

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.14.021

# 黑臭河道近自然河流的生态恢复与构建

吴伟龙<sup>1,2</sup>, 蔡然<sup>1</sup>, 王征戌<sup>1</sup>, 张珊珊<sup>3</sup>, 王光春<sup>1,2</sup>, 刘帅<sup>1,2</sup>

(1. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044; 2. 四川水汇生态环境治理有限公司, 四川 内江 641100; 3. 北京绿景行水环境科技有限公司, 北京 101300)

**摘要:** 西南地区某黑臭河道治理工程, 在实施一期控源截污工程后, 水质得以改善但波动明显。针对河道黑臭反复的问题, 采用近自然河流生态修复的理念, 开展生态空间的构建与恢复, 强化河流自我修复功能。工程实施后, 河道水质稳定达到地表Ⅳ类水标准, 浮游植物密度约  $92 \times 10^4$  cells/L, 蚌、螺、鱼、虾等水生动物恢复出现, 呈现较好的自然生态特征, 成为黑臭水体达标后持续向好的示范项目。

**关键词:** 近自然河; 黑臭水体; 生态修复; 控源截污

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)14-0126-07

## Ecological Restoration and Construction of a Black and Odorous River by Close-to-nature River Method

WU Wei-long<sup>1,2</sup>, CAI Ran<sup>1</sup>, WANG Zheng-shu<sup>1</sup>, ZHANG Shan-shan<sup>3</sup>,  
WANG Guang-chun<sup>1,2</sup>, LIU Shuai<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Capital Eco-Environment Protection Group Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. Sichuan Aqua Gathering Eco-Environment Management Co. Ltd., Neijiang 641100, China; 3. Beijing Aqualake Technology Development Co. Ltd., Beijing 101300, China)

**Abstract:** After the implementation of phase I source control and sewage interception project in a black and odorous river management project in southwest China, the water quality was improved but fluctuated significantly. Aiming at the recurrent black and odorous problem, the concept of close-to-nature river ecological restoration is adopted to carry out the construction and restoration of ecological space and strengthen the self-restoration function of the river. After implementation, the river water quality stably realize level IV criteria of the *Environmental Quality Standard for Surface Water* (GB 3838-2002). The phytoplankton density is about  $92 \times 10^4$  cells/L, and the aquatic animals such as mussels, snails, fish, shrimp have recovered, showing good natural ecological characteristics. It becomes a demonstration project for continuous improvement of black and odorous water after reaching the standard.

**Key words:** close-to-nature river; black and odorous river; ecological restoration; source control and sewage interception

2020年底, 全国地级及以上城市黑臭水体实现 98.2% 消除, 黑臭水体治理工作取得了全面成效。

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划项目(2020-R-027)

通信作者: 蔡然 E-mail: cairan@capitalwater.cn

在水质改善的同时,很多河道因历史破坏或简易河道塑形,致使形态和结构单一,生态功能严重退化,无法解决溢流污染、面源冲击、管网淤积释放等问题,造成黑臭现象反复。20 世纪四五十年代至今,欧美和日本等西方国家按照近自然河流的理念进行大量生态恢复实践,营造健康的河流生态系统。国内水体治理也开始更加注重“自然修复”的长效作用<sup>[1]</sup>,以期解决河道黑臭反复问题。

在西南地区某黑臭河道治理项目中即应用了近自然工法。

1 项目概况

该黑臭水体河道总平面见图 1。

该河道总长 1.8 km,流域面积约 8.3 km<sup>2</sup>,整体呈 Y 字型。河道含两个源头,北侧支流起于上游渠(暗涵)排口,南侧支流源头来自上游小型水库。工程实施前河流生态基本特征和本底特征分别见表 1、2。2019 年初完成北侧支流暗涵改造、散居生活污水整治及底泥清理的一期工程<sup>[2]</sup>后,实现黑臭基

本消除;但因暗涵源头雨污分流改造不够彻底、散居村户违法倾倒、散禽养殖及河道汇水范围内的城市和农业下垫面所产生的雨水径流污染,造成河道水质在雨季波动明显。支流交汇点水质变化见图 2。

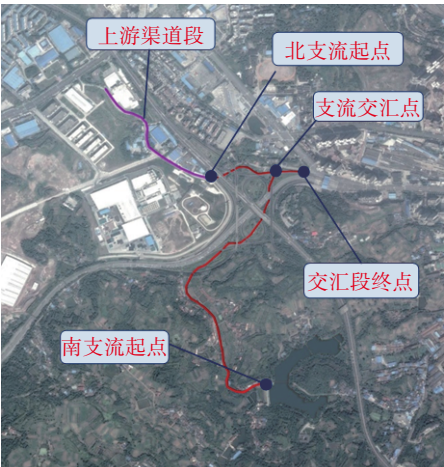


图1 河道总体平面

Fig.1 General layout of the river



表 1 河流生态基本特征

Tab.1 Basic characteristics of river ecology

河段	气候及水文地质	地形地貌	水量	工程实施前水质
北侧支流	亚热带湿润季风气候,多年平均降雨量 1 025.6 mm。地势起伏大,水力坡度大,源短流量小,洪枯变化大,快排型河道,流速 0.1~8 m/s。以表土、粉质黏土、泥岩、砂岩为主,保水能力强,易受侵蚀	建成区,长 500 m,底宽 1.5~3 m,直线型,断面整体为方形或梯形断面,呈不规则状态。单一坡度,水深无变化	合流制暗涵排水及少量连续山体存蓄渗水,缺少稳定水源	上游源头暗涵排水为劣 V 类水(COD 为 57 mg/L, NH <sub>3</sub> -N 为 15.3 mg/L, TP 为 1.5 mg/L)
南侧支流		城郊农村区,长 1 300 m,河道被水田侵占,部分段落为坑塘。纵向随水田呈矮阶梯状	旱季上游水库持续稳定孔口溢流,汛期承担汇水区域泄水	上游水库水源水质较好, IV~V 类水(COD 为 34 mg/L, NH <sub>3</sub> -N 为 0.59 mg/L, TP 为 0.23 mg/L)

表 2 河流生态本底特征

Tab.2 Background characteristics of river ecology

河段	生境及生物	河床特征	
		底泥	岸线特征
北侧支流	生境:受污染破坏,以 1~2 种小栖境为主,河道底部以沉积物及细沙为主,基质粒径无差别,条件差; 生物:物种丰富度极低,水下不适宜水生动植物生长,岸上植被覆盖率低(约 20%),无生长基础	泥柱长 75 cm,明显分为 3 层,其中上层 0~23 cm(黑色浮泥,呈厌氧黑臭状态),中层 23~43 cm(灰黑色,泥沙状,可塑性差),下层 43~75 cm(褐色原状土)	
南侧支流	生境:河道被稻田侵占,为单一稻田生态结构; 生物:物种丰度较低,伴有家禽和家鱼养殖	泥柱长为 45~60 cm,明显分为 2 层,其中上层颜色较深,厚度 15~25 cm(稻田表层灰褐色泥),下层为褐色原状土	

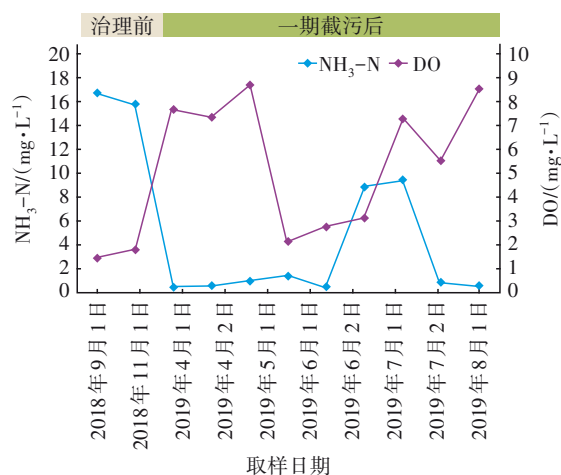


图2 截污工程实施前、后水质(支流交汇点)

Fig.2 Water quality before and after sewage interception project

## 2 近自然河流的生态构建方法应用

为应对雨季污染冲击,提升河流生态自净能力,达到稳定的地表Ⅳ类水水质,打造健康自然的生态系统,采用近自然工法对河道进行生态恢复和构建。项目河道采用工法主要包括岸线恢复、断面优化、驳岸改善、栖息地构建等。

### 2.1 因势利导,还原自然蜿蜒形态

根据当地县志记载,该河道具有“环抱学宫,形如玉带”的特征,如图3所示,北侧支流2018年相对1998年河道形态进行了裁弯取直。在恢复河道段的蜿蜒设计中,选取附近河长5 km的未受干扰河段的蜿蜒模式为模板,其整体河道弯曲率约为1.42,

典型弯的弯曲波长 $L_m$ 范围为100~500 m,平均河宽8.2 m,弯曲半径 $R_m$ 为35~310 m。

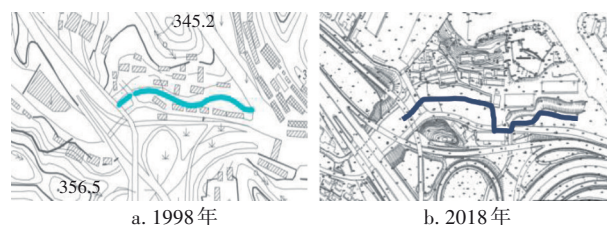


图3 治理前北侧支流河道线位

Fig.3 North tributary route of 1998 and 2018 (before treatment)

以模板河道为参照,考虑项目河道实际地形条件,在满足控规条件下,取消河道直角及长直线,充分考虑现有地形特点,尽量避免高挖低填,共设置7处河弯(编号为①~⑦),见图4及表3。

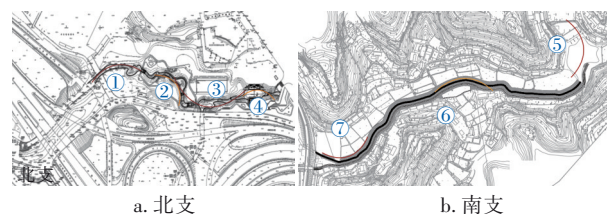


图4 支流河弯恢复

Fig.4 Restoration of meandering of tributary

设计南侧支流弯曲率 $863/588=1.47$ ,北侧支流弯曲率 $395/273=1.45$ ,与模板河道相近,均为蜿蜒型河道;两支流参数 $K_L$ 及 $K_R$ 值与模板河道范围基本相似。相关参数可作为该区域同类河道修复的参考。

表3 模板河道及设计河道弯曲参数

Tab.3 Template river channel and design river channel meandering parameters

模板河道	序号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	均值
	弯曲波长 $L_m/m$	217	326	98	112	110	182	178	511	216.8
	平均河宽 $B/m$	7.5	9.0	7.7	8.2	6.5	5.5	8.4	12.9	8.2
	弯曲半径 $R_m/m$	117	85	37	39	38	76	66	311	96.1
	$K_L(L_m/B)$	28.9	36.2	12.7	13.7	16.9	33.1	21.2	39.6	25.3
	$K_R(R/B)$	15.6	9.4	4.8	4.8	5.8	13.8	7.9	24.1	10.8
项目河道	序号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦		均值
	弯曲波长 $L_m/m$	94.6	76.7	128	70	110	140	119		105.5
	平均河宽 $B/m$	4	5	6	6	湿地	4	4		4.8
	弯曲半径 $R_m/m$	117	85	37	39	76	80	62		70.9
	$K_L(L_m/B)$	23.7	15.3	21.3	11.7		35.0	29.8		22.8
	$K_R(R/B)$	29.3	17.0	6.2	6.5		20.0	15.5		15.7

注: 河宽采用常水位蓝线宽度。

### 2.2 延伸融合,丰富河道断面设计

在满足行洪排涝功能的同时,充分考虑周边用

地和生境栖息地构建需求,在纵断面上设置汀步、挡水堰坝、逆向缓坡等多级蓄水设施(见图5),局部



结合湿地、栖息框架、汇流塘等生态设施,构建深潭-浅滩交替序列,丰富纵向水深和流态变化,改善

水动力条件。因河道水量较小,蓄水前后高度 $H$ 控制在 30~80 cm,砌筑材料以当地毛石及砂卵石为主。

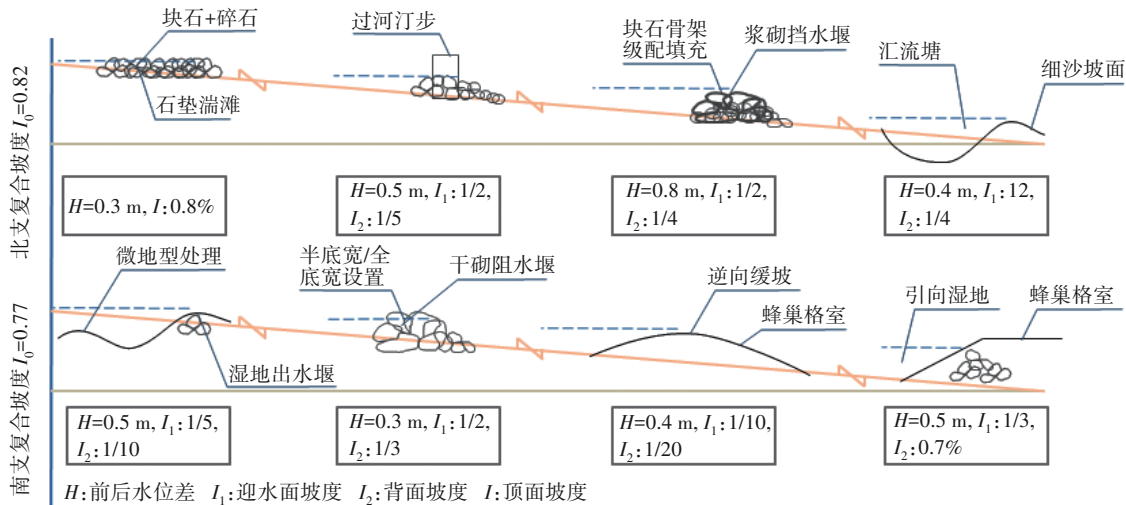


图5 支流纵断面设计

Fig.5 Diagram of tributary vertical section design

在横断面上进行延伸,与周围的河滩、生态设施、驳岸等形成了组合空间,通过横向能量、物质交换及自然水位的漫溢与回落,实现水陆生境的自然衔接。北侧支流采用了复式断面形式(以栖息框架断面为例),南侧支流河道采用了梯形断面形式,典型断面见图6。

庄和鱼塘的用地的影响,大部分采用梯形断面,结合蜂巢格室护岸和碎石基质改善措施,实现河道的全生态断面,河道底宽 3 m,河槽平均深 1.5 m,河岸坡率 1:2。

2.3 因地制宜,丰富护岸应用形式

为拦截面源污染,营造了多样化生境边界,以北侧支流为例介绍对护岸的不同类型改造(见图7)。项目河道位于西南重丘区域,河道坡降较大,自然护岸受冲刷易形成坍塌和水土流失,强降雨期间现场实测北侧支流上游暗涵出口雨水瞬时流速可达 8~10 m/s,经缓冲后逐渐放缓,因此在充分考虑护岸稳定性的条件下,依次应用于砌片石驳岸(前置消能池)、蜂巢格室护岸、卵石坡面护岸、生态种植卷护岸、草坡护岸,并进行相应的生态化改造。

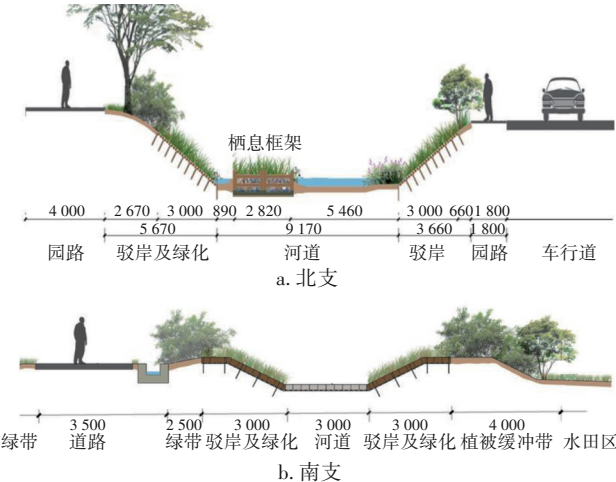
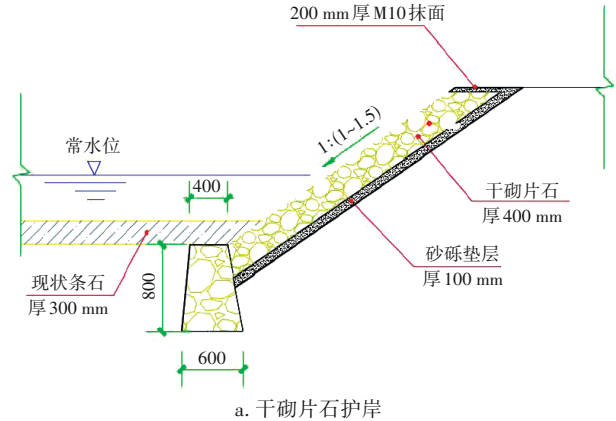


图6 南北两支流典型断面

Fig.6 Typical section diagram of south and north tributary

复式断面的构建,按照深潭-浅滩序列规律,借助河道周边相对宽松的用地,以设计水位为参照,将原 1.5~2 m 宽的狭窄河道优化为 3~10 m 的弹性断面,局部达 12 m,在横向范围内营造深浅水、河漫滩及水陆过渡带等空间。南侧支流河道受周边村



a. 干砌片石护岸

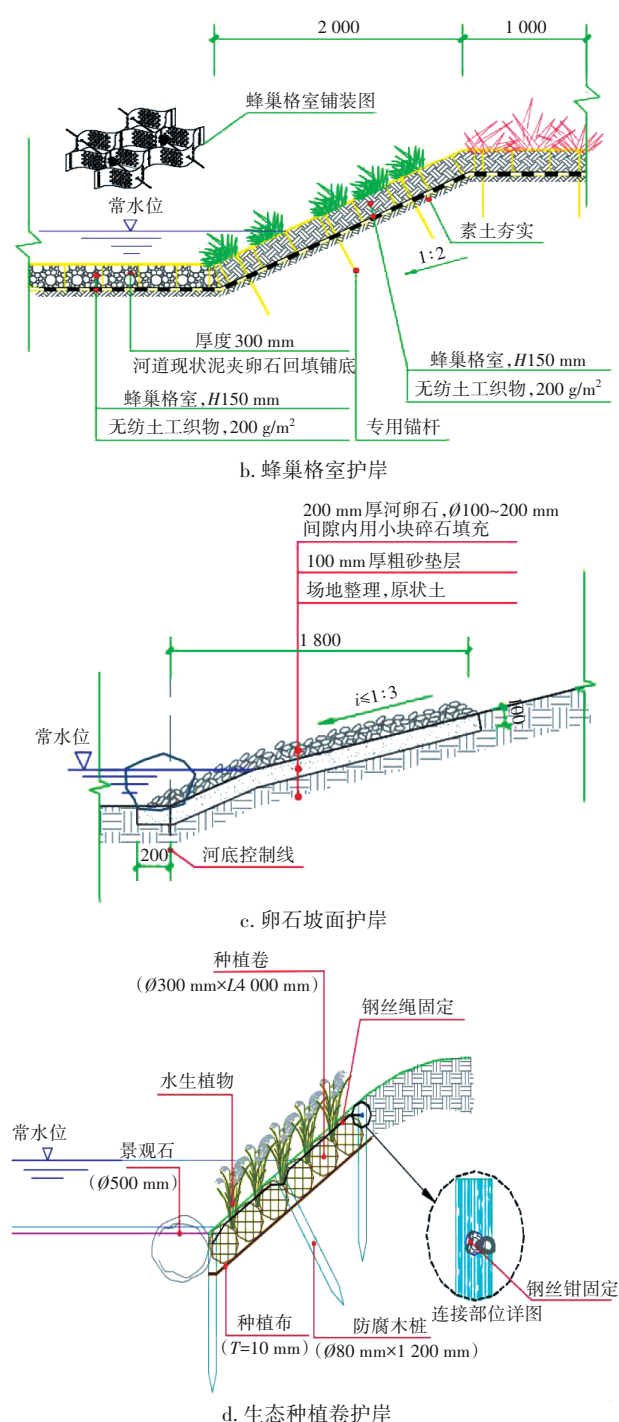


图7 北侧支流护岸方法

Fig.7 Schematic diagram of revetment methods in north tributary

## ① 干砌片石护岸

因北侧支流起始于暗涵泄水口,为抵挡冲刷,在迎水面设置干砌片石护岸,护岸片石厚400 mm,片石下设置100 mm砂砾垫层,底部设护角与现状条石相契。结合底部消能池及石垫湍滩(直径30 cm

不规则块石沿河底铺设,长10 m)降低水动能;在护岸顶部补植铁线蕨、芦蒿等本地常见垂吊茎叶植物,片石间隙喷播草籽。

## ② 蜂巢格室

蜂巢格室护岸主要采用蜂巢形状的高分子材料(PCA)宽带连接及铺展,形成对表土、植被和边坡土体有效的构造保护,并通过纵向锚杆和横向加筋带(高强度聚酯纤维)巢室强化防滑、防沉降及抗冲刷性能。从河底到两岸的蜂巢格室一体铺设,单格室高度15 cm,护岸坡比为1:2,在岸坡的格室内填充种植土,进行湿生植物的恢复,河道底部的格室内填充回填泥夹卵石,利用砾间实现对河水的有效净化。

## ③ 卵石坡面护岸

卵石坡面在河弯缓坡一侧设置,护岸宽度约1.8 m,从水线以下向岸上延伸,面层采用优质黏土,卵石采用10~20 cm天然料,间隔3~5 cm满铺,基础采用大块石稳固。卵石坡面护岸在保护岸坡、提高河道抗冲刷能力的同时,卵石及坡面附着微生物,泥质间隙自然生长草本植被,形成生物膜和水土过渡带栖息环境。

## ④ 生态种植卷护岸

生态种植卷护岸应用于新开挖河道、坡度较陡(坡比 $\geq 1:1.5$ )的护岸处,椰棕卷制作而成的高密度种植卷材(DN300)均匀铺设在平整后的坡面上,用防腐木桩( $\varnothing 80$  mm $\times$ 1 200 mm)和钢丝绳固定卷材,在卷材上均匀挖取孔洞(15个/ $m^2$ ),孔洞内置种植土和植物幼苗,并在底部设置大块景观石用于坡脚防护。种植卷本身为网状多孔天然纤维结构,拦截河面源污染的同时,通过腐殖作用,提供更多的营养基促进植被生长及微生物繁衍。

## 2.4 生物栖息地构建

## ① 自然湿地

在南侧支流起点处设置自然湿地(见图8),利用现状水田和洼塘进行改造利用,对上游太子湖来水及周边鱼塘农田退水进行净化处理并打造栖息空间,场地为多边形,长约104 m,宽约77 m,总体设计面积5 300  $m^2$ 。湿地平均深度0.6 m,旱季平均HRT约9.8 h。

自然湿地内部设置大石汀步,一是对湿地内水体进行流态优化,二是与太子湖进行路径连通。临近鱼塘溢流口处布设石滩,对鱼塘溢流水进行初步

净化,削减水体悬浮物。湿地内部进行微地形营造和不同种类植物搭配,有效削减鱼塘溢流水体中的N、P等营养物质。

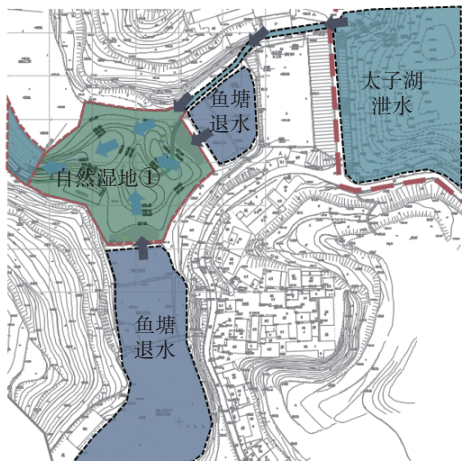


图 8 自然湿地平面布置

Fig.8 Layout of natural wetland

② 生态净化塘

生态塘平面布置见图9。将梯级鱼塘、稻田结构入河前最末一级的鱼塘改造为生态塘,设计面积725 m<sup>2</sup>,进行上游汇水入河前的拦截净化,临近鱼塘溢流口处布设石滩,对上游退水进行初步净化,削减60%的悬浮物,同时对水流进行消能缓冲。塘内设置溢流设施,生态塘内水量过多时,水体流入南侧支流及支流末端湿地。



图 9 生态塘平面布置

Fig.9 Layout of ecological pond

③ 栖息框架

栖息框架见图10。在河床较宽处及河道转角处设置固定栖息框架,在河床上埋构框架高度30 cm,常水位高度控制60 cm,单排宽度为1.35 m,双

排或多排设置。框架内配置石块确保稳定性,毛石直径10~15 cm,顶部铺设带孔种植卷。框架底部设置碎石层,保持基础稳固。栖息框架依据“砾间接触氧化法”可以改善水质,提供鱼类和水生动物的避难、产卵、休息空间。通过植被构架内的椰棕卷可以导入多种植被,成为河道底栖生物的栖息场所,并提供食物链基础。

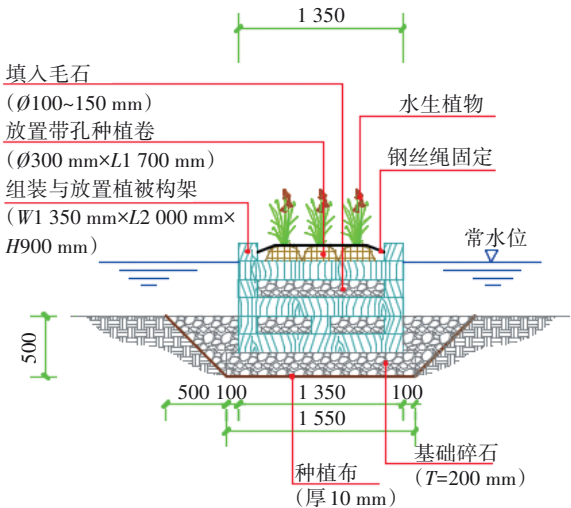


图 10 栖息框架断面

Fig.10 Cross-section of habitat frame

3 实施效果

通过近自然河流方式的生态恢复与构建,提升了黑臭水体治理成效,水质明显提升且趋向稳定,初步形成了稳定的自然河流生态系统。

① 水质提升

2021年1月—8月水质检测数据见表4,各项水质指标均达到地表Ⅳ类水质标准,河道水质不再返黑返臭,有效缓解了外部污染对河道的冲击。

表 4 实施生态恢复工程后的河道水质

Tab.4 River water quality after implementing ecological restoration project mg·L<sup>-1</sup>

项 目	溶解氧	COD	BOD <sub>5</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TP
北支起点	5.0	15.5	2.7	0.64	0.22
南支起点	7.5	21.6	5.1	0.91	0.24
支流交汇点	5.8	19.3	3.7	0.44	0.19
交汇终点	8.1	17.5	3.4	0.41	0.20
均值	6.6	18.5	3.7	0.60	0.21

② 物种恢复

河流水质稳定后,对水体进行生物调查,其中各点位浮游植物及底栖动物调查情况见表5。



表5 浮游植物与底栖动物调查结果

Tab.5 Investigation of phytoplankton and zoobenthos

取样点	浮游植物 密度/(10 <sup>4</sup> cells·L <sup>-1</sup> )	底栖动物			
		纲	科	属	数量/只
北侧支流 起点	88.1	昆虫纲	摇蚊亚科	摇蚊属	2
		腹足纲 肺螺亚纲	囊螺科	囊螺属	3
南侧支流 起点	75.8	双壳纲 软甲亚纲	珠蚌科	无齿蚌属	1
		腹足纲 前鳃亚纲	田螺科	田螺属	6
		腹足纲 肺螺亚纲	囊螺科	囊螺属	2
南北支流 交汇点	112.2	甲壳纲	螯蛄科	原螯虾属	1
		腹足纲 肺螺亚纲	囊螺科	囊螺属	2
		腹足纲 前鳃亚纲	田螺科	田螺属	4
交汇段 终点	91.1	腹足纲 前鳃亚纲	田螺科	田螺属	6
		甲壳纲 软甲亚纲	钩虾科	钩虾属	2
		腹足纲 肺螺亚纲	囊螺科	囊螺属	3

各点位浮游植物的平均密度为 $92 \times 10^4$  cells/L, 参照夏季南京西北护城河<sup>[3]</sup>(Ⅲ类水,  $25.2 \times 10^5$  cells/L)及北京潮白河<sup>[4]</sup>(Ⅱ~Ⅳ类水,  $51.3 \times 10^4$  cells/L)调查值,河水中浮游植物密度为相对正常水平。底栖动物调查各点累积采样面积 $2 \text{ m}^2$ ,采用D型网,网衣为40目锦纶,孔径0.5 mm,各点位均出现不同数量的河蚌、田螺、囊螺等底栖动物,支流交汇点驳岸发现清水型河道常见的小龙虾。选取蒲苇、野芋、芒、再力花、鸢尾等水生植物品种,结合水深的需求以及高度层次,沿河进行水生植物的空间布置。

#### 4 结论

① 通过多种综合近自然河流方式的改造,项目河道实现了良好水质和生态恢复效果,成为黑臭水体治理由消除黑臭到实现长制久清的样板案例。

② 河道近自然河流的改造各类工程费用约750.8万元,约合562元/ $\text{m}^2$ ,与中等偏低水平的景观

打造费用相当,且以自然作用为主,后期维护费用较少,具有良好的工程经济性。

③ 各类自然工法应根据河道特性,实施“一河一策”,应对季节性河水变化及降雨径流污染,维护河道水质及生物多样性。随着国家水环境治理需求不断提高,河道自然属性将成为健康评价的重要标准而更加得到重视。

#### 参考文献:

- [1] 刘青,毛转梅,李松阳,等. 山区河流生态修复理论与技术研究进展[J]. 江西农业学报, 2020, 32(1): 107-114.  
LIU Qing, MAO Zhuanmei, LI Songyang, et al. Advances in theory and technology of ecological restoration of mountain rivers [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2020, 32(1): 107-114 (in Chinese).
- [2] 吴伟龙,蔡然,瞿文凤,等. 源头暗涵化河道形成过程与系统治理思路[J]. 给水排水, 2021, 47(12): 147-151.  
WU Weilong, CAI Ran, QU Wenfeng, et al. Formation process and systematic management of source concealed channel [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(12): 147-151 (in Chinese).
- [3] 胡智华,林妙丽,李港,等. 城市闸控河流浮游植物群落结构特征及影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, 41(9): 3631-3640.  
HU Zhihua, LIN Miaoli, LI Gang, et al. Phytoplankton community characteristics and influencing factors of the urban gate-controlled rivers [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(9): 3631-3640 (in Chinese).
- [4] 黄玉霞,刘阳春,刘芳,等. 潮白河浮游植物现状及水质分析[J]. 北京水务, 2021(S1): 58-62.  
HUANG Yuxia, LIU Yangchun, LIU Fang, et al. Phytoplankton status and water quality analysis in Chaobai River [J]. Beijing Water, 2021(S1): 58-62 (in Chinese).

作者简介:吴伟龙(1988—),男,山东昌乐人,硕士,工程师,主要从事流域水环境综合治理工作。

E-mail: superwwl@sina.com

收稿日期: 2021-08-20

修回日期: 2022-03-01

(编辑:衣春敏)