

平原河网地区典型城镇河流修复成效初探

金毅麟¹, 黄天舒¹, 吴建斌², 黄瑾³, 陈燕³, 杨昌涛¹, 李建华¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 苏州市吴江区水务局, 江苏 苏州 215200; 3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200135)

摘要:本研究以苏州吴江区桃源镇的问津河为研究对象, 通过构建适用于平原河网地区的河流综合评价指标体系, 对该典型河流修复前后的健康情况开展了评估。结果显示, 修复工程实施后, 底质健康值从0.577升到0.922, 水生植被健康值从0.537升到0.611。然而, 问津河水质健康值却呈现略微下降, 从0.363降到0.351, 底泥重金属浓度与区域背景值基本相当。河畔陆生植被健康值从0.899降到0.782, 特别是加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)呈现出入侵加剧趋势。综合评估结果显示, 问津河生境综合健康指数呈现改善迹象, 从2018年的0.592上升为2019年的0.645, 表明河道清淤措施确实能够明显改善底质健康状况, 但在外源持续输入的情况下, 其对河水水质的改善作用是有限的, 改善时效也是短暂的。在河流修复过程中, 还需要加强对外来种入侵风险的防范, 尤其需要重视对加拿大一枝黄花等草本入侵植物的管控。

关键词: 平原河网; 河流健康修复; 清淤; 评价指标体系

中图分类号: X524

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.05.013

Investigation of Typical Urban River Restoration in Plain River Network Area

JIN Yilin¹, HUANG Tianshu¹, WU Jianbin², HUANG Jing³, CHEN Yan³, YANG Changtao¹, LI Jianhua¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Water Conservancy Bureau of Wujiang District, Suzhou 215200, China; 3. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute, Shanghai 200135, China)

Abstract: The current study was carried out in a typical river of Wujiang District in Suzhou City. A comprehensive river evaluation index system that was suitable for plain river network areas was established and was applied to evaluate the health of the river after restoration. The results showed that the sediment health index increased from 0.577 to 0.922 and the macrophyte health index increased from 0.537 to 0.611 after restoration. However, the water quality health index of Wenjin River decreased from 0.363 to 0.351 after dredging, and the heavy metal concentration decreased to the regional background level. Riparian vegetation deteriorated from 0.899 to 0.782 and the river bank suffered from *Solidago canadensis* invasion. The comprehensive health index of Wenjin River was 0.592 in 2018, and 0.645 in 2019. The results indicated that the river dredging significantly improved the overall ecological health condition, especially the health of the sediment. However, the restoration effect on water quality was limited with the continuous input of external pollutants. In addition, there was a risk of alien species invasion in the river restoration process, especially the herbaceous invasive plants, such as *Solidago canadensis*.

Keywords: Plain River Network; Restoration of River Health; Dredging; Evaluation Index System

CLC number: X524

平原河网地区通常指长江中下游太湖流域及周边地区, 该区域水网密集, 河道纵横交错, 素有“鱼米之乡”的美誉。然而, 近几十年来, 平原河网地区城市化进程迅速, 以该区域典型城市苏州为例, 截至2015年, 城市化面积已经超过70%。粗放

型的增长模式给区域河流的生态健康带来了巨大的冲击和威胁, 2015年苏州市Ⅳ~Ⅴ类水质断面比重达到52.38%^[1]。河流生态系统服务功能逐渐丧失, 已经成为制约区域经济发展的重要因素, 也逐渐上升为社会主义生态文明建设和新农村建设的

收稿日期: 2019-08-29

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2016YFE0115800); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX070205); 城市河道治理及长效管理关键技术与示范(K72018086)

作者简介: 金毅麟(1992-), 男, 硕士研究生。研究方向: 水域生态修复。E-mail: 2411081880@qq.com

通信作者: 李建华(1959-), 男, 教授。研究方向: 水域生态修复。E-mail: leejianhua@tongji.edu.cn

引用格式: 金毅麟, 黄天舒, 吴建斌, 等. 平原河网地区典型城镇河流修复成效初探[J]. 环境保护科学, 2020, 46(5): 74-80.

主要矛盾,平原河网地区河流健康亟待修复和改善。

我国关于河流健康的研究起步较晚,但近年来随着“十二五”水专项和生态文明建设的大力推进,越来越多的学者就河流健康理论^[2-5]、河流健康评价方法^[6-8]等方面展开了研究。当前,平原河网地区以苏州市和嘉兴市为代表的部分区域一改往日的“工程化”措施,率先采用生态工程的理念进行河流修复。但由于平原河网地区河流特点鲜明,一方面,普遍受城镇化影响严重,部分河道“硬化”紧束且河流多为断头浜;另一方面,水动力条件不佳,河流的自净能力较差。因此,当前尚缺乏适应于平原河网地区河流的评价体系,致使河流修复在实际中成效不甚理想^[9]。本文以平原河网典型城市苏州为例,选取具有代表性的河段,建立适应平原河网地区的河流综合评价指标体系,从全方面、多角度量化分析河流修复前后的健康情况,旨在为平原地区河流修复积累实践经验并提供现实参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究选取了位于苏州吴江区桃源镇的一条村级断头河道——问津河,全长 1.28 km,河道平均宽度 15 m,河底平均高程 0.5 m 左右,水动力条件差。问津河沿线大多为林地和住宅,还有部分商铺和工厂,存在污水直排和部分河道“硬化”改造的情况,是平原河网地区典型的受城镇化影响较为严重的河流,河道底泥淤积、水质较差。地方政府基于前期末泥与水生生态调研,在 2018 年 10 月对问津河河道进行了针对性清淤,在保护现有水生植物群落的同时对入侵种进行针对性拔除,并对河岸带植物残体和垃圾进行清理,以保护优先的原则最大程度减小施工对河岸带植被的影响,最后根据需要对部分河段进行“硬化”处理。

1.2 采样及分析方法

本研究基于代表性和可操作性的原则在问津河间隔 50 m 共布设了 8 个采样点,基本涵盖全河道,见图 1。

其中,1、2 号采样点位于河岸“硬化”的河段,是早期污水直排的入口;4~7 号采样点位于人为干扰相对较少问津河南侧,3、8 号采样点位于问津河北段。采样工作分别于 2018 年、2019 年 3 月晴朗的早上展开,采集问津河修复工程实施前后的水体、底泥和底栖生物样品,并对河畔陆生植被和

水生植物群落展开调查。

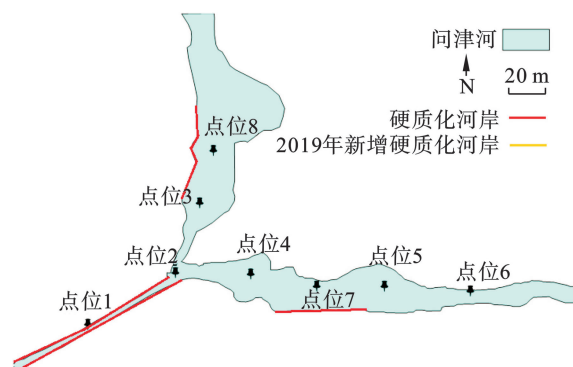


图 1 采样点示意图

1.2.1 地表水采集 现场用 YSI-EXO 多参数分析仪 (Yellow Springs Instruments, USA) 测定各样点水体中的溶解氧、电导率、水温 and pH 等水质参数。另外采集表层水样低温冷藏运回实验室,参照国标 (HJ 636-2012; GB 11893—89) 测定氮磷营养盐指标。

1.2.2 底泥沉积物采集 水样采集完毕后,用柱状采样器采集河道 0~50 cm 的底泥沉积物,分层取适量 0~20、20~40 和 40~50 cm 处的底泥,充分混合形成该样点的底泥沉积物样品。底泥样品低温保存运回实验室后经冷冻干燥、研磨过筛和混酸消解的预处理过程之后,用 ICP-MS 测定其重金属赋存特征。

1.2.3 底栖生物采集 底栖生物采集参照环保部颁布实施的《生物多样性观测技术导则-淡水底栖大型无脊椎动物 (HJ710.8—2014)》^[10]。本研究区域河流水面宽度较窄,平均宽度仅为 15 m,水深小于 3 m,因此用彼得生采泥器在各样点 1 m² 内采集,对于采集得到的样品,物种鉴定完毕后,参考江苏省底栖动物耐污值,计算 Hilsenhoff 生物指数 (HBI 指数) 进行底质状况评价^[11]。

1.2.4 水生植物群落调查 水生植物群落研究参考李伟和钟扬编译的《水生植物研究的理论和方法》^[12],采用样方法^[13]在上述的采样带内均匀设置 1 m×1 m 样方,记录样方内挺水植物名称、株数、高度、盖度、出现频度和优势种;浮叶及沉水植物使用水生植物定量夹采集,记录样方内植物物种名称、株数、株高和优势种等。分别计算相对密度、相对频度、相对盖度、重要值和 Shannon-Wiener 多样性指数等对水生植物群落状况进行评价^[14]。

1.2.5 河畔陆生植被调查 河畔陆生植被调查主要参照环保部颁布的《生物多样性观测技术导则-陆生维管植物 (HJ 710.1—2014)》^[15],在上述 8 个采

样点的两侧河岸处分别设置 50 m(平行于河流)×15 m(垂直于河流)的样带,共计 16 个。在每个样带内沿着河滩方向,均匀布点,每隔 2 m 设置一个草本样方,每隔 10 m 设置一个乔木群落样方。其中,草本样方大小 1 m×1 m,灌木样方大小 2 m×2 m~5 m×5 m,乔木样方大小为 5 m×5 m~20 m×20 m。调查记录样方中乔木的名称、高度、株数、胸径、出现频度和优势种;灌木的名称、株数/丛数、覆盖度和优势种;草本的名称、株数、高度、覆盖度、出现频度和优势种。分别计算各层次结构的植物群落重要值、Shannon-Wiener 多样性指数等对河畔陆生植被健康状况进行评价^[4]。

2 结果与讨论

2.1 河岸带物理结构

问津河河岸总长均为 1 072.1 m,河岸带“硬化”集中在 1、2 号采样点,均为渠化水泥质护岸;南侧的部分沿岸也设置了“硬化”的护岸围墙;在 3 号采样点的近住宅侧也为水泥质护岸,其余区域均为自然护岸。河流修复工程实施前,测得问津河硬化河道总长约为 374.4 m;河流修复工程实施过程中,由于东侧道路的建设的护坡要求,“硬化”河道长度有所增加,“硬化”河道总长为 378.6 m。平原河网地区普遍具有防灾的现实需求,因此问津

河修复工程实施后河道硬度有所上升,受人为干扰程度有所提高,见图 1。

2.2 水质状况恢复情况

1、2 号点位是问津河的纳污口,水体有明显异味,其余河段水体混浊但无明显异味。在修复工程实施前,除 3、5 号点位外,水体 DO 均劣于地表水 IV 类标准;而各点位水体总氮含量均劣于 IV 类水标准,沟渠段的 1、2 号点位尤为严重,属于劣 V 类水平;总磷含量除 8 号点外,也均劣于 IV 类水标准,1、2 和 4 号点位的总磷属于劣 V 类水平;氨氮除 5 号点以外,也均远劣于 IV 类水标准。在问津河修复工程实施前的 2018 年 3 月采样期间,问津河水体整体属于劣 V 类水平,为典型的城镇黑臭河道。

修复工程实施后,水体 DO 得到大幅改善,见图 2,主要得益于河道中植物残体的清理和底泥疏浚,有机物分解消耗的氧量减少,DO 含量得到提升;水体溶解性总氮含量有所降低,但总氮、透明度则未有明显改善;总磷、溶解性总磷含量相比修复前不降反升,这与水生植物群落尚未得到恢复,对水体中磷的固定程度降低有关^[16]。2019 年 3 月采样期间,问津河偷排现象并未得到有效改善,河流水体在修复工程实施之后依旧整体属于劣 V 类水平,水体黑臭状况并未通过清淤等方式得到实质性改善。

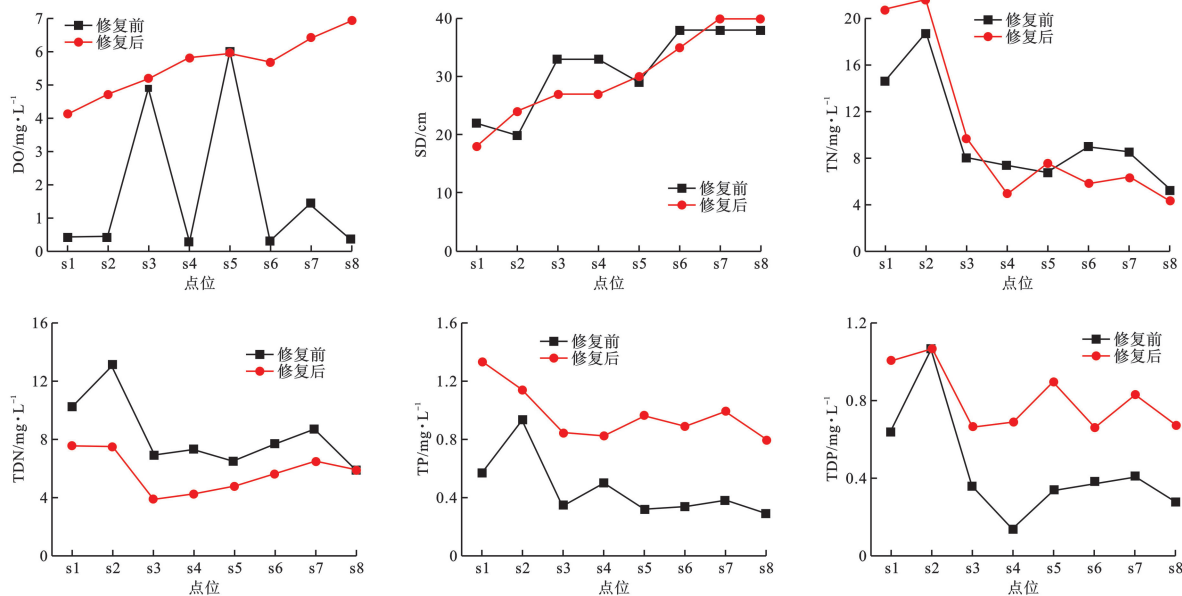


图 2 问津河各样点修复工程实施前后水质状况变化

2.3 底质恢复状况

问津河底泥疏浚前,底泥中砷、镉、铬、汞、铅和锌含量均远高于区域背景值,见图 3,主要是受到

附近印染厂与纺织厂废水直排所致。其中,纳污口(1、2 号采样点)处的重金属含量明显高于其他区域。

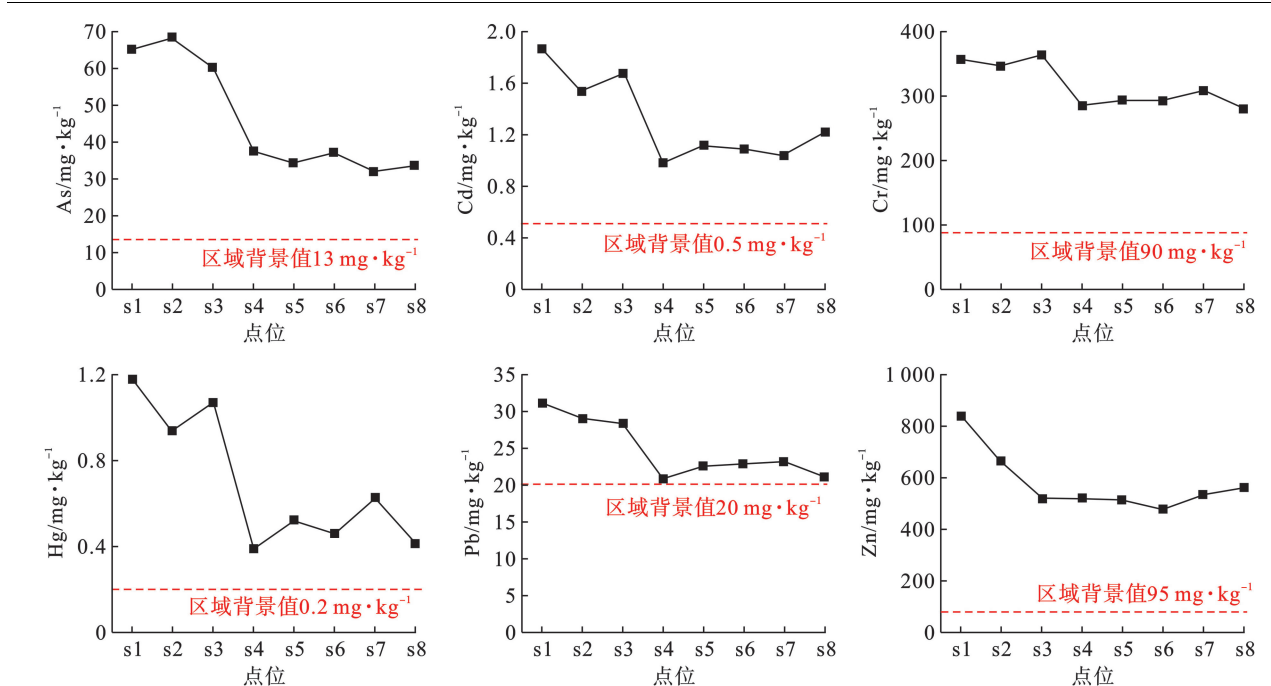


图 3 问津河修复工程实施前各样点底泥重金属含量与区域背景值对比

2018 年 10 月对问津河实施底泥疏浚后,于次年 3 月重新采集问津河底泥样品,各样点混合底泥样品测得的重金属含量明显下降,底泥重金属风险较修复工程实施前有明显好转。2019 年初在清淤修复工程完成后,底泥中砷、镉、铬、汞、铅和锌重金属含量基本与区域背景值相当,见表 1,底质状况明显改善,底泥重金属释放风险大大下降。

2.4 底栖生物恢复状况

问津河修复工程实施前,2018 年 3 月采样共获得底栖生物 7 科 10 属 10 种,见表 2。其中 3 种环节动物,6 种软体动物,1 种节肢动物。修复后,

2019 年 3 月采样共获得底栖生物 8 科 12 属 12 种。其中 3 种环节动物,6 种软体动物,3 种节肢动物。

表 1 修复工程实施前后问津河底泥重金属含量与区域背景值对比

指标	修复前混合样品浓度	修复后混合样品浓度	区域背景值
As	46.08	3.2	13
Cd	1.32	0.62	0.5
Cr	315.15	68.3	90
Hg	0.70	ND	0.2
Pb	24.88	23.1	20
Zn	577.59	113.06	95

表 2 问津河修复工程实施前后底栖生物

序号	科	属	种	拉丁学名	修复前		修复后	
					出现点位	个数	出现点位	个数
1	颤蚓科	尾鳃蚓属	苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiurasonwerbyi</i>	2	1	2	5
2	颤蚓科	水丝蚓属	霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilushoffmeisteri</i>	1、2、3	200+	1、2、3	200+
3	盘螺科	盘螺属	—	<i>Discus</i>	5、6、7、8	17	5、6、7、8	17
4	田螺科	田螺属	中国圆田螺	<i>Cipangopaludinachinensis Gray</i>	4、5、7	26	4、5、7	43
5	田螺科	河螺属	—	<i>Rivularia</i>	4、5、6、7	12	4、5、6、7	19
6	蜆科	蜆属	河蜆	<i>Corbicula fluminea</i>	5	4	5	3
7	田螺科	环棱螺属	方形环棱螺	<i>Bellamya quadrata</i>	3、4、8	8	3、4、8	11
8	摇蚊科	摇蚊属	红裸须摇蚊	<i>Prosilocerusakamusi</i>	1、2	58	1、2	38
9	肋鳃科	短沟鳃属	—	<i>Semisulcospira</i>	3	20	3	47
10	带丝蚓科	带丝蚓属	—	<i>lumbricus</i>	2	2	2	12
11	螯虾科	原螯虾属	克氏原螯虾	<i>Procambarusclarkii</i>	—	—	6、7	33
12	负子蝻科	田鳖属	田鳖幼虫	<i>Kirkaldyiadeyrollei</i>	—	—	8	1

注：部分物种只能鉴定到属。

问津河采得的软体动物和节肢动物属于耐污能力较强的物种^[17],底栖动物群落的空间分布特征与水质的空间分布特征具有良好的对应性。水质空间变化导致环节动物和软体动物、节肢动物的空间分布存在一定交错性^[18]。耐污性较强的水丝蚓作为优势种群主要分布在污染重、溶解氧低的渠道化河道。查阅江苏省大型底栖动物耐污值,可计算问津河修复工程实施前后的底栖生物 BI 指数,得到 2018 年修复工程实施前问津河 BI 指数为 8.62,2019 年修复工程实施后 BI 指数为 8.54,表明水体均属于中污染状态。清淤后问津河软体动物种群数量有所上升,可能是淤泥被清除后较坚硬的底质比较适宜软体动物生存,水体污染改善程度有限。

2.5 水生植物恢复情况

在问津河修复工程实施前,采样期间共采得挺水植物 2 科 3 属 3 种,浮叶植物 1 科 1 属 1 种,漂浮植物 2 科 2 属 2 种,沉水植物 1 科 1 属 1 种。菰为优势度最高的物种,入侵物种空心莲子草优势度仅次于菰,见表 3。

表 3 修复工程实施前 (2018 年) 水生植物优势度

植物种名	相对盖度	相对密度	相对频度	物种重要值
菰	0.424 2	0.317 9	0.357 1	0.366 4
空心莲子草	0.242 4	0.331 1	0.285 7	0.286 4
芦苇	0.181 8	0.165 6	0.142 9	0.163 4
菖蒲	0.121 2	0.119 2	0.142 9	0.127 8
黑藻	0.030 3	0.066 2	0.071 4	0.056 0

在问津河修复工程实施前,水生植物,尤其是挺水植物十分茂密,群落结构较为完整,挺水植物、浮叶植物和沉水植物盖度在样方当中超过 95%,占总水面面积也超过 41%,这为水生动物和鸟类营造了良好的栖息地,同时也对水体中的重金属和营养盐有富集、固定作用。整体而言,修复工程实施前问津河水生植物群落结构较为完整,但空心莲子草入侵状况较为严峻。

问津河修复工程实施后,共采得挺水植物 3 科 4 属 4 种,浮叶植物 1 科 1 属 1 种,漂浮植物 2 科 2 属 2 种,沉水植物 2 科 2 属 2 种。如表 4,菰依然为优势度最高的物种;入侵物种空心莲子草在人工拔除之后有所减少,但依然在河道北部占据一定优势地位,优势度依旧仅次于菰;慈姑成为重要度第 3 的水生植物,可能为附近经济作物逸生。在经历了河道清淤的剧烈干扰之后,2019 年问津河水生植

物种群并未完全恢复,北部受干扰较小,区域生境依然较好;南部受干扰较大,挺水植物种群远远未恢复至清淤之前水平,水生植物占总水面面积仅恢复至 22%;总体而言,水生植物生境状况有较大退化,空心莲子草入侵趋势仍然较为严重。

另外,问津河在修复工程实施前 Shannon-Wiener 多样性指数为 1.446,修复工程实施后 Shannon-Wiener 多样性指数为 1.836,反映了问津河修复工程实施后水生植物生物多样性有所改善,清淤以及对空心莲子草的针对性拔除对水生植物群落重建中物种多样性的改善起到了正面作用。

表 4 修复工程实施后 (2019 年) 水生植物重要值

植物种名	相对盖度	相对密度	相对频度	物种重要值
菰	0.307 7	0.247 3	0.230 8	0.261 9
空心莲子草	0.205 1	0.268 8	0.153 8	0.209 3
慈姑	0.102 6	0.096 8	0.230 8	0.143 4
菖蒲	0.128 2	0.107 5	0.153 8	0.129 9
芦苇	0.153 8	0.150 5	0.076 9	0.127 1
眼子菜	0.051 3	0.064 5	0.076 9	0.064 2
黑藻	0.051 3	0.064 5	0.076 9	0.064 2

2.6 河畔陆生植被状况

问津河修复工程实施前后,乔木并未遭到破坏,2018 和 2019 年群落调查均获得乔木 11 科 14 属 15 种,樟树和桑树是最高优势物种。

问津河修复工程实施前,群落调查共获得灌木 3 科 4 属 4 种。7 号采样点作为清淤施工区域,施工过程中对河岸带灌木造成了巨大破坏,至 2019 年 3 月,7 号采样点的灌木群落都未能恢复,但其他点位灌木群落结构均未有变动。

草本植物中,本研究重点关注维管束草本。修复工程实施前,共获得维管束草本植物 33 科 52 属 56 种,样方中植被覆盖率达 83.3%,Shannon-Wiener 多样性指数为 3.641;修复工程实施后,共计得 30 科 46 属 51 种,植被覆盖率为 67.7%,Shannon-Wiener 多样性指数为 3.404。问津河修复工程实施前后物种丰富度基本持平,但由于修复实施过程对 6、7 号采样点的草本植被造成较大破坏,因而覆盖率和生物多样性都有所下降。另外,问津河修复工程实施后,草本植被群落外来种入侵状况加剧,外来入侵种加拿大一枝黄花、马缨丹和酢浆草生态位扩张,2019 年加拿大一枝黄花在 6、7 号采样点样

方中面积占比超过 90%, 成为绝对优势种, 挤占本土物种空间; 而马缨丹也从偶见变为常见种, 河流修复施工过程对原生草本群落结构的破坏为外来种的入侵创造了机会^[19], 值得警惕。

2.7 河岸健康综合评价

充分考虑平原河网地区河流特征, 从水质状

况、底质状况、河河畔陆生植被状况、河岸带物理状况、水生植被状况及其他生物状况共 5 个准则层选取 16 个指标建立生态系统健康综合指数 (EHIC) 对河流健康状况进行评价, 准则层采取专家打分法确定权重, 指标层由熵值法确定的权重见表 5。

表 5 河流生态系统健康评价体系层次以及其权重

目标层A	准则层B (权重)	指标层C	指标层C权重	
			C层指标相对于B层权重	C层指标相对于A层权重
河流生态系统综合指数 (EHCI)	岸带物理状况 B1 (0.209 0)	河道硬度C11	0.402 2	0.084 1
		河流弯曲度C12	0.398 2	0.083 2
		亲水设施C13	0.199 6	0.041 7
	水质状况 B2 (0.208 0)	溶解氧C21	0.040 4	0.008 4
		总氮C22	0.105 9	0.022 0
		总磷C23	0.448 1	0.093 2
		透明度C24	0.133 7	0.027 8
		氨氮C27	0.271 9	0.056 6
	底质状况 B3 (0.174 3)	铬C31	0.133 7	0.023 3
		镉C32	0.146 7	0.025 6
		汞C33	0.247 8	0.043 2
		铅C34	0.188 9	0.032 9
		锌C35	0.169 0	0.029 5
		砷C36	0.113 9	0.019 9
	河畔陆生植被状况 B4 (0.185 5)	河岸带物种丰富度C41	0.468 8	0.087 0
		覆盖率C42	0.167 8	0.031 1
		本地物种指数C43	0.181 7	0.033 7
		入侵物种指数C44	0.181 7	0.033 7
	水生植物状况及底栖 B5 (0.223 1)	水生植物物种丰富度C51	0.357 9	0.079 8
		覆盖率C52	0.109 8	0.024 5
		本地物种指数C53	0.160 6	0.035 8
		入侵物种指数C54	0.160 6	0.035 8
		底栖动物HBIC61	0.211 1	0.047 1

通过计算可得到各准则层健康指数, 见表 6, 问津河 2018 ~ 2019 年修复工程实施前后, 河岸带物理状况由于更多人为扰动而稍有降低。水质状况则稍有下降, 虽然溶解氧有所上升而总氮、氨氮有所下降, 总磷却出现了一个明显的上升。清淤之后底质状况得到大幅度改善, 底质的生态风险得到控制。由于部分区域的河畔陆生

植被在清淤过程中遭到清理导致了覆盖度降低, 且出现了加拿大一枝黄花和马缨丹入侵的现象, 因此河畔陆生植被的健康指数有所下降。水生植物和底栖动物方面, 清淤过程附带去除了部分空心莲子草, 且出现了此前并未发现的挺水植物和沉水植物物种, 本地物种指数和多样性指数有所上升。

表 6 准则层综合健康指数

准则	2018年	2019年
岸带物理状况B1	0.622 8	0.621 6
水质状况B2	0.363 0	0.350 7
底质状况B3	0.573 3	0.922 2
河岸带植被状况B4	0.899 5	0.782 2
水生植物状况B5	0.537 1	0.611 4

综合而言,2018年问津河生境综合健康指数为0.592,2019年问津河健康指数则达到了0.645,问津河的清淤、清理等修复措施确实达到了一定效果,改善了河流健康状况。

3 结论与展望

本文以平原河网地区受城镇化影响的典型河段为例,通过对比问津河修复前后的河流健康恢复状况后发现:河道清淤确实能够明显改善底质健康状况,但在不能完全阻断外源污染输入的情况下,清淤对改善河水水质的作用是有限的。由于清淤可能破坏水生植物群落,甚至削弱河流生态系统的自净能力,从而减少对水体中营养盐、重金属等污染物的固定作用,存在加剧水质恶化的风险。因此,在清淤过程中,加强对河岸带水生植物群落的保护尤为重要。在河流缓冲带修复过程中,还存在外来种入侵的风险,需要格外重视对加拿大一枝黄花等草本入侵植物的管控。

参考文献

- [1] 周昭英. 上海地区生态河岸带的理论与构建[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [2] 董哲仁. 生态水工学——人与自然和谐的工程学[J]. 水利水电技术, 2003(1): 14-16.
- [3] 吴浓娣, 刘小勇, 陈健, 等. 河湖健康管理内涵与标准规范建设研究[J]. 水利发展研究, 2019, 19(8): 7-9, 13.
- [4] 李晓阳, 丰华丽, 陆海明. 基于山水林田湖草系统的河流健康研究初探[J]. 水利发展研究, 2018, 18(6): 53-56.
- [5] 郭二辉, 杨喜田, 陈利顶. 河岸带生态功能认知及河流景观偏好的调查研究[J]. 中国园林, 2017, 33(1): 95-99.
- [6] 刘勇丽, 刘录三, 汪星, 等. 水生植物在河流健康评价中的应用研究进展[J]. 生态科学, 2017, 36(3): 207-215.
- [7] 邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 等. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 993-1001.
- [8] 章晶晶, 陈波, 卢山. 基于生态文化健康的城市河流健康评价指标体系探索[J]. 浙江农业科学, 2018, 59(4): 575-577.
- [9] 陈丙法, 黄蔚, 陈开宁, 等. 河道生态护岸的研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 74-77.
- [10] 中华人民共和国环境保护部. 生物多样性观测技术导则-淡水底栖大型无脊椎动物: HJ710. 8—2014 [S/OL]. (2014-11-06) [2019-06-08]. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/stzl/201411/W020141115348424763944.pdf>.
- [11] TONG X, HU H, CHEN S. Use of aquatic insects to evaluate water quality in the streams of Mt. Nankun[J]. Journal of South China Agricultural University, 1995, 16(3): 6-10.
- [12] 李伟, 钟扬. 水生植物研究理论与方法[M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 1992.
- [13] 储荣华. 水生植物的生态和景观应用[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [14] 王兵, 郑秋红, 郭浩. 基于 Shannon-Wiener 指数的中国森林物种多样性保育价值评估方法[J]. 林业科学研究, 2008(2): 268-274.
- [15] 中华人民共和国环境保护部. 生物多样性观测技术导则-陆生维管植物: HJ710. 1—2014 [S/OL]. (2014-11-06) [2019-06-08]. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/stzl/201411/W020141106529795756324.pdf>.
- [16] PENUELAS J, POULTER B, SARDANS J, et al. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe[J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 2910-2934.
- [17] 王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2768-2775.
- [18] 耿世伟, 渠晓东, 张远, 等. 大型底栖动物生物评价指数比较与应用[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2281-2287.
- [19] 黄红娟, 叶万辉. 外来种入侵与物种多样性[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 121-126.