

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.018

非完全截污城市河道水生态修复探索与实践

陈家林^{1,2}, 王伯轩^{1,2}, 焦巨龙^{1,2}, 刘兵^{1,2}, 仝启杰^{1,2}

(1. 北京首创大气环境科技股份有限公司, 北京 100044; 2. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 水生态修复措施常以控源截污为前提,协同发挥“外拦截、内降解”的净水效能,是水环境治理的重要举措。县级城市控源截污基础工作往往不够完善,需要在非完全截污条件下开展生态修复工作,这无疑是城市河道生态修复工作的重要挑战。本文聚焦瑞昌市排污渠生活污水直排问题,探讨排污支渠和灤河主河道的生态修复措施。排污渠采取生态透水坝+生态水草+曝气措施,发挥过滤拦截、接触氧化作用,有效降解直排生活污染物,为灤河水生态修复创造条件。通过内源清理、外源拦截、强化净化、系统修复措施,实现了灤河水生态系统修复及水质提升的目标。

关键词: 非完全截污; 水生态修复; 城市河道; 生态透水坝

中图分类号: X522 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0123-07

Exploration and Practice of Urban River Water Ecological Restoration Project under Incomplete Sewage Interception

CHEN Jialin^{1,2}, WANG Boxuan^{1,2}, JIAO Julong^{1,2}, LIU Bing^{1,2}, TONG Qijie^{1,2}

(1. Beijing Capital Air Environmental Science & Technology Co. Ltd., Beijing 100044, China;
2. Beijing Capital Eco-Environment Protection Group Co. Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: Water ecological restoration measures often prioritize source control and pollution interception, synergistically enhancing water purification through external interception and internal degradation, serving as a crucial strategy in water environment management. However, the foundational work of source control and pollution interception in county-level cities is frequently inadequate, necessitating ecological restoration efforts under conditions of incomplete sewage interception, which undoubtedly poses a significant challenge to urban river ecological restoration. This study focuses on the issue of direct discharge of domestic sewage into drainage ditches, exploring ecological restoration measures for branch drainage canals and the main channel of the Rang River in Ruichang. By implementing the measures of ecological permeable dam + ecological water grass + aeration on the sewage channel, the filtration interception and contact oxidation effects are effectively utilized to degrade directly discharged domestic pollutants, creating conditions for the ecological restoration of the Rang River. By implementing measures such as internal cleaning, external interception, enhanced purification, and system restoration, the goal of restoring the ecological system of Rang River and improving water quality can be achieved.

Keywords: incomplete sewage interception; water ecological restoration; urban river; ecological permeable dam

我国城市河道水环境治理大都采取控源截污、清淤疏浚、清水补给、生态修复、环境整治和长效管理的系统治理措施^[1-2]。其中,控源截污和生态修复通过“外拦截、内降解”协同发挥净水作用,且大多数生态修复工艺须在河道做好控源截污的基础上才能实施。县级城市尤其是老城区、城中村、城乡接合部,往往截污管网建设进度滞后,存在污水直排河道的问题。由于场地限制、资金限制、管网建设进度与水环境达标进度要求不匹配等,通常需在未完全控源截污的条件下进行河道生态修复,这无疑成为水生态修复工程设计的难点问题。

灕河是江西省瑞昌市居民休闲游憩的重要场所,因河道原有污染物及周边居民生活污水不断排入,河道水质急剧恶化,下游麦沟断面水质稳定达标也受到威胁。本研究基于灕河排污渠生活污水直排条件,结合实际案例探讨不同生态修复工艺的选择,可为同类城市河流水环境治理工程提供参考。

1 基本情况

1.1 水系概况

灕河是瑞昌市城区自西向东的一条内河,长约 5.5 km,宽 20~50 m,平均水深 2 m,河道两侧大部分已修筑硬质护岸。灕河补水利用倒虹吸取水,从南侧的长河引水至城区,后又汇入长河。长河在灕河汇入点后继续东流,约 12 km 后流经九江麦沟省控断面,最终汇入长江。九江麦沟断面水质考核执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类标准。城区水系及排水分区见图 1。

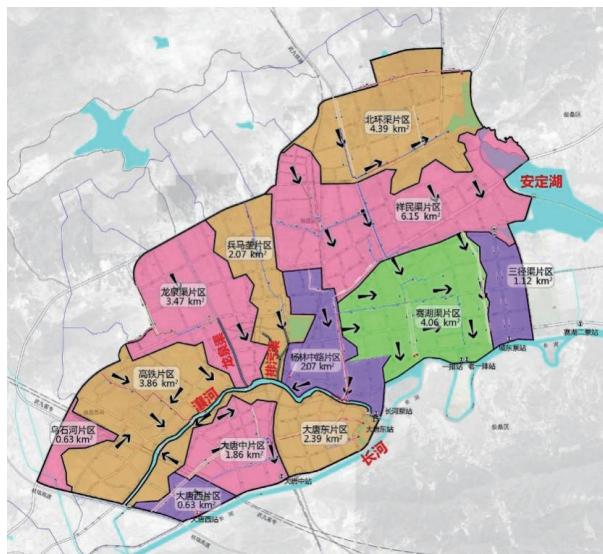


图 1 城区水系及排水分区

Fig.1 Urban water systems and drainage zones

根据《瑞昌市排水防涝专项规划(2021—2035)》,城区以南北向的武九铁路为界,整体分为东西两个排水片区,东片区汇水主要通过北环渠、祥民渠、赛湖渠等通道排入城东的安定湖和城南的长河。西片区汇水通过龙泉渠、兵马垄-人民南路渠排至灕河,最终汇入长河。灕河排水片区内龙泉渠紧邻市政道路龙泉路,雨污管网较为完善,且已完成龙泉渠 70 个排口的整治工作,兵马垄-人民南路渠多以暗渠形式穿过城中村区域,接纳了居民零星散排的生活污水,最终以明渠(又称排污渠)形式汇入灕河,排污渠长约 500 m。

1.2 水质现状

工程设计之初,在灕河及排污渠选点采集水样进行检测,采样点位布置见图 2,采样点水质见表 1。



图 2 采样点位

Fig.2 Sampling points

表 1 采样点水质数据

Tab.1 Water quality monitoring results mg/L

点位	河道	氨氮	总磷	COD	总氮	水质类别
1	灕河	0.26	0.06	21.05	1.62	Ⅳ类
2	灕河	0.20	0.08	9.00	0.71	Ⅲ类
3	灕河	3.07	0.29	17.02	5.18	劣Ⅴ类
4	灕河	3.05	0.88	18.11	5.94	劣Ⅴ类
5	排污渠	5.93	1.53	38.03	14.9	劣Ⅴ类

从表 1 可知,灕河从上游到下游水质逐步变差(从地表水Ⅲ类恶化至劣Ⅴ类),超标因子主要为氨氮和总磷,以地表水Ⅲ类水质标准计算,氨氮和总磷最大超标倍数分别为 2.07、3.40 倍。排污渠水质为地表水劣Ⅴ类,污染物浓度整体高于灕河,相较于地表水Ⅲ类水质,氨氮、总磷、COD 超标倍数分别

为4.93、6.65、0.90倍。

1.3 污染物解析

根据《瑞昌市排水防涝专项规划(2021—2035)》,灤河作为城区雨水排放的受纳水体,主要承接西片区(高铁片区、龙泉渠片区、兵马垄片区、杨林中路片区、大唐东片区)排水,故按此纳污范围进行污染物核算。

根据《瑞昌市国土空间总体规划(2021—2035年)》,灤河汇水范围内土地利用现状北部(龙泉渠片区北、兵马垄片区北)以农田、林地、园地为主,散布居住用地。北部汇水区域主要为城乡接合部,入河污染物来自居民种植、养殖活动产生的面源污染,污染物通过地面径流进入龙泉渠,最终汇入灤河。中部汇水区域(高铁片区、龙泉渠片区南、兵马垄片区南、杨林中路片区)现状以居住用地为主,入河污染物主要为城镇面源污染,同时该片区兵马垄-人民南路渠穿过城中村区域,接纳了居民零星散排的生活污水,该排污渠污染物纳入生活源污染物计算范畴。南部汇水区域(大唐东片区)以居住用地、耕地为主,入河污染物主要为城镇及农业面源污染。

结合瑞昌市排水分区情况,通过现场调研分析、水质采样分析、数据收集等,计算灤河汇水范围内城镇生活源、农业面源、畜禽养殖污染源、城镇径流及河道底泥内源等污染物的入河量。

① 城镇生活源

2023年12月,瑞昌市实施了城西污水处理厂及配套雨污管网项目建设,大大提升了城区污水收集处理能力。本次城镇生活源污染物为灤河北侧排污渠接纳的城中村居民零星散排的生活污水。根据实测排污渠水中污染物浓度结果计算污染物入河量:COD为89.88 t/a,氨氮为14.03 t/a,总磷为3.62 t/a,总氮为35.24 t/a。

② 农业面源

根据《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》可知,瑞昌市种植业中每年农作物播种过程氮磷排放(流失)系数分别为:总氮6.682 kg/hm²、氨氮0.950 kg/hm²、总磷0.860 kg/hm²,查阅相关资料及文献^[3],考虑项目区实际情况,每年农作物播种过程COD排放(流失)系数分别为总氮10 kg/亩(150 kg/hm²),农业面源污染物入河系数取0.2。灤河周边农作物种植面积约18.37 hm²,由此计算得到农业

面源污染物入河量:COD为2.81 t/a,氨氮为0.01 t/a,总磷为0.01 t/a,总氮为0.09 t/a。

③ 畜禽养殖污染源

根据《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》,瑞昌市规模化养殖生猪排污系数:COD为69.111 kg/头、氨氮为1.542 kg/头、总磷为1.327 kg/头、总氮为5.551 kg/头;牛的排污系数:COD为1288.153 kg/头、氨氮为7.655 kg/头、总磷为5.196 kg/头、总氮为32.189 kg/头。参考《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001),将羊的养殖量换算为猪的养殖量(3只羊换算成1头猪)。考虑项目区实际情况,畜禽养殖污染物入河系数取0.1。

据统计,灤河周边生猪养殖数量为4650头、牛为332头,由此计算得到畜禽养殖污染物入河量:COD为74.90 t/a,氨氮为0.97 t/a,总磷为0.79 t/a,总氮为3.65 t/a。

④ 城镇径流

城镇降雨径流污染负荷是指一场降雨或多场降雨所引起的径流排放污染物总量。由于地表径流排放污染负荷的随机性使单次降雨径流污染负荷的代表性很差,所以通常采用年径流污染负荷。

瑞昌市紧邻武汉市,降雨条件相似,故径流平均浓度(EMC_s)取值参考李立青等^[4]在武汉市城区的研究数据,径流污染物平均COD为233.3 mg/L,氨氮为5.75 mg/L,总磷为2.07 mg/L,总氮为16.03 mg/L。根据灤河周边城市下垫面特征,城市综合径流系数取0.4,由此计算得到径流污染物入河量:COD为171.91 t/a,氨氮为4.24 t/a,总磷为1.53 t/a,总氮为11.81 t/a。

⑤ 底泥内源

底泥沉积物是水体中营养物质最大的源和库。底泥沉积物-水界面间进行频繁的物质交换,主要分为沉积和释放两个过程。河道水体污染物在水体与底泥中处于吸附解吸平衡过程,当上覆水水质变化时,平衡被打破,若河道实现清水补给或换水后,底泥污染物会向上覆水释放;当河道因外源污染汇入而水质恶化,水体污染物会向底泥转移。作为内源污染,底泥释放会对水质造成二次污染,甚至破坏河道水生态环境。因此,在计算污染物时,尽可能考虑底泥内源污染释放的污染物。

各地底泥污染物释放扩散通量存在一定差异,本研究选用的数据来自江西省及周边地区的研究

结果,参考相关研究^[5-7]结果并结合灤河水质现状,灤河底泥污染物向水体中扩散通量COD为252.49 mg/(m²·d),氨氮为17.12 mg/(m²·d),总磷为15.23 mg/(m²·d),总氮为20.02 mg/(m²·d),由此计算得到底泥内源污染物排放量:COD为16.37 t/a,氨氮为1.37 t/a,总磷为1.61 t/a,总氮为1.22 t/a。

⑥ 污染物汇总

灤河入河污染物汇总见表2,其中污染物贡献占比较大的为城镇生活源和城镇径流污染。

表2 入河污染物汇总

Tab.2 Summary of pollutants entering the river

项目	COD	氨氮	总磷	总氮
城镇生活源	89.88	14.03	3.62	35.24
农业面源	2.81	0.01	0.01	0.09
畜禽养殖污染源	74.90	0.97	0.79	3.65
城镇径流	171.91	4.24	1.53	11.81
底泥内源	16.37	1.37	1.61	1.22
合计	355.87	20.62	7.55	52.01

1.4 水环境容量计算

本研究中河道为小型河流,选择零维模型进行分析,同时考虑水体自净能力。根据质量守恒和概化条件,构建河流水环境容量计算模型^[8]:

$$M = Q(c_s - c_0) + KVC_s + q(c_s - c_q) \quad (2)$$

式中: M 为水域纳污能力,g/s; Q 为起始断面的入流流量,m³/s; c_0 为起始断面的水质浓度,mg/L; q 为旁侧入流量,m³/s; c_q 为旁侧入流的水质浓度,mg/L; c_s 为水体的水质控制目标,mg/L; V 为计算水域的水体体积,m³; K 为污染物综合降解系数,s⁻¹。

根据灤河河道的基本情况,河水流量与污水流量之比为13.82,同时不需考虑污水进入水体的混合距离,相应参数选择见表3。

表3 水环境容量计算参数

Tab.3 Calculation parameters for water environmental capacity

点位	流量/(m ³ /s)	污染物浓度/(mg/L)		
		COD	氨氮	总磷
上游断面	1.040	17	3.07	0.29
排污口	0.075	38	5.93	1.53
控制断面		20	1.00	0.20

污染物综合降解系数采用国家环境规划院对容量测算的要求值,同时参考与本研究中河道宽

度、流速、污染物浓度等条件近似的研究结果^[8],确定COD取0.2 d⁻¹,氨氮、总磷取0.1 d⁻¹,经计算得出灤河水环境容量:COD为888.07 t/a,氨氮为-58.53 t/a,总磷为-1.76 t/a。

1.5 污染物削减任务量

根据入河污染物总量及水环境容量数据,计算得到灤河污染物削减任务量:氨氮为79.15 t/a,总磷为9.31 t/a。

1.6 环境问题分析

灤河流经瑞昌市城区,由于城区发展较快,河流沿岸实施了硬质护岸建设工程。城区的建设工程改变了原有河道完整的生态岸线,在一定程度上削弱了对沿岸面源污染的阻控能力。从灤河水质变化情况看,排污渠的汇入对灤河下游水质产生较大影响,致使原本上游地表Ⅲ~Ⅳ类水质大幅降至劣Ⅴ类,加剧了下游长河省考断面水质超标风险。因此,在灤河水体生态修复过程中,首先要关注排污渠这一水量较大、水质较差的重要污染源。在排污渠水质得到有效提升后,再对灤河水体进行水生态修复,才能有效解决灤河水质恶化的问题。

2 治理思路

灤河污染物贡献率较大的是排污渠城镇生活源和城镇径流污染。生态修复的重点是对排污渠进行污染治理,通过建设生态透水坝局部抬高坝前水体深度,营造缓冲区,延长水力停留时间,促进水中泥沙及营养盐的沉降,同时,布设曝气增氧设备和碳素纤维生态草,依靠生态水草较高的吸附性与生物亲和性,形成黏着性活性生物膜,通过微生物的降解作用净化排污渠水质。解决非完全截污条件下高污染负荷污水入河的问题后,再对河道进行水生态修复。

灤河河道生态修复技术路线见图3。主要包括:对河道进行基底清理和修复,清除沉积多年的底泥,构建良好的底质环境;针对河道水体流动性差、水体透明度低的问题,布设曝气增氧设备,增加水体扰动,补充水体溶解氧,提高水体透明度。在水体水质提升后,逐步进行水生态系统恢复与构建,恢复水体自净能力,降解城镇径流污染物及其他污染物。通过构建“外拦防、内净化、全方位、高效率”的河道污染物净化体系,达到多重拦防、高效净化、长治久清的治理目的。



图3 水生态修复技术路线

Fig.3 Technical roadmap for water ecological restoration

3 水生态修复方案

3.1 排污渠

排污渠治理措施见图4。结合生态透水坝的净化机理和应用场景,选择在排污渠内修筑透水坝,在坝前水深较深区域布设生态水草,结合曝气增氧设备,共同发挥排污渠内污染物降解作用。设置生态透水坝2座,坝高0.6 m,坝长10 m。坝前布置太阳能曝气机2台,碳素纤维生态水草3 200 m²。

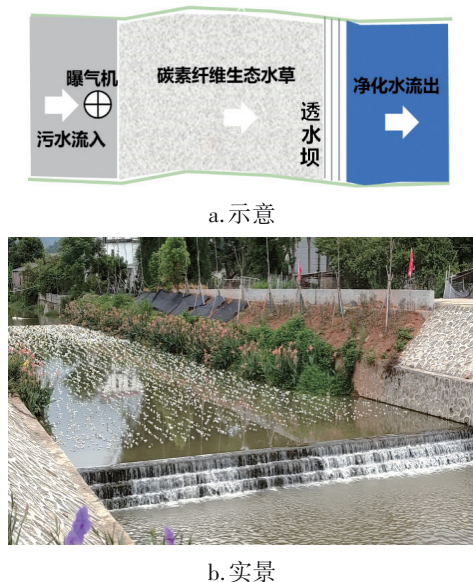


图4 排污渠治理措施

Fig.4 Governance measures of sewage discharge channel

3.2 主河道

① 底质改良

采用干挖底与水力冲挖相结合的方式对全河道基底清理,面积为22 hm²,平均清理厚度约40 cm,清理量约8.8万 m³。河道基底清理后,投撒底质改良菌剂,激活原有底泥环境中土著微生物的同时,再加入经过特殊驯化的微生物及其生长所需要

的营养来提高生物活性,加快底泥环境修复,修复面积约22 hm²。

② 曝气增氧

河流曝气增氧技术根据河流受到污染后缺氧的特点,利用自然跌水或人工曝气对水体复氧。结合曝气设备的主要技术参数,根据校正计算得到的氧转移速率与设备的动力效率确定设备数量。经计算,河道内共布设太阳能曝气机11台,结合河道现状及水质数据,河道上游间距500 m左右,下游重点区域间距200~300 m,曝气机布设于河道断面中心位置,充分发挥扰动水体及增氧的作用。

③ 水生态系统

根据灤河现状平均水深2 m的建设条件,适宜在河道内实施水生态修复措施。根据营养平衡、生态平衡原则,以及主导生态因子、生态适应性、物种耐性、生态位、生物多样性等生态学原理,对先锋物种选择及动、植物群落的水平空间和垂直空间进行优化设计。根据生态系统食物链中生产者与消费者、初级生产与次级生产的情况选择水生动物种类和数量,逐步恢复挺水植被、沉水植被及水生动物,提高水体的自净能力。

河道内沉水植被按照60%的覆盖度进行种植,面积约13.2 hm²,选择苦草、眼子菜、黑藻、狐尾藻等,种植密度30株/m²;挺水植物种植按照20%河道面积设计,面积约4.4 hm²,对于部分不具备种植条件区域,可利用浮体材料构建生态浮床,选择黄花鸢尾、香蒲、美人蕉、千屈菜等,种植密度20~25株/m²;浮叶植物选用睡莲,结合实际景观需求在重要节点布置,种植面积约2 750 m²。

水生动物选择中华圆田螺、方形环棱螺等螺类,背角无齿蚌、刻纹蚬等贝类和鲢鱼、鳙鱼、乌鳢、泥鳅等鱼类,共投放5 500 kg。

4 目标可达性分析

4.1 理论削减量

本研究中的生态修复措施包括排污渠的生态透水坝+碳素纤维生态水草和主河道的底质改良工程、水生态系统构建等,污染物削减量能力参数均在以往研究或工程实践中被证实。其中,生态透水坝对污染物的去除率维持在30%~80%^[9~11],本研究生态透水坝+碳素纤维生态水草措施的协同净化效率取30%。河道清淤底质改良工程对污染物的

去除效率均选取以往研究中的低值^[12-13],COD、氨氮、总氮的削减比例分别为 20%、60% 和 30%。水生态系统污染物削减能力参照《人工湿地水质净化技术指南》(环办水体函〔2021〕173 号)中Ⅲ区参数选

取,计算得到具体污染物削减量见表 4。对比本项目污染物削减任务量及工程实施可削减污染物量可知,灤河工程措施污染物削减量均大于目标削减量,故工程目标可以实现。

表 4 工程量及污染物削减量
Tab.4 Details of engineering quantities and pollutants reduction amount

工程内容	工程量/m ²	污染物削减比例或能力			污染物削减量/(t/a)		
		COD	氨氮	总磷	COD	氨氮	总磷
生态透水坝	50	30%	30%	30%	26.96	4.21	1.09
碳素纤维生态水草	3 200						
底质改良工程	220 000	20%	60%	30%	114.86	60.03	5.74
沉水植物	132 000	5.0 g/(m ² ·d)	0.4 g/(m ² ·d)	0.08 g/(m ² ·d)	240.90	19.27	3.85
挺水植物	44 000	4.0 g/(m ² ·d)	0.3 g/(m ² ·d)	0.06 g/(m ² ·d)	64.24	4.82	0.96
浮叶植物	2 750	4.0 g/(m ² ·d)	0.3 g/(m ² ·d)	0.06 g/(m ² ·d)	4.02	0.30	0.06
小计					450.98	88.63	11.70

4.2 实际工程效果

目前本工程还在实施中,排污渠污染及河道底泥内源污染已得到有效控制,水生态系统正在逐步恢复。2025 年 1 月—10 月,灤河水质监测数据显示,COD 为 15~18 mg/L,氨氮为 0.12~0.99 mg/L,总磷为 0.05~0.13 mg/L,满足地表水Ⅲ类水质要求,达到预期目标。

5 结语

传统以“控源截污、内源治理、生态修复”为主线的治理思路固然能实现河道系统治理目标,但在基础设施建设进度滞后的县城,以控源截污为主旨的管网系统建设工程更易因投资大出现“水土不服”,因此在实现水质目标的同时,更要“花小钱,办大事”。本项目属于典型的非完全截污条件下的河道水生态修复项目,如何处理居民零星生活污水成为破局之举。在不具备完全控源截污的前提条件下,利用排污渠的生态空间,构建“生态透水坝+生态水草+曝气净化”的治理体系,降低直排污水污染负荷,为灤河整体的生态修复创造条件。

城市河道水生态修复是一项复杂的系统工程,以单一的工艺或措施很难达到治理目标。通过“选配组合工艺+优化技术措施+控制工程投资”的组合拳,有望实现生态效益与经济效益的协同。本项目作为在非完全截污条件下城市河道水生态修复工程设计的一次探索,在低投资约束下,实现了水质提升目标,可为同类项目设计提供参考。

参考文献:

[1] 王晨,李婧,赖文蔚,等. 海口市美舍河水环境综合治理系统方案[J]. 中国给水排水, 2018, 34 (12): 24-30.
WANG C, LI J, LAI W W, et al. Integrated water environment remediation approach of Meishe River in Haikou City [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (12): 24-30 (in Chinese).
[2] 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 (in Chinese).
[3] 耿润哲,殷培红,周丽丽,等. 关于农业面源污染物入河系数测算技术路线与关键方法的探讨[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44 (2): 26-30.
GENG R Z, YIN P H, ZHOU L L, et al. Reviews: assessment and calculation for the pass through rate of agricultural diffuse sources pollution in national scale [J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44 (2): 26-30 (in Chinese).
[4] 李立青,尹澄清,何庆慈,等. 武汉市城区降雨径流污染负荷对接纳水体的贡献[J]. 中国环境科学, 2007 (3): 312-316.
LI L Q, YIN C Q, HE Q C, et al. Contribution of pollution load of storm runoff in urban areas of Hanyang, Wuhan City on the receiving water [J]. China Environmental Science, 2007(3): 312-316 (in Chinese).

- [5] 张曼,殷鹏,支鸣强,等.太湖藻型及草型湖区底泥内源污染及释放机制研究[J].环境科学学报,2023,43(6):247-257.
ZHANG M, YIN P, ZHI M Q, et al. Characteristics and release mechanism of endogenous pollution in algae- and grass-dominated zones in Lake Taihu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43 (6) : 247-257 (in Chinese).
- [6] 林华实.水体沉积物中的氮磷释放规律研究[D].广州:广东工业大学,2011.
LIN H S. The Research of Release Law of Nitrogen and Phosphorus in Sediment [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2011 (in Chinese).
- [7] 韩宁,郝卓,徐亚娟,等.江西香流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献[J].环境科学,2016,37(2):534-541.
HAN N, HAO Z, XU Y J, et al. Nitrogen release from sediment under dry and rainy season alternation and its contribution to N export from Xiangxi watershed in Jiangxi Province [J]. Environmental Science, 2016, 37 (2):534-541 (in Chinese).
- [8] 孙晖.河道水环境容量及污染负荷削减量的核算[J].有色冶金节能,2018,34(2):46-50.
SUN H. Calculation of river water environment capacity and reduction amount of pollution load [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2018, 34 (2) : 46-50 (in Chinese).
- [9] 刘然,李绍飞,王冰,等.人工水草技术对北运河城区段水质净化效果分析[J].水处理技术,2023,49(1):113-117.
LIU R, LI S F, WANG B, et al. Analysis on water purification effect of artificial aquatic plant technology in the urban section of North Canal [J]. Technology of Water Treatment, 2023,49(1):113-117 (in Chinese).
- [10] 李明泽,崔康平,郭志,等.组合生物技术对黑臭河道治理的中试研究[J].水处理技术,2021,47(6):122-125.
LI M Z, CUI K P, GUO Z, et al. Pilot-scale study of combined biotechnology for treatment of black and odorous rivers [J]. Technology of Water Treatment, 2021,47(6):122-125(in Chinese).
- [11] 董慧峪,王为东,强志民.透水坝原位净化山溪性污染河流[J].环境工程学报,2014,8(10):4249-4253.
DONG H Y, WANG W D, QIANG Z M. In-situ remediation of polluted hilly river with permeable dams [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8 (10) : 4249-4253(in Chinese).
- [12] 丁睿,缪璐,林燕.城市骨干河道湿式清淤实践与探索:以南京市运粮河为例[J].江苏水利,2024(12):13-15,19.
DING R, MIAO L, LIN Y. Practice and exploration of wet dredging of urban backbone rivers: taking the Yunliang River in Nanjing as an example [J]. Jiangsu Water Resources, 2024(12):13-15,19(in Chinese).
- [13] 李红静,陈海波,陆海明,等.环保绞吸船清淤作业过程对湖泊水环境的影响[J].环境工程学报,2023,17(12):3897-3905.
LI H J, CHEN H B, LU H M, et al. Research on the impact of eco-friendly cutter suction dredger's sediment removal operation on lake water environment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17 (12):3897-3905(in Chinese).

作者简介:陈家林(1990—),男,河南南阳人,硕士,工程师,主要研究方向为流域治理与生态修复。

E-mail:836288920@qq.com

收稿日期:2025-12-10

修回日期:2026-01-20

(编辑:衣春敏)