

引用格式：

许继军, 景唤. 河流生态修复理念与技术研究进展 [J]. 农业现代化研究, 2022, 43(4): 691-701.

Xu J J, Jing H. Research progress of river ecological restoration concept and technology[J]. Research of Agricultural Modernization, 2022, 43(4): 691-701.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2022.0066



## 河流生态修复理念与技术研究进展

许继军, 景唤\*

- (1. 长江水利委员会长江科学院水资源与生态环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010 ;
2. 长江水利委员会长江经济带保护与发展战略研究中心, 湖北 武汉 430014)

**摘要：**随着工业化和城市化进程加速，河流岸线被侵占填埋及水资源消耗和污染物排量剧增，河流形态及其生态系统显著恶化。为维系河流健康生命，对受损河流的生态修复广受各界关注。本文对国内外河流生态修复的研究进展进行了系统阐述，总结了河流生态修复的概念、发展历程和主要目标，并从修复手段入手，系统阐述了当前河流生态修复的工程类技术（底泥疏浚、河流形态修复、生态补水技术等）和生态类技术（水生生物处理、生物膜、微生物修复、土地处理技术等）的主要特点。在此基础上，对河流生态修复的近自然治理理念进行了系统阐述，并针对当前生态修复理论的不足，从顺应新时代人们对美好生活和环境的需求角度，提出了近自然治理理念指导下的河流生态修复原则，即：综合治理和多种措施并举、工程措施与非工程措施结合、河流生态修复多目标统筹和兼顾美学的工程技术设计，以期为未来河流生态修复理论发展与工程实践提供科学参考。

**关键词：**生态修复；工程类；生态类；近自然治理；创新需求

中图分类号：X171.4

文献标识码：A

文章编号：1000-0275 (2022) 04-0691-11

### Research progress of river ecological restoration concept and technology

XU Ji-jun, JING Huan

- (1. Changjiang River Scientific Research Institute, Hubei Key Laboratory of Water Resources & Eco-Environmental Sciences, Wuhan, Hubei 430010, China; 2. Research Center on the Yangtze River Economic Belt Protection and Development Strategy, Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Wuhan, Hubei 430014, China)

**Abstract :** With the acceleration of industrialization and urbanization, river shorelines have been occupied and buried, and water consumption and pollutant discharge have increased dramatically, resulting in a significant deterioration of river morphology and ecosystem. To maintain the healthy life of rivers, ecological restoration of damaged rivers is widely concerned. This paper reviewed domestic and overseas research progress of river ecological restoration, including concept, development history, and main objectives. In addition, this paper also systematically examined the main characteristics of current river ecological restoration engineering technologies (sediment dredging, river morphology restoration, ecological water supply technology, etc.) and ecological technologies (aquatic biological treatment, biofilm, microbial restoration, land treatment technology, etc.). On this basis, this paper discussed the concept of near nature control of river ecological restoration. From the perspectives of the deficiencies of current ecological restoration theories and people's demands for better life, this paper provides some basic principles for river ecological restoration, including comprehensive management and multiple measures, combination of engineering measures and non-engineering measures, multi-objective coordination, and aesthetic engineering technology design of river ecological restoration.

**Key words :** ecological restoration; engineering technology; ecological technology; near natural control; innovation demands

基金项目：国家自然科学基金重点项目（U2040206）。

作者简介：许继军（1971—），男，湖北武汉人，博士，教授级高级工程师，主要从事水文水资源、水文模型研究及应用，E-mail: xujj07@163.com.cn；通信作者：景唤（1993—），女，河南商丘人，博士，主要从事河床演变学研究，E-mail: 2574515425@qq.com。

收稿日期：2022-03-21，接受日期：2022-08-08

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (U2040206).

**Corresponding author:** JING Huan, E-mail: 2574515425@qq.com.

**Received** 21 March, 2022; **Accepted** 8 August, 2022

水是生命之源、生产之要、生态之基,具备社会、自然、资源等多重属性,在人类社会发展和生态环境演替中发挥着不可替代的作用。河流作为水的核心载体,在自然生态、社会服务等不同领域扮演着重要角色。具体而言,水循环方面,河流是陆地与海洋生态系统的重要纽带,推动着生物圈的物质循环和能量流动;水资源方面,河流具有供水、航运、发电、灌溉等多重经济功能,促进区域经济高速发展;水生态方面,河流为水生动植物提供栖息场所,其形态多样性奠定了流域生物多样性的基础;水文化方面,河流演化形成的丰饶谷地是人类文明的发祥地,孕育了璀璨的河谷文明等。

然而,上世纪 80 年代以来,随着我国工业化和城市化进程的加速,传统治河工程被大量修建,河流岸线乱占滥用、污染物无序排放现象频发,强烈的人类活动干扰损害了河流生态系统的健康,造成河流自然形态破坏、生物多样性减少、水体自净能力和自我恢复能力减弱、水体污染加重等一系列问题<sup>[1-2]</sup>。兼之对河流生态保护的科学认知不全面、管理保护不到位、生态文明意识欠缺等原因,最终造成河流生态和服务功能退化,防洪、资源、生态、景观、文化等功能丧失。

在此背景下,开展河流生态修复已成必然趋势。尤其是十八大以来,党和国家将生态文明建设纳入中国特色社会主义事业总体布局,指出“建设生态文明,是关系人民福祉、关乎民族未来的长远大计”<sup>[1]</sup>。因此,做好河流生态修复,是贯彻国家生态文明战略、建设美丽中国的重要工作之一。

为全面了解现阶段河流生态修复发展状况,本文拟从概念、发展历程、目标、技术等多方面入手,系统梳理和总结国内外河流生态修复相关理论与技术的研究成果,以为未来河流的生态修复实践提供科学依据和指导。

## 1 河流生态修复理念

### 1.1 河流生态修复的概念

河流生态修复是指基于生态系统原理,运用多种方法或技术手段,恢复因人类活动干扰而丧失或退化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,修复和强化其自然生态和社会服务功能,使生态系统实现整体协调与自我维持、自我演替的良性循环<sup>[3-4]</sup>。

### 1.2 河流生态修复发展历程

从河流生态修复理念的发展状况入手,大致可分为三个阶段:

1) 理论雏形阶段。人类城市化与工业化进程中,掠夺式的水资源开发和剧增的污染物排放,破坏了河流生态系统原有的平衡状态,造成河流健康状况恶化。在此背景下,德、英、美等西方发达国家反思并总结了传统水利工程对于河流生态系统的胁迫,要求缓解河湖压力,恢复河湖自然面貌,提出了早期“河流修复”的概念<sup>[5]</sup>。1938年,德国学者 Seifert 首先提出了“近自然河溪治理”的理念,指出在完成河道治理任务时应综合考虑近自然、实用、经济、美观等多重原则,标志着河流生态修复领域理论研究的起点。但值得注意的是,早期的河流生态修复多侧重对污染水体的治理和保护,目标相对单一。

2) 初步形成阶段。随着研究的开展,人们意识到水质恢复不是河流修复的最终目标,生境、生物多样性所蕴含的生态价值逐渐被重视。20世纪 50 年代,德国创立了“近自然河道治理工程学”,提出河道整治要改变传统的设计理念与方法,应符合植物化和生命化原理。1962年,美国学者 H T Odum 等首次提出“生态工程”的概念,指出其含义为少量辅助下对以自然为主系统的环境控制,初步奠定了“多自然型河道生态修复技术”的理论基础<sup>[6]</sup>。紧随其后,受损河流生态系统的修复实践也逐步开展。1965年,德国学者 Ernst Bittmann 以芦苇和柳树为材料,在莱茵河开展了生态护岸的试验研究,开启了天然河流生态修复的实践探索<sup>[7]</sup>。20世纪 70 年代,瑞士 Zurich 州河川保护建设局在丰富和发展德国“生态护岸法”的基础上,提出了“多自然型河道生态修复技术”,指出应将混凝土硬化护岸改造为“树+石”生态护岸,恢复河流深槽浅滩相间、蜿蜒曲折的天然形态,同时也为鱼类等水生动物提供生存空间,丰富了河流生态修复的内涵。

3) 理论与实践全面发展阶段。随着工程实践的广泛开展,河流生态修复理论进一步发展,生态系统恢复进入人们的视野。1987年,莱茵河保护国际委员会提出了莱茵河行动计划,以生态系统修复作为莱茵河重建的主要指标<sup>[8]</sup>。20世纪 90 年代,日本建设省提出了“多自然型河川工法”,提倡使用木桩、竹笼、卵石等天然材料修建河堤,并将其应用于建设省的治水计划中<sup>[9]</sup>。2000年左右,荷兰认为应将河流生态修复与防洪相结合,强调“Make More Room for Water”,指出可从营造复杂水环境角度恢复河流生物多样性。2008年, Nakamura<sup>[10]</sup>提出河流生态修复应将保证生态系统完整性作为修复指导思想与目标。在此基础上,河流生态功能修复

的内涵获得了进一步丰富与发展。例如,Becker等<sup>[11]</sup>认为河流生态修复应利用天然河流转向结构建立稳定平面蜿蜒形态,以改善河流水生态,意味着河流生态修复已由单纯的结构修复向生态系统功能性修复转变。随后,Friberg等<sup>[12]</sup>对渠化河流自然化影响下水生大型无脊椎动物的演化展开了研究,认为栖息地恢复有助于改善大型无脊椎动物的种群结构,但对生物多样性恢复收效甚微,指出栖息地异质性需要重视;Galat和Zweimüller<sup>[13]</sup>指出生物多样性是原生鱼类区系恢复的必要条件,开展河流生态修复时,主槽、滩地、支流的栖息地与流程间的动态作用需加以考虑。

综上所述,历经半个世纪的孜孜探索,河流生态修复理念不断发展,其内涵已逐步从单一的结构修复向统筹考虑生态系统结构、功能和动力学过程的综合性修复发展。

近年来,我国学者深刻认识到水利工程对河流生态系统的影响,展开了河流生态修复的多维探索。以刘树坤提出的“大水利”理论为代表,他认为河流开发应重视流域整治与管理,充分发挥水的资源、环境和生态功能,为后续河流修复理论的研究奠定了基础<sup>[14]</sup>。董哲仁<sup>[15]</sup>分析了基于水工学的治水工程对河流生态系统的胁迫,提出了“生态水工学”的概念,认为生态学原理应被吸纳进水利工程的设计中,以保证河流生态系统的健康,实现人与自然和谐共处。

与此同时,学者们围绕河流生态修复理念与实践展开了大量研究。例如,高甲荣等<sup>[16]</sup>分析了传统河溪治理理念的利弊,提出了河溪的自然治理原则,认为河溪近自然治理需兼顾系统与区域原则、多目标兼顾原则、自然美学原则和文化保护原则,并对主要的治理模式展开了探讨;达良俊和颜京松<sup>[17]</sup>认为当前城市人工水景观存在整体性不足、人工硬化模式重的弊端,以“人与自然协调共生”理念为指导,提出了“近自然型”人工水景观建设思路,促进了近自然河道生态修复理念的发展;陈庆伟等<sup>[18]</sup>认为水利工程修建在通道阻隔、水库淹没、径流调节、水温变化等多个方面对河流生态系统产生影响,并将生态修复理念应用于水库运用与调度中,提出了相应的水库生态调度措施;胡和平等<sup>[19]</sup>基于生态流量过程线的概念,兼顾水质改善、泥沙控制、生态系统修复和血吸虫病防治等多个生态目标,提出了包括问题识别、目标确定、流量要求计算、生态方案设计和模拟调度等在内的水库生态调度的初步实施方案等。

### 1.3 河流生态修复技术流程

通常而言,健康的河流状态一般具备良好的水文情势、适宜的地貌形态,丰富的生物多样性等特征,而河流生态修复则主要是对河流因人类活动干扰而丧失或退化的自然生态功能进行恢复和保护。从技术流程上讲,河流生态修复通常包括三个主要阶段,其一为河流健康状况调查及评价,以明晰河流生态系统的主要退化原因;其二为生态修复策略制定,针对河流生态功能受损状况,针对性地采取适当的生态修复技术(包括工程类技术和生态类技术),改善河道水文情势(包括水量调配、水质净化、水文过程重塑等),营造适宜的栖息地环境(包括河道水系连通性改造、横向—纵向地貌形态多样性营造等),改善河流生态系统生物生境,以促进生物多样性恢复;其三为河流生态修复效果评价,采取定性或定量指标评估修复工程的实际效果。

### 1.4 河流生态修复的目标

结合文献调研结果,河流地貌特征改善、水文条件改善、生物多样性改善是现阶段河流生态修复的主要目标<sup>[20]</sup>。具体介绍如下:

1) 河流地貌特征改善。该目标主要是改善受损河流生态系统结构完整性,具体内容是恢复河流纵向连通性和横向连通性、保持河流纵向和横向形态多样性(其中,纵向主要指河道蜿蜒性,横向主要指深槽—浅滩结构形态等)、避免河床与河岸材料硬质化、塑造生态河床与河岸等<sup>[21]</sup>。经由河流地貌形态改善,塑造多样化生物栖息环境,恢复河流生态功能。

2) 水文条件改善。该目标包括水量和水质两个方面,具体侧重于保障河流生态需水量、改善河流水质、塑造近自然脉冲式水文周期等<sup>[21]</sup>。其中,水量恢复主要通过补充河流生态系统发展与平衡所需水量,提高河流水环境容量和自净能力,以维持河流生态系统的良性循环,多通过生态补水和生态调度手段实现<sup>[22]</sup>;水质改善则聚焦于污染河流的水质治理,降低污染物浓度,改善河流水质与水环境,以恢复河流生态系统的健康,多通过原位和异位净化手段实现<sup>[23]</sup>。

3) 生物多样性改善。该目标主要围绕河流生态系统水生植物与水生动物多样性的恢复与保护展开,特别是流域珍稀、濒危、特有和重要经济物种等,多采用“就地保护为主、迁地保护为辅”的保护原则<sup>[23]</sup>。该目标通常为河流生态修复较高阶段目标。

通过多维度修复,最终最大程度地降低传统河道整治对河流生态系统的不良影响,重建退化或受

损的水系统,修复和强化天然河道的防洪、排沙、航运、发电、生态、景观等自然生态和社会服务功能,实现河流生态系统的良性运转,实现人与自然和谐共处。

## 2 河流生态修复主要技术

### 2.1 工程类技术

2.1.1 底泥疏浚 底泥疏浚主要针对季节性断流且内源污染严重的河流,通过河道底泥的直接机械疏挖,清除水体内源污染源,控制污染物的持续释放,达到河流生态修复的目的<sup>[1]</sup>。底泥疏浚技术涉及两个关键问题,其一为疏浚深度的确定,其二为疏浚污泥后处理。对此,邢雅因等<sup>[24]</sup>探讨了城市河道底泥疏浚深度对氮、磷释放的影响;林莉等<sup>[25]</sup>系统探讨了底泥减量化、无害化处理和资源化利用的各项技术及底泥的处理处置途径等。总的来说,底泥

疏浚技术适用于突发水污染问题的应急处置,可快速改善污染河道的水质状况,但作业工程量大,成本高昂,难以避免对河流底质生态系统的损害,且往往难以从根本上解决问题<sup>[21]</sup>。

2.1.2 生态补水 生态补水技术是对缺水河流的生态修复技术,通常包括闸坝设置、闸坝生态调度和生态输水等内容。闸坝设置是指通过在河道内布设堰、低坝等维持基本水量<sup>[21]</sup>;闸坝生态调度是指利用河道闸坝进行水量调度时,应将生态要素考虑在内,满足工程下游河道的生态需水,缓解对河流生态系统的胁迫<sup>[1,21]</sup>;生态输水是指通过闸、泵等水利设施的调控,引入上游河道、水库水源、或处理厂处理水,补充河道水量,促进河流生态修复<sup>[1,21]</sup>。生态补水技术可直接有效地改善河道缺水状况,提升水环境容量,但具有工程量大、施工成本高等缺点。生态补水技术特征及应用实例见表 1。

表 1 生态补水技术与应用实例  
Table 1 Ecological water refill technology and application examples

修复技术	特征	应用实例
闸坝设置技术	适用于季节性河流水量调节	1. 深圳市观澜河翻板闸水量调节设施建设 <sup>[26]</sup> 2. 山东临沂城区段沂河干支流上下串通、水面连接的梯级橡胶坝群建设 <sup>[27]</sup>
闸坝生态调度技术	适用于闸坝设施完善的河道	1. 美国爱达荷州 Snake 河枯水期流量调度研究 <sup>[28]</sup> 2. 长江上游大型梯级水电站多目标、多任务、多尺度的联合调度 <sup>[29-30]</sup>
生态输水技术	适用于闸、泵等设施完善,水源丰富河流	1. 深圳市小型水库的河道生态补水研究 <sup>[31]</sup> 2. 常熟市生态补水试验研究 <sup>[32]</sup>

2.1.3 河流形态修复 河流形态修复主要指基于近自然原理,尽可能恢复河流横向连通性和纵向连续性、形态多样性、河床与河岸的生态化等<sup>[21]</sup>。

1) 横断面结构修复。所谓河流横断面结构修复,主要指在不影响河道功能的条件下,尽量保持河流天然断面形态,若无法保持天然断面,则按照复式、梯形、矩形断面的顺序选择<sup>[33]</sup>。其中,河道滩地占地面积较大的复式断面因有助于改善水生动物栖息环境,在天然河流中应用广泛<sup>[34]</sup>。例如,王庆国等<sup>[35]</sup>以四川某一山区河流为例,探讨了河道横断面深槽设置的生态改善效果,结果发现,特征流量下采用深槽修复可增加可使用栖息地面积约 48%,生境改善效果显著。

2) 河道蜿蜒性修复。蜿蜒性是天然河流平面形态的典型特征。所谓河道蜿蜒度修复包括大尺度和小尺度两个层面,前者是指应尊重河流地貌特性,应弯则弯,应直则直,尽可能保持原有蜿蜒性,确保河流连续;后者则多借助堆石、丁坝等结构营造局部蜿蜒性<sup>[21]</sup>。

3) 河道纵向连通性修复技术。所谓河道纵向连通性的修复,是指尽可能恢复河流的纵向连续性,

通畅其物质和能量的纵向流动,常通过拆除或降低阻碍水流的诸如闸门、水坝、浆砌谷坊坝、跌水等挡水建筑物,或通过人工布设辅助水道,改直立跌水为缓坡,于水位落差大河段设置鱼道等方式来实现<sup>[36]</sup>。河道纵向连通性的改善有利于恢复河流的生物多样性。

4) 生态河床构建。关于河床的生态化,主要是指深槽与浅滩形态序列构建、河床生态化以及栖息地结构加强三个部分<sup>[1,21]</sup>。针对水量偏少或易发生断流河流,采用人工机械挖掘方式塑造河床深槽浅滩犬牙交错分布的形态格局;条件允许的情况下,亦可利用生态丁坝和潜坝进行河床深槽浅滩形态构建<sup>[37]</sup>。河床生态化主要是指河床组成材料的生态化,手段包括:采用透水性能较好的材料构筑河床;以木桩、块石或混凝土块体等提高河床孔隙率等。生物栖息结构加强,主要是指运用树墩、砾石、渔樵等改善河床地貌,旨在提高河道生境异质性<sup>[21]</sup>。

5) 生态岸坡构建。河岸生态化主要是指河道岸坡的生态防护,将植物、自然材料等与工程技术有机结合,在保证河岸稳定性与抗侵蚀性前提下,营造多种生物共生的生态景观<sup>[38]</sup>,常用措施有植物

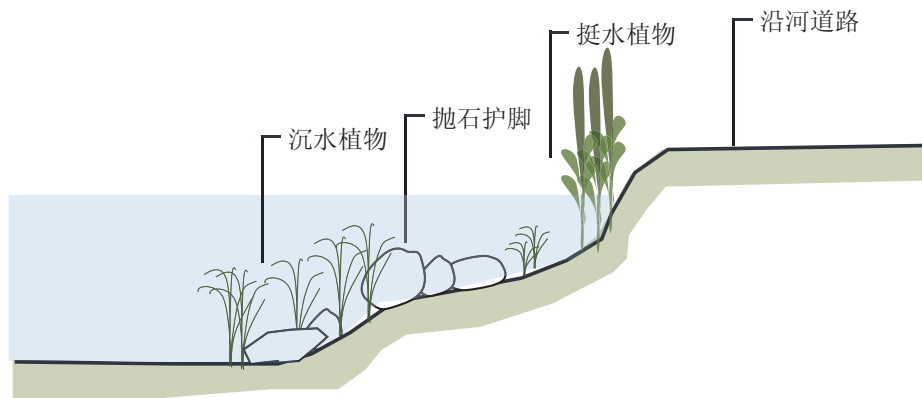


图 1 生态岸坡示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ecological slope protection

表 2 河流形态修复技术与应用实例

Table 2 River morphology restoration technology and application examples

修复技术	特征	应用实例
横断面结构修复技术	应结合河道水流特点，边坡陡缓相宜，河宽宽窄适度	1. 四川某一山区河流的断面深槽修复试验 <sup>[35]</sup> 2. 连山区凉水井子河段钢筋混凝土槽式结构复式断面方案研究 <sup>[39]</sup>
河道蜿蜒性修复技术	基于河流地貌特点，综合考虑大、小尺度修复	1. 丹麦斯凯恩河蜿蜒性塑造 <sup>[21]</sup> 2. 日本北海道标津川下游的再蛇行化实验
河道纵向连通性修复技术	拆除或降低阻碍水流的建筑物，设置辅助水道等	1. 太湖流域杭嘉湖地区平原水网连通性改善机理及措施研究 <sup>[40]</sup> 2. 巴西巴拉那河伊泰普水电站鱼道设置 <sup>[41]</sup>
生态河床构建技术	包括深槽浅滩构建、河床生态化及栖息地强化结构	1. 长春市水源入库生态河道生态堰、木桩、抛石三种典型生物栖息地强化结构效果研究 <sup>[42]</sup> 2. 卵砾石生态河床的水质修复作用研究 <sup>[43]</sup>
生态岸坡构建技术	将植物、自然材料等与工程技术有机结合	1. 海河流域北运河典型河段的生态护岸方法 <sup>[44]</sup> 2. 上海青浦区华新镇境内东风港滨岸缓冲带示范工程建设 <sup>[45]</sup>

环、生态型土壤技术等。生态岸坡示意图见图 1。河流形态修复技术特征及应用实例见表 2。

## 2.2 生态类技术

2.2.1 水生生物处理 水生生物处理技术包括水生植物修复技术和水生动物修复技术（即生物操纵法）两大类。

1) 水生植物处理。a. 人工湿地技术。人工湿地是指通过人为设计与建造由饱和基质、挺水与沉水植物、水体、动物构成的复合体，构建人工湿地生态系统，利用自然生态系统的物理—化学—生物的多重协同作用，通过过滤、吸附、降解等过程，同化或异化水体营养物质，实现水污染治理，恢复河道水质<sup>[46]</sup>，人工湿地治理示意图见图 2。按水流形态，人工湿地可分为垂直流人工湿地、水平潜流人工湿地和表面流湿地。以往研究表明，人工湿地技术对河道污水的氮、磷去除效果显著。例如，陈源高等<sup>[47]</sup>研究了表面流人工湿地系统对云南抚仙湖窑泥沟富营养化污水的除氮效果，结果发现，人工湿地系统氮去除率年平均为 39.4%；裴亮等<sup>[48]</sup>研究了潜流人工湿地系统对农村生活污水的处理效果，结果发现，潜流人工湿地对 COD、BOD<sub>5</sub>、

NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 的去除效果较好，平均去除率依次达 87.4%、83.5%、63.8%、57.9% 和 90.1%，并指出人工湿地系统处理效果与植物种植状况、温度、污染物浓度等有关。总的来说，人工湿地技术具有管理成本低、运行简便、无重复污染等优点，但也存在占地面积大、处理效果不完全可控等缺陷。

b. 生物浮岛。又称生态浮岛、人工浮岛、人工浮床，是指基于生态工程原理，通过将挺水植物、陆生植物等有机组合后种植于人为设计、搭建的轻质浮岛上，一方面利用植物根系直接吸收水体中的 N、P 等营养元素，另一方面借助由此构成的植物—微生物—动物生态系统的分解、合成、代谢功能除去污染水体中的有机物及其他营养元素，达到净化水质的目的<sup>[49]</sup>。例如，罗固源等<sup>[50]</sup>通过实验手段研究了以陶粒为基质的人工浮床上的美人蕉、风车草对水体 N、P、COD 等营养盐的去除效果，结果发现，浮床美人蕉、风车草对 N、P、COD 的去除率分别为 51.3%、44.7%、26.7%、46.6%、40.0% 和 25.0%，效果显著。该类方法适用于富营养化河流治理，具有工程量小、维护简单、避免重复污染等优点，但难以实施机械化、标准化推广，适用范

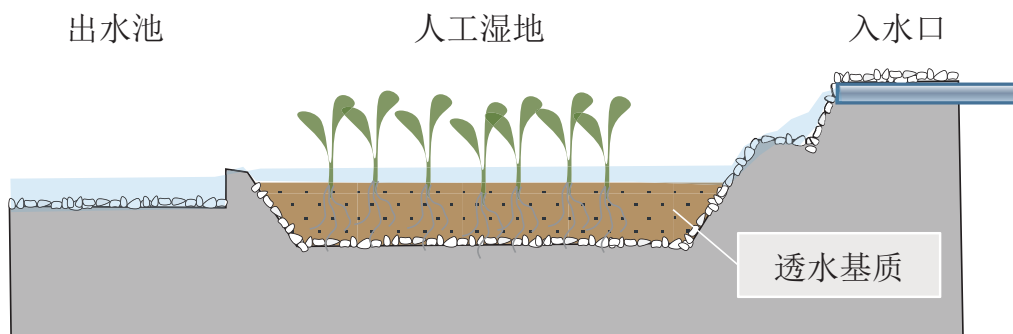


图 2 人工湿地示意图

Fig. 2 Diagram of constructed wetland

围较为有限。

c. 稳定塘。又称生物塘和氧化塘，是指基于水体的天然自净能力，在洼地或适宜河段人工修建处理塘，使待处理污水于其中缓慢流动、稀释与扩散，利用稳定塘中细菌、藻类等微生物的代谢作用降解污染物，净化水体<sup>[51]</sup>。例如，江栋等<sup>[52]</sup>研究了氧化塘对河道黑臭水体的处理效果，结果发现，在一定进水量与增氧曝气条件下，COD<sub>Cr</sub>去除率在50.0%以上，NH<sub>3</sub>-N去除率在40.0%以上，并指出氧化塘对于恢复河道多级食物链组成的复杂生态系统效果显著。该方法具有结构简单、无需污泥二次处理、成本低、管理简便等优点，但同时具有占地面积大、维护操作较复杂、处理效果不稳定等缺点。另外，为避免污染地下水，稳定塘常需设置围堤和

防渗层。

d. 水生植被恢复。是指在发生逆向演替的水生生态系统中，选取适应性强、生长状况好且具备水质净化能力的现存植被，通过设计、布置合理的群落结构组成，截流陆源污染物，加快河流生态系统的生态恢复，保护物种多样性，实现良性循环<sup>[53]</sup>。例如，陈开宁等<sup>[54]</sup>开展了太湖五里湖生态重建示范工程试验，探讨水生植被恢复对水体处理效果的影响，结果表明，示范工程区内水体的TN、TP、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N及PO<sub>4</sub>-P的平均值分别比示范工程区外下降了20.7%、23.8%、35.2%、21.1%、45.6%和54.0%。水生植物处理技术特征及应用实例见表3。

2) 水生动物处理。水生动物处理又称生物操

表 3 水生植物处理技术与应用实例

Table 3 Aquatic plant treatment technology and application examples

修复技术	特征	应用实例
人工湿地	适用于滩地较宽或周围存有湿地布设空间河道	1. 抚仙湖入湖河道窖泥沟表层流人工湿地生态除氮试验 <sup>[47]</sup> 2. 潜流人工湿地对农村生活污水治理特性试验 <sup>[48]</sup>
生态浮岛	适用于富营养化、有机污染的河流	1. 杭州市南应加河黑臭水体治理实践 <sup>[49]</sup> 2. 临江河富营养化污染治理试验 <sup>[50]</sup>
稳定塘	适用于富营养化河流	1. 某城市黑臭河道上游污水的氧化塘预处理试验 <sup>[52]</sup>
水生植被恢复	适用于水生植物退化河流	1. 人工湖泊月亮湾沉水植被恢复研究 <sup>[53]</sup> 2. 五里湖南岸水生植被恢复工程试验区建设 <sup>[54]</sup>

纵法，是指基于生态系统的食物链原理，通过投放鱼类、虾类、螺蛳和河蚌等大型底栖动物，营造“水生植物—微生物—藻类—水生动物”食物链，达到控制水体藻类量，实现生态系统完整性的目标<sup>[21]</sup>。以往学者对此开展了大量研究。例如，谢平<sup>[55]</sup>认为可通过调整肉食性鱼类和滤食性鱼类（以浮游生物为食的鲢鱼、鳙鱼等）种群数量控制蓝藻水华，提出了非经典生物操纵模式；余文公<sup>[56]</sup>通过在四明湖水库中放养鲢、鳙，控制水华，缓解水库水体富营养化。

2.2.2 生物膜 是指通过在天然河道中人工补充填料或载体，促进水体细菌增殖，利用其产生的生物膜的净化、过滤作用，摄取水体中的有机污染物并吸收、同化，大幅提升水体自净能力，改善河流水质<sup>[57]</sup>。例如，周勇等<sup>[58]</sup>运用生物填料开展城市重污染河道治理研究，结果发现，生物膜对河流水质的改善效果显著，TN、TP、COD、Chla、浊度的去除率达5.0%~53.0%；张楠等<sup>[59]</sup>通过实验研究了A/O生物膜法的污水处理效果，结果发现该方法对石化综合污水的氮、磷去除效果显著，水力

停留时间为 30 h 条件下, COD 和氨氮的去除率为 74.0%~77.0% 和 93.0% 以上, 总氮和总磷的去除率为 58.0% 和 79.0%。该方法具有成本低、效率高、占地面积小等优点, 在有机物污染突出城市中小河流应用效果相对较好。

**2.2.3 微生物修复** 微生物修复技术是指利用天然或特殊微生物(光合细菌、硝化细菌等)对污染物的降解作用, 对污染水体进行处理的技术。根据工程实施的方法又分为原位修复技术和异位修复技术。该方法具有耗时短、经济高效、不产生二次污染等优点。通常而言, 原位微生物修复技术更为经济合理, 操作模式分为两种: 一种是直接补充硝化细菌等高降解微生物; 第二种是补充可有效促进微生物生长、解毒及污染物降解的有机酸、营养物质、缓冲剂的组分, 间接提高处理能力<sup>[60]</sup>。例如, 刘双江等<sup>[61]</sup>通过海藻酸钠固定光合细菌, 研究了其对不同浓度豆制品生产废水的处理效果, 结果表明, 当污水 COD 浓度在 7 560~12 600 mg/L 时, 去除率约为 62.3%~78.2%, 当污水 COD 浓度在 1 260~5 040 mg/L 时, 去除率约为 41.0%~60.3%, 效果突出; 马文林等<sup>[62]</sup>将微生物生态修复剂应用于富营养化湖泊的治理中, 监测结果显示, 微生物修复剂修复富营养水体水质能力突出, COD、TP、Chla 去除率分别达到 50.6%、65.5% 和 73.0%。

**2.2.4 土地处理技术** 是指利用土地中微生物和植物系统的自我调控功能及对污染物的吸收、过滤和净化作用, 对被污染水体进行改善净化, 同时, 污水中氮磷等营养物质可促进农作物生长和发育, 实现被污染水体的无害化和资源化, 具有工艺灵活、效果稳定、工程投资小等优点。依据处理对象和目标不同, 可具体分为慢速渗滤、快速渗滤、地表漫流、湿地处理和地下渗滤几种工艺类型。目前虽因系统易堵塞等缺点尚未能大规模应用, 但该技术在水农业污水灌溉领域具有较为广阔的应用前景。

### 3 近自然治理理念

“近自然治理理念”虽尚无严格的科学定义, 但却贯穿于河流生态修复理念与技术研究的始终, 是一系列河流生态修复理论与技术的核心原则。具体而言, 19 世纪 30 年代, 德国学者 Seifert 提出“近自然河溪治理”概念, 认为河溪治理应综合考虑近自然、实用、经济、美观等多重原则, “近自然治理理念”进入人们的视野; 瑞士等提出“多自然型河道生态修复技术”, 指出应将混凝土硬化护岸改造为“树+石”生态护岸, 恢复河流深槽浅滩相间、

蜿蜒曲折的天然形态, “近自然治理理念”被应用于河流早期的结构性修复实践中。此后, 景观生态学理论被引入河流生态治理中, “近自然治理理念”内涵不断丰富。例如, Friberg 等<sup>[12]</sup>、Galat 和 Zweimüller<sup>[13]</sup>提出生境与生物多样性应作为河流生态修复的重要考量指标, 生态系统恢复成为“近自然治理理念”的高级目标, 河流生态修复从单一的结构修复向统筹考虑生态系统结构、功能和动力学过程的综合性修复发展, “近自然治理理念”获得了充分阐述。

不仅如此, 在“近自然治理理念”的发展与指导下, 学者们从河流生态系统生态特征、形态特征和水文特征等角度入手展开研究, 提出了一系列河流生态修复的工程类和生态类技术, 前者包括底泥疏浚、河流横向连通性和纵向连续性修复、断面形态多样性修复、河床与河岸的生态化修复等; 后者则包括水生植物处理(如人工湿地、生态浮岛、稳定塘、水生植被恢复等)、水生动物处理、微生物修复技术等。这些技术被广泛应用于我国的河流生态修复实践中, 取得了良好的效果。此外, 以“近自然治理理念”为核心, 融合我国生态文明思想, 以保护、可持续管理和恢复生态系统、提供人类福祉、保护生物多样性为目标, 结合各类生态修复技术, 基于自然的解决方法(Nature-based Solution, NbS)应运而生, 在滨海鸟类栖息地保护、退化海岸带修复、矿山生态修复等领域成效显著<sup>[63-64]</sup>。

以丽江市青龙河(束河古镇段)受损河流的生态修复为例, 对“近自然治理理念”指导下的小流域综合治理方案简单进行阐述。青龙河连通束河古镇与丽江古城, 是丽江坝中西部田园生态水网的重要组成部分。近年来, 随着城市建设进程加快, 河道空间被挤占, 河道渠化、河岸硬化现象普遍, 河道中不合理的挡水建筑物阻断了鱼类洄游通道, 导致生物多样性减少。为此, 青龙河(束河古镇段)河流生态修复设计重点从断面、驳岸改造和污水处理出发, 通过亲水平台和漂石布置、水利设施升级改造恢复河道自然形态, 重建多样化的河道深槽-浅滩序列, 营造有利于水生生物的局部生境, 同时通过改造不合理叠水堰, 恢复水生生物活动通道连通性。

总的来说, “近自然治理理念”体现了人与自然的和谐交融, 是指在顺应生态系统自然规律的基础上, 尽量规避自然灾害影响, 兼顾生态系统功能, 通过地貌特征改善、水文条件改善、生物多样性改善的各类措施, 使系统各组成要素接近不受人生活

动干扰的自然状况,维护生态系统平衡和稳定,以发挥其资源、生态、美学、社会等多方面自然功能。

#### 4 结语

经过几十年的不懈探索,河流生态修复已从单一的结构性修复向统筹考虑生态系统结构、功能和动力学过程的综合性修复发展,相应的生态修复技术也获得了显著进步。考虑到河流健康问题的复杂性和多样性,为进一步顺应新时代人民对美好生活和环境的需求,需更加注重科学与艺术创新。为此,在“近自然治理理念”指导下,未来的河流生态修复应遵循如下原则:

1) 综合治理和多种措施并举。开展受损河流修复治理,将更加注重河流的综合治理与多种修复措施并举,多学科交叉融合创新,兼顾水力学、土力学、河流动力学、生态学、规划学、经济学、美学等多个方面。

2) 工程措施与非工程措施结合。受损河流的生态修复,不止在于工程措施的实施,应将工程措施与非工程措施相结合,用好工程管理与社会管理的两大抓手,使生态修复与资源、环境的社会管理紧密结合,建立交通、农业、水利、旅游等多部门合作机制。

3) 河流生态修复多目标统筹。宜将精致化、多样化、生态化、景观化、人文化等多维度目标纳入河流生态修复工程建设,促进受损河流水量恢复、水质净化、生态修复、河流景观美化、水生生物多样多目标协调统一。

4) 兼顾美学的工程技术设计。在开展河流生态修复工程设计上,应注重工程技术与自然艺术结合,在满足力学规律的基础上,尊重近自然化修复理念,将景观美学纳入生态工程设计,经由生态工程的合理规划,实现力学与美学的有机相融,营造人水和谐的生态空间。

此外,还应加强河流生态修复的基础科学研究,进一步推进河流生态修复理念与技术发展,注重河流生态修复后的管理与维护工作,完善相关管理规程,确保生态修复措施预期作用发挥,为受损河流的治理和保护提供强有力的科学支撑。

#### 参考文献:

- [1] 刘欢,杨少荣,王小明. 基于河流生态系统健康的生态修复技术研究进展[J]. 水生态学杂志, 2019, 40(2): 1-6.  
Liu H, Yang S R, Wang X M. Research progress on ecological restoration technology based on river ecosystem health[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(2): 1-6.
- [2] 邓正苗,谢永宏,陈心胜,等. 洞庭湖流域湿地生态修复技术与模式[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 994-1008.
- [3] 刘晓婉,许继军. 河流修复中几个概念的辨析[C]//水生态安全——水务高峰论坛 2015 年度优秀论文集, 2015, 132-137.  
Liu X W, Xu J J. Differentiation of several concepts in river restoration[C]//The Urban Landscape River & Lakes Small Watershed Management and Ecological Restoration Forum, 2015, 132-137.
- [4] 雷书珊. 基于生态修复技术的河流治理研究[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(11): 125-127.  
Lei S S. Research on river management based on ecological restoration technology[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2020, 48(11): 125-127.
- [5] 董哲仁. 河流生态恢复的目标[J]. 中国水利, 2004(10): 6-9, 5.  
Dong Z R. The goal of river ecological restoration[J]. China Water Resources, 2004(10): 6-9, 5.
- [6] Mitsch W J. Ecological engineering-The 7-year itch[J]. Ecological engineering, 1998, 10(2):119-130.
- [7] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical stabilization of highway cut slope[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(9): 1395-1409.
- [8] Neumann D. Ecological rehabilitation of a degraded large river system - considerations based on case studies of macrozoobenthos and fish in the lower Rhine and its catchment area[J]. International Review of Hydrobiology, 2002, 87(2/3): 139-150.
- [9] 邓红兵,王青春,王庆礼,等. 河岸植被缓冲带与河岸带管理[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 951-954.  
Deng H B, Wang Q C, Wang Q L, et al. On riparian forest buffers and riparian management[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(6): 951-954.
- [10] Nakamura K. River restoration efforts in Japan: Overview and perspective[R]. Public Works Research Institute, Japan, 2008.
- [11] Becker J F, Endreny T A, Robinson J D. Natural channel design impacts on reach-scale transient storage[J]. Ecological Engineering, 2013, 57(4): 380-392.
- [12] Friberg N, Baattrup-Pedersen A, Kristensen E A, et al. The River Gelså restoration revisited: Habitat specific assemblages and persistence of the macroinvertebrate community over an 11-year period[J]. Ecological Engineering, 2014, 66: 150-157.
- [13] Galat D L, Zweimüller I. Conserving large-river fishes: Is the highway analogy an appropriate paradigm? [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2001, 20(2): 266-279.
- [14] 陈兴茹. 国内外河流生态修复相关研究进展[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(5): 122-128.  
Chen X R. Progress of river restoration research at home and abroad[J]. Journal of Hydroecology, 2011, 32(5): 122-128.
- [15] 董哲仁. 生态水工学的理论框架[J]. 水利学报, 2003, 34(1): 1-6.  
Dong Z R. Theoretical framework for eco-hydraulics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(1): 1-6.
- [16] 高甲荣,肖斌,牛健植. 河溪近自然治理的基本模式与应用界限[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 84-87, 91.

- Gao J R, Xiao B, Niu J Z. Model and application of near natural stream control[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(6): 84-87, 91.
- [17] 达良俊, 颜京松. 城市近自然型水系恢复与人工水景建设探讨[J]. *现代城市研究*, 2005, 20(1): 8-15.
- Da L J, Yan J S. The method and application of approx-natural restoration in urban aquatic ecosystem and waterscape constructions[J]. *Urban Research*, 2005, 20(1): 8-15.
- [18] 陈庆伟, 刘兰芬, 孟凡光, 等. 筑坝的河流生态效应及生态调度措施[J]. *水利发展研究*, 2007, 7(6): 15-17, 36.
- Chen Q W, Liu L F, Meng F G, et al. Ecological effects of damming rivers and ecological regulation measures[J]. *Water Resources Development Research*, 2007, 7(6): 15-17, 36.
- [19] 胡和平, 刘登峰, 田富强, 等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. *水科学进展*, 2008, 19(3): 325-332.
- Hu H P, Liu D F, Tian F Q, et al. A method of ecological reservoir reoperation based-on ecological flow regime[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(3): 325-332.
- [20] 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.
- Dong Z R. Discussion on principles of river ecological restoration planning[J]. *China Water Resources*, 2006(13): 11-13, 21.
- [21] 于鲁冀, 李瑶瑶, 吕晓燕, 等. 河流生态修复技术研究进展[C]//湖泊保护与生态文明建设——第四届中国湖泊论坛论文集. 合肥, 2014: 279-288.
- Yu L J, Li Y Y, Lü X Y, et al. Research progress on river ecological restoration technology[C]//Lake Protection and Ecological Civilization Construction-Proceedings of the 4th China Lake Forum, Hefei, 2014, 279-288.
- [22] 崔瑛, 张强, 陈晓宏, 等. 生态需水理论与方法研究进展[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(4): 465-480.
- Cui Y, Zhang Q, Chen X H, et al. Advances in the theories and calculation methods of ecological water requirement[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(4): 465-480.
- [23] 林俊强, 陈凯麒, 曹晓红, 等. 河流生态修复的顶层设计思考[J]. *水利学报*, 2018, 49(4): 483-491.
- Lin J Q, Chen K Q, Cao X H, et al. A thought on top-level design of river ecological restoration[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(4): 483-491.
- [24] 邢雅囡, 阮晓红, 赵振华. 城市河道底泥疏浚深度对氮磷释放的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(4): 378-382.
- Xing Y N, Ruan X H, Zhao Z H. Effects of depth of sediment dredging in urban rivers on release of nitrogen and phosphorus[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2006, 34(4): 378-382.
- [25] 林莉, 李青云, 吴敏. 河湖疏浚底泥无害化处理和资源化利用研究进展[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(10): 80-88.
- Lin L, Li Q Y, Wu M. Advance in research on harmless treatment and resource utilization of dredged sediment of rivers and lakes[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(10): 80-88.
- [26] 韦昌旭. 调流措施对华南受损河流的生态修复作用研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2012.
- Wei C X. Study on adjusting flow measures to the effects of ecological restoration of damaged rivers of South China[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012.
- [27] 徐智廷, 孙廷玺, 张世功, 等. 沂河梯级橡胶坝汛期调度运用原则探讨[J]. *中国水利*, 2008(19): 61-62.
- Xu Z T, Sun T X, Zhang S G, et al. Regulation of cascade rubble dams in Yihe River Basin[J]. *China Water Resources*, 2008(19): 61-62.
- [28] Gates K K, Kerans B L. Habitat use of an endemic mollusc assemblage in a hydrologically altered reach of the snake river, Idaho, USA[J]. *River Research and Applications*, 2014, 30(8): 976-986.
- [29] 许继军, 陈进, 陈广才. 长江上游大型水电站群联合调度发展战略研究[J]. *中国水利*, 2011(4): 24-28.
- Xu J J, Chen J, Chen G C. Development strategy study on combined management of large hydropower stations on the upper Yangtze River[J]. *China Water Resources*, 2011(4): 24-28.
- [30] 许继军, 陈进, 尹正杰, 等. 长江流域梯级水库群联合调度关键问题研究[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(12): 48-52.
- Xu J J, Chen J, Yin Z J, et al. Key issues in the joint operation of large cascade reservoirs in Yangtze River Basin[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, 28(12): 48-52.
- [31] 彭溢, 廖国威, 谢林伸, 等. 深圳市利用小(2)型水库进行河流生态补水研究[J]. *环境工程*, 2016, 34(2): 51-53, 101.
- Peng Y, Liao G W, Xie L S, et al. Study on the application of small reservoir type II for ecological water supplement of rivers in Shenzhen[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(2): 51-53, 101.
- [32] 邢梦雅, 陈星, 周锴, 等. 基于生态补水的水环境改善效果评价体系[J]. *水资源保护*, 2016, 32(1): 64-66, 85.
- Xing M Y, Chen X, Zhou E, et al. Study on evaluation system of improvement of water environment based on ecological water supplement[J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(1): 64-66, 85.
- [33] 孙东亚, 董哲仁, 许明华, 等. 河流生态修复技术和实践[J]. *水利水电技术*, 2006, 37(12): 4-7.
- Sun D Y, Dong Z R, Xu M H, et al. River ecological restoration: Techniques and practices[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2006, 37(12): 4-7.
- [34] 张先起, 李亚敏, 李恩宽, 等. 基于生态的城镇河道整治与环境修复方案研究[J]. *人民黄河*, 2013, 35(2): 36-38, 77.
- Zhang X Q, Li Y M, Li E K, et al. Research on urban river training and environment rehabilitation program based on ecology[J]. *Yellow River*, 2013, 35(2): 36-38, 77.
- [35] 王庆国, 李嘉, 李克锋, 等. 减水河段水力生态修复措施的改善效果分析[J]. *水利学报*, 2009, 40(6): 756-761.
- Wang Q G, Li J, Li K F, et al. Effectiveness of hydraulic ecological rehabilitation measures in flow reduced river reaches[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(6): 756-761.
- [36] 廖平安. 北京市中小河流治理技术探讨[J]. *中国水土保持*, 2014(1): 11-13.
- Liao P A. Discussion on harnessing technology of small and medium-sized rivers in Beijing[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2014(1): 11-13.
- [37] 赵银军, 丁爱中. 河流地貌多样性内涵、分类及其主要修复内容[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(3): 167-170.

- Zhao Y J, Ding A Z. Connotation, classification and restoration contents of river morphology diversity[J]. *Water Resources and Power*, 2014, 32(3): 167-170.
- [38] 刘永录, 徐晓锋, 高之栋. 河道生态修复及堤防护岸技术模式探讨[J]. *亚热带水土保持*, 2012, 24(2): 53-56.
- Liu Y L, Xu X F, Gao Z D. Discussion on ecological restoration of river course and technical mode of dike revetment[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2012, 24(2): 53-56.
- [39] 高山, 边艳. 槽式结构复式断面生态护堤设计及应用[J]. *水土保持应用技术*, 2016(5): 31-33.
- Gao S, Bian Y. Design and application of ecological dike with trough structure and compound section[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2016(5): 31-33.
- [40] 马爽爽. 基于河流健康的水系格局与连通性研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- Ma S S. Study on River Network Pattern and Connectivity of Hangzhou-Jiaxing-Huzhou Plain Region Based on River Health[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [41] 陈凯麒, 常仲农, 曹晓红, 等. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. *水利学报*, 2012, 43(2): 182-188, 197.
- Chen K Q, Chang Z N, Cao X H, et al. Status and prospect of fish pass construction in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(2): 182-188, 197.
- [42] 李元. 河床调流措施对河流生态修复作用研究——以长春市水源地入库生态河道为例[D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- Li Y. The Effect of River Flow Regulating Measures on Repairing River Ecosystem—Taking the Ecological River Flowing into Changchun's Water Source Reservoir as an Example[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2013.
- [43] 侯俊, 王超, 王沛芳, 等. 卵砾石生态河床对河流水质净化和生态修复的效果[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(6): 46-49.
- Hou J, Wang C, Wang P F, et al. Effects of ecological gravel bed on water quality purification and ecological restoration in streams[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(6): 46-49.
- [44] 陈婉. 城市河道生态修复初探[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- Chen W. The research on the urban river ecological restoration[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [45] 赵杭美, 由文辉, 罗扬, 等. 滨岸缓冲带在河道生态修复中的应用研究[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(4): 116-122.
- Zhao H M, You W H, Luo Y, et al. Building riparian buffer for ecological restoration of river banks[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(4): 116-122.
- [46] 蒋凯, 邓潇, 周航, 等. 植物塘人工湿地系统对灌溉水 Cd 的生态拦截效果[J]. *农业现代化研究*, 2019, 40(3): 518-526.
- Jiang K, Deng X, Zhou H, et al. Ecological interception effect of plant pond constructed wetland system on irrigation water Cd[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2019, 40(3): 518-526.
- [47] 陈源高, 李文朝, 李荫玺, 等. 云南抚仙湖窑泥沟复合湿地的除氮效果[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(4): 331-336.
- Chen Y G, Li W C, Li Y X, et al. Nitrogen removal efficiency of Yaonigou integrated constructed wetland on the bank of Lake Fuxian, Yunnan Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4): 331-336.
- [48] 裴亮, 刘慧明, 颜明, 等. 潜流人工湿地对农村生活污水处理特性试验研究[J]. *水处理技术*, 2012, 38(3): 84-86, 90.
- Pei L, Liu H M, Yan M, et al. Study on subsurface flow constructed wetland for treatment efficiencies of rural domestic sewage[J]. *Technology of Water Treatment*, 2012, 38(3): 84-86, 90.
- [49] 陈荷生, 宋祥甫, 邹国燕. 利用生态浮床技术治理污染水体[J]. *中国水利*, 2005(5): 50-53.
- Chen H S, Song X F, Zou G Y. Treatment in water bodies pollution by ecological floating bed technology[J]. *China Water Resources*, 2005(5): 50-53.
- [50] 罗固源, 韩金奎, 肖华, 等. 美人蕉和风车草人工浮床治理临江河[J]. *水处理技术*, 2008, 34(8): 46-48, 54.
- Luo G Y, Han J K, Xiao H, et al. Study on Lin Jiang River control by canna indica and cyperus alternifolius artificial floating rafts[J]. *Technology of Water Treatment*, 2008, 34(8): 46-48, 54.
- [51] Li H B, Du L N, Zou Y, et al. Eco-remediation of branch river in plain river-net at estuary area[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 1085-1091.
- [52] 江栋, 李开明, 刘军, 等. 黑臭河道生物修复中氧化塘应用研究[J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 822-826.
- Jiang D, Li K M, Liu J, et al. The application of lagoon in the bioremediation of black-odor river[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(6): 822-826.
- [53] 陈灿, 王国祥, 朱增银, 等. 城市人工湖泊水生植被生态恢复技术[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(5): 523-527.
- Chen C, Wang G X, Zhu Z Y, et al. Study on eco-remediation in urban-ponds: Restoring submerged macrophytes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(5): 523-527.
- [54] 陈开宁, 包先明, 史龙新, 等. 太湖五里湖生态重建示范工程——大型围隔试验[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(2): 139-149.
- Chen K N, Bao X M, Shi L X, et al. Ecological restoration engineering in Lake Wuli, Lake Taihu: A large enclosure experiment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(2): 139-149.
- [55] 谢平. 鲢、鳙与藻类水华控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- Xie P. Silver carp and bighead, and their use in the control of algal blooms[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [56] 余文公. 生物操纵防止四明湖水华研究[C]//健康湖泊与美丽中国——第三届中国湖泊论坛暨第七届湖北科技论坛论文集. 武汉, 2013: 933-938.
- Yu W G. Four Minghu reservoir biology operation prevents the water bloom discussion[C]//Healthy Lakes and Beautiful China—Proceedings of the 3rd China Lake Forum and the 7th Hubei Science and Technology Forum, Wuhan, 2013, 933-938.
- [57] 李晋. 河流生态修复技术研究概述[J]. *地下水*, 2011, 33(6): 60-62.
- Li J. Overview of technology study on river ecosystem restoration[J]. *Ground Water*, 2011, 33(6): 60-62.
- [58] 周勇, 操家顺, 杨婷婷. 生物填料在重污染河道治理中的应用研究[J]. *环境污染与防治*, 2007, 29(4): 289-292.
- Zhou Y, Cao J S, Yang T T. Porous stuffing material for biofilm treatment of highly polluted urban river way[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2007, 29(4): 289-292.
- [59] 张楠, 初里冰, 丁鹏元, 等. A/O 生物膜法强化处理石化废水及生物膜种群结构研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(1): 80-86.

- Zhang N, Chu L B, Ding P Y, et al. Enhanced treatment of petrochemical wastewater by using A/O biofilm reactor and analysis of biofilm community[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(1): 80-86.
- [60] 黎明, 蔡晔, 刘德启, 等. 国内城市河道水体生态修复技术研究进展 [J]. *环境与健康杂志*, 2009, 26(9): 837-839.
- Li M, Cai Y, Liu D Q, et al. Study advance of ecological restoration technique for urban stream in China[J]. *Journal of Environment and Health*, 2009, 26(9): 837-839.
- [61] 刘双江, 杨惠芳, 周培瑾, 等. 固定化光合细菌处理豆制品废水产氢研究 [J]. *环境科学*, 1995, 16(1): 42-44, 93-94.
- Liu S J, Yang H F, Zhou P J, et al. Hydrogen production from soybean wastewater by immobilized photosynthetic bacteria[J]. *Environmental Science*, 1995, 16(1): 42-44, 93-94.
- [62] 马文林, 吕爱芑, 刘建伟, 等. 微生物生态修复剂修复富营养化人工湖水质研究 [J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(S1): 213-216.
- Ma W L, Lü A P, Liu J W, et al. Research on the remediation technology of eutrophication artificial lake with microbial remediation agent[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(S1): 213-216.
- [63] 朱正杰, 张轩波, 忻飞, 等. 基于NbS的滨海湿地修复: 以盐城湿地生态补偿区为例 [J]. *湿地科学与管理*, 2022, 18(3): 47-50.
- Zhu Z J, Zhang X B, Xin F, et al. Rehabilitation of coastal wetlands with Nature-based Solutions(NbS): A case study of ecological compensation area in Yancheng wetlands[J]. *Wetland Science & Management*, 2022, 18(3): 47-50.
- [64] 冯哲, 邵铁政, 李元青, 等. 基于自然的解决方案(NBS)在海口西海岸修复工程中的应用创新 [J]. *水运工程*, 2022(S1): 13-20, 30.
- Feng Z, Shao T Z, Li Y Q, et al. Innovative application of nature-based solution(NBS) in restoration project on the west coast of Haikou[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(S1): 13-20, 30.

(责任编辑: 王育花)