

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.014

城市河流系统治理策略在鹅颈水生态修复中的应用

汤茵琪,任心欣,孔露霆,颜映怡

(深圳市城市规划设计研究院有限公司市政规划院,广东 深圳 518028)

摘要:在简要介绍城市河流系统治理策略的基础上,详细论述其在鹅颈水生态修复中的应用。鹅颈水治理以流域为空间单位,准确把握河流主要问题,综合考量水资源、水安全、水环境、水生态、水文化,坚持工程和非工程措施并重,分阶段逐步实现洪水风险管理、外源污染控制、河流水质修复、河流生态系统恢复的目标。结果表明,鹅颈水目前已基本消除黑臭,水质逐渐提升至国家地表水Ⅳ类水标准。提出进一步加强河流生态系统恢复、优化管理制度、逐步建立全过程和全指标生态监测评估体系、实施弹性管理等鹅颈水系统治理措施。

关键词:城市河流;生态修复;系统治理;监测评估体系;鹅颈水

中图分类号:TV882 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0088-06

Application of integrated urban river management strategy in Ejingshui River ecological restoration//TANG Yinqi, REN Xinxin, KONG Luting, YAN Yingyi (*Municipal Infrastructure Planning Institute, Urban Planning & Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518028, China*)

Abstract: Based on an introduction of the integrated urban river management strategy, the application of the strategy to Ejingshui River eco-restoration was discussed. From the view of the whole river basin, main problems of the Ejingshui River were identified accurately. Water resource, water security, aquatic environment, aquatic ecosystem, and water culture were taken into consideration comprehensively, and engineering and non-engineering measures were emphasized simultaneously. Thus, the specific targets for stages of flood control, pollution control, water quality remediation, and river ecological restoration were achieved successively. Results show that the black and odorous water problem in the Ejingshui River has already been solved, and the water quality attained class-Ⅳ gradually. Finally, some suggestions are proposed for further management of the Ejingshui River, including strengthening the river ecosystem recovery, optimizing the river management system, establishing a long-term monitoring and multi-index assessment system, and implementing adaptive management.

Key words: urban river; ecological restoration; integrated management; monitoring and assessment system; Ejingshui River

城市河流是城市空间的重要组成部分,具有显著社会经济功能和生态环境效益。强人类活动干扰往往会较大程度改变河流水文特性和生态环境,给河流健康带来诸多问题。城市河流治理最初以防洪为主要目标,主导思想是将洪水尽快送到城市下游河道,形成河岸硬化、直线化、规则化。随着治水理念转变,河流治理逐渐向系统治理方向发展,研究方向也从工程水利转向生态环境,注重河流生态修复,不但关注河流水体、岸线、水质,而且开始关注滨水空间和河流生态系统,结合工程措施和非工程措施,统筹社会、经济、生态、环境、文化多方面效益,实现水资源、水安全、水环境、水生态、水文化共治^[1]。

河流系统治理可分为4个阶段:洪水风险管理、外源污染控制、河流水质修复、河流生态系统恢复,针对各阶段的特点和目标,可采取相应的工程措施,逐步达到阶段性目标,最终实现河流系统性治理,打造人与自然的和谐关系^[2]。洪水风险管理注重采用生态防洪措施,包括清淤疏浚、清障工程、河道拓宽、岸堤整治、水系沟通、建立蓄滞洪区等^[3-5]。外源污染控制包括污染物的源头减排、沿河截污工程、污水集中处理和面源污染控制等^[6],如德国Emscher河流复原工程中,新建4座污水处理厂、超过400 km污水管道和290座合流制溢流构筑物,解决污水直排和初期雨水污染问题^[7]。近年来,我国

大力推进海绵城市建设,有利于初期雨水污染控制,如植草沟能有效去除雨水径流中总悬浮物、化学需氧量(COD)、Pb、Cu、Cd、Zn 等污染物^[8-9]。河流水质修复技术中补水、曝气复氧和清淤在国内外河流治理中被广泛采用,能提高水体环境容量、溶解氧(DO)质量浓度,以及减少底泥二次污染,有效净化水质^[10-12];生态浮床、人工湿地和稳定塘等技术也得到广泛应用,有利于河流水质的深度净化和生态系统的修复,且运行成本低^[13-14]。河流生态系统恢复指通过采取生态保护和生态工程技术,恢复河道的自然属性和生物群落,促进河流生态系统良性循环^[15]。该目标可以通过修复河流生态结构和构建健康生物链来实现,如瑞士 Thur 河和 Töss 河^[16]以及英国 Thames 河^[17]的修复工程。人与自然关系的修复也是此阶段的重要任务,通过打造特色鲜明的城市滨河空间,将水文化建设有机融入其中,如在法国里昂 Rhône 河改造中,根据城市布局、居民生活需求和河流生境维护打造不同特色河段^[18]。

在国内外河流治理实践中,河流管理制度不断完善。1876 年,英国政府出台了《河流污染防治法》,该法成为世界上第一部水环境保护法规。自 20 世纪 60 年代,英国政府不断完善法律法规,由分散管理走向流域水资源、水环境综合管理^[19]。我国建立了符合国情的河长制,加强河流管理,苏州河的治理是河长制的先行探索和成功实践^[20]。建立河流数据库,对河流工程项目、监测和分析方法、监测动态、著作发表等进行统一管理和更新,是河流管理的重要手段。如欧洲的 REFORM (<http://wiki.reformrivers.eu>) 和 RESTORE (<https://restorerivers.eu>) 平台,为决策者制定政策和河流修复方案提供实践经验和科学参考。

当前我国河流形势严峻,水安全问题尚未得到根本性解决,水污染问题日益突出。河流生态系统恢复是实现其良好生态服务功能的重要条件,城市河流系统治理已成为我国城市实现可持续发展的重要任务。本文探讨国内外城市河流系统治理策略及其在深圳市鹅颈水生态修复中的应用,旨在为河流生态修复提供借鉴。

1 研究区概况

深圳市鹅颈水(图 1)发源于鹅颈水库,流经光明区凤凰城,属于茅洲河一级支流,总长约 5.6 km,流域面积 16.1 km²。整治前,鹅颈水光侨路至入河口段属于黑臭水体段,长约 4.14 km,被列入国家黑臭水体名录,河水汇入茅洲河干流,导致干流污染严重。整治前,鹅颈水排水口合计 158 处,混流排水量

1.96 万 m³/d;流域内面源污染严重,每天产生 1.8 t 污染负荷中 0.36 t 为面源污染;河道底泥厚度约 0.5 m,主要存在于中下游段。此外,工业企业事故性排放或违法偷排、沿岸乱堆的生活垃圾也给鹅颈水造成污染。

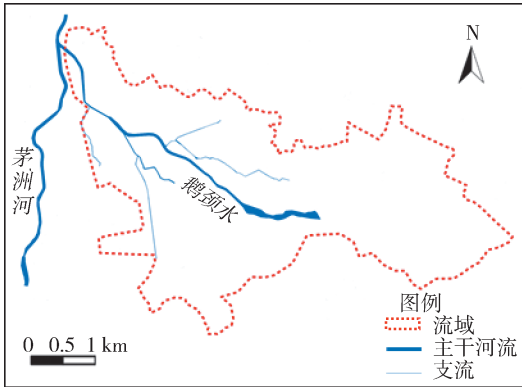


图 1 鹅颈水流域范围

Fig. 1 Ejingshui River watershed

2 河流系统治理策略

图 2 为城市河流系统治理思路。根据国内外河流系统治理研究实践,城市河流系统治理策略主要包括以下方面:

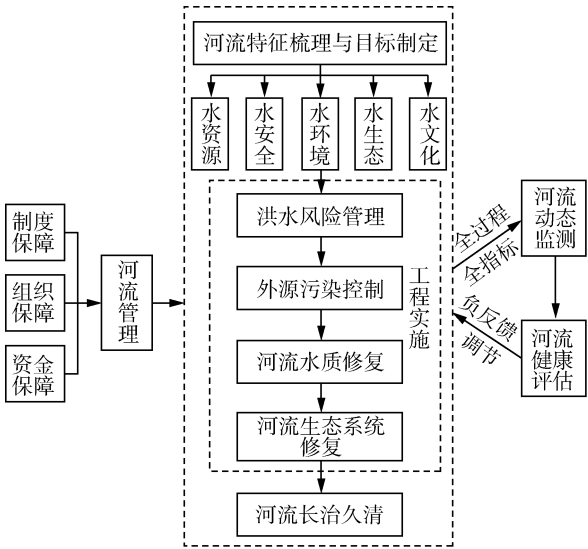


图 2 城市河流系统治理思路

Fig. 2 Flow chart of integrated urban river restoration and management

a. 梳理河流特征与制定目标。通过历史资料收集和现场踏勘调研,从水资源、水安全、水环境、水生态、水文化角度,系统性开展河流综合评价工作,建立河流生态状况分级标准,合理评价河流的生态状况,分析河流已丧失的功能,明确河流受污染的范围和河流生态系统的缺陷,识别关键影响因素,明确河流的修复现状,确立河流修复的总目标^[21]。

b. 合理分阶段推进工程。多阶段的工程实施周期、缓慢的生态恢复特点、大量的资金配套需求等因素决定河流系统性治理需要分阶段逐步推进。因此,应设定不同阶段的重点任务,明确各阶段整治工程的重点内容,考虑技术可行性和资金投入规模,提出合理的实施计划,逐步实现洪水风险管理、外源污染控制、河流水质修复、河流生态修复的阶段目标;在河流治理过程中不断发展和深化具有特色的水文化,实现水安全、水环境、水生态、水文化多赢局面,保障水资源可持续利用。河流治理工程实施应保证施工质量,避免后期问题频发、反复施工、浪费大量资金、降低治河效率。

c. 完善优化管理机制。坚持依法治河,在制度、组织和资金等方面逐步完善保障机制,建立并完善具有本国特色、地方特色的河流管理机制,实行流域水资源、水环境综合管理。由于河流治理耗资巨大,可考虑多途径融合资金,引入市场竞争机制,分类施策以提高工作效率和资金使用效率。如常德市黑臭水体整治项目中尝试多种筹资途径,其中,老西门项目总投资 16.72 亿元,护城河专项治理投入 8115 万元,资金来源于企业自有资金、银行贷款、企业发行债券、社会资本和政府补助等,缓解了政府财政压力。河流治理在以政府为主导的前提下,应重视调动民众、专家、顾问等社会各界共同参与,构建良好参与体制,如在韩国清溪川治理中,政府引入公众参与制度,广泛征求居民和专家意见,有效提高公众对工程实施的支持度^[22]。

d. 逐步建立全指标、全过程的河流健康动态监测评估体系。实施河流整治工程对河流生态系统的扰动较大,须及时获取水体变化信息,掌握生态系统的演变动态。建立全过程的生态系统监测网络,有助于全面评价整治工程的影响和效果,适时调整河流整治方案,在不同修复阶段根据需求有侧重地选择河流监测参数和频次^[23]。在国内外河流修复实践过程中,由于水质与生物状态的联系不明确等原因,仅利用物化指标难以全面、合理地评价河流生态系统状况,因此,在河流治理中宜建立包括生物、水文等其他类型指标的全指标监测网络和评价体系。美国《快速生物监测协议》(*Rapid bioassessment protocols*)^[24]和英国《城市河流调查》(*Urban river survey*)^[25]等河流健康评价体系值得参考借鉴。同时,应建立河流动态监测评估数据库,在河流生态恢复阶段尤其重视对河流进行多方面长期动态监测,为河流治理过程中调整措施提供定量数据支撑。

将弹性河流管理贯穿于河流生态修复的全过程,实现负反馈调节机制,根据河流发展动态,不断

修正河流整治方案,调整工程措施和非工程措施,确保河流治理的正确方向。针对受损河流生态系统恢复复杂而漫长的特点,对河流生态修复给予充足的时间,以使河流生态系统达到平衡稳定的健康状态。

3 鹅颈水生态修复

深圳市光明区于 2014 年启动鹅颈水综合整治工程,总体目标为实现河流生态修复。鹅颈水系统治理以流域为空间单位,重点关注水安全和水污染。通过分解阶段性目标,制定不同阶段的主要任务;建立相应监测系统,合理评估河流状态的变化趋势;结合负反馈规划设计方法,适时调整河流整治措施,在综合整治过程中坚持工程和非工程举措并重。

3.1 工程措施

洪水风险管理是河流治理最基本的要素。鹅颈水治理注重运用生态技术实施生态防洪工程,既满足防洪要求,又尽可能地保护河流生态环境。治理工程拓宽部分河道断面;建设沿河生态护岸,如自然植被护岸、石笼网护岸和复式护岸等;建立约 12.72 万 m²蓄滞洪区。同时,优化城市洪水排水管网系统,结合海绵城市的建设,缓解河道防洪压力^[26]。

外源污染控制是削减河流污染的根本之策。为控制外源污染,沿河铺设截污干管,接入光明污水处理厂干管,排查整治入河排污口,完善沿河污水收集系统;推进“正本清源”工程,从源头上实现雨污分流,改善管网错接乱排的现象,目前已开展光明区污水支管网(二期)建设工程(甲子塘、塘家)、长圳片区污水支管网工程等;充分结合海绵城市建设,因地制宜建设低影响开发设施,如生物滞留设施、雨水花园、透水铺装和绿色屋顶等,从源头上削减初期雨水污染,减少污染物直排入河。

河流水质修复使城市河流外源污染得以控制,河流水质进一步提升。为综合提升河流水质,实施底泥疏浚约 4.6 万 m³,消除重度污染的黑臭底泥污染;实施再生水补水工程,在鹅颈水上游设置补水点,补水量为 4 万 m³/d,补水来源为公明水质净化厂尾水,补水水质达到地表水Ⅳ类标准,有效提高鹅颈水的水环境容量;实施鹅颈水生态湿地工程,净化水体水质,目标为将水质提升至地表水Ⅳ类水标准,该工程于 2019 年下半年完工。河流水质修复过程中综合利用各类治理技术,改善水体水质,为水体中的生物提供良好的生存环境。

河流生态系统恢复促进了河流生态系统持续健康发展。鹅颈水治理中注重生态修复,重视河流的生态价值,目前已建设沿河生态护岸,恢复河岸的可

渗透性。在鹅颈水治理过程中,尝试将水文化融入其中,开展鹅颈水景观提升工程,提升沿河景观,打造景观节点,提高亲水性,为周边居民提供休闲娱乐的场所。

3.2 河流管理

河流管理是河流系统性治理并实现长治久清的重要保障。鹅颈水的综合整治坚持依法治河,严厉打击违法排水排污行为;完善区-街道-社区三级河长组织体系,加强河流日常管理和维护;实施源头控污,开展全流域工业污染源和私接乱排生活污水的综合整治;推行“环保管家”试点,制作河道、管网、建筑物、企业(排水户)相关联的信息化管理平台,全面规范涉水工业企业管理;对鹅颈水治理过程和成效开展公众宣传,提高公众对河流治理的认知度和支持度;定期开展鹅颈水整治效果公众调查评议,2017年11月、2018年6月和2019年1月的评议结果显示公众满意度分别为92.68%、99.08%和96.36%,表明鹅颈水治理得到公众的高度认可。

3.3 监测评价

鹅颈水综合整治监测指标以水质物化指标为主,从工程前期、实施过程到实施后期,对鹅颈水水质开展长期监测,为鹅颈水修复措施的动态调整提供依据。在2016—2018年治理过程中,鹅颈水上、中、下游河段的水质修复动态变化如表1所示。

表1 2016—2018年鹅颈水水质变化情况
Table 1 Water quality variations of Ejingshui River from 2016 to 2018

年份	河段	污染物质量浓度/(mg·L ⁻¹)			DO 质量浓度/氧化还原电位/mV	
		COD	氨氮	总磷	(mg·L ⁻¹)	
2016	上游	26.70	0.59	0.05	7.09	237.4
	中游	44.53	4.41	2.70	5.54	254.3
	下游	40.23	7.43	0.94	3.10	202.5
2017	上游	13.99	0.36	0.24	7.13	395.8
	中游	86.28	16.03	0.73	6.91	348.1
	下游	46.60	13.73	1.44	7.23	344.4
2018	上游	16.56	0.40	0.14	7.13	374.3
	中游	23.75	3.32	0.47	6.91	383.3
	下游	10.64	2.84	0.33	7.23	410.3

由表1可看出,2017年整治工程前,中游河段COD、氨氮、总磷质量浓度相比于上游河段显著升高,原因是中游城镇建设区和工业区污水收集管网不完善,雨污水错接乱排现象较为严重,同时面源污染十分严重,水体污染物含量高,消耗水中DO含量,损害水生生态系统的健康。自2017年以来,随着整治工程逐步推进,COD、氨氮、总磷质量浓度在各河段尤其是下游河段显著降低,同时氧化还原电位和DO质量浓度均已恢复至较高水平。2018年各河段的氧化还原电位均大于350mV,DO质量浓度

均高于6mg/L,说明外源污染控制和河流水质修复取得明显成效。根据《城市黑臭水体整治工作指南》的标准,鹅颈水于2017年底已基本消除黑臭,随着整治工程的逐步推进,河流水质逐渐提升至国家地表水Ⅳ类水标准。但目前鹅颈水的监测仅限于水质理化指标,尚缺乏对河道其他特征,如水生生物和河岸带状况等的长期监测数据,对鹅颈水健康状况尚未能进行完整评估,因此完整的监测和评估工作在下一步河流管理中有待加强。

4 鹅颈水河流生态修复建议

在修复目标方面,截至2017年底,鹅颈水实施综合整治工程后已基本消除黑臭,目前总体上已完成外源污染控制、河流水质修复的阶段,但与河流生态修复的总目标仍存在一定距离,需进一步推进河流系统性治理,恢复河流生态系统,以实现河流长治久清。

在工程措施方面,针对河流生态系统恢复,应加强生态河流结构和健康生物链的构建,恢复河道的自然属性。城市河流的结构修复有蜿蜒性修复、连续性修复、多样性河道断面恢复、生态护岸修建和河床生态化修复等,以强化河流与周围区域的横向流通性,促进营养物质迁移扩散和水生动物的繁殖^[15,27-28]。河流生态系统生物链的构建,可借鉴浅水湖泊治理的生物操纵技术,利用沉水植物、滤食性鱼类、双壳贝类等水生生物,组成合理有效的生物操纵技术组合,根据水体特性有重点地调整组合,形成较为稳定而健康的河流生态系统^[29-30]。同时,对河流生物群落的重构和稳定预留充足的恢复时间,缓慢恢复河流生态系统健康。

在河流管理方面,河流系统性治理宜在流域范围内统筹实施。由于河道流经不同行政区,且各项工作的开展涉及水务、生态环境、规划和自然资源管理、建筑工务等多部门,市区间、部门间的沟通协调对工程实施和河流管理影响巨大,欧洲Rhine河治理中各国政府的沟通协调方式、英国Thames河管理部门调整模式值得参考。鹅颈水综合整治还应结合地方特点,完善公众参与机制,推进工程的进一步实施和河流的长期管养。此外,由于河流治理和长期管理耗资巨大,应善于利用各种筹资途径,并考虑治水的经济效益,如城市环境资本效益、旅游效益等,引入市场机制,激活社会资本。

在监测评价方面,目前鹅颈水的监测指标仅以水质物化指标为主,每周开展水质监测。水质修复目标基本实现后,需进一步全面评价河流健康状况,适时调整措施,逐步实现河流生态修复的总目标。

建议增设对河流生物指标、形态结构、水文特征和河岸带状况的定期监测,监测频率根据指标情况以季度或年为周期。应通过以上5类指标表征鹅颈水的健康状况,全面反映工程和非工程措施的实施对鹅颈水的影响,全过程评估鹅颈水生态修复动态。此外,应尽快建立鹅颈水河流管理数据库,对鹅颈水的发展动态进行长期跟踪和管理。

鹅颈水生态修复应全过程采用弹性管理,实施负反馈调节。根据监测评价状况,总结河流治理举措的成败经验,适时调整工程和非工程措施,确保河流治理效果处于正确的发展方向。

5 结 语

河流系统治理需要抓准河流自身特点和主要问题,从水安全、水环境、水生态、水文化和水资源的角度统筹河流治理的总体大方向,逐步实现洪水风险管理、外源污染控制、河流水质修复、河流生态系统恢复的阶段性目标。多阶段的工程实施周期、缓慢的生态恢复特点、大量的资金配套需求等因素决定河流系统治理需要分目标逐步推进,并对河流生态系统恢复过程进行全过程、全指标监测和评估。此外,河流系统治理应注重精雕细琢,保证工程和非工程措施质量,逐步由政府主导向全社会共同参与治河转变,形成社会合力,以实现河流长治久清。

参考文献:

- [1] 黄祥荣. 以深圳坪山河为例探讨我国城市河流综合治理的发展方向[J]. 中国给水排水, 2018, 34(18): 22-25. (HUANG Xiangrong. Taking Shenzhen Pingshan River as an example to discuss the development direction of comprehensive control of urban river in China[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(18): 22-25. (in Chinese))
- [2] 贾海峰. 城市河流环境修复技术原理及实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [3] 闫毓, 袁赛瑜, 唐洪武, 等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 329-334. (YAN Yu, YUAN Saiyu, TANG Hongwu, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(4): 329-334. (in Chinese))
- [4] 许怡, 吴永祥, 王高旭, 等. 伦敦城市洪水风险管理的启示[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(4): 13-18. (XU Yi, WU Yongxiang, WANG Gaoxu, et al. Enlightenment of urban flood risk management in London[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(4): 13-18. (in Chinese))
- [5] 刘苑, 王润, 陆文钦, 等. 城市河流社会-经济-自然复合

生态系统构建: 长沙市圭塘河流域治理与生态修复规划设计[J]. 景观设计学, 2019, 7(4): 114-127. (LIU Yuan, WANG Run, LU Wenqin, et al. A social-economic-natural compound ecosystem constructed for urban rivers: planning and design for the remediation and ecological restoration of the Guitang River watershed in Changsha City, China[J]. Landscape Architecture Frontiers, 2019, 7(4): 114-127. (in Chinese))

- [6] 金竹静, 李金花, 张春敏, 等. 滇池流域城区河道污染治理技术体系建立及工程应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(6): 100-105. (JIN Zhuqing, LI Jinhua, ZHANG Chunmin, et al. Construction and engineering application of pollution control technology system for urban river in Dianchi watershed[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(6): 100-105. (in Chinese))
- [7] PERINI K, SABBION P. Urban sustainability and river restoration: green and blue infrastructure[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.
- [8] 刘家宏, 王东, 李泽锦, 等. 厦门海绵化改造区入渗性能测定及特征[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 9-13. (LIU Jiahong, WANG Dong, LI Zejin, et al. Measurement and characteristic analysis of infiltration performance in Xiamen spongification reconstruction area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 9-13. (in Chinese))
- [9] 黄俊杰, 沈庆然, 李田. 植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2109-2115. (HUANG Junjie, SHEN Qingran, LI Tian. Performance of grass swales for controlling pollution of roadway runoff in field experiments[J]. Environmental Science, 2015, 36(6): 2109-2115. (in Chinese))
- [10] 何永. 清溪川复原: 城市生态恢复工程的典范[J]. 北京规划建设, 2004(4): 102-105. (HE Yong. Cheonggyecheon restoration in Seoul: a paradigm for the urban ecological revitalization[J]. Beijing City Planning & Construction Review, 2004(4): 102-105. (in Chinese))
- [11] 张绍君. 纯氧曝气快速消除河流黑臭工程效果及河道影响因素研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [12] MACKIEJ A, NATALI S M, LEVINTON J S, et al. Declining metal levels at Foundry Cove (Hudson River, New York): response to localized dredging of contaminated sediments[J]. Environmental Pollution, 2007, 149(2): 141-148.
- [13] HICKEY A, ARNSCHEIDT J, JOYCE E, et al. An assessment of the performance of municipal constructed wetlands in Ireland[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 210: 263-272.
- [14] 赵学敏, 虢清伟, 周广杰, 等. 改良型生物稳定塘对滇池流域受污染河流净化效果[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1): 35-43. (ZHAO Xuemin, GUO Qingwei, ZHOU Guangjie, et al. Purification effect of improved biological stabilization ponds on the polluted river in Lake Dianchi

- catchment[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1): 35-43. (in Chinese))
- [15] 米艳杰, 何春光, 王隽媛, 等. 河流地貌多样性修复技术研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(10): 15-30. (MI Yanjie, HE Chunguang, WANG Juanyuan, et al. Technical study on eco-restoration of topographic diversity of river [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(10): 15-30. (in Chinese))
- [16] PAILLEX A, SCHUWIRTH N, LORENZ A, et al. Integrating and extending ecological river assessment: concept and test with two restoration projects [J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 131-141.
- [17] 侯俊, 裴佳琦, 黄喻威, 等. 基于鱼类需求的息县枢纽工程闸下河段环境流量研究[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 8-12. (HOU Jun, PEI Jiaqi, HUANG Yuwei, et al. Study on environmental flow of lower reach of Xi County hub project based on fish demand [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 8-12. (in Chinese))
- [18] 郭婷, 余侃华. 尊重自然的城市河流改造: 法国里昂罗纳河改造启示[J]. 工业建筑, 2017, 47(7): 175-179. (GUO Ting, YU Kanhua. Urban river reform giving priority to nature; the enlightenment of reconstruction for Rhone in Lyon, France [J]. Industrial Construction, 2017, 47(7): 175-179. (in Chinese))
- [19] 刘娟, 王飞, 韩文辉, 等. 汾河上中游流域生态系统健康评价[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 91-98. (LIU Juan, WANG Fei, HAN Wenhui, et al. The ecosystem health evaluation in the upper and middle reaches of Fen River basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 29(3): 91-98. (in Chinese))
- [20] 徐祖信, 张辰, 李怀正. 我国城市河流黑臭问题分类与系统化治理实践[J]. 给水排水, 2018, 44(10): 1-5. (XU Zuxin, ZHANG Chen, LI Huaizheng. Analysis of urban black and odorous water problems and practice of comprehensive treatment for urban river in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(10): 1-5. (in Chinese))
- [21] 崔晨韵, 朱永华, 吕海深, 等. 长兴县与水相关的生态环境承载力评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 406-412. (CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system in Changxing County [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 406-412. (in Chinese))
- [22] 李允熙. 韩国首尔市清溪川复兴改造工程的经验借鉴[J]. 中国行政管理, 2012, 321(3): 96-100. (LI Yunxi. Experience and enlightenment of Cheonggyecheon restoration project in Seoul, Korea [J]. Chinese Public Administration, 2012, 321(3): 96-100. (in Chinese))
- [23] 董哲仁. 河流生态修复[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [24] BARBOUR M T, GERRITSEN J, SNYDER B D, et al. Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish [M]. 2nd ed. Washington D. C.: U. S. Environmental Protection Agency, 1999.
- [25] 曾鹏, 汪昱昆, 刘焱焱, 等. 基于河段尺度的太湖流域城市河流生境评价[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 581-589. (ZENG Peng, WANG Yukun, LIU Yaoyi, et al. A river stretch scale assessment of urban river habitat in the Taihu Lake Basin [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 581-589. (in Chinese))
- [26] 杨少雄, 侯精明, 陈光照, 等. LID 径流控制效果对设计暴雨重现期的响应[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 93-98. (YANG Shaoxiong, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Response law of LID runoff control effect to design rainstorm return period [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 93-98. (in Chinese))
- [27] 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 Jun, WANG Chao, WANG Peifang, 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. (in Chinese))
- [28] 葛扬. 曝气条件下微生物强化砾石河床改善河水水质试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [29] 吴锋, 赵建成, 陈小刚, 等. 生物操作理论在浅水湖泊治理应用中的现状与展望[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(6): 158-160. (WU Feng, ZHAO Jiancheng, CHEN Xiaogang, et al. Application status and prospects of biomanipulation in shallow lake remediation [J]. Environmental Science and Management, 2016, 41(6): 158-160. (in Chinese))
- [30] 李晓东. 河流生态设计思考: 以新加坡·南京生态科技岛为例[J]. 水利规划与设计, 2015(6): 48-51. (LI Xiaodong. A thought on river ecological design: take Singapore-Nanjing Eco Hi-tech Island as an example [J]. Water Resources Planning and Design, 2015(6): 48-51. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-09-29 编辑: 施 业)

