

# 河流生态修复研究进展

杨俊鹏<sup>1</sup>, 王铁良<sup>2</sup>, 范昊明<sup>2</sup>, 苏子龙<sup>2</sup>

(1. 沈阳农业大学 高等职业技术学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

**摘要:**在河流生态系统普遍遭受严重破坏的今天,河流生态修复成为研究的热点。该文在广泛查阅国内外河流生态修复资料的基础上,分析认为河流生态系统的影响因素主要为水文条件、流域气候、河流地貌、河流的水力特性和水质,以及人类活动在传统水利工程、污染物排放、过量引水及农渔业活动方面对河流生态系统的胁迫作用。在明确河流生态修复概念与任务的基础上,对河流生态修复理论研究中的河流健康、河流生态需水、河流生态修复尺度与机理,以及河流生态修复模型进行了分析与综述。对河流生态修复原则及生态修复中的几个重要技术问题进行了分析与评价。最后提出了我国河流生态修复研究和建设中应特别关注的几个问题及发展建议。

**关键词:**河流; 生态系统; 影响因素; 胁迫; 生态修复

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)06-0299-06

## Research Progress of River Ecological Restoration

YANG Jun-peng<sup>1</sup>, WANG Tie-liang<sup>2</sup>, FAN Hao-ming<sup>2</sup>, SU Zi-long<sup>2</sup>

(1. High Vocational-technical School, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China;

2. College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** The ecological restoration of river ecosystem has become a research hotspot because the river ecosystems were generally severely damaged. On the basis of broad access to the information of the domestic and international ecological restoration, the influence factors of river ecological system have been analyzed, which were hydrological conditions, watershed climate, river geomorphology, hydraulic characteristics of rivers and water quality. The stress of the river ecosystem which was forced by human activities in the traditional water conservancy project, pollutant emissions, excessive diversion of water project and fishing activities aslo was analyzed. On the basis of a clear river ecosystem repair concepts and tasks, several theoretical studies on river restoration have been analyzed and summarized, which were river health, river ecological water demand, scale and river restoration mechanism, and the model of river restoration. In addition, the principles of river restoration and several important technical issues of ecological restoration have been analyzed and evaluated in this paper. Finally, several issues were proposes which should be particular concerned in the research and construction of China's ecological restoration and development proposals.

**Key words:** river; ecosystem; influence factor; stress; ecological restoration

河流生态系统具有十分丰富的生物资源和重要的生态服务功能。长期以来,人们为了满足泄洪、排涝、航运、灌溉等要求,过多地使用混凝土等硬质材料进行水利工程建设 and 河道整治,结果导致河流长度缩短,河道遭到分割,浅滩和深潭消失,沿河的洪泛平原和湿地消失,河流两岸的植被减少<sup>[1]</sup>。同时,人类将生产和生活产生的大量污染物排入河流中,造成水质恶化。此

外,人类无节制地使用河流淡水资源、开发其生物资源,造成河水干涸、动植物减少。以上种种人类活动都对河流生态系统造成了胁迫,导致其生境恶化,生物多样性减少,从而造成河流生态系统的破坏。

随着社会的进步,人们的环保意识不断提高,对“人水和谐发展”的要求越来越高。保护水资源、修复河流生态系统已引起生态、环保、水利等多方

收稿日期:2012-05-14

修回日期:2012-07-10

资助项目:国家科技重大专项子课题辽河保护区河道综合修复关键技术(2012ZX07202004-004);国家自然科学基金资助项目(41071183)

作者简介:杨俊鹏(1972—),男,辽宁辽阳人,硕士,主要从事水土保持与生态修复方面的研究。E-mail:imyjp1972@163.com

通信作者:范昊明(1972—),男,吉林白山人,博士,主要从事流域侵蚀产沙与水土保持规划研究。E-mail:fanhaoming@163.com

面的关注,国内外对河流生态修复理论、应用技术的研究和实践取得了重大进展<sup>[2]</sup>。我国拥有大量的河流资源,但多数遭到破坏,进行河流生态修复的研究对我国水资源和生态环境保护具有十分重要的意义。

## 1 河流生态系统的影响因素

河流生态系统的影响因素主要有水文条件、流域气候、河流地貌、河流的水力特性和水质等。它们之间相互作用,是河流生态系统生境的组成要素。其中,水文条件和流域气候主要是在流域的尺度上对河流生态系统的生态过程和系统的结构、功能造成影响,而河流地貌、河流的水力特性以及水质则主要在河流廊道和河段这样相对较小的尺度上发挥作用<sup>[3]</sup>。

水文条件对河流生态系统具有主动性、驱动性作用,除了对河流环境景观的形成具有重要作用外,还对河流生物群落的构成和生物过程有着重要影响。水文条件包括河流的水量、流量和水文过程。其中,水量和流量对河流地貌的形成起着决定性的作用,它们的变化对河流中物质、能量、信息以及生物之间的传递和迁移具有重要的意义。丰华丽等<sup>[4]</sup>研究表明,水量和径流量的减少是河流生态系统退化的关键因素,严重时甚至会导致不可逆的生态退化。较为激烈的水文过程(例如骤然涨落的洪水)能够将河流与河滩动态地联结起来,促进水生与陆生生物之间的能量交换和物质循环。Poff等<sup>[5]</sup>认为水文条件是一种调节河流生态系统完整性和多样性的控制变量,水量、流量和水文过程任何一项的改变都会引起河流生态系统的变化。流域气候主要通过降雨和温度对河流生境进行影响。流域气候与河流生物群落的生物构成、生物过程具有明显的相关性。降雨会导致河流的水文条件发生改变,从而影响河流生境;在温度较低时,河流生态系统的能量交换和物质循环将会减弱。同时,河流生态系统也反作用于流域气候,造成局部小气候的改变。生命系统与非生命系统之间存在依存与耦合关系。河流生物群落依附不同的河流地貌生存发展,并与河流地貌相互影响;同时,良好的河流地貌景观格局使河流与洪泛滩区、湖泊、水塘和湿地之间保持良好的连通性,为物质流、能量流和信息流的畅通提供了物理保障<sup>[3]</sup>。河流的水力特性在较小的尺度上(如河段、河流廊道)上影响着河流环境景观的形成,并且使河流中的生物和矿物质得以运移和传递,为水生生物提供栖息地并输送营养物质。不同的水生生物都对应有相适宜的水力特性<sup>[3]</sup>,它的改变将会对水生生物造成影响。水质是判断河流生态系统是否健康的直接指标之一,良好的水质是维持河流

生态系统多样性、完整性以及其生态功能的基本条件,水质的恶化将导致严重的生态退化。

## 2 人类活动对河流生态系统的胁迫

人类活动对河流生态系统的胁迫使其整体性、连续性等特点遭到破坏,往往造成河流生态环境的变化,生物多样性减少,生态服务功能降低,甚至造成不可逆的生态退化。这种胁迫主要有传统水利工程对河流生态系统的胁迫、污染物的排放对河流的污染、引水量过大、沿河的农业、渔业生产对河流生态系统的胁迫等。

### 2.1 传统水利工程对河流生态系统的胁迫

传统水利工程(大坝、河道硬化等)的修建对河流原有的水文条件、河流地貌以及河流的水力特性造成严重的影响,破坏了河流生态系统本身的特性,从而造成了其对河流生态系统的胁迫。例如大坝的修建,将河流分割开来,破坏了河流的连续性,使河流上游形成高位水头、下游流量减少,中断了大坝上下游能量、物质和信息的传递,造成河流原有生境的改变,而生物群落和生境具有统一性,导致河流生物群落的栖息和迁徙规律受到影响<sup>[6]</sup>,最终使生物群落的多样性降低。再如河道硬化整治,由于对河道采取截弯取直和大量采用混凝土等硬质材料,一方面改变了河流地貌和河流的水力特性,破坏了河流的开放性和多样性,使原来蜿蜒的河道变得顺直,河水流速加快,阻碍了河流与河岸之间的交换、地表水与地下水之间的联系,改变了水域生态系统的结构和功能<sup>[7]</sup>,造成生物多样性减少和生态退化;另一方面,致使河流原有景观遭到破坏,河道形状几何规则化,变得十分单调,降低了河流生态系统的景观服务功能。

### 2.2 污染物排放对河流的污染

人类在生产、生活过程中向河流排入大量污染物,如果其数量超过河流生态系统的自净能力,将导致水质变坏(如水体富营养化、水体中含有大量的悬浮颗粒物等),直接对河流生态系统造成破坏(如水生生物大量死亡等),降低其淡水供应等生态服务功能。另外,由人类活动引起的硫化气体的大量排放,导致酸雨的形成,也会间接造成河流水质的恶化。

### 2.3 引水量过大

随着社会的发展,工农业以及人类的生活引用了大量的河水,但是每条河流的循环水量是有限的<sup>[8]</sup>。无限制的引用河水,使河流生态系统的水量低于生态需水量的下限,将导致原有河流生态系统结构的破坏,生态服务功能的退化,生物多样性减少,甚至造成河水干涸,整个河流生态系统的彻底毁灭。

## 2.4 沿河的农、渔业活动对河流生态系统的胁迫

沿河的农业活动对河流生态系统的胁迫主要表现在对河滩的开垦和耕作。由于土地肥沃,人们加大了对河滩、湖岸、河边湿地的开垦。大量的开垦造田使河滩、湖岸及河边湿地原有的天然植被受到严重破坏,水文条件、河流地貌及水力特性均随之发生改变,导致河滩、湖岸土地以及河滩湿地的退化,减少河滩本来拥有的丰富的生物多样性,降低其生态系统服务功能(如河滩湿地对河流水质的净化作用等)。此外,河滩的开垦还会造成水土流失,在河滩田地中大量使用农药,会对河流水质造成新的污染。而渔业活动则会造成河流中的经济鱼种受到过分的捕捞,破坏了原有的食物链,导致河流生态系统的完整性受损。

## 3 河流生态修复的概念和任务

有关河流生态修复的概念在学术界还没有统一的定义。我国学者任海和彭少麟<sup>[9]</sup>将其定义为:重建河流系统干扰前的结构与功能及有关的物理、化学和生物学特征,使其发挥应有的作用。2003年,美国土木工程师协会(ASCE)做出有关“河流生态恢复”的定义:河流恢复是这样一种环境保护行动,其目的是促使河流系统恢复到较为自然的状态,在这种状态下,河流系统具有可持续特征,并可提高生态系统价值和生物多样性。我国学者董哲仁<sup>[10]</sup>在此基础上将其定义为:河流生态修复是指通过适度人工干预,促进河流生态系统恢复到较为自然状态的过程,在这种状态下河流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。这些概念都突出了人工干预和自然恢复的结合,但其分歧在于对河流生态系统修复的程度,前者是对原有河流生态系统的重建,而后两者则是不追求完全恢复原有河流系统,而是达到一个相对较为自然的状态。学术界有关河流生态修复的任务虽然表述不一,但内涵基本相同:一是水质、水文条件的改善,使水量高于最小生态需水量,生境得到恢复;二是河流生态系统空间结构(河流地貌),及河流的连续性和开放性的恢复,以及河道纵向的蜿蜒性和横向断面的多样性;三是对生物种群的恢复,通过对生境的改善使生物的多样性得到提高。

## 4 河流生态修复理论研究

自德国学者 Seifen<sup>[11]</sup>提出“近自然河溪治理”的概念后,河流生态修复得到了蓬勃发展。20世纪60年代起,西欧和北美的发达国家将生态学原理运用于工程实践中,开展有关河道生态修复的相关实验研究,并逐步运用于实践。Vannote等<sup>[12]</sup>在更早的时

候提出河流连续体(River Continuum Concept, RCC)的概念,指出河流网络从河流源头起,到下属各级河流流域是一个连续的、流动的整体系统,河流生态系统的结构和功能与流域具有统一性。同时RCC还概括了沿河纵向有机物数量的时空变化、生物群落的结构和资源的分配,使得河流生态系统特征能够得到预测<sup>[13]</sup>。但是RCC描述的是没有受到干扰的河流生态系统,具有特殊性和局限性。董哲仁等<sup>[14]</sup>提出“水文—生物—生态功能河流连续体”概念,其内涵是:以河流水文—水力学过程空间连续性,生物群落结构空间连续性,营养物质流和能量流空间连续性,信息流空间连续性为要素的河流连续体模型;同时,考虑水文、生物及河流生态系统演变和进化的动态特征,建立相应的时间坐标和尺度。这些概念指出了河流生态修复的重点和时空尺度,构成了研究人类活动对河流生态系统的胁迫机理和河流生态修复的理论基础。在此基础上,开展了河流健康、河流生态需水量、河流生态修复的尺度和机理的研究,以及修复方法技术的研究。

### 4.1 河流健康

河流健康的研究可为河流的生态修复提供相关的标准,是河流管理工作的依据。学术界对河流健康还没有统一的定义,但总体来说可以分为两类。一是单纯从河流生态系统出发,Richard等<sup>[15]</sup>认为河流健康是指河流生态系统完整、生态条件良好。这种定义适合未受人类活动干扰的河流,但是当前多数河流不可避免地与人类社会相联系,所以另外一类定义将人类的价值涵盖其中,强调了河流对社会生态服务的特征。夏自强和郭文献<sup>[16]</sup>在总结前人相关概念的基础上,提出河流健康为既能保持生态系统的完整性,同时又能维持其对人类社会提供的各种服务功能。澳大利亚新南威尔士州的健康河流委员会(Healthy River Commission)将健康河流定义为:与其环境、社会和经济特征相适应,能够支持社会所希望的河流的生态系统、经济行为和社会功能的河流为健康河流<sup>[17]</sup>。目前,多数学者采用第二类定义。

对河流健康的研究主要集中在对河流健康的评价上。国外较早开展了相关研究,并立足于实际情况,建立起采用不同指标体系和标准的河流健康评价方法。目前,国外采用的评价方法可分为生物评价法和综合指标法两类。其中,生物评价法是基于生物对河流环境变化的反应来对河流健康进行评价,澳大利亚采用的AusRivAS模型就是将大型无脊椎动物作为指示物种,对其生活状况进行监测,并将其作为评价指标与期望值相比较得出评价结果<sup>[18]</sup>。但是当所

评测河流缺乏指示物种时,该方法则不能有效地做出评价。而综合指标法综合了物理、化学、生境、生物等多方面因素,能够反映不同尺度的信息,综合指标法将成为未来河流健康评价的主要发展方向。常用的是澳大利亚维多利亚州制定的河流状况指数法(ISC),该法通过对河流的水文、河流物理状态、岸边带、水质和水域生物 5 个方面的现状与原始状况相比较进行健康评价<sup>[18]</sup>。我国学者也较为倾向于综合指标法,高永胜等<sup>[19]</sup>在考虑了社会需求的满足程度和维持河流自身生命需要的基础上建立了河流健康生命评价指标体系,该体系包括地貌结构、社会经济功能、生态功能 3 个方面的 16 项指标,并选择分层二元对比专家分析法确定指标权重。但是综合评价法也存在指标过于繁杂、某些指标的监测成本较高、评价速度慢等缺点,尚需要进一步完善和发展。

#### 4.2 河流生态需水量

河流生态需水量是河流生态修复的重要依据,使河流水量满足生态需水量要求也是河流生态修复的重点之一。河流生态需水量是指在特定生态保护目标下,维持特定时空范围内的河流生态系统水分平衡所需要的总水量<sup>[20]</sup>。国外对河流生态需水量的研究开展的较早,并已形成了一套相对完整的体系,目前,相关研究已扩展了尺度,将生态需水量的研究与其他生态系统以及人类社会联系起来,并从河流生物群落所需的水动力学、水质要求等多个方面开展研究,并广泛地应用于河流的生态修复和管理之中。Acreman 等<sup>[21]</sup>研究表明,河流的生态需水量应立足于河流自身,满足河流生物对水的质、量、水动力等多方面需求,同时,还要充分考虑到人类社会的需求。Arthington 和 Pusey<sup>[22]</sup>通过对澳大利亚全国河流水资源分配进行分析,提出应通过对水流(包括水质、流态等)的保护和修复来保证生态需水。我国河流生态需水量研究则侧重于解决水资源短缺危机、河流生态修复等方面。倪晋仁等<sup>[23]</sup>将河流生态需水量分为:河流水污染防治用水、河流生态用水、河流输沙用水、河口区生境用水以及河流景观与娱乐环境用水。王伟等<sup>[24]</sup>对滦河典型水库群联合调度影响区(潘家口水库、大黑汀水库至滦河河口)的最小、适宜、理想三个等级的生态需水量进行了计算,为滦河下游的生态修复提供依据。常用的计算方法有水文学法、水力学法、栖息地法、整体法。这些方法在国内结合应用背景进行了改造,并得到了广泛的应用。

#### 4.3 河流生态修复的尺度和机理

河流生态修复的尺度和机理研究有助于确定河流生态修复的规划、原则以及所采用的修复方法。目

前对河流修复的理论研究多集中于流域尺度,董哲仁<sup>[10]</sup>通过分析水文过程与生态过程的耦合特征,论证了流域尺度是编制河流生态修复规划的适宜尺度,以流域尺度进行河流生态修复规划更能反映生态系统整体性特征。也有学者提出应针对不同的时空尺度特点进行针对性的研究,赵彦伟和杨志峰<sup>[25]</sup>探讨了河流生态修复的时空尺度,将时间尺度分为短、中、长和极长四个尺度,将空间尺度分为区域、流域、河流廊道和河段 4 个尺度,指出在修复过程中应根据不同的时空特点,确定重点内容和方向。

在河流生态修复机理研究方面,李睿华等<sup>[26]</sup>研究了美人蕉、香根草和荆三棱 3 种水生植物改善河水水质的机理和效果,指出河道修复中植物对提高河流自净能力、改善流域局部小气候有重要的作用。滑丽萍等<sup>[27]</sup>研究了河湖底泥的生物修复方法,并对其机理进行了阐述。高甲荣等<sup>[28]</sup>对采用扦插、生物垫和梢捆 3 种土壤生物工程措施进行河流岸坡治理的北京怀九河一渡河段的稳固岸坡效果进行了调查观测,分析了其加固机理。Pedersen 等<sup>[29]</sup>通过对 Skjern River 的生境、大型植物和大型无脊椎动物在 2000 年(修复前)和 2003 年(修复后)的两次调查观测,分析了生物群落的恢复机理,指出生态修复使生境变得丰富多样,极大地促进了生物群落的生长,并指出生物群落将会随着河流形态的稳定而持续发展。Nakano 等<sup>[30]</sup>对日本北部的 Shibetsu River 的生态修复进行了调查研究,探讨了大型无脊椎动物种群的恢复机理,指出重塑的蜿蜒河道为大型无脊椎动物创造了两种主要的生境:稳固的河床边缘生境和在河道弯曲处形成的树木的生境,这两种生境有利于大型无脊椎动物的发展。郑天柱等<sup>[31]</sup>应用生态工程学理论进行河道生态恢复机理的探讨,指出满足河流生态需水量是缺水地区恢复河流生态的关键。杨海军等<sup>[32]</sup>对河岸生态系统恢复过程中自组织机理进行了初步研究。综合目前国内外研究情况,关于河流恢复机理的研究尚属于初步阶段,一些机理尚不清楚,还有待深入研究,例如河岸生态系统在恢复过程中对水生生物群落的影响等问题。

#### 4.4 河流生态修复模型

河流生态修复模型可有效地为河流生态修复的规划和决策提供参考和指导,也是近年来国际上研究的热点之一。国外较早地开展了该方面的研究,并相继建立了一些模型,为河流的生态修复服务。例如基于 GIS 技术建立的生境适宜指数模型(HIS, Habitat Suitability Index)<sup>[33]</sup>,将其结合河流水力模型可有效地预测水生生物的适宜生境的参数(如水深、流速等),可为河流生境的修复提供参考,但该模型在遇到

复杂河道时部分参数的预测与标准值不符。又如模拟大坝拆除后河流中沉积物运动和河床稳定性的模型<sup>[34]</sup>,它可以对大坝拆除后河流中沉积物的重新分配及河床的稳定性进行预测,包括大坝拆除时期和拆除后的4 a恢复时期,但是该模型未考虑河流对河床的冲刷。另外还有计算水流动力的模型(CFD, Computational Fluid Dynamics)<sup>[35]</sup>,该模型被广泛应用于确定水流运动参数,以满足生态水利工程的需要,并可结合其他生态学模型模拟恢复过程,为河流的生态修复服务。有关综合模型报道较少, Bockelmann等<sup>[36]</sup>在2003年针对英国的Afon Morlais河的一段长约3 km的蜿蜒片段开发了生态恢复模型,此模型集合该河流片段的水力、土层、生态参数建立而成,可以对河流的恢复进行预测,但由于各条河流的状况不同,因此该模型具有特殊性和局限性,不能得到广泛的应用。我国的河流生态修复模型尚处于起步阶段,但也取得了一定的成果。叶飞等<sup>[37]</sup>通过原位样方观测和室内水情模拟实验,开发了岸边带植被演替模型,该模型耦合了全局基于连续性模式的水动力模块和局部基于元胞自动机模式的植被演替模块,但是该模型由于缺乏对水温、浊度等因素的考虑,具有局限性。我国在综合模型的方面尚处于概念理论阶段,相关报道较少。综合上述文献,当前国内外对河流生态修复模型的研究多集中于对部分的模拟,并且这些模型考虑的影响因素不全面,只能对一些理想状态下的情况进行模拟,具有局限性;由于河流生态恢复机理尚不明确,所以对于综合模型的报道较少,已开发出的综合模型还不完善,有待进一步研究。

## 5 河流生态修复的方法

目前,河流的生态修复方法主要用于对河流地貌和水质的修复,常用的修复方法有:

(1) 水利设施的拆除。由于水利工程会对河流生态系统构成胁迫,人们在进行河流的生态修复时会通过拆坝、拆除混凝土河道等措施降低水利工程对河流生态系统的负面影响。

(2) 河岸带的修复。河岸带位于水陆交错地带,是河流水生生态系统和陆地生态系统之间能量、物质和信息交换的重要过渡带。因此,河岸带的修复对河流生态系统的修复具有重要的意义。常采用后撤堤防、建造生态护坡以及修复或建造河岸湿地等方法进行河岸带的修复,可有效提高生物多样性和防治水土流失。李小平和张利权<sup>[38]</sup>在上海浦东机场镇河岸带中采用沉水植物、挺水植物、湿生植物进行修复,10个月后发现土壤剪切力和生物多样性都得到了明显改善。

(3) 河道的修复。对河道的修复主要是在纵向上修复河道自然蜿蜒的形态,赵进勇等<sup>[39]</sup>总结了修复蜿蜒形态的四种方法:复制干扰前的蜿蜒模式法、参考附近未受干扰河段模式法、自然恢复法和通过对受干扰河流进行系统评价和分析的系统分析法。但由于河流都具有独特性,因而复制法和参考法都具有特殊性,不适合所有河道;自然恢复法的历史较长;系统分析法能够综合多方因素模拟河流的蜿蜒形态,较为适用。河道修复在横向上是修复河道断面的多样性,同时注意深潭—浅滩的创建。另外还可以通过建造橡胶坝、小型水堰等方法来改善河道内的局部地貌形态。美国从1990年开始的基西米河生态修复工程,通过改变上游水库的运行方式、修建拦河坝抬高水位以恢复两岸湿地和回填渠化河道、恢复其自然蜿蜒状态等方式,达到河流生态修复的目的<sup>[40]</sup>。

(4) 控制入河污染物。水质是河流生态系统的重要影响因素和生境要素,对河流生态系统的健康有着至关重要的影响。在结合河岸湿地、生态河道的生态治污等防治污水方式的同时,还应加强对各类入河污染物排放的控制,以减少水污染,修复河流水质。

## 6 建议

我国幅员辽阔,拥有大量的河流,但是由于人为或自然原因,大部分河流生态系统遭受到了不同程度的破坏。因此,加强对未受干扰河流的保护和对已受破坏河流进行生态修复已刻不容缓。从目前国内研究情况来看,河流的生态修复虽取得一定成就,但仍处于探索阶段,针对我国实际情况提出以下发展建议:(1) 在根据不同尺度进行河流生态修复工程的规划和建设的同时,应注意结合河流所在区域的其它环境保护和生态修复,以助于更大尺度范围内的生态建设;(2) 当前大多研究和工程实践偏重于河流水质的改善,今后应加强对河流生态系统结构和功能修复的研究和实践;(3) 加强对河流生态修复标准的研究,尽快确立起修复标准,为河流生态修复提供依据;(4) 应综合修复方法、河流健康评价体系、生态需水量以及修复标准等多个方面,构建起一套完整的河流生态修复模型,来指导具体工程建设,并对已修复河流进行监测、管理;(5) 河流恢复历时较长,但在修复工程结束后缺乏长期监测,建议应进行针对生态护坡、生物多样性恢复、流域小气候等的长期观测。

参考文献:

- [1] 王薇,李传奇. 河流廊道与生态修复[J]. 水利水电技术, 2003,34(9):56-58.

- [2] 孙东亚,赵进勇,董哲仁. 流域尺度的河流生态修复[J]. 水利水电技术,2005,36(5):11-14.
- [3] 董哲仁. 河流生态系统研究的理论框架[J]. 水利学报,2009,40(2):129-137.
- [4] 丰华丽,陈敏建,王立群. 河流生态新系统特征及流量变化的生态效应[J]. 南京晓庄学院学报,2007,12(6):59-62.
- [5] Poff N L, Allan J D, Bain M B, et al. The natural flow regime: a new paradigm for riverine conservation and restoration[J]. Bio-Science, 1997,47:769-784.
- [6] 王东胜,谭红武. 人类活动对河流生态系统的影响[J]. 科学技术与工程,2004,4(4):299-320.
- [7] 董哲仁. 水利工程对生态系统的胁迫[J]. 水利水电技术,2003,34(7):1-5.
- [8] 艾学山,王先甲. 打造健康河流维持可持续发展[J]. 国土资源科技管理,2007,24(3):60-65.
- [9] 任海,彭少麟. 恢复生态学导论[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [10] 董哲仁. 河流生态修复的尺度格局和模型[J]. 水利学报,2006,37(12):1476-1481.
- [11] Seifert A. Naturnaeherer wasserbau [J]. Deutsche Wasserwirtschaft,1983,33(12):361-365.
- [12] Vannote R L. The river continuum concept[J]. Can. J. Fish. Aqua. Sci.,1980,37:130-137.
- [13] 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.
- [14] 董哲仁,孙东亚,彭静. 河流生态修复理论技术及其应用[J]. 水利水电技术,2009,40(1):4-10.
- [15] Richard H N, Charles P H. Monitoring river health [J]. Hydrobiologia,2000,435:5-17.
- [16] 夏自强,郭文献. 河流健康研究进展与前瞻[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(2):252-256.
- [17] Halse S A, Scanlon M D, Cocking J S, et al. Factors affecting river health and its assessment over broad geographic ranges: the Western Australian experience [J]. Environ. Monit. Assess.,2007,134(2):161-175.
- [18] Ladson A R, White L J, Doolan J A, et al. Development and testing of an Index of Stream Condition for waterway management in Australia[J]. Freshwater Biology,1999,41(2):453-468.
- [19] 高永胜,王浩,王芳. 河流健康生命评价指标体系的构建[J]. 水科学进展,2007,18(2):252-257.
- [20] 占车生,夏军,丰华丽,等. 河流生态系统合理生态用水比例的确定[J]. 中山大学学报,2005,44(2):121-124.
- [21] Acreman M, Dunbar M J. Defining environmental river flow requirements-a review [J]. Hydrology and Earth System Science,2004,8(5):861-876.
- [22] Arthington A H, Pusey B J. Flow restoration and protection in Australian rivers[J]. River Research and Applications,2003,19(5):377-395.
- [23] 倪晋仁,崔树彬,李天宏,等. 论河流生态环境需水[J]. 水利学报,2002,9(9):14-20.
- [24] 王伟,杨晓华,王银堂. 滦河下游河道生态需水量[J]. 水科学进展,2009,20(4):560-566.
- [25] 赵彦伟,杨志峰. 河流生态修复的时空尺度探讨[J]. 水土保持学报,2005,19(3):196-200.
- [26] 李睿华,管云涛,何苗,等. 用美人蕉、香根草、荆三棱植物带处理受污染河水[J]. 清华大学学报,2006,46(3):366-370.
- [27] 滑丽萍,郝红,李贵宝,等. 河湖底泥的生物修复研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(2):124-129.
- [28] 高甲荣,刘瑛, Hanspeter Rauch. 土壤生物工程在北京河流生态恢复中的应用研究[J]. 水土保持学报,2008,22(3):152-157.
- [29] Pedersen M L, Friberg N, Skriver J, et al. Restoration of Skjern River and its valley-short-term effects on river habitats, macrophytes and macroinvertebrates [J]. Ecological Engineering,2007,30(2):145-156.
- [30] Nakano D, Nagayama S, Kawaguchi Y, et al. River restoration for macroinvertebrate communities in low-land river: insights from restoration of the Shibetsu River, north Japan[J]. Landscape Ecol Eng.,2008,4(1):63-68.
- [31] 郑天柱,周建仁,王超. 污染河道的生态恢复机理研究[J]. 环境科学,2002,23(12):115-117.
- [32] 杨海军,内田泰三,盛连喜,等. 受损河岸生态系统修复研究进展[J]. 东北师范大学学报:自然科学版,2004,36(1):95-100.
- [33] Gillenwater D, Granata T, Zika U. GIS-based modeling of spawning habitat suitability for walleye in the Sandusky River, Ohio, and implications for dam removal and river restoration[J]. Ecological Engineering,2006,28(3):311-323.
- [34] Konrad C P. Simulating the recovery of suspended sediment transport and river-bed stability in response to dam removal on the Elwha River, Washington[J]. Ecological Engineering,2009,35(7):1104-1115.
- [35] Daraio J A, Weber L J, Newton T J, et al. A methodological framework for integrating computational fluid dynamics and ecological models applied to juvenile freshwater mussel dispersal in the Upper Mississippi River[J]. Ecological Modelling,2010,221(2):201-214.
- [36] Bockelmann B N, Fenrich E K, Lin B, et al. Development of an ecohydraulics model for stream and river restoration[J]. Ecological Engineering,2004,22(4):227-235.
- [37] 叶飞,陈求稳,吴世勇,等. 空间显式模型模拟河流岸边带植被在水库运行作用下的演替[J]. 生态学报,2008,28(6):2604-2613.
- [38] 李小平,张利权. 土壤生物工程在河道坡岸生态修复中应用与效果[J]. 应用生态学报,2006,17(9):1705-1710.
- [39] 赵进勇,孙东亚,董哲仁. 河流地貌多样性修复方法[J]. 水利水电技术,2007,38(2):77-83.
- [40] 吴保生,陈洪刚,马吉明. 美国基西米河生态修复工程的经验[J]. 水利学报,2005,36(4):473-477.