行山东坡的滏阳河和源于五台山北坡的滹沱河汇成，两河于献县臧家桥汇合后，始名子牙河。流经山西、河北、天津三个省份，全长 730km，流域面积 7.87 万 km²。子牙河经西河闸至天津市十一堡汇南运河，至第六堡与大清河相汇，后至金钢桥和

北运河合流。另一路由独流减河泄洪入海。全长474km（至海口），流域面积4.6万km²（至献县）。中华人民共和国建立后，在献县以下辟子牙新河，经天津市北大港入渤海，以减轻水患。目前子牙河常年不过水，为干涸状态，选择“生态系统替代模式”修复。

5.5.9 卫运河

卫运河是漳、卫河于徐万仓汇流后至四女寺的一段河流，在四女寺枢纽分流入漳卫新河和南运河。河道长157km，两岸堤防总长320.5km，是冀、鲁两省边界河道。左岸经河北省馆陶县、临西县、清河县、故城县；右岸经山东省冠县、临清市、夏津县、武城县。到卫运河是典型的复式断面蜿蜒型半地上河，形成历史悠久。秦汉时期称为清河，为黄河故道，因水清而得名；隋唐两代是永济渠的一部分，宋代称御河，元代临清到四女寺成为著名京杭大运河的一段，民国后始称卫运河。建国后，曾三次进行扩大治理。1956年河道行洪能力从建国初期的300~400m³/s，提高到800m³/s；1958年又提高到1250m³/s，1963年大水后，按照防御五十年一遇洪水的标准，于1972至1973年再次进行了扩大治理，设计行洪流量达到了4000m³/s；扩建改建了四女寺枢纽工程，新建了祝官屯枢纽，两座枢纽除具备防洪调度功能外，兼有蓄水灌溉及航运等效益。卫运河水污染严重且河流生境遭到破坏，应选择直接修复中的“强化净化模式”对河流进行修复。

5.5.10 南运河

南运河是京杭大运河的一段，南起梁官屯、北至独流镇十一堡，全长48.21km。1958年引黄济津，南运河成为黄河北徙的通道，也是历次引黄的必经之路。南运河只在引黄入津的时候水量比较大，平时除用于泄洪外基本干涸，为防止其影响周边环境，选择“生态系统替代模式”其进行修复。

5.5.11 漳河

漳河是卫河的支流，位于中国河北省、河南省之间。源出晋东南山地，有清漳河与浊漳河两源。清漳河大部流行于太行山区的石灰岩和石英岩区，泥沙较少，水较清。浊漳河流经山西黄土地区，水色浑浊。两源在河北省西南边境的合漳村汇合后称漳河。向东流至馆陶入卫河。长466km（至南陶），流域面积（至蔡小庄）1.82万km²。1960~1969年在上游林县（今林州市）境内建有红旗

渠水利工程。漳河的主要问题则是水量不足，不能满足生态基流的要求，生境也遭到破坏，应采用补水修复中的“水量-生境改善模式”修复。

5.5.12 漳卫新河

漳卫新河是漳卫南运河水系的入海通道，它西起四女寺枢纽，东至入海口，全长257km（四女寺至大口河），漳河、卫河的山区洪水几乎全部从该河宣泄入海，漳、卫两河50年一遇洪水下泄量由卫运河承泄，至四女寺枢纽由漳卫新河承泄 $3500\text{m}^3/\text{s}$ ，南运河承泄 $300\text{m}^3/\text{s}$ 。卫运河来水超过 $3800\text{m}^3/\text{s}$ 时，漳卫新河强迫行洪，如发生险情，可向恩县洼分洪。漳卫新河沿河还修建了七里庄、袁桥、吴桥、王营盘、前罗寨、庆云、辛集等七座拦河闸，总蓄水量可达 1亿m^3 ，为解决当地蓄水灌溉起了积极作用。漳卫新河还承担恩县洼 1309km^2 及两岸约 1100km^2 的排涝任务。漳卫新河常年水量充沛，但来水水质很差，生境也遭到破坏，因此选择补水修复中的“水量-生境改善模式”着重改善河流水质和生境。

5.5.13 蓟运河

蓟运河位于滦河以西，潮白河以东。主要支流有沟河、州河、还乡河，均发源于燕山南麓兴隆县境。沟、州两河至九王庄汇合后称蓟运河，汇流处有青甸洼为滞洪区，在新集以上开挖了引沟入潮减河，可引部分沟河洪水经潮白新河入海。至江洼口纳还乡河，汇流处有盛庄洼滞洪区。以下流经芦台、汉沽于北塘入海。新中国成立后，河系内先后修建了海子、于桥、邱庄三座大型水库。蓟运河干流除承泄上游洪水外，还担负着两岸排涝的任务。下游河道多弯，坡度平缓，洪涝渲泄不畅。1973年后，陆续对下游河道进行了整治，尾闾不畅的局面有所改善。蓟运河存在的主要问题是河流干涸，应采用“生态系统替代模式”修复改善河流生态环境。

5.5.14 海河干流

海河干流自西向东横贯天津市区，西起金钢桥，东到海河闸，全长72km，为大清河和永定河部分洪水的入海尾闾（兼泄北运河、永定河、子牙河、南运河的少量洪水），并泄天津市沥水。原为潮汐河道，自1958年建海河闸后，变为泄洪、防潮、蓄淡、排涝多功能河道。海河干流三岔口~二道闸段，因为城市河道，河底渠化，可以保证有一定的水量，重点是要改善河流生境，因此选择直接修复中的“生境恢复模式”修复。二道闸~海河闸段的主要问题是缺水，可以通

过补水修复中的“直接补水模式”修复，使生态环境得到改善。

5.5.15 潮白河

潮白河位于蓟运河以西，北运河以东。上游有白河、潮河两支，均发源于沽源县境，在密云县附近汇合后称潮白河，至怀柔纳怀河后入平原，下游河道经苏庄至香河。1950年在吴村闸下开挖了潮白新河，沿途纳城北减河、运潮减河、青龙湾减河，分泄北运河洪水，并纳引沟入潮减河，分泄沟河洪水，穿黄庄洼、七里海等分滞洪区，在宁车沽入永定新河入海。流域内建有云州、密云、怀柔3座大型水库。潮白河河道干涸、水量稀缺，应选择“生态系统替代模式”修复对河道进行治理。

5.5.16 徒骇河

徒骇河属于海河流域，位于黄河下游北岸，从西南向北呈窄长带状。干流自聊城地区莘县文明寨起，流经聊城、德州、惠民3个地区13个县（市），在惠民地区沾化县与秦口河汇流后于暴风站入海。干流总长度436.35km，流域面积13902km²。徒骇河各河段都存在水污染严重的问题，同时考虑生境现状，除西新河入徒骇河处~禹城前油坊采用直接修复中的“强化净化模式”修复外，其它各段均采用直接修复中的“水质改善模式”对河道进行整治。

5.5.17 马颊河

马颊河干流自河南省濮阳金堤河闸，经河南省濮阳、清丰、南乐，河北省大名县，在莘县沙王庄入聊城市，流经莘县、冠县、聊城、茌平、临清、高唐入德州，在无棣黄柏岭以下汇入渤海。河道全长123.24km（从沙王庄至高唐董姑桥），流域面积2870.8km²。马颊河清丰县马庄桥-薛王刘闸段主要的问题是水量短缺和水污染问题，可采用补水修复中的“水量-水质改善模式”进行治理；其余河段不仅存在水量不足和水污染严重的问题，生境也遭到破化，应采用补水修复中的“复合模式”进行治理。

上述十七条河流的生态修复模式以及北运河、永定河、滦河和卫河的生态修复模式汇总于表5.5中。

表 5.7 海河流域平原河流生态修复模式汇总

修复类型	修复模式	河流/河段
管理保护	管理保护模式	滦河引滦枢纽以上段
直接修复	生境恢复模式	北运河牛牧屯~土门楼段、海河干流三岔口~二道闸段
	水质改善模式	徒骇河文明寨~西新河入口和禹城前油坊~入海口段
	强化净化模式	北运河北关闸~牛牧屯段、卫河、漳卫新河、徒骇河西新河入徒骇河处~禹城前油坊
补水修复	直接补水模式	陡河、唐河西大洋水库~温仁段、海河二道闸~海河闸段
	水量—水质改善模式	白沟河、马颊河清丰县~薛王刘闸段、滦河引滦枢纽~河口段
	水量—生境改善模式	永定河三家店至卢沟桥段河道、漳河、北运河土门楼~屈家店河段、唐河温仁~白洋淀段
	复合模式	马颊河金堤闸~马庄桥段和薛王刘闸~入海口段
生态系统替代	生态系统替代模式	永定河卢沟桥以下段、南拒马河、潞龙河、滹沱河、滏阳河、子牙河、南运河、蓟运河、潮白河

第六章 结论

海河流域的河流生态系统由于受到水资源过度开发和污染物排放的影响,结构和功能均受到严重破坏。为了修复河流生态系统,进而改善整个流域的生态环境,有必要根据海河流域河流自然条件、现状、社会要求、经济发展水平、目前修复技术水平和未来发展,分析研究海河流域平原河流分阶段修复目标(代表性河流、典型河段)、实施原则和修复技术方案。

结合海河流域河流缺水、水污染严重以及人工控制强度大的现状,通过对国内、外已有河流生态修复技术理论研究及其工程实践分析研究,整理筛选出 13 种适用于海河流域平原河流的河流生态修复技术,并根据流域内河流生态现状和修复特点,将这些技术重新分为水量调整、水质净化和生境改善三大类技术。

海河流域平原河流生态修复应依据河流连续统理论、洪水脉冲理论和河流四维模型等河流生态学基本理论,遵循自然循环、生物多样性、景观异质性、流域内整体性以及经济可行的原则,从海河流域的河流生态现状出发,研究生态修复模式和未来实施方案。

从影响海河流域河流生态系统健康最重要的因素——水量出发,综合考虑河流水质、河道天然形态、生物生境等其它重要因素,系统地提出海河流域平原河流生态修复模式。海河流域平原河流生态修复有管理保护型、无补水修复型、补水修复型和“以绿代水”型四种修复类型,其中包含九种修复模式即管理保护型修复、生境恢复型修复、水质改善型修复、强化净化型修复、直接补水型修复、水量-生境改善型修复、水量-水质改善型修复、复合型修复以及“以绿代水”型修复模式。

在此基础上,对海河流域存在典型生态问题的代表性河流-北运河、永定河、滦河以及卫河分河段进行重点研究,结合各个河段河流生态健康评价和存在的主要问题提出适宜的修复模式并分析可行的修复技术与方法;对其余的 17 条河流,结合海河流域河流健康评价和存在的主要问题分别进行研究并提出相应的修复模式。

研究所涉及的 21 条河流中,生态系统健康只需管理保护的仅有滦河引滦枢纽以上的河段。需要进行生境恢复型修复的有北运河牛牧屯-土门楼与海河干流三岔口-二道闸两河段;需要进行水质改善型修复的有永定河官厅水库-三家店、徒骇河文明寨~西新河入徒骇河和禹城前油坊-入海口三条河流或河段;需要进

行强化净化型修复的有永定河官厅水库以上、北运河北关闸-牛牧屯、卫河、卫运河、漳卫新河以及徒骇河西新河入徒骇河处-禹城前油坊六条河流或河段；可进行直接补水型修复的有陡河、唐河西大洋水库-温仁段、海河二道闸-海河闸三条河流或河段；需要进行水量-生境改善型修复的有永定河三家店-卢沟桥、北运河土门楼-屈家店、唐河温仁段-白洋淀、漳河四条河流或河段；需要进行水量-水质改善型修复的有白沟河、马颊河清丰县-马庄薛王刘闸、滦河潘大水库-河口三条河流或河段；需要进行复合型修复的有马颊河濮阳县金堤闸-清丰县马庄桥与薛王刘闸-入海口两河段；需要进行“以绿代水”型修复的有永定河卢沟桥以下、南拒马河、潞龙河、滹沱河、滏阳河、子牙河、南运河、蓟运河、潮白河九条河流或河段。

通过生态修复模式研究，海河流域二十一条平原河流中，有十七条河的修复类型为补水修复或生态系统替代。可见，彻底解决海河流域平原河流生态问题的关键在于流域内水资源的科学调度管理和合理开发利用。

参考文献

- [1] 冯质刚. 海河流域典型水环境问题及对策研究[J]. 山东水利. 2007(10): 27-30.
- [2] 牛桂林,谢子书. 海河流域生态修复发展方向研究[J]. 水科学与工程. 2007(3): 48-52.
- [3] 鲁春霞,谢高地,成升魁. 河流生态系统的休闲娱乐功能及其价值评估[J]. 资源科学. 2001, 5.
- [4] 白世强,张春梅卢升高. 基于维持河流健康的城市河道生态修复研究[J]. 人民黄河. 2006, 28(8): 3-4, 8.
- [5] 董哲仁, 探索生态水利工程学[J]. 中国工程科学. 2007, 9(1): 1-7.
- [6] 龙笛,潘巍. 河流保护与生态修复[J]. 水利水电科技进展. 2006, 26(2):21-25.
- [7] 李洪远,鞠美庭. 生态恢复的原理与实践[D]. 化学工业出版社. 2004年12月.
- [8] 陈敏芬,毛江才,汪勇. 河流生态恢复的几点对策[J]. 浙江水利水电专科学校学报. 2006, 18(2):38-40.
- [9] 蔡庆华,唐涛,刘建康. 河流生态学研究中的几个热点问题[J]. 应用生态学报. 2003, 14(9):1573-1577.
- [10] 卢晓宁,邓伟,张树清. 洪水脉冲理论及其应用[J]. 生态学杂志. 2007, 26(2):269-277.
- [11] 陈敏芬,毛江才,汪勇. 河流生态恢复的几点对策[J]. 浙江水利水电专科学校学报. 006, 18(2):38-40.
- [12] 陈雪,徐海波,马继霞等. 生态型河道建设概述[J]. 市政工程设计. 2006(7):77-80.
- [13] Cairns J,Pratt J R , Pratt R. Ecological restoration through behavioral change[J]. Restoration Ecology, 1995, 3(1):51 -53.
- [14] 董哲仁. 试论河流生态修复规划的原则[J]. 中国水利, 2006(13) : 11-13,21.
- [15] 倪晋仁. 受损河流的生态修复[J]. 科技导报. 2006, 217(7):17-20.
- [16] 彭静,李翀,徐天宝. 论河流保护与修复的生态目标[J]. 长江流域资源与环境. 2007, 16(1):66-71.
- [17] 任海,彭少麟编著. 恢复生态学导论[D]. 科学出版社. 2002.
- [18] Williams T C, Dee P E. A citizen's approach to integrated river basin management[J]. Water Science and Technology, 1995,32(5-6):169-174.
- [19] Markb B. Amyl H, Daniel P L. Aquatic ecosystem protection and restoration:advances in methods for assessment and evaluation. Environmental Science & Policy,2000,3(9):89-98.
- [20] Williams T C, Dee P E. A citizen's approach to integrated river basin management[J]. Water Science and Technology, 1995,32(5-6):169-174.
- [21] Markb B. Amyl H, Daniel P L. Aquatic ecosystem protection and restoration:advances in methods for assessment and evaluation. Environmental Science & Policy,2000,3(9):89-98.
- [22] 董哲仁. 受污染水体的生物修复技术[J]. 水利水电技术, 2002,11(2):75-79.
- [23] 张忠祥,钱易. 城市可持续发展与水污染防治对策[D]. 中国建筑工业出版社.
- [24] Drenner R W, Day D J, Basham S J, et al. Ecological water treatment system for removal of

参考文献

- phosphorus and nitrogen from polluted water. *Biological Application*. 1997, 7(2).
- [25] 濮培民, 王国祥, 李正魁等. 健康水生系统的退化及其修复——理论、技术及应用[J]. 湖泊科学. 2001, 13(3).
- [26] Allan R J. What is aquatic ecosystem restoration. *Water Quality Research Journal of Canada*. 1997. 32 (2): 229- 234.
- [27] 罗朝晖. 生态河道构建技术及净污效果实验研究[M]. 河海大学: 2005 年.
- [28] 侯俊. 生态型河道构建原理及应用技术研究[M]. 河海大学: 2005 年.
- [29] Morten L. P., Jens M. A., kurt N., Marianne L. treatment system for removal of phosphorus and nitrogen from polluted water. *Ecological engineering*. 2007, 30: 131-144.
- [30] 董哲仁. 美国基米西河生态恢复工程的启示[J]. 水利水电技术. 2004, 35(9): 8-13 19.
- [31] 吴保生, 陈红刚, 马吉明. 美国基米西河生态修复工程的经验. 2005, 36(4): 437-477.
- [32] 陈永金, 李卫红, 陈亚宁等. 塔里木河流域综合治理的生态效应[J]. 中国环境科学. 2007, 27(1): 4-28.
- [33] 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏等. 塔里木河下游断流河道输水的生态响应与生态修复[J]. 干旱区研究. 2006, 23(4): 521-530
- [34] 邓铭江. 塔里木河流域气候与径流变化及生态修复[J]. 冰川冻土. 2006, 28(5): 694-701.
- [35] 吴芝英, 陈盛. 小流域水污染治理示范工程——杭州长桥溪的生态修复[J]. 湖泊科学. 2008, 20(1): 33-38.
- [36] 左华. 桂林环城水系整治及生态修复——城市水利工程[J]. 桂林工学院学报. 2006, 26(1): 13-17.
- [37] 黎运菜, 范惠生. 桂林环城水系整治及通航设计[J]. 山西水利科技. 2002, (1): 82-86.
- [38] 左华. 桂林环城水系整治及生态修复——生态护岸工程[J]. 桂林工学院学报. 2005, 25(4): 437-441.
- [39] 陈淑敏. 从历史的演变看转河治理的必要性[J]. 北京水利. 2004, (3): 6.
- [40] 张东进. 浅谈转河污水截留[J]. 北京水利, 2004, (3): 19-20.
- [41] 谢祥财, 朱晨东. 转河与菖蒲河的整治成果分析[J]. 北京水务, 2007, (5): 40-43.
- [42] 吴光红, 刘德文, 丛黎明. 海河流域水资源与水环境管理[J]. 水资源保护. 2007, 23(6): 80-83.
- [43] 李彦东, 李红有. 对北运河治理规划的思考[J]. 海河水利. 2007, (2): 24-27.
- [44] 付春梅. 北运河雨洪利用分析[J]. 北京水务. 2006, (4): 12-14.
- [45] 孙久虎, 张晶, 张洁等. 近 20 年来北运河地区植被覆盖时空变化研究[J]. 首都师范大学学报. 2007, 28(2): 93-97.
- [46] 李永华, 王劭勇, 白文荣. 温榆河雨洪资源水质分析及其利用[J]. 北京水务. 2006, (2): 36-39.
- [47] 周洪利. 北运河榆林庄闸重建的生态水闸模式[J]. 北京水务. 2006, (4): 17-19.
- [48] 焉丽, 赵文吉. 北京市永定河河流湿地水环境现状研究[J]. 吉林地质. 2004, 23(2): 33-38.
- [49] 龚秀英. 试谈永定河水系存在问题及建议[J]. 北京水利. 2005, (1): 12-13.
- [50] 梁涛, 张秀梅, 章申. 官厅水库及永定河枯水期水体氮、磷和重金属含量分布规律[J]. 地理科学进展. 2001, 20(4): 341-345.
- [51] 李海龙, 岳德鹏, 贾丹等. 永定河下游沙地风沙活动典型分析[J]. 河北林果研究. 2007,

- 22(4):371-375.
- [52] 张欣欣,向小勇. 永定河抑制扬尘沙地平整及生态建设工程概述[J]. 北京水利. 2005, (4): 29-30.
- [53] 冯晓静,高焕文,毛宁等. 永定河沙地播草盖沙效果的风洞试验研究[J]. 中国水土保持. 2006, (4):16-18.
- [54] 于京雯. 滦河流域水利建设成就[J]. 河北水利水电技术. 2003, (6)4-6.
- [55] 李海东,宋清秀,周亚歧. 水土保持措施对滦河流域径流"泥沙的影响研究(一)[J]. 海河水利. 2004, (1):18-20.
- [56] 温立成,鞠玉梅. 滦河水资源可持续开发利用初探[J]. 海河水利. 2003, (2):26-27.
- [57] 丛黎明. 科学调配水资源改善滦河下游水生态环境[J]. 海河水利. 2003, (2):13-15.
- [58] 罗少军,王丽雅. 滦河水资源开发利用的几个问题[J]. 河北水利水电技术. 2000, (2):26-28.
- [59] 张维斌,赵斌. 内蒙古境内滦河水质污染现状及防治建议[J]. 内蒙古环境保护. 2001, 13(4): 26-28.
- [60] 王少明. 滦河干流及伊逊河污染类型判定及趋势分析[J]. 水利电力劳动保护. 2000,(4): 26-28.
- [61] 王少明,邢海燕,王立明. 潘家口和大黑汀水库水质变化趋势分析[J]. 水资源保护. 2003, (2):25-27.
- [62] 刘克岩. 滦河水资源开发与利用分析[J]. 海河水利. 2000,(5):10-11.
- [63] 温立成,刘洪波. 利用洪水资源改善滦河下游生态环境的探讨[J]. 海河水利. 2004,(6): 25-27.
- [64] 高继德. 乐亭县滦河、大清河入海口养殖水域污染事故及其反思[J]. 河北渔业. 2000,(1): 124-127.
- [65] 孙春歧,于文清. 承德市野生鱼类资源调查分析报告[J]. 承德民族师专学报. 2007,(5):58-59
- [66] 刘科. 滦河中下游防洪措施[J]. 河北理工大学学报. 2008,30(1):53-54.
- [67] 杨春德. 浅析引滦工程对滦河下游地区的负面影响[J]. 河北水利水电技术. 2003,(4):24-25.
- [68] 荆大江. 滦河堤防滦南段的现状分析及提高防洪能力的措施[J]. 河北工程技术高等专科学校学报. 2007,(1):32-34.
- [69] 郑连合,苏子英,才辉辉. 生态防洪技术在滦河河道治理工程中的应用[J]. 水科学与工程 技术. 2006,(2):48-49.
- [70] 刘波,鲍文刚,崔惠. 卫源湖景观规划初探[J]. 城市道桥与防洪. 2007,(9):170-173.
- [71] 韩秀丽,闫倩倩. 卫河流域湿地生态环境恢复对策[J]. 海河水利. 2007, (4):20-28.
- [72] 朱晓春,王白陆. 卫河流域初始水权分配方案研究[J]. 海河水利. 2008, (2):4-6.
- [73] 赵飞燕,万贵生. 卫河地表水水质对地下水水质的影响研究[J]. 河南水利与南水北调. 2007, (8)
- [74] 何彬,邹洁玉. 海河流域跨省河流量分配基本思路[J]. 中国水利. 2007,27(1):43-46.
- [75] 马双梅,郭强,季红梅. 试析卫河污水治理[J]. 平原大学学报. 2002,19(2):82-83.
- [76] 杨长明. 对卫河河道与坡洼治理规划中共西行洪道规划方案的探讨[J]. 海河水利. 2004, (2):35-37

致谢

本论文研究是在南开大学大学环境科学与工程学院导师黄岁樑教授的悉心指导下完成的。

在论文的选题、研究方向定位、课题实施至整个论文的完成过程中黄老师都倾注了极大的心血，都给予了至关重要的指导。在论文完成之际，谨向黄岁樑导师致以最衷心的感谢和最崇高的敬意！

本论文在完成过程中同是得到了水利部海河水利委员会水资源保护科学研究所的张胜红、林超、刘德文、车红军、侯思琰、石维、王立明的帮助指导与协作，以及本实验室解莹、徐晓伟、唐婷芳子的帮助，特此致谢。

个人简历

汪雯, 1884年2月10日生, 2006年获得河北科技大学环境工程专业工学学士学位。2006年9月至2009年7月就读于南开大学环境科学与工程学院, 攻读硕士学位。在学期间主要发表论文如下:

[1] 汪雯, 黄岁樑, 张胜红等. 海河流域平原河流生态修复模式研究 I- 模式[J]. 水利水电技术, 2009, 40(4): 14-19.

[2] 汪雯, 黄岁樑, 张胜红等. 海河流域平原河流生态修复模式研究 II- 应用[J]. 水利水电技术, 2009, 40(5): 64-69.

论文所受项目资助:

水利部科技创新项目(XDS2007-05)、天津市科技支撑计划重点项目(09ZCGYSF00400)、水利部公益性行业科研专项子课题(200801135)、国家水体污染控制与治理重大专项(2008ZX07209-001)、国家自然科学基金(50479034)和中国水利水电科学研究院开放基金