

基于河流生态系统健康的生态修复技术研究进展

刘欢, 杨少荣, 王小明

(中国三峡建设管理有限公司, 四川 成都 610041)

摘要:随着人类对河流大规模开发利用, 河流生态系统遭受严重破坏。近年来, 生态修复引起了社会广泛关注, 也取得了显著的进步。本文从河流生态系统特性和所受胁迫出发, 介绍了河流健康概念和评价方法, 回顾了国内外河流生态修复相关研究发展历程, 归纳了河流生态修复的理念, 并以河流健康因素为基础, 总结了水量、连通性、水质、水生生物4个方面的生态修复技术及其实践案例, 最后根据当前研究的不足, 提出了河流生态修复的3个研究方向, 以为未来的修复实践提供参考和指导。

关键词:河流; 生态系统; 生态修复; 修复技术

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2019)02-0001-06

河流是地球上水文循环的重要途径, 河流系统是自然界最重要的生态系统之一, 人类社会的生存和发展与河流息息相关(钱正英等, 2006)。随着我国城市化和工业化进程的不断加速、水利工程的逐步实施、用水量和排放量的持续增加, 导致河流水质恶化, 河流生态系统退化加剧。近年来, 西方国家对过去的治水思路进行反思, 要求尊重河湖系统的自然规律, 提出了生态治水的新理念(关春曼等, 2014a)。河流生态系统修复逐渐引起社会各界的普遍关注, 尤其是党的十八大以来, 国家把生态文明建设放在了突出重要位置, 明确提出“建设生态文明, 是关系人民福祉、关乎民族未来的长远大计”。同时, 流域综合治理与生态修复已成为“十三五”生态环境保护规划新思路。因此, 开展河流生态修复治理已成必然趋势。本文梳理和归纳总结国内外学者进行的大量河流生态修复的研究与实践, 以为未来的河流生态修复实践提供参考和指导。

1 河流生态系统概述

1.1 河流生态系统过程

河流生态系统是一个复杂、开放、动态、非平衡和非线性的系统, 其演变过程涉及水文情势、地貌、流态、生物活动等。河流生态系统的影响因素主要有水质、河流水力特性、河流地貌、水文和流域气候等, 因素之间相互影响。水文条件和流域气候对河

流生态系统的结构、功能造成的影响主要表现在宏观流域大尺度上, 而河流地貌、河流的水力特性以及水质的影响则主要在河段和河道等较小的尺度上(董哲仁, 2009)。

1.2 河流生态系统的功能

河流自身的形成、发育、衰退和消亡是一个十分漫长过程。自然环境不同的地区, 河流具有不同特性。河流的活动反过来也不断地影响与其相关的自然环境。由于河流的发育和发展程度不同, 不同的河流在不同阶段的主要功能存在较大差异(倪晋仁和刘元元, 2006)。一般情况下, 河流的主要功能包括输水、输沙、供水、自净、航运、发电和生态功能。

1.3 人类活动对河流生态系统的胁迫

人类活动往往会破坏河流生态系统的完整性, 造成河流水文、水质等生态环境的变化, 导致河流生物多样性减少, 生态结构破坏, 降低其生态服务功能, 甚至造成不可逆的生态退化(毛战坡等, 2006)。主要的胁迫来源包括传统水利工程(如大坝、河道硬化等)建设、污染物的排放、引水量过大、沿河的农渔业生产等(杨俊鹏等, 2012)。

2 河流健康及评价

2.1 河流健康

关于河流健康的概念, Meyer认为健康的河流不仅要维持生态系统的结构与功能, 还要包括生态系统的社会价值, 在健康的概念中涵盖了生态完整性与对人类的服务价值(赵彦伟和杨志峰, 2005)。健康的河流能够用于社会工农业用水供应、鱼类生产等, 还能提供优美的环境, 带来精神享受。

收稿日期: 2017-03-18

作者简介: 刘欢, 1991年生, 男, 硕士研究生, 主要从事河流生态保护与修复方面研究。E-mail: jyj007@163.com

从流域层面考虑,河流的生态系统包括纵向、横向、垂向和时间4个维度的变化,因此,系统考虑这4个维度是河流健康管理及保护的重要内容。在纵向上,河流从源头到河口,随着地形地貌的改变以及各级支流的不断汇入变得更宽、更深;河流将上游的泥沙及营养物质带到下游,形成不同的栖息地,河流生态系统及其中的生物组成也随之变化。在横向纬度上,淡水生态系统中的生物群落既包括水生生物群落,也包括与河流连接的周边河漫滩及湿地的生物群落,而河流与这些生物群落之间交流对于生物群落的健康与繁荣具有重要作用。在垂向纬度上,河流与地下水、化学物质以及微生物间相互交流与补给;还分布着十分重要的底栖区域,生活着部分无脊椎动物和鱼类。在时间纬度上,河流水文情势随四季变换而变化,水生生物群落及其他生物群落以水文情势为信号,来开启他们生活史的不同阶段。

根据大自然保护协会(TNC, The Nature Conservancy)编制的《淡水生物多样性保护工作实践指南》,淡水生态系统是一个包含水文情势、连通性、水质、生物群落及栖息地5大关键属性的复杂系统(妮可·思科和克里斯汀·斯如娜,2010)。5个因素相互影响,通过仔细分析其受损情况综合评价河流的健康状况。

2.2 河流健康评价方法

2.2.1 生物监测方法 生物监测,即通过监测一些生物或其类群的数量、生物量、生产力及生理生态状况的动态变化来描述河流生态系统的健康状况(王文君和黄道明,2012)。最常用的生物监测方法是生物指数法和物种多样性指数法。生物指数法多以鱼类、着生藻类及无脊椎动物为监测与研究对象。盛萧等(2016)在对东江流域主要干支流的河流健康评价中就使用了鱼类生物完整性指数(IBM);余德琴等(2016)利用浮游甲壳动物的密度和生物量来评价生态修复前后无锡亲水河的健康状况。常用的物种多样性指数包括马格列夫(Margalef)多样性指数、PFU微型生物群落等,徐梦珍等(2012)利用底栖动物多样性指数评价了雅鲁藏布江河流生态系统健康状况。

2.2.2 综合指标方法 综合指标法是对物理、化学、生物甚至社会经济指标进行综合,能够反映不同尺度的信息,是生态系统健康评价的重要手段。综合指标法包括2种,一种是收集多方面数据进行综合评判,另一种是强调生态作用过程(赵彦伟和杨志峰2005)。比较有代表性的是溪流状况指数(Index

of stream condition, ISC)。ISC综合反映了河流水文学、物理构造特征、河岸区状况、水质及水生生物等5个要素共计19项指标,采用打分的方法对河流进行对比性评价。张晶等(2010)从影响河流生态系统的生物、生境要素和人类活动要素出发,构建了包括水文特性、水质特性、河流地貌特性、生物特性和社会经济特性5方面含36项指标的全国河流健康评价全指标体系。李卫明等(2016)在对水电梯级开发的雅砻江进行健康评价时,通过构建评价指标体系,采用综合评价法得出雅砻江下游河段的综合健康指数为0.71。董增川等(2016)基于可拓学并从水文水资源、物理结构、水质、水生生物及社会服务等5个方面建立了生态健康诊断模型对漳卫新河进行诊断,结果显示2010年漳卫新河处于疾病状态,提出从生态流量调度、水污染联合治理、水生物修复等方面来开展河流生态治理。

3 国内外河流生态修复研究进展

3.1 国外河流生态修复研究进展

1938年德国学者 Seifert(1983)提出了“近自然河溪治理”的理念,是指在完成传统河道治理任务的基础上达到贴近自然、经济实用并保持美观的河道治理方案。1962年美国生态学家 H T Odum 等首次提出生态工程的概念,并将生态工程定义为“人类运用少量辅助能而对那种以自然能为主的系统进行的环境控制”(Mitsch, 1998)。1965年德国的 Emst Bittmann 在莱茵河用芦苇和柳树进行生态护岸实验,可以看作是最早的河流生态修复实践(Gray & Sotir, 1992)。随着城市河道生态工程技术的实践,其理论也得到了进一步的发展。2003年,美国土木工程师协会(ASCE, 2003)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。Becker 等(2012)认为河道修复设计应利用河流转向结构建立蜿蜒弯曲形态,加强生态系统的生态环境。河流生态修复要注重物种的多样性,效仿自然,保持营养和水循环,维持植物生境和动物栖息地的质量。

3.2 国内河流生态修复研究进展

20世纪90年代,我国开始了河流生态修复方面的研究。刘树坤1999年提出了“大水利”的理论框架,认为河流的开发应重视流域的综合整治与管理,发挥水的资源功能、环境功能和生态功能(陈兴

茹, 2011)。进入 21 世纪后, 河流生态修复和保护已经引起社会各界的重视, 成为学术讨论的热点问题。董哲仁(2003)提出了“生态水工学”的概念, 从生态系统需求角度, 分析了以水工学为基础的治水工程的弊病, 探讨了修复河流生态环境的工程措施及思路, 并提出了一系列理论和方法。近年来, 国内学者在河流生态修复方面进行了大量研究。吴建寨等(2011)提出河流修复生态功能分区是对河流进行适应性生态修复的必要前提和基础, 可为制定生态修复目标提供科学依据。徐菲等(2014)指出未来应制定包含河流历史及现状调查、修复目标制定、修复措施计划和实施、修复评价和监测 4 部分完整修复过程的技术规范。

4 河流生态修复技术

河流生态修复是一项复杂的系统工程, 目前国内相关的修复技术多种多样, 分类方法也有多种。本文根据河流健康关键因素, 将修复内容分为水量、河流形态结构、水质和水生生物 4 大类。

4.1 水量生态修复技术

水量生态修复技术是减脱水区域必不可少的修复技术, 主要包括生态补水技术、生态调度 2 种。

生态补水技术主要指通过水利设施(闸门、泵站等)的调控, 引入上游水库的水, 或者污水处理厂的深度处理水、雨水等, 补充河道水量。该方法既能有效增加水环境容量, 又能改善河流生境, 提高河流的自净能力(于鲁冀等, 2014)。彭溢等(2016)对深圳市利用小(二)型水库进行河流生态补水研究, 结果表明生态补水可在一定程度上改善下游河流旱季水质状况。邢梦雅等(2016)以常熟市生态补水试验为例, 通过构建指标评价体系, 分析评估表明该体系能为优化生态补水方案提供定量化基础。

生态调度是通过泄放合适的流量维持一定的流态和水位过程, 以弥补或减缓水库对河流生态系统的不良影响。生态调度主要集中在通过控制流量、水温 and 沉积物输移来改善野生动物的环境状况(Olden & Naiman, 2010)。Gates & Kerans(2014)通过研究美国爱达荷州 Snake 河流上的大坝生态调度发现, 调整大坝调度方式, 适当增大季节性枯水期流量, 能够提高下游底栖生物群落的栖息地可利用性。2012-2014 年, 三峡水库相继实施了 4 次试验性生态调度, 并同步开展鱼类资源、水文和水环境要素等监测工作, 结果表明生态调度对四大家鱼自然繁殖起到了一定促进作用(陈进和李清清,

2015)。

4.2 河流连通性修复技术

河流连通性修复主要是基于近自然的原理, 尽可能恢复河流横向的连通性和纵向的连续。一般来说, 对于河流连通性修复主要包括河道横断面结构、河床生态化以及生态护岸 3 个方面。

对于河道横断面结构的修复, 在满足河道功能的前提下, 应尽可能保持天然断面; 在无法保持天然河道断面的情况时, 应按复式断面、梯形断面、矩形断面的顺序选择(孙东亚等, 2006)。王芳和刘小梅(2016)在崇明陈家镇四号河、琵琶河项目的河道断面设计时, 与海绵城市建设相结合, 充分保证水生动植物和陆生动植物食物链的完整性和连续性, 同时考虑岸坡的透水性和植被率, 达到水、岸、陆三位一体的效果。

对于河床的生态化, 主要包括深潭和浅滩的重建、河床材料的生态化以及栖息地的加强 3 部分。在水量较少或者断流的河道, 利用人工挖掘来构建深潭和浅滩; 如果经济条件允许, 可通过建设生态丁坝、生态潜坝等构建深潭和浅滩(赵银军和丁爱中, 2014)。河床的构筑应尽量采用透水性能好的材料, 对于已采用混凝土硬化的河道, 也可以通过深挖河床, 设置木桩、堆积石块等方式来构建多孔隙河道空间。

对于生态护岸, 主要是采用植物或者植物与土木工程相结合的方式对河岸进行防护, 既能够防止河岸坍方, 又能使河水与土壤相互渗透, 增强河道自净能力, 同时具备一定自然景观效果。关春曼等(2014b)指出生态护岸构建应与传统护坡技术结合、与土工合成材料结合, 同时注重新型植被生长基质的研发和施工方式的创新。

4.3 水质生态修复技术

主要是指生物-生态修复技术, 主要包括底泥生态疏浚、生态浮床技术、人工湿地技术。

底泥生态疏浚主要是针对一些断流且底泥污染严重的河道, 通过底泥的疏挖清除水体的内源污染, 减少底泥污染物向水体的释放。生态疏浚的关键是确定底泥薄层精确疏浚深度和疏浚污泥的后处理。张文惠等(2016)在对泉州山美水库底泥疏浚工作研究中指出, 疏浚深度的确定应综合考虑沉积物氮、磷及重金属污染状况。吴桢芬等(2016)在富营养化疏浚底泥的资源化利用方面研究表明, 底泥气化处理在技术和经济上均可行。

生态浮床技术, 即用竹子、高分子材料作为载体

人工构建生物浮床,水生植物通过吸收水体中营养物质,降低 COD;同时营造一个动物、微生物良好的生长环境,提高水体的自净能力,从而修复水生态系统。Rao Lei 等(2014)试验发现人工生态浮床能改善河道的水力特征,可用于河流修复。引入竹丝或稻草等固相碳源作为基质形成的组合式生态浮床与植物和微生物协同作用,能够造成缺氧环境,出现类似于短程反硝化的效果,对富营养水体的氨氮和总磷有较好的净化效果(周世杰等,2015)。

人工湿地技术主要是模拟天然湿地形成的人工生态系统,利用基质填料、微生物、植物和水生动物之间的物理、化学和生物协同作用降解污染物,通过过滤、吸附、共沉、离子交换、植物吸收和微生物降解作用,实现水质净化。例如对汾河进行的生态修复中,人工湿地占重要地位,采用了潜流湿地、表流湿地和景观湿地,并取得了良好效益(李泽峰,2012)。人工湿地在氮、磷、有机物、微量营养元素的去除中均有广泛应用(Saeed & Sun, 2012; Turker et al, 2014)。

4.4 水生生物修复技术

水生生物修复技术包括利用水体中的植物、微生物和动物吸收、降解、转化水体中的污染物以实现水环境净化修复技术,通过恢复水生生物资源、改善种群结构、增加物种多样性的修复技术。前者主要包括水生植物修复及水生动物的修复,后者主要包括增殖放流。

水生植物修复是以植物忍耐和超量积累某种或某些化学元素的理论为基础,利用植物及共存微生物体系去除污染物,最后通过收割植物将污染物带走,以达到净化水质的目的。水生植物修复技术被认为是一种更为绿色的修复方法(Rezania et al, 2015)。常用的植物修复品种包括芦苇、菖蒲、香蒲、旱伞草、慈姑、金鱼藻、凤眼莲、睡莲、菱角等。水生植物治理受痕量金属(Laffont et al, 2015)、放射性元素(Pratas et al, 2014)污染的水体也有研究。

水生动物的恢复,又称为生物操纵法,主要通过投放鱼类及虾类、河蚌等底栖动物,构建“藻类-浮游动物-鱼类”食物链,从而控制藻类的生长,修复水体污染。谢平(2003)提出通过减少凶猛性鱼类数量及放养食浮游生物的滤食性鱼类(鲢、鳙)来直接牧食蓝藻水华的非经典生物操纵模式。在四明湖水库修复中,通过养殖鲢、鳙,能一定程度上防止水华事件发生,减缓水库的富营养化趋势(余文公,2013)。

增殖放流是利用人工方法繁殖水生生物并直接

向海洋、江河、水库等公共水域进行活体投放活动。国外增殖放流分为增加资源量放流、生态修复放流以及改变生态结构放流 3 种类型(聂永康等,2017)。中华鲟这一古老的水生物种因水利工程建设和资源过度利用等原因导致资源危机,1983 年科研人员实现了葛洲坝下中华鲟人工繁殖(房敏等,2014)。此后,三峡集团公司开始向长江增殖放流中华鲟苗和幼鱼,至 2018 年共开展 60 次放流活动,累计向长江放流中华鲟超过 500 万尾。王军红等(2014)通过监测 2010-2012 年间三峡大坝至葛洲坝间实施的鲢、鳙、草鱼等鱼类增殖放流及分析历史数据发现,每年 100 万~125 万尾的放流规模对两坝间水域鱼类增殖具有一定效果,并建议放流活动的实施选择在禁渔期、饵料开始丰富而水温相对较低的 3 月份进行,以提高放流鱼的运输成活率以及降低小个体幼鱼被捕捞的比例。

5 结论与展望

国内外河流生态修复研究经历了从对河流形态到功能的修复、从单一的水质修复到河流生态系统修复的过程并取得了显著进步,但仍处于探索阶段,生态修复技术的应用及修复模式的构建缺乏科学性、系统性。因此,针对河流生态修复,在未来的发展中仍需开展以下研究。

多种修复技术的优化组合。河流生态修复是一项复杂的生态工程,包括水量、水质、河流形态结构及水生生物等多个方面。单一的技术很难实现整个河流系统的恢复。今后的研究应从整个河流生态系统出发,根据河流的具体情况,着力于探索多种修复技术的组合设计。

从流域层面综合考虑。河流作为纵向、横向、垂向和时间上“四维”连续的生态体系,应加强对其流域层面上的生态修复研究,并注重相关技术标准和规范的编制工作。

重视修复后监测和评价。修复工程的效果往往不能在短时间内体现,有的甚至需要几十年,为保证河流生态修复效果,必须进行修复后的长期跟踪监测,应制定后评价具体时间、标准,为河流修复后的健康评估提供便利。

参考文献

- 陈进,李清清,2015. 三峡水库试验性运行期生态调度效果评价[J]. 长江科学院院报, 32(4): 1-6.
- 陈兴茹,2011. 国内外河流生态修复相关研究进展[J]. 水生

- 态学杂志, 32(5): 122-128.
- 董增川, 赫冉, 徐伟, 等, 2016. 漳卫新河生态健康诊断与修复对策[J]. 人民长江, 47(16): 26-29.
- 董哲仁, 2003. 生态水工学的理论框架[J]. 水利学报, 34(1): 1-6.
- 董哲仁, 2009. 河流生态系统研究的理论框架[J]. 水利学报, 40(2): 129-137.
- 房敏, 蔡露, 王从锋, 等, 2014. 长江珍稀鱼类中华鲟物种特性及资源保护[J]. 生态学杂志, 33(4): 1121-1127.
- 关春曼, 张桂荣, 赵波, 等, 2014a. 城市河流生态修复研究进展与护岸新技术[J]. 人民黄河, 36(10): 77-80.
- 关春曼, 张桂荣, 程大鹏, 等, 2014b. 中小河流生态护岸技术发展趋势与热点问题[J]. 水利水运工程学报, (4): 75-81.
- 李卫明, 艾志强, 刘德富, 等, 2016. 基于水电梯级开发的河流生态健康研究[J]. 长江流域资源与环境, 25(6): 957-964.
- 李泽峰, 2012. 人工湿地在汾河生态修复污水处理中的应用[J]. 山西水利, (1): 28, 32.
- 毛战坡, 单保庆, 彭文启, 等, 2006. 氮素在河流生态系统中的滞留研究进展[J]. 长江流域资源与环境, 15(4): 480-484.
- 倪晋仁, 刘元元, 2006. 论河流生态修复[J]. 水利学报, 37(9): 1029-1037, 1043.
- 妮可·思科, 克里斯汀·斯如娜, 2010. 淡水生物多样性保护工作实践指南[M]. 朱琳, 刘林军, 译. 中国环境科学出版社.
- 聂永康, 陈丕茂, 周艳波, 等, 2017. 水生生物增殖放流生态风险评价研究进展[J]. 生态科学, 36(4): 236-243.
- 彭溢, 廖国威, 谢林伸, 等, 2016. 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, 34(2): 51-53.
- 钱正英, 陈家琦, 冯杰, 2006. 与河流和谐发展[J]. 中国水利, (2): 7-10.
- 盛萧, 黄小追, 徐海升, 等, 2016. B-IBI 在东江河流健康评估中的应用研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 48(2): 52-60.
- 孙东亚, 董哲仁, 许明华, 等, 2006. 河流生态修复技术和实践[J]. 水利水电技术, 37(12): 4-7.
- 王芳, 刘小梅, 2016. 海绵城市建设与河道综合治理模式探讨[J]. 水利规划与设计, (6): 1-4.
- 王军红, 姜伟, 唐锡良, 等, 2014. 长江三峡大坝—葛洲坝江段经济鱼类增殖放流效果初步评价[J]. 淡水渔业, (6): 100-103.
- 王文君, 黄道明, 2012. 国内外河流生态修复研究进展[J]. 水生态学杂志, 33(4): 142-146.
- 吴建寨, 赵桂慎, 刘俊国, 等, 2011. 生态修复目标导向的河流生态功能分区初探[J]. 环境科学学报, 31(9): 1843-1850.
- 吴桢芬, 李世平, 李雯, 等, 2016. 富营养化湖泊滇池疏浚底泥气化利用可行性分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 41(1): 64-68.
- 谢平, 2003. 鲢、鳙与藻类水华控制[M]. 北京: 科学出版社: 103-129.
- 邢梦雅, 陈星, 周镆, 等, 2016. 基于生态补水的水环境改善效果评价体系[J]. 水资源保护, 32(1): 64-66.
- 徐菲, 王永刚, 张楠, 等, 2014. 河流生态修复相关研究进展[J]. 生态环境学报, (3): 515-520.
- 徐梦珍, 王兆印, 潘保柱, 等, 2012. 雅鲁藏布江流域底栖动物多样性及生态评价[J]. 生态学报, 32(8): 2351-2360.
- 杨俊鹏, 王铁良, 范昊明, 等, 2012. 河流生态修复研究进展[J]. 水土保持研究, 19(6): 299-304.
- 于鲁冀, 李瑶瑶, 吕晓燕, 等, 2014. 河流生态修复技术研究进展[C] //湖泊与生态文明建设——第四届中国湖泊论坛论文集: 271-280.
- 余德琴, 郭匿春, 汤祥明, 等, 2016. 无锡亲水河生态修复过程中浮游甲壳动物群落结构研究[J]. 水生态学杂志, 37(1): 70-77.
- 余文公, 2013. 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: 933-938.
- 张晶, 董哲仁, 孙东亚, 等, 2010. 基于主导生态功能分区的河流健康评价全指标体系[J]. 水利学报, 39(8): 883-892.
- 张文慧, 许秋瑾, 胡小贞, 等, 2016. 山美水库沉积物重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学研究, (7): 1006-1013.
- 赵彦伟, 杨志峰, 2005. 河流健康: 概念、评价方法与方向[J]. 地理科学, 25(1): 119-124.
- 赵银军, 丁爱中, 2014. 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, 32(3): 167-170.
- 周世杰, 曹文平, 周大众, 等, 2015. 组合式生态浮床处理富营养化水体的比较与研究[J]. 人民长江, (22): 7-12.
- ASCE River Restoration Subcommittee on Urban Stream Restoration, 2003. Urban Stream Restoration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 129: 491-493.
- Becker J F, Endreny T A, Robinson J D, 2012. Natural channel design impacts on reach-scale transient storage[J]. Ecological Engineering, 57(4): 380-392.
- Gates K, Kerans B, 2014. Habitat use of an endemic mollusc assemblage in a hydrologically altered reach of the Snake river, Idaho, USA[J]. River Research and Applications, 30(8): 976-986.
- Gray D H, Sotir R B, 1992. Biotechnical stabilization of highway cut slope[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 118(9): 1395-1409.

Laffont-Schwob I, Triboit F, Prudent P, et al, 2015. Trace metal extraction and biomass production by spontaneous vegetation in temporary Mediterranean stormwater highway retention ponds: Freshwater macroalgae (*Chara* spp.) vs. cattails (*Typha* spp.)[J]. Ecological Engineering, 81(3): 173 – 181.

Mitsch W J, 1998. Ecological engineering—the 7-year itch [J]. Ecological Engineering, 10(2): 119 – 130.

Olden J D, Naiman R J, 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity[J]. Freshwater Biology, 55(1): 86 – 107.

Pratas J, Paulo C, Favas P J C, et al, 2014. Potential of aquatic plants for phytofiltration of uranium-contaminated waters in laboratory conditions[J]. Ecological Engineering, 69(69): 170 – 176.

Rao L, Qian J, Ao Y H, 2014. Influence of artificial ecological floating beds on river hydraulic characteristics[J].

Journal of Hydrodynamics, 26(3): 474 – 481.

Rezania S, Ponraj M, Talaiekhosani A, et al, 2015. Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater[J]. Journal of Environmental Management, 163: 125 – 133.

Saeed T, Sun G, 2012. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media[J]. Journal of Environmental Management, 112(24): 429 – 448.

Seifert A, 1983. Naturnaeherer wasserbau [J]. Deutsche Wasserwirtschaft, 33(12): 361 – 366.

Türker O C, Türe C, Böcük H, et al, 2014. Constructed wetlands as green tools for management of boron mine wastewater[J]. International Journal of Phytoremediation, 16(6): 537 – 553.

(责任编辑 张俊友)

Research Progress on Ecological Restoration Technology Based on River Ecosystem Health

LIU Huan, YANG Shao-rong, WANG Xiao-ming

(China Three Gorges Projects Development Co., Ltd., Chengdu 610041, P.R.China)

Abstract: With the large-scale exploitation of river, river ecosystem is suffering serious damage. So river ecological restoration has become a big concern for public and the work has made considerable progress in recent years. In this paper, at first we analyzed the characteristics of river ecological system and the stresses it is facing at present, introduced the concept of river health and its evaluation methods, and reviewed the related research development of river ecological restoration home and abroad. Then, the technologies and typical practice cases of river ecological restoration were summed up in relation to water flow, connectivity, water quality and aquatic organisms. Finally, we put forward three suggestions on the further research of river ecological restoration: combining different restoration technologies; decision making from the aspect of river basin; monitoring and effect evaluation after ecological restoration. The study will provide reference and guidance for the restoration practice in future.

Key words: river; ecosystem; ecological restoration; restoration technology