

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.05.027

平原河网地区河流生态修复技术研究与实践

黄显峰¹, 郑延科¹, 方国华¹, 吴俊¹, 王宗志²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对平原河网地区河流生态系统问题日益严重的状况, 总结了河流生态修复的国内外研究进展, 阐述了目前主要应用的河流水质改善、生态护岸建设和河流生态景观建设3个方面的河流生态修复技术, 结合江苏省丰县的生态水利建设实例, 提出我国河流生态修复的建议。

关键词: 河流生态修复; 生态修复技术; 河流水质; 生态护岸; 生态景观; 平原河网地区

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2017)05-0170-07

Research and practices of river ecological restoration technology applied in plain river network area

HUANG Xianfeng¹, ZHENG Yanke¹, FANG Guohua¹, WU Jun¹, WANG Zongzhi²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Aimed at the increasingly serious situation of river ecological system in plain river network area, this paper summarized the domestic and foreign research progress of river ecological restoration and elaborated on the main river ecological restoration technologies, including water quality improvement, ecological embankment and ecological landscape. Case study is conducted by referring to ecological water conservancy construction in Feng County of Jiangsu Province. Reasonable suggestions are put forward for the practice of river ecological restoration in our country at present.

Key words: river ecological restoration; ecological restoration technology; river water quality; ecological revetment; ecological landscape; plain river network area

河流系统是陆地与海洋联系的纽带, 在生物圈的物质循环中起着十分重要的作用, 具有输水泄洪、气候调节、供水发电、景观娱乐、生态平衡等多种功能, 是自然界最重要的生态系统之一。多年以来, 为了满足防洪、排涝、灌溉、航运等要求, 人们过多地使用硬质材料整治河道, 导致河流缩短, 沿河的洪泛平原和湿地消失, 河流两岸的植被减少^[1]。此外, 人类生产生活中无节制地使用河流资源并将大量污染物排入河流中, 造成河水干涸、水质恶化。诸多的人类活动破坏了河流系统的自然形态, 导致河流生态系统破坏。河流生态系统修复问题引起了全世界的广泛关注, 国内外相关学者和机构开展了大量的相

关理论研究与实践工作, 取得了很大进展。平原河网地区河流开发利用强度大, 河流生态问题更为突出, 河流生态修复问题更受关注。本文主要介绍国内外河流生态修复技术的相关研究进展和主要修复技术, 并以平原河网地区—江苏省丰县为实例, 分析这些技术的生态修复效果。

1 国内外研究进展

1.1 国外

1.1.1 初步形成阶段

20世纪30—50年代为河流生态修复理论的初步形成阶段。20世纪30年代起, 西方国家的一些

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0400909); 湖南省水利科技项目([2015]245-13); 湖南省水利科技重点项目(湘水科计[2016]194-21)

作者简介: 黄显峰(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水资源规划与管理方面研究。Email: hxhuang2005@163.com

学者针对日益严重的河流水质恶化状况,开始着手对污染河流进行生态环境修复^[2]。德国于1938年提出“近自然河溪治理”,标志着河流生态修复研究的开端^[3]。此阶段河流生态修复的研究主要针对污染河流的水质修复。

1.1.2 逐步发展阶段

20世纪50—80年代为河流生态修复理论的逐步发展阶段。20世纪50年代,德国创立了“近自然河道治理工程学”,提出要改变传统的工程设计理念,使河流的整治符合植物化和生命化的原理^[4];1962年美国提出了生态工程的概念,将生态学的理论运用到实际工程中^[5];德国1965年在莱茵河用芦苇和柳树进行生态护岸试验,可以看作是最早的河流生态修复实践^[6]。此阶段,人们对河流生态系统修复的研究重点逐渐由单一的河流水质保护技术转变为多自然河道生态修复技术,通过改造河道护岸等使河道尽量保持自然状态,从而使受损严重的河流生态系统得到了明显改善。

1.1.3 全面开展阶段

20世纪80年代至今,是河流生态修复理论与实践的全面开展阶段。1989年,美国的Mitsch等^[7]探讨了生态工程概念,在此基础上诞生了“生态工程”理论;Bernhardt等^[8]提出河流生态修复的范围应包括河漫滩和流域,而不仅仅是河道本身;Palmer等^[9]认为21世纪的河流生态修复要注重通过分析数据和经验得出未来河流生态修复需要努力的方向;Jaehnig等^[10]阐述了如何评价某一项河流生态修复成功与否;Naiman等^[11]认为,在不断发展的社会生态系统中,制定河流生态修复原则时,需要考虑提高应变能力和适应性;Kurth等^[12]总结了瑞士30年河流修复的措施和经验教训;Reich等^[13]指出了极端水文事件对流动水域生态修复的影响,并提出如何减小极端水文事件的影响。本阶段,河流生态修复技术已日渐成熟并不断创新完善,人们开始逐渐将河流生态修复理论应用于实践并取得了一定的成果。

1.2 国内

1.2.1 萌芽阶段

1999—2005年为我国河流生态修复理论的萌芽阶段,相关研究始于20世纪90年代。刘树坤^[14]提出了“大水利”理论,为我国河流生态修复研究奠定了理论基础;董哲仁^[15]提出了“生态水工学”理念,指出“生态水工学”是在水工学的基础上吸收生态学的理论而建立发展起来的工程学科;王超等^[16]在总结分析城市生态系统特征、功能及结构的基础上提出了城市水生态系统建设与管理新模式;

赵彦伟等^[17]建立了针对城市河流生态系统健康评价的综合指标体系和评价模型,为相关城市河流生态修复工作的进行提供了科学指导。此阶段,我国主要是学习国外的理论技术成果,并逐步形成针对我国河流生态问题的学术见解。其中,董哲仁、杨志峰和王超等贡献较大,为我国河流生态修复理论研究奠定了基础。

1.2.2 逐步发展阶段

2005年至今为我国河流生态修复理论与实践的逐步发展阶段。王新军等^[18]从生态水力学角度分析了城市河道的特点,提出了建设生态护岸的一些设想;曹勇等^[19]提出生态浮床是一项重要的水质修复技术,重点描述了浮床的结构和设计,并展望了生态浮床的发展方向;朱党生等^[20]结合全国主要河湖生态保护与修复规划编制工作,提出了水生态保护与修复规划的主要内容、关键环节和技术路线;夏继红等^[21]针对河岸带潜流层功能退化的问题开展健康诊断,明确致病机理,实施适宜的生态修复工作;李焕利等^[22]概述了人工浮床国内外研究现状及工程应用实例,对人工浮床处理效果影响因素进行分析并展望发展前景;许珍等^[23]指出河流生态修复的关键在于水质的修复、生境的修复以及有效的管理手段,并在此基础上提出了相应的河流生态修复措施。此阶段,我国社会各界对河流生态修复问题的重视程度逐渐提高,河流生态修复的相关理论研究与实践工作在全国范围内广泛开展。

2 主要河流生态修复技术

目前,河流生态修复技术体现在河流水质改善、生态护岸和生态景观建设3个方面,见图1。

2.1 河流水质改善

国内外对污染河流水质改善技术研究的时间较长,污染河流的水质改善技术主要包括物理修复、化学修复和生物-生态修复3类。

2.1.1 物理修复技术

a. 调水改善水环境。调水是治理河流水质污染的一项重要辅助技术,通过向被污染河流调入清洁水,可以增加河流水量并加速水流流动,从而促进了河流污水的稀释,在一定程度上缓解河流水质污染状况^[24]。对于附近有充足清洁水源的污染河流来说,这是一种可取的方法。

b. 河道曝气。通过向被污染水体中充入空气或纯氧,使污染水体的溶氧能力得到提升,增强水体的自净能力,去除河流中的污染物,从而使河流的水

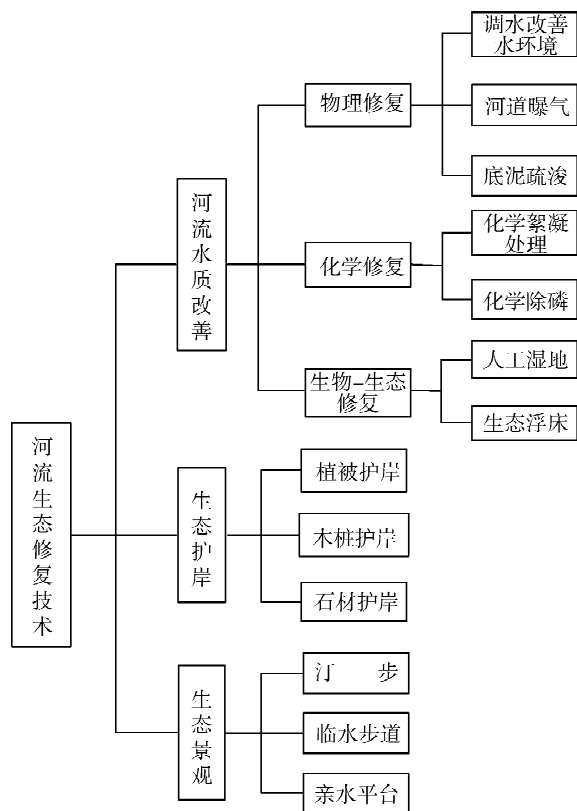


图1 河流生态修复技术

质状况得到改善^[24]。该技术主要应用于突发性河道污染应急处理。

c. 底泥疏浚。通过对河道底泥的疏挖,去除河道中的污染物,使河流的水质状况得到改善。底泥疏浚技术是清理河道内源污染的一项重要技术,该技术主要应用于富营养化河流的治理。

2.1.2 化学修复技术

a. 化学絮凝处理。向河道中投入絮凝剂,使絮凝剂与河道内污染物发生化学反应来去除污染物,从而改善河流的水质状况。该技术适用于比较封闭的受污染严重水体。

b. 化学除磷。将化学除磷剂投入废水中,经过一系列的分解凝取沉析而达到除磷的目的。该技术适用于溶解性和胶体状无机磷含量较高的水体。

2.1.3 生物-生态修复技术

a. 人工湿地。人工湿地是由人工基质和在其上生长的水生植物组成的生态系统^[25]。通过湿地中土壤、人工介质、植物和微生物的物理、化学和生物三重协同作用对污水和污泥进行净化。该技术在污染河流水质改善中应用较为广泛。

b. 生态浮床。把特制的轻型生物载体放入受污染水体中形成浮床,将吸收水中有机污染物能力较强的植物植入浮床的种植槽内,使植物根系自然悬浮于水体中,通过吸附作用削减水体中的氮、磷及

有机污染物质,从而使水质得到净化。该技术主要适用于富营养化及受有机污染的河流,处理效果好,可实现资源持续利用^[26]。

2.2 生态护岸技术

河道岸坡是河流生态系统的重要组成部分,在水土保持、防洪行洪等方面起着十分重要的作用。根据使用的材料,生态护岸可以分为植被护岸、木桩护岸和石材护岸3种类型^[26]。

a. 植被护岸。植被护岸是最为常见的一种生态护岸形式。在岸坡上错落有致地种植乔木和灌木,可充分利用光照条件,形成了错落有致的景观,同时大量乔木和灌木形成的发达根系能够起到稳固堤岸的作用,从而更好地抵御洪水。

b. 木桩护岸。沿河岸向下垂直打入成排圆木桩,在木桩上按一定间距钉上木条形成木桩栅栏,在栅栏与不规则岸坡之间填充柳树等嫩枝扎成的活枝捆,发芽后可形成植被系统,为水生生物提供栖息空间并美化环境。

c. 石材护岸。依据河道的自然岸线抛石或堆石,因石块可以抵御水流波浪的冲击,从而使河道岸坡得到有效保护。石材护岸技术比较容易实施,同时可以彰显河道的自然岸线美。

2.3 生态景观建设

生态景观建设以景观生态学为理论指导,遵循与传统水利目标相融合、尊重历史、道法自然、景观连续等原则^[27]。3种常见的河流生态景观是汀步、临水步道和亲水平台。

a. 汀步。在浅水中按一定间距布设块石,微露水面,以供居民行走和嬉戏。汀步质朴自然,别有情趣,不仅可以增加该河道的景观效果,还可体现出自然之美、简约之美、韵律之美。

b. 临水步道。岸坡上修建临水步道可增加地形景观的塑造性及亲水活动的便利性。步道宜用鹅卵石、碎石铺成,若为现浇混凝土材质,则每隔一定距离铺设石板或透水砖,形成生物通道,供两栖动物活动。

c. 亲水平台。亲水平台建筑物包括亭、楼、阁、轩、廊、榭、舫等。亲水平台高于常水位10~15 cm,可以是单一的亭、楼、阁、轩、廊、榭、舫或者多种亭、楼、阁、轩、廊、榭、舫形式的组合,材料以木质为佳,沿柱子种植爬山虎等攀藤观赏植物,构建宜人的滨水景观。

3 实例研究

丰县位于江苏省西北部,介于东经116°21'15"~

116°52'03", 北纬 34°24'25" ~ 34°56'27", 地处苏、鲁、豫、皖 4 省交界处, 隶属徐州市, 属于典型的平原河网地区。丰县境内主要河道护岸多数为天然护坡, 虽然植被覆盖率较高, 但植被品种单一, 河岸植物群落生态稳定性较差; 其衬砌护岸则多为浆砌块石或混凝土抹面垂直挡墙, 缺乏生态景观功能, 也不利于水岸物质交换和动物迁移; 部分水域水葫芦或水花生疯长, 不仅遮蔽水面, 而且植株死亡腐败使水质变差。丰县采取了一些生态修复措施, 取得了较好的效果。

3.1 改善河流水质

a. “三环四河”水系沟通。“一环”水系由护城河、季合园中沟、中阳大道沟、青年沟、城西一号沟, 杜庄中沟、白衣河等河道以及凤鸣湖、小北海等集中水面组成; “二环”水系由复新河段、城南二号沟、卜老家大沟、白衣河段组成; “三环”水系由大沙河、子沙河、子复河、复新河、七号沟、费楼沟、苗成河、三联河、太行堤河、沙支河组成。“三环”水系之间互相沟通, 其中, “一环”水系与“二环”水系通过季合园中沟、中阳大道沟等河道进行沟通, “二环”水系与“三环”水系通过白衣河、复新河和子午河等河道进行沟通。丰县“三环”水系沟通示意图见图 2。“四河”水系由子午河-复新河、大沙河、郑集南支河、黄河故道以二坝为圆心, 分别向东、东北和北辐射贯穿丰县县境。通过“三环四河”水系沟通工程, 丰县水环境得到了很大改善, 水景观得到显著提升。

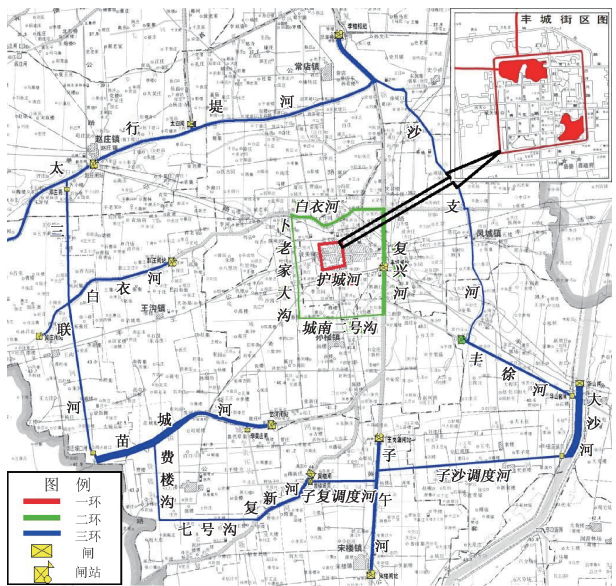


图 2 丰县“三环”水系沟通示意图

b. 调水改善水环境。采取调水措施改善城区护城河水质, 利用复新河上游水质较好、水量充足的水源条件, 进行水利工程优化调度引水, 加快水体置

换, 使护城河河道水体活起来。根据护城河现状, 每天调水 7 000 t, 约 20 d 完成 1 次置换, 即可满足改良水质的需要。在新城区新开挖飞龙湖、凤凰湖和栖凤湖, 分别与邻近的沙支河、老解放河等沟通, 适时适量进行换水。

c. 生态浮床。生态浮床的建设不仅可以净化河道, 还可以增加河道的景观效果。用于浮床栽植的植物品种有: 美人蕉、旱伞草、鸢尾、粉绿狐尾藻、黄菖蒲等。在丰县中心城区凤鸣湖、凤凰湖、沙支河及工业农业区白衣河、丰沛河、史南河、梁寨水库等水质较差的骨干河道段建设生态浮岛, 有效改善河道的水质状况。生态浮床效果见图 3。



图 3 生态浮床

3.2 建设生态护岸

结合各护岸形式的优势以及丰县河道的水位特点, 对县域内河道生态护岸分区域进行建设。城区护城河和复新河已建有浆砌石垂直挡墙式硬质化护岸, 采用植被护岸; 沙支河和小北海采用石材护岸, 凤凰湖则采用木桩护岸。工业区白衣河、丰沛运河、太行堤河水力冲刷较大, 采用木桩护岸; 东营子河和史南河水力冲刷较小, 采用植被护岸。农业区梁西河、苗城河和大沙河均采用植被护岸。植被护岸、木桩护岸和石材护岸效果图分别见图 4 ~ 6。



图 4 植被护岸



图5 木桩护岸



图6 石材护岸

3.3 构建生态景观

- a. 大沙河百里风光带。大沙河为 1851 年黄河决口流向昭阳湖的分洪道,贯穿丰沛两县,全长 61.5 km,丰县境内长 28.5 km。根据大沙河风光带旅游总体规划,在大沙河北至华山闸,南至黄河故道(二坝湿地)沿岸约 25 km 范围内开发建设华山闸综合旅游区、大沙河林场度假旅游区、夹河闸温泉度假区、果都大观园及二坝湿地等 5 个重点旅游节点。
- b. 二坝湿地。二坝湿地位于丰县西南部的大沙河镇二坝村境内,距离丰县县城约 40 km,南北长约 10 km、东西宽约 4 km,环绕湿地新建一条宽 7 m 的混凝土道路,在道路与水体之间局部节点新建亲水栈道、亲水平台,并进行岸坡整治。二坝湿地岸坡

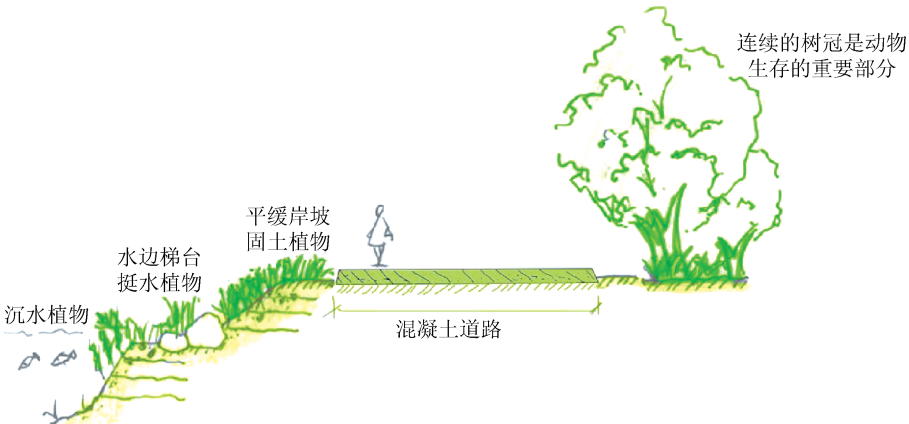


图7 二坝湿地岸坡整治示意图

- 整治示意图见图 7。
- c. 凤凰湖。凤凰湖公园位于丰沛铁路以北 2.1 km 处,规划总面积 60 km²。护岸植物配置按照城区水景观建设要求进行配置。常绿与落叶树种交错,乔、灌、草、花搭配,并配植水上植物,形成“常年有绿,四季有花”的立体绿色空间。小岛上除补种柳树、槐树等乔木和部分小灌木外,不进行其他人为干预,保留原始草本植物地被形态,为野生动物提供必需的栖息繁衍场所。
- 3.4 工程实施效果
- a. 改善了河道功能状况。“三环四河”水系沟通改变了丰县水系缺乏沟通的状况,提高了河道的引排能力,利于水体的循环流动,从而强化河流水体自净能力,进一步有效改善河湖水质和水环境。
 - b. 维护了河道的健康。河道生态护岸的建设,增加了河道两岸的植被覆盖面积,使丰县骨干河道形成了健康的生态体系,有利于植物多样性的恢复,进而保护生物多样性。
 - c. 彰显了生态水乡的内涵。生态景观的建设,改变了以往水景观建设无序开发的状况,在景观节点塑造中引入水文化,彰显出丰县生态水乡的内涵。
- 4 建 议
- a. 我国当前的河流生态修复实践大多是以河流水质改善为主,对于河流生态系统结构功能方面的研究和实践较少。应加强对河流生态系统结构和功能理论研究及实践的重视程度,以实现河流生态系统的全面修复。
 - b. 目前我国的河流生态修复实践缺乏可以参考的完整模型,应根据不同地形各自建立起一套完整的河流生态修复模型,为同类地区的河流修复实践工作提供科学指导,然后根据各个地区的具体特点制定适合该地区的河流生态修复策略,以满足该地区的社会经济发展需要。

c. 进一步加强河流生态修复的监测工作,做好河流生态修复各项重要指标数据的长期积累工作,为河流生态修复后评价工作和修复理论的进一步研究提供数据支撑和理论依据。

d. 在不断开展区域河流生态修复工作的同时,逐步在流域尺度下选择小型流域开展河流生态修复方面的理论与实践工作。

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. (WANG Wei,LI Chuanqi. River corridor and ecological restoration [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34 (9) : 56-58. (in Chinese))

[2] 王文君,黄道明. 国内外河流生态修复研究进展[J]. 水生态学杂志,2012,33(4): 142-146. (WANG Wenjun, HUANG Daoming. Research progress of river restoration research at home and abroad [J]. Journal of Hydroecology, 2012,33(4): 142-146. (in Chinese))

[3] 高甲荣. 近自然治理:以景观生态学为基础的荒溪治理工程[J]. 北京林业大学学报,2009,21(1): 80-85. (GAO Jiarong. Near natural control: torrent control engineering based on the landscape ecology [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 21 (1) : 80-85. (in Chinese))

[4] LAUB B G, PALMER M A. Restoration ecology of rivers [J]. Encyclopedia of Inland Waters, 2009(1): 332-341.

[5] 汪秀丽. 浅议河流生态修复[J]. 水利电力科技, 2010, 36 (1) : 6-16. (WANG Xiuli. Discussion on river ecological restoration [J]. Water Resources and Electric Power, 2010, 36(1): 6-16. (in Chinese))

[6] 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 Xingru. Progress of river restoration research at home and abroad [J]. Journal of Hydroecology, 2011, 32(5): 122-128. (in Chinese))

[7] MITSCH W J, JØRGENSEN S E. Ecological engineering: an introduction to eco-technology [M]. New York: Wiley, 1989.

[8] BERNHARDT E S, PALMER W A, ALLAN J D, et al. Synthesizing U. S. river restoration efforts [J]. Science, 2005, 308: 636-637.

[9] PALMER M, ALLAN J D, MEYER J. River restoration in the twenty-first century: data and experiential future efforts [J]. Restoration Ecology, 2007, 15(3): 472-481.

[10] JAEHNIG S C, LORENZ A W, HERING D. River restoration success: a question of perception [J]. Ecological Applications, 2011, 21(6): 2007-2015.

[11] NAIMAN R J. Socio-ecological complexity and the restoration of river ecosystems [J]. Inland Waters, 2013, 3 (4) : 391-410.

[12] KURTH A M, SCHIRMER M. Thirty years of river restoration in Switzerland: implemented measures and lessons learned [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(6): 2065-2079.

[13] REICH P, LAKE P S. Extreme hydrological events and the ecological restoration of flowing waters [J]. Freshwater Biology, 2015, 60(12): 2639-2652.

[14] 刘树坤. 21 世纪中国大水利建设探讨[J]. 中国水利, 1999 (9) : 16-17. (LIU Shukun. Discussion on the construction of large water conservancy in China in twenty-first Century [J]. China Water Resources, 1999(9): 16-17. (in Chinese))

[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 Zheren. Theoretical framework for eco-hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(1): 1-6. (in Chinese))

[16] 王超,王沛芳. 城市水生态系统建设与管理[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[17] 赵彦伟,杨志峰. 城市河流生态系统健康评价初探[J]. 水科学进展, 2005, 16 (3) : 349-355. (ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng. Preliminary study on assessment of urban river ecosystem health [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 349-355. (in Chinese))

[18] 王新军,罗继润. 城市河道综合整治中生态护岸建设初探[J]. 复旦学报(自然科学版), 2006, 45 (1) : 120-126. (WANG Xinjun, LUO Jirun. A preliminary study of ecological embankment construction for urban river restoration [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2006, 45(1): 120-126. (in Chinese))

[19] 曹勇,孙从军. 生态浮床的结构设计[J]. 环境科学与技术, 2009, 32 (2) : 121-124. (CAO Yong, SUN Congjun. Application of ecological floating beds to water restoration and its design [J]. Environmental Science and Technology, 2009, 32(2): 121-124. (in Chinese))

[20] 朱党生,张建永,李扬,等. 水生态保护与修复规划关键技术[J]. 水资源保护, 2011, 27 (5) : 59-64. (ZHU Dangsheng, ZHANG Jianyong, LI Yang, et al. Key technologies for aquatic ecosystem protection and rehabilitation planning [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(5): 59-64. (in Chinese))

[21] 夏继红,陈永明,王为木,等. 河岸带潜流层动态过程与生态修复[J]. 水科学进展, 2013, 24 (4) : 589-597. (XIA Jihong, CHEN Yongming, WANG Weimu, et al. Dynamic processes and ecological restoration of hyporheic layer in riparian zone [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 589-597. (in Chinese))

- [22] 李焕利,刘超,陆建松,等. 人工浮床技术在污染水体生态修复中的研究[J]. 环境科学与管理,2015,40(1): 114-116. (LI Huanli, LIU Chao, LU Jiansong, et al. Research progress of artificial floating bed technology in polluted water ecological restoration [J]. Environmental Science and Management, 2015, 40 (1): 114-116. (in Chinese))
- [23] 许珍,陈进,殷大聪. 河流生态功能退化原因及修复措施分析[J]. 人民珠江,2016,37(6): 16-19. (XU Zhen, CHEN Jin, YIN Dacong. Analysis on degradation reasons and restoration of fluvial ecological function [J]. Pearl River,2016,37(6): 16-19. (in Chinese))
- [24] 陈兴茹,许凤冉. 城市河流水质原位净化技术综述[J]. 水利水电技术,2011,42(7): 19-23. (CHEN Xingru, XU Fengran. A review on in-situ water purifying technologies for urban rivers [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2011,42(7): 19-23. (in Chinese))
- [25] 蒋跃平,葛滢,岳春雷,等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J]. 生态学报,2004,24(8): 1720-1725. (JIANG Yueping, GE Ying, YUE Chunlei, et al. Nutrient removal role of plants in constructed wetland on sightseeing water [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (8): 1720-1725. (in Chinese))
- [26] 王韶伟,徐劲草,许新宜. 河流生态修复浅议[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2009(增刊1): 626-630. (WANG Shaowei, XU Jincao, XU Xinyi. Ecological restoration of rivers [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science),2009(sup1): 626-630. (in Chinese))
- [27] 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 Zheren. Discussion on principles of river ecological restoration planning [J]. China Water Resources, 2006 (13): 11-13, 21. (in Chinese))

(收稿日期:2016-10-14 编辑:彭桃英)

(上接第158页)

- [15] 刘志培,刘双江. 硝化作用微生物的分子生物学研究进展[J]. 应用环境生物学报,2004,10(4): 521-525. (LIU Zhipai, LIU Shuangjiang. Advances in the molecular biology of nitrifying microorganisms [J]. China Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10 (4): 521-525. (in Chinese))
- [16] 赵伟,梁斌,杨学云,等. 长期不同施肥对小麦-玉米轮作体系土壤残留肥料氮去向的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(8): 1628-1634. (ZHAO Wei, LIANG Bin, YANG Xueyun, et al. Effects of long-term different fertilizations on the fate of residual fertilizer N in a wheat-maize rotation system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(8): 1628-1634. (in Chinese))
- [17] 李勇,孙卫刚. 新疆博斯腾湖污染源调查分析[J]. 地下水,2010,32(4): 177-179. (LI Yong, SUN Weigang. The analysis of pollution source of Lake Bosten in Xinjiang [J]. Ground Water, 2010, 32 (4): 177-179. (in Chinese))
- [18] 廖丹. 博斯腾湖水质评价与污染源分析[D]. 成都:四川师范大学,2008.
- [19] 楼成林,喇国静. 畜禽养殖场污水中BOD与COD相关性探讨[J]. 北方环境,2003,28(3): 40-42. (LOU Chenglin, LA Guojing. The correlations between BOD and COD in sewage of livestock farming [J]. North Environment,2003,28(3): 40-42. (in Chinese))
- [20] 李维军,曹鹏,李春,等. 好氧-厌氧耦合法处理番茄酱加工有机废水[J]. 化工学报,2006,57(2): 2970-2975. (LI Weijun, CAO Peng, LI Chun, et al. Treatment of organic wastewater from tomato paste processing by coupled aerobic-anaerobic process [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006, 57 (2): 2970-2975. (in Chinese))
- [21] 新疆荒地资源综合考察队. 博斯腾湖的盐化原因及其控制途径[J]. 地理学报,1982(2): 144-154. (Xinjiang comprehensive expedition team of wasteland resources. The cause of the salinization of the bisiteng lake and the ways of its control [J]. Acta Geographica Sinica, 1982(2): 144-152. (in Chinese))
- [22] 卢文君,刘志辉,习阿幸. 博斯腾湖水体矿化度影响因子分析及调控措施[J]. 中国农村水利水电,2015(5): 97-101. (LU Wenjun, LIU Zhihui, XI Axing. An analysis of the influencing factor of water mineralization and regulation strategies Bosten [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(5): 97-101. (in Chinese))
- [23] 肖开提·阿不都热衣木,汤世珍. 新疆艾比湖水矿化度变化过程及原因分析[J]. 水资源保护,2010,26(4): 35-38. (XAWKAT Abudureyimu, TANG Shizhen. Study on change and cause of water mineralization in Ebinur Lake of Xingjiang [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(4): 35-38. (in Chinese))
- [24] 杨建军,沈根祥,姚政,等. 灌水洗盐对设施农业中土壤养分的影响[J]. 上海农业学报,2004,20(2): 63-66. (YANG Jianjun, SHEN Genxiang, YAO Zheng, et al. Effect of watering and salt leaching on soil nutrient in agriculture under structure [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2004, 20(2): 63-66. (in Chinese))

(收稿日期:2016-10-25 编辑:彭桃英)