

· 城市生态保护 ·

城市污染河道水环境生态治理效应分析

——以北京市丰台区葆李沟为例

刘骥良¹, 季世琛¹, 鲍永刚², 沈继华², 李璐¹, 巩潇¹, 赵方莹¹

(1. 北京圣海林生态环境科技股份有限公司, 北京 100083;
2. 北京市丰台区水务局, 北京 100071)

摘要: 根据对北京市丰台区葆李沟的污染特征的诊断分析结果, 设计并实施了具有针对性的生态治理模式, 包括截污清淤、延长水体驻停时间、设置生态滤床、重建水生植物系统、微生物系统构建、水生动物系统构建等综合措施。在生态治理模式稳定运行后, 对河道内污染物的去除效果及河道生态系统恢复状况进行了跟踪研究。结果表明: 研究期间生态治理模式对葆李沟污染状况的改善具有明显效果, 研究段内 COD 平均去除率为 $66.45\% \pm 0.11\%$, TP 平均去除率为 $39.36\% \pm 0.01\%$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率为 $36.13\% \pm 0.03\%$; 在水生植物净化区内, 3 种污染物的去除贡献率与水生植物生物量及温度呈显著正相关关系, COD 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除贡献率与溶解氧呈显著正相关关系; 生态治理模式的实施对河道景观特征、水文、形态、水质及物种丰度等方面具有明显改善作用。

关键词: 河道污染; 生态治理模式; 生态修复; 葆李沟

中图分类号: X522

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.02.019

Effect of Ecological Treatment Mode of Water Environment in Urban Polluted River —Taking Baoligou, Fengtai District, Beijing as an Example

LIU Jiliang¹, JI Shichen¹, BAO Yonggang², SHEN Jihua², LI Lu¹, GONG Xiao¹, ZHAO Fangying¹

(1. Beijing Sainetco Technology co., LTD, Beijing 100083, China;

2. Water-affair Authority of Beijing City, Beijing 100071, China)

Abstract: According to the results of diagnosis and analysis of pollution characteristics of Baoligou in Fengtai District of Beijing, a targeted ecological treatment mode was designed and implemented, including comprehensive measures such as sewage interception and dredging, prolonging sewage purification time, setting up ecological filter beds, rebuilding aquatic plant systems, building microbial systems and aquatic animal systems, etc. After the stable operation of the ecological treatment mode, the removal efficiencies of pollutants in the river and the restoration status of the river ecosystem were tracked and studied. The results showed that the ecological treatment mode had an obvious effect on the improvement of pollution treatment in Baoligou during the study period. The average removal rates of chemical oxygen demand, total phosphorus and total nitrogen in the study period were $66.45\% \pm 0.11\%$, $39.36\% \pm 0.01\%$ and $36.13\% \pm 0.03\%$, respectively. In the aquatic plant purification zone, the removal rates of the three pollutants were significantly positively correlated with the aquatic plant biomass and temperature, and the removal rates of chemical oxygen demand and total nitrogen were significantly positively correlated with dissolved oxygen. The implementation of the ecological treatment mode had an obvious improvement on the scenic characteristics, hydrology, morphology, water quality and species abundance in the river.

Keywords: River Pollution; Ecological Treatment Mode; Ecological Restoration; Baoligou

CLC number: X522

河道生态系统包括河流及滨岸带范围内所有环境与生物要素, 城市河道在行洪排涝、补给地下水、保护生物多样性和改善城市局域小气候方面发

挥着重要作用^[1]。但城市化进程一般会对河道生态系统产生负面影响, 如径流紊乱、水质恶化、生态系统退化等。城市建设用地的增加往往会缩减城

收稿日期: 2019-05-31

作者简介: 刘骥良(1980-), 男, 工程师。研究方向: 水环境治理与水生态修复。E-mail: liujiliang@163.com

通信作者: 赵方莹(1974-), 男, 教授级高级工程师。研究方向: 水土保持生态修复。E-mail: 2373261146@qq.com

引用格式: 刘骥良, 季世琛, 鲍永刚, 等. 城市污染河道水环境生态治理效应分析——以北京市丰台区葆李沟为例[J]. 环境保护科学, 2020, 46(2): 98-102.

市水域面积,造成城市水网密度下降^[2],而人口数量的增长会引发城市污水排放量逐年增加^[3],污水处理厂处理能力不足导致河道成为城市污水的集中排放场所,大量污水的汇入会造成河道内污染物含量超标(一般达到劣 V 类地表水标准),威胁水生生物生存的同时病原体(细菌、病毒和寄生虫卵等)也会随污水传播进而危害人类健康。此外,城市发展规划通常会对区域内自然河道进行人为改造(截弯取直、护岸硬质化和河道渠道化),使河道结构趋向简单化与固定化,功能趋向景观绿化与行洪排涝^[4],最终会导致水生态系统内部物质循环与能量传递途径受阻,降低水体自净能力^[5]。

1 生态治理模式概况

近年来,由城市河道污染所引发的众多环境问题逐渐成为制约城市可持续经济发展的关键所在,随着国内外对环境建设的不断重视,水环境污染治理领域呈现出多元化、系统化的发展趋势。但传统污染河道的治理方法(物理法、化学法和生物法)侧重于对某几项环境指标的控制和改善,忽视了河道生态系统恢复的重要性,致使黑臭水体在治理一段时间后反复出现。生态治理模式是指能够在不影响河道正常行洪功能的情况下,通过综合治理方法恢复河道内水生态系统结构与功能,借助水生态系统内部物质循环过程去除污染物的综合治理方法,是环境与生物相互作用的结果。以往研究证实了大型水生植物、浮游植物及微生物膜在净化城市生活污水、工业废水等方面的作用^[6-8],而近几年国内有关生态治理模式应用的案例也取得了良好效果^[9]。

2 项目背景

2017 年北京市五大水系中河流总长度约

2 434 km,其中劣 V 类河流长度占 34.7%,其中北运河水系整体水环境质量较差^[10]。2018 年北京市黑臭水体总长度约 50.1 km,污染面积约 19.2 km²^[11]。葆李沟跨越丰台区与大兴区,是北运河水系中凉水河的一条支流,环境建设滞后于城市经济发展致使葆李沟生态环境破坏与水环境污染陷入恶性循环状态:岸坡植被稀疏,土壤侵蚀严重;河道内泥沙垃圾淤积,水体连续性差;水生植物种类单一数量稀少,水体自净能力低;生活污水与不达标中水(中水水质为一级 B 标准,断面考核标准为 V 类地表水标准)直排,中水与河道汇流口距断面考核点距离过短,无法充分净化。经检测,2016 年葆李沟断面考核点水质全年(除汛期外)为劣 V 类地表水标准,属于重度黑臭水体。2017 年河道断面考核点 COD 平均值为 83.32 mg/L, TP 平均值为 4.48 mg/L, NH₃-N 平均值为 44.07 mg/L。

生态治理模式的应用需遵循因地制宜的原则,根据葆李沟的污染特征实施了具有针对性的生态治理模式,并对生态治理模式运行后的污染物去除效果以及影响水生植物净化区内污染物去除贡献率(该区域内污染物去除量与整体治理模式污染物去除量的百分比)的环境因子进行跟踪研究。

3 具体措施及研究方法

以葆李沟京良路至宏康路段(K0+000~K1+188)为对象,在截污清淤的基础上设计并实施以延长水体驻停时间、设置生态滤床、重建水生植物系统、微生物系统构建和水生动物系统构建等措施相结合的生态治理模式,见表 1 和图 1。通过在河道内建立良性生态系统循环过程,恢复水生态系统内部的物质循环功能,加快污染物的分解转化速度,延长污水净化时间并提升河道水体自净能力。

表 1 生态治理模式具体措施

序号	措施	具体布置
①	截污清淤	封堵生活污水直排口;清理河道底部淤泥。
②	延长水体驻停时间	K0+300、K0+420、K0+970、K1+188设置生态跌水,延长水体净化时间;通过地理式管道将原K0+760处污水处理厂中水出水口改至K0+420处。
③	设置生态滤床	K0+400处沿河道横断方向每隔1 m设置1道规格为16 m×1 m×0.4 m的生态滤床,共设置30道,滤床内部填充过滤性材料(陶粒:砾石=1:3)。
④	重建水生植物系统	在K0+420~K0+970及K0+970~K1+188区域内栽植大型水生植物,包括香蒲、水葱、千屈菜、黄菖蒲睡莲、轮叶黑藻和平均密度约9.5株/m ² 。
⑤	微生物系统构建	在K0+970中水改造管道起点投放浓度为1 g/m ³ 的复合微生物制剂(平均活菌含量为2.0×10 ¹⁰ cfu/g)与浓度为0.3 g/m ³ 的复合的生物酶(平均酶活性在10 000 U以上),投放时间持续60 d;K0+950处沿河道横断方向每隔1.5 m布置1组长度为10m的水下人工水草,共布置30组。
⑥	水生动物系统构建	其他措施布设完成并稳定运行后,在K0+420~K1+188处放养水生动物(环棱螺50 kg,鲤、鲢和鳙共100 kg)。

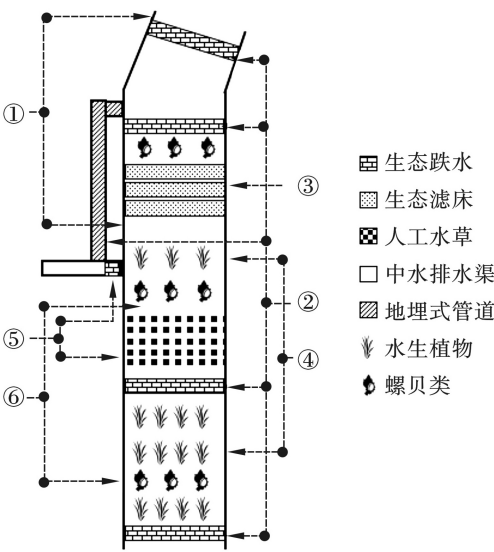


图 1 葆李沟生态治理模式示意图

2018 年 3 月,研究段内所有措施布设完成并进入水环境修复期,为评价生态治理模式的成效,需对河道内水质(COD、NH₃-N、TP、温度、pH 和溶解氧)、生态系统恢复状况进行检测分析。COD、TP 和 NH₃-N 检测工具为哈希水质分析仪(DRB 200),为减小实验误差每组水样需重复检测 2 次,pH 检测工具为 pH 计(上海三信 PHB-3),温度与溶解氧检测仪器为便携式溶氧仪(上海雷磁 JPB-607A)。检测 K0+970~K1+188 水生植物净化区内

水生植物生物量(湿重),具体方法参照《淡水生物资源调查技术规范:DB43/T 432—2009》^[12]进行,检测时间与次数与水质相同。数据分析使用 SPSS 19.0 完成。通过现场调查评价生态系统恢复状况。检测期间,高立庄污水处理厂中出水水质较稳定: NH₃-N 平均值为 29.8 mg/L、TP 平均值为 2.94 mg/L、COD 平均值为 20.2 mg/L。

4 结果讨论

4.1 污染物去除率

以《城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918—2002》^[13]和《地表水环境质量标准:GB 3838—2002》^[14]为参考标准评价污染物去除效果。检测结果见表 2、表 3。

表 2 水环境检测结果

t/月-日	水温/℃	pH	溶解氧/mg·L ⁻¹	水生植物生物量/kg·m ⁻²
03-25	14.3	8.23	4.05	1.20
04-25	18.2	7.95	3.3	1.51
05-25	23.6	8.41	3.78	2.10
06-25	27.1	7.95	4.95	2.55
07-25	27.5	7.85	4.66	2.74
08-25	28.0	8.22	4.8	3.15
09-25	27.7	8.07	5.29	2.93

表 3 整体与水生植物净化区的污染物去除率

t/月-日	整体模式对污染物的去除率/%			水生植物净化区内污染物的去除率/%		
	COD	TP	NH ₃ -N	COD	TP	NH ₃ -N
03-25	49.61±0.58	33.25±0.00	29.69±0.06	10.10±0.47	6.20±0.03	5.93±0.04
04-25	64.54±0.86	32.71±0.01	31.22±0.03	22.07±0.81	11.23±0.03	7.00±0.04
05-25	66.12±0.45	35.69±0.00	36.64±0.03	20.19±0.58	16.24±0.01	11.50±0.08
06-25	73.03±0.45	43.95±0.04	30.96±0.01	41.98±0.51	23.38±0.03	11.73±0.06
07-25	71.58±0.34	45.45±0.01	41.21±0.04	44.56±0.57	23.55±0.01	22.07±0.04
08-25	72.58±0.54	42.89±0.01	38.91±0.04	40.15±1.20	26.09±0.03	21.22±0.04
09-25	67.68±0.82	41.54±0.01	44.29±0.08	36.63±1.23	23.64±0.00	24.16±0.10

注:数据用平均值±标准差的形式表示。

生态治理模式对研究段内 COD 的平均去除率达到 66.45%±0.11%。考核断面 COD 指标从 2017 年的二级标准(83.32 mg/L)提升至 2018 年的Ⅱ类地表水标准(9.04 mg/L),COD 的去除主要依靠滤料的拦截、吸附作用,水生植物的拦截、吸附和吸收作用及微生物的分解作用,但水生植物与微生物

在低温环境下代谢活动较弱^[15],水温回升至 25~30℃时,水生植物与微生物代谢活动旺盛,滤料、植物根系与人工水草表面形成的微生物膜能够高效分解吸收水中有机质。此外,沉水植物与挺水植物的根系能够稳定底质环境,避免沉积物中有机碎屑再悬浮^[16]。

生态治理模式对研究段内 TP 的平均去除率达到 39.36%±0.01%。考核断面 TP 指标从 2017 年二级标准(4.48 mg/L)提升至 2018 年的一级 B 标准(2.24 mg/L)。TP 的去除主要依靠生态滤床中滤料的拦截吸附与微型生态系统的分解、转化作用以及水生植物与微生物(主要为聚磷菌)的吸收、分解作用。聚磷菌在好氧条件下过量吸收水中的正磷酸盐合成聚磷酸盐储存在细胞内,在厌氧条件下水解体内的聚磷酸盐并向水中释放正磷酸盐^[17]。水生植物根系周围好氧环境有利于除磷菌过量吸收水体中正磷酸盐,从而提高 TP 去除率。

生态治理模式对研究段内 NH₃-N 的平均去除率达到 36.13%±0.03%。考核断面 NH₃-N 均值从 2017 年的三级标准(44.07 mg/L)提升至 2018 年的二级标准(23.03 mg/L)。除滤料与水生植物作用外,微生物膜中一系列脱氮过程(同化、氨化、硝化

和反硝化等)也能够有效降低 NH₃-N 含量,但微生物的脱氮过程需要充足的 C 源作为底物^[18],研究段内 COD 平均去除率达到 60% 以上,而通过生态跌水增加的 CO₂、CO₃²⁻和 HCO₃⁻等少量 C 源并不能充分满足微生物的代谢活动需求,微生物脱氮过程受到限制是 NH₃-N 去除率较低的原因之一。此外,弱酸性条件下滤料对 NH₃-N 的去除效果较强,而研究过程中水体呈现弱碱性,较多的 OH⁻会影响滤料对 NH₃-N 的吸附效果^[19],是研究段内氨氮去除率较低的另一原因。

4.2 污染物去除贡献率与环境因子的关系

利用相关分析分别研究 K0+970 ~ K1+188 区域内水生植物生物量(湿重)、温度、pH 和溶解氧与该区域内污染物去除贡献率的相关关系,并使用 Pearson 相关系数表示相关关系的强弱情况,分析结果见表 4。

表 4 污染物去除贡献率与环境因子的关系

环境因子	COD去除贡献率		TP去除贡献率		NH ₃ -N去除贡献率	
	相关系数	<i>p</i>	相关系数	<i>p</i>	相关系数	<i>p</i>
水生植物生物量	0.842*	0.017	0.959**	0.001	0.972**	0.001
温度	0.849*	0.016	0.961**	0.001	0.914**	0.004
pH	-0.653	0.112	-0.105	0.822	-0.26	0.573
溶解氧	0.794*	0.033	0.669	0.100	0.823*	0.023

注: ** 表示差异极显著 (*p*<0.01), * 表示差异显著 (*p*<0.05)。

水生植物净化区内,3 种污染物的去除贡献率与水生植物生物量和温度呈显著正相关关系;3 种污染物去除贡献率与 pH 无相关关系;COD 与 NH₃-N 的去除贡献率与溶解氧呈显著正相关关系,

而 TP 的去除贡献率与溶解氧无相关关系。

4.3 河道生态系统恢复

项目实施前后河道生态系统状况对比结果,见表 5。

表 5 河道生态系统恢复状况对比

类型	特征	2017年项目实施前	2018年项目稳定运行后
表观特征	颜色、气味	部分水体颜色泛黑, 气味刺鼻	水体清澈, 无特殊气味
河道水文	水流	部分水体几乎不流动	各断面流速均一
	水量	部分浅滩裸露	平均水深60 cm, 无浅滩裸露
河道形态	河床稳定性	河床泥沙淤积严重	河床稳定, 无泥沙淤积
	护坡	大部分护坡有侵蚀现象	护坡有草本植物覆盖, 无侵蚀现象
水质	COD	二级	Ⅱ类
	TP	二级	一级B
	NH ₃ -N	三级	二级
生物	物种丰度	仅有少量芦苇	大型水生植物9种
		无大型水生动物	大型水生动物5种

表 5 可知,生态治理模式运行以来,河道生态系统(葆李沟)在景观特征、水文、河道形态、水质和水生生物丰度等方面有明显改善,河道生态系统结构及功能的恢复不仅能够改善葆李沟水污染状况,同时沿河道形成的生态恢复带有助于物种的迁入,如生态系统恢复初期,草本植物(稗草、菖蒲等)与浮游动物(轮虫类、枝角类)会率先在近岸带及生态滤床带中出现。

4.4 污染物去除效果的优化

生态治理模式去除污染物是多种措施综合作用的结果,通过以上的结果分析可以看出,目前所采用的生态治理模式仍有可优化提升的空间,在滤料作用区控制水体弱酸性条件、提高水生植物生物量、控制适宜的水温、提升水体溶解氧含量和保持水体中有一定量的有机质等措施可以提高整体研究段内染污物的去除效果。但考虑到室外条件及成本控制,如何有效控制部分区域水体酸碱性及水温等问题仍需要进一步的研究。

5 结论

本次葆李沟水污染治理过程中,针对污染源问题,前期的截污清淤能够将河道内污染物含量控制在稳定水平。针对原河道中污水处理路径较短的问题,生态跌水的建设与中水汇流口的改造一方面能够延长河道内水力驻停时间,使污染物得到充分净化;另一方面稳定的水文条件能够为水生生物及微生物提供适宜的栖息环境。针对治理前河道内水质恶化严重的问题,将人工水草微生物净化作用集中在净化流程的中后段,前期生态滤床与大型水生植物的初步净化能够将河道内污染物含量控制在微生物生存的耐受范围之内,为微生物挂膜提供有益环境。生态治理模式运行期间,水体中营养物质最终进入水生植物及滤食性动物体内,对水生生物的收割和打捞能够及时将营养转移出河道,避免水生生物死亡后营养元素再次进入河道。

葆李沟生态治理模式运行期间,研究段内 COD 平均去除率为 $66.45\% \pm 0.11\%$, TP 平均去除率为 $39.36\% \pm 0.01\%$, $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均去除率为 $36.13\% \pm 0.03\%$;其中 K0+970 ~ K1+188 水生植物净化区内 COD、TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除贡献率与水生植物生物量、温度呈显著正相关;生态治理模式在有效去除水体中污染物的同时,能够沿河道建立生态的恢复带,对区域内生态系统恢复具有实际意义;弱酸性

条件、提高水生植物生物量、适宜的温度、提高溶解氧含量和一定量的有机质等措施能够提升生态治理模式中污染物的去除效果。

参考文献

- [1] 汤江武,王新,姚晓红,等.污染河道流域综合治理与生态修复的探讨[J].浙江农业科学,2015,56(1):15-18.
- [2] 郭科.城市化河流生态水文效应及调控研究[D].郑州:华北水利水电大学,2018.
- [3] 郑毅.我国城市水环境现状及防治对策探讨[J].浙江水利科技,2016,44(6):50-52.
- [4] 傅振久.城市化过程对河道系统的影响与生态修复分析[J].黑龙江水利科技,2018,46(8):39-41.
- [5] 陈利顶,齐鑫,李芬,等.城市化过程对河道系统的干扰与生态修复原则和方法[J].生态学杂志,2010,29(4):805-811.
- [6] Gersberci R M, Elkins B V, Lyon S R, et al. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands[J]. Water Research, 1986, 20(3): 363-368.
- [7] Tripathi B D, Shukla S C. Biological treatment of wastewater by selected aquatic plants[J]. Environmental Pollution, 1991, 69(1): 69-78.
- [8] Melin T, Jefferson B, Bixio D, et al. Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse[J]. Desalination, 2006, 187(1): 271-282.
- [9] 徐后涛.上海市中小河道生态健康评价体系构建及治理效果研究[D].上海:上海海洋大学,2016.
- [10] 北京市环境保护局.2017年北京市环境状况公报[EB/OL].(2018-05-16)[2019-02-15]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20180516/898160.shtml>.
- [11] 国家住房和城乡建设部.全国城市黑臭水体整治监管平台[EB/OL].(2018-09-12)[2019-04-10]. <http://219.142.101.118/HeiChouShuiTi/>.
- [12] 湖南省质量技术监督局.淡水生物资源调查技术规范:DB43/T 432-2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [13] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18918-2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [14] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838-2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] 向律成.三种水生植物对富营养化水体的净化效应及其影响因素研究[D].杭州:浙江大学,2010.
- [16] 许晓伟,陈昌仁,万福绪,等.高等水生植物对太湖沉积物再悬浮特征的影响[J].安徽农业科学,2012,40(3):1706-1709.
- [17] 陈舒,张培玉,郑猛,等.高盐条件下废水生物脱氮除磷及其工艺研究进展[J].生物技术通讯,2011,22(4):598-602.
- [18] 赵玛.污水反硝化中颗粒有机物的水解及对脱氮效率的影响[D].扬州:扬州大学,2014.
- [19] 赵发敏,海热提,韩晓丽.人工湿地填料去除氨氮优化配比及影响因素研究[J].环境科学与技术,2011,34(9):26-30.