

# 北京某小型黑臭水体治理实践与技术探索

李 婷, 刘纪成, 马泽宇, 陈春生, 张 勇, 范成成  
(北京碧水源科技股份有限公司, 北京 102206)

**摘 要:** 针对北京某小型河道黑臭现状,采用控源截污、内源治理、活水循环、造流增氧、生态修复等组合措施治理。治理2月余,实现了臭味完全消除,水体透明度由8 cm提高至50 cm;治理1年余,除TN外的指标均达到地表Ⅴ类水标准;治理2年余,各水质指标达到地表Ⅳ类水标准。实践证明,该组合技术可安全、高效地消除水体黑臭。

**关键词:** 黑臭水体; 污水处理站; 曝气增氧; 絮凝剂

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)02-0098-05

## Practice and Technical Exploration on the Treatment of a Small Black and Odorous Water Body in Beijing

LI Ting, LIU Ji-cheng, MA Ze-yu, CHEN Chun-sheng, ZHANG Yong, FAN Cheng-cheng  
(Beijing Origin Water Technology Co. Ltd., Beijing 102206, China)

**Abstract:** In view of the black and odorous condition of a small river in Beijing, the combined measures of source pollution interception, endogenous treatment, living water circulation, aeration and ecological restoration were adopted. After two months of operation, the odor was completely eliminated, and the water transparency was increased from 8 cm to 50 cm. After 1 year of treatment, all indexes except TN reached level Ⅴ criteria of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838 - 2002). After over 2 years of treatment, all water quality indexes had reached the level Ⅳ criteria of the standard. Practice had proved that the combined technology could eliminate black and odorous water body safely and efficiently.

**Key words:** black and odorous water body; wastewater treatment station; aeration; flocculating agent

随着我国经济的高速发展,生活污水和工业废水排放量急速增加,而配套污水收集管网和污水厂未及时建设,大量未经处理的废水直接流入城市河流,导致城市内河受到不同程度的污染,以及出现大量城市水体黑臭现象。由于黑臭水体成因复杂,对治理技术要求较高,尽管目前许多学者对黑臭治理技术已有一定研究<sup>[1-4]</sup>,但整体上相关治理技术尤其是组合技术研究尚不完善,且组合技术治理效果定量分析不足,严重制约着黑臭水体治理工作。

选取北京某典型黑臭水体,在对污染源进行充分调查的基础上,制定了“控源截污、内源治理、活

水循环、造流增氧、生态修复”等多种技术集成的治理方案。

### 1 工程概况

该河道位于北京市朝阳区来广营乡,自来广营东路由北向南流经费家村、东辛店而后进入北小河南皋段,属北小河上游支流,全长为2.25 km,流域面积为6 km<sup>2</sup>。治理段长约310 m,流域面积约为9 000 m<sup>2</sup>,水面宽约30~50 m,水深约1.5~2 m,水量约2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。河道周边污染源有17家,主要为餐饮废水、洗车废水、生活污水,因周边市政污水管网设施不完善,这些污水等均排入河道,还包括雨季

上游泄洪带来的污染。目前该河道受到严重污染,已成为黑臭水体。2017 年 4 月初取治理段水样,检

测结果见表 1。由表 1 可知,河道各项水质指标均明显超标(pH 值除外),为劣 V 类水体。

表 1 河道水质

Tab. 1 Water quality of the river

项目	悬浮物/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	COD/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	氨氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	总氮/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	总磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	pH 值	DO/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
数值	81	84 ~ 112	9 ~ 28	32 ~ 55	3 ~ 5	7.7	0.05

治理前河道水体透明度为 8 cm, DO 为 0.05  $\text{mg/L}$ , 氧化还原电位为 -350 mV, 氨氮为 9 ~ 28  $\text{mg/L}$  (平均为 16.5  $\text{mg/L}$ ), 属于重度黑臭水体。

河道淤泥平均深度为 40 ~ 60 cm, 其中上部 20 cm 为黑色, 淤泥量约 2 500  $\text{m}^3$ , 有机质含量为 3.4%, 速效氮为 180  $\text{mg/kg}$ , 速效磷为 16  $\text{mg/kg}$ 。

该工程的治理目标是自项目竣工验收之日起 6 个月内实现现场无明显臭味, 无水华暴发, 水体透明度不低于 30 cm, 具备水生动物生存条件; 自竣工验收之日起 2 年内确保水质达到地表 V 类水标准。

## 2 工程设计

本工程确定了“控源截污、内源治理、活水循环、造流增氧、生态修复”的污染治理方案, 如图 1 所示。

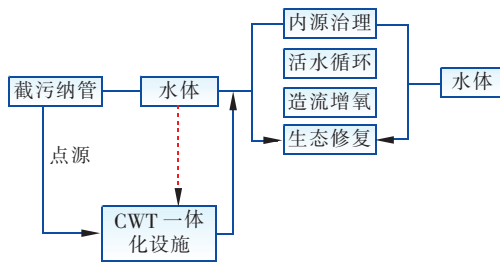


图 1 河道治理技术路线

Fig. 1 Technical route of river regulation

控源截污主要是新建一座 300  $\text{m}^3/\text{d}$  的 A/O - MBR 工艺<sup>[5]</sup> 污水处理站(本项目采用智能一体化污水净化系统, Compact Wastewater Treatment System, 简称 CWT), 对河道上游和周边的排污进行截流处理, 达到优质杂排水标准后再排入水体上游。内源治理是通过投加化学絮凝剂, 对污水进行沉淀分离, 对底泥覆盖固化。活水循环是通过水泵将下游河水提升至新建污水站或上游水域, 形成区域内的活水循环。造流增氧是通过人工造流增氧等措施, 提高水体溶解氧浓度和氧化还原电位, 防止厌氧分解和促进黑臭物质的氧化。生态修复是指通过原有人工湿地、护岸植物等逐步恢复水生态, 提升水体的自净

能力。

### 2.1 控源截污

在河道闸口处建一座混凝土截流围堰, 将上游污水及周边商户污水收集至污水站进行处理。当上游和周边污水量较少时, 可将河水直接泵入污水处理站, 作为旁路处理措施。新建污水站的处理能力为 300  $\text{m}^3/\text{d}$ , 采用 A/O - MBR 工艺, 以去除有机物、氮、磷、SS 等污染物为主。采用 CWT 智能一体化污水净化系统, 其采用模块化设计, 由缺氧、好氧 + MBR 膜池、控制 + 设备单元、办公区四部分组成。同时在截流堰处设置一根 DN400 溢流超越管, 当降雨强度较大时, 雨水可通过溢流管输送至下游水体, 避免初期雨水进入河道造成面源污染。

### 2.2 内源治理

投加化学絮凝剂是快速高效去除河道污水污染物的方法之一<sup>[6-7]</sup>。为了避免对原河道生态系统产生不利影响, 选用高级无机絮凝剂, 该药剂环境友好, 符合《饮用水化学处理剂卫生安全性评价》(GB/T 17218—1998) 相关要求。该药剂可有效将水中悬浮物、有机物、氮、磷等污染物凝聚起来, 使其沉降到底泥中, 同时通过药剂形成的大分子团凝聚沉降以及一些电化学反应整合底泥中的重金属, 激发底泥中的一些土著微生物发挥作用, 恢复河道的生态系统。

### 2.3 活水循环

在河道下游设置一台提升泵, 水体污染时可将下游河水提升至 CWT 一体化装置处理, 再输送至河道上游; 水质较好时也可直接从下游提升至上游, 形成区域内活水循环。

### 2.4 造流增氧

河流需氧量取决于实际水量、水质、预期的治理目标, 需综合考虑有机物、硝化、底泥、还原物质等耗氧作用, 以及考虑大气、藻类的复氧作用等。由于实际项目情况较为复杂, 难以综合考虑以上因素, 为简化计算过程, 主要参考一级反应的箱式模型<sup>[8]</sup>, 计算公式为:

$$O = [1.4L_0(1 - e^{-k_1 t}) - (C_s - C)(1 - e^{-k_2 t}) + C_m] \times V \quad (1)$$

式中  $O$ ——水体的需氧量, g

$V$ ——水体的体积,  $\text{m}^3$

$t$ ——充氧时间, d

$C$ ——水体的溶解氧浓度, mg/L

$L_0$ ——水体初始的  $\text{BOD}_5$  浓度, mg/L

$k_1$ —— $\text{BOD}_5$  生化反应速率常数,  $\text{d}^{-1}$

$C_s$ ——水体的饱和溶解氧浓度, mg/L

$k_2$ ——水体的复氧速率常数,  $\text{d}^{-1}$

$C_m$ ——维护水体好氧微生物生命活动的最低溶解氧浓度, mg/L

充氧时间  $t$  根据下式确定:

$$L = L_0(1 - e^{-k_1 t}) \quad (2)$$

式中  $L$ ——水体改善后的  $\text{BOD}_5$  浓度, mg/L

其中设计水温取  $20^\circ\text{C}$ , 河水水量取  $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,  $k_1 = 0.1 \text{ d}^{-1}$ ,  $k_2 = 0.2 \text{ d}^{-1}$ , 初始  $\text{BOD}_5$  为  $29.4 \text{ mg/L}$  (进水 COD 的 30%), 设改善后的  $\text{BOD}_5$  满足地表 V 类水标准 ( $10 \text{ mg/L}$ ), 水体饱和溶解氧为  $8.5 \text{ mg/L}$ , 根据箱式模型得到的需氧量为  $9.5 \text{ kg/h}$ , 考虑到实际存在底泥以及外源污染耗氧, 将该需氧量加倍为  $18.95 \text{ kg/h}$ 。故在河面分别安装 6 台强力造流曝气机 ( $1.5 \text{ kW}$ ,  $3.0 \text{ kgO}_2/\text{h}$ ) 和 4 台浮水式喷泉曝气机 ( $1.5 \text{ kW}$ ,  $0.60 \text{ kgO}_2/\text{h}$ ), 对河水进行曝气增氧。

## 2.5 生态修复

现状潜流人工湿地面积为  $2800 \text{ m}^2$ , 水力负荷约为  $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 可继续利用。污染河水经过湿地, 总悬浮物、有机物、总磷、总氮等污染物可有效去除, 净化后出水再返至河中。

## 3 工程实施及运行

### 3.1 CWT 污水站调试运行

调试运行期间 CWT 污水站进、出水水质变化如图 2 所示。

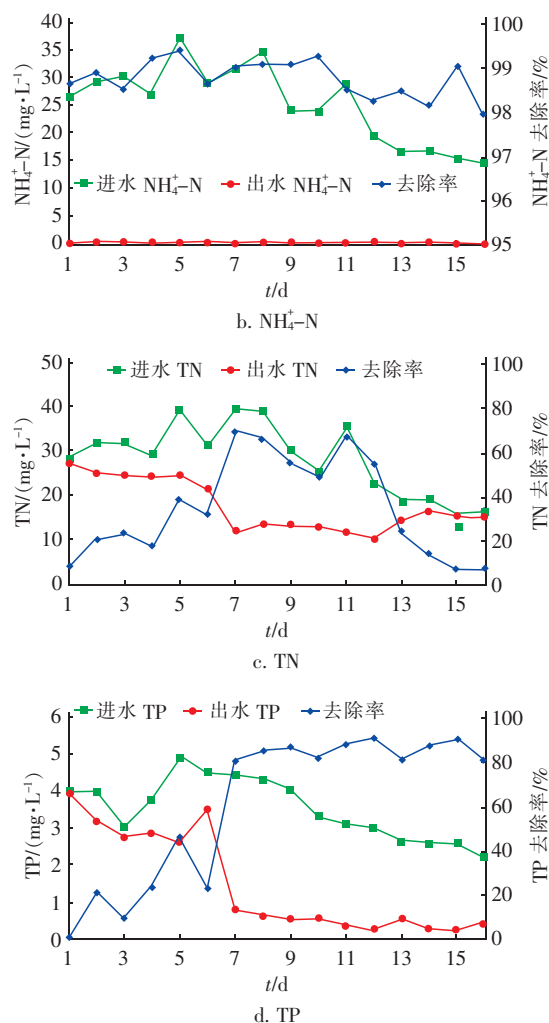
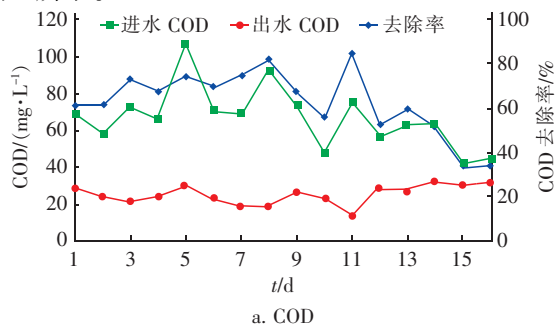


图 2 调试期间 CWT 进、出水水质

Fig. 2 Influent and effluent quality of CWT in debugging period

从图 2 可以看出, 自 CWT 运行以来, 出水各项指标均稳定降低, COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 下降值分别为  $43.77$ 、 $25.19$ 、 $10.92$ 、 $2.36 \text{ mg/L}$ , 平均去除率分别约  $62.78\%$ 、 $98.74\%$ 、 $34.42\%$ 、 $61.55\%$ 。另外, 由于进水 C/N 仅为  $2.1$ , 而投加外碳源降低出水 TN 不太经济, 所以 CWT 设备出水 TN 进一步降低有难度, 需配合其他措施。

### 3.2 内源治理药剂投加

本项目投加内源治理药剂为高效无机矿物质型絮凝剂, 包括水质净化型 H2 型和底泥修复型 W1 型药剂, 参照药剂厂家意见及小试, H2 和 W1 最佳投加浓度分别为  $200$ 、 $600 \text{ mg/L}$ , 水量为  $21700 \text{ m}^3$ , 泥量为  $2480 \text{ m}^3$ , 则总药剂投加量分别为  $4.3$ 、 $1.5 \text{ t}$ 。该项目运行 2 个月后开始投药, 此后 COD、 $\text{NH}_4^+ -$

N、TN 及 TP 浓度分别降低了 35.2%、14.3%、21.3%、60.5%。实际去除率比小试去除率低,可能是河面较大,搅拌混合条件较难控制,影响了絮凝反应效率。

### 3.3 活水循环

将下游污水提升至上游,促进水体的流动,在一定程度上加快了水体的交换,缩短了污染物的停留时间;同时水体流动性增强可以增加底层水体的溶解氧含量,对底泥污染物释放具有一定的抑制作用<sup>[3-4]</sup>。但本项目活水循环量较小,仅 300 m<sup>3</sup>/d,但不可否认其与控源截污、内源治理、生态修复等主要治理手段相辅相成,为有效的辅助治理手段。

### 3.4 造流增氧

参考其他项目经验,造流增氧可实现黑臭水体 COD 去除 37.2% ~ 84.8%, BOD<sub>5</sub> 去除 74.7% ~ 88.2%, SS 去除约 76.7% ~ 81.9%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 去除约 45%<sup>[9-11]</sup>,初步估计曝气增氧可为黑臭去除作出一定贡献,但本项目未做量化研究。

### 3.5 生态修复

采用垂直潜流人工湿地,按照 0.15 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · h) 的水力负荷,湿地表面积为 2 800 m<sup>2</sup>,可处理河水 420 m<sup>3</sup>/d。其中,湿地处理进、出水水质见表 2,可知人工湿地可高效去除水中 SS、COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN、TP 等物质,其平均去除率分别为 75.3%、52.3% ~ 55.3%、11.1% ~ 64.3%、53% ~ 63.6%、73.3% ~ 76%。

表 2 人工湿地进、出水水质

Tab. 2 Influent and effluent quality of constructed wetland

mg · L<sup>-1</sup>

项目	悬浮物	COD	氨氮	总氮	总磷
进水	81	84 ~ 112	9 ~ 28	32 ~ 55	3 ~ 5
出水	20	40 ~ 60	8 ~ 10	15 ~ 20	0.8 ~ 1.2

### 3.6 整体运行效果

本项目治理 2 个月后,藻类明显减少,臭味完全消除,水体透明度由 8 cm 提升至 50 cm。在 2 年半的治理期间,水生动植物生长良好,河道生态处于良好状态。治理前河水 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN、TP 分别为 63.87、27.30、29.89、3.57 mg/L,治理期间河道 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN 及 TP 指标变化见图 3。投加化学混凝剂后的 3 ~ 5 d, COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN 及 TP 指标分别降低了 35.2%、14.3%、21.3%、60.5%,可见化学混凝是高效去除河道污染物的方法。分段来

看,治理 1 年余, COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN、TP 分别降至 32.00、1.48、6.48、0.38 mg/L,去除率分别为 49.9%、94.6%、78.3%、89.3%;治理 2 年余, COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN、TP 分别降至 16.00、0.57、1.45、0.25 mg/L,去除率分别为 74.9%、97.9%、95.1%、92.9%。综上,随项目实施,河道水质指标逐步降低;治理 1 年余,水质(除 TN 外)达到地表 V 类水标准;治理 2 年余,水质达到地表 IV 类水标准。

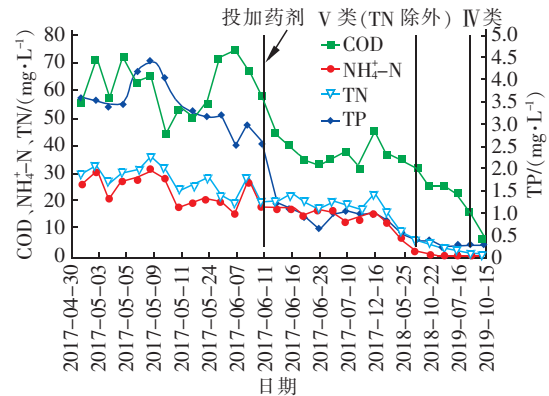


图 3 河道治理期间 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、TN 及 TP 变化趋势

Fig. 3 COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N, TN and TP changes during river regulation

## 4 结论

① 采用“控源截污、内源治理、活水循环、造流增氧及生态修复”的组合技术快速消除水体黑臭,恢复了水体自净能力。项目实施仅 2 个月,藻类明显减少,臭味完全消除,水体透明度由 8 cm 提升至 50 cm;治理 1 年余,水质(除 TN 外)达到地表 V 类水标准;治理 2 年余,水质达到地表 IV 类水标准。

② 就本项目而言,控源截污是关键,内源治理和生态修复为主要的治理措施,活水循环和造流增氧为有效的辅助措施。

③ 针对尚未完成截污纳管区域的小型河道,建议采用以截污就地处理、底泥原位修复、人工湿地净化为主要措施,以造流增氧、活水循环等为辅助措施的组合修复技术,快速消除水体黑臭现象,恢复水体自净能力,实现水质的改善及长效保持。

④ A/O - MBR 一体化污水处理设施(CWT),具备安装简单快速、运行效果好的特点,可推广应用于黑臭水体治理;投加化学絮凝剂是快速高效去除河道污水污染物的方法之一,但应用时需考虑生态安全性,应选用无毒无害药剂以避免对原河道生态造成影响。



## 参考文献:

- [1] 张桐. 疏浚技术在黑臭水体治理中的应用及生态影响[J]. 环保科技, 2018, 24(1): 57-60, 64.  
Zhang Tong. The application and ecological impact of dredging technology in the process of malodorous black river treatment [J]. Environmental Protection and Technology, 2018, 24(1): 57-60, 64 (in Chinese).
- [2] 杨兆华, 何连生, 姜登岭, 等. 黑臭水体曝气净化技术研究进展[J]. 水处理技术, 2017, 43(10): 49-53.  
Yang Zhaohua, He Liansheng, Jiang Dengling, et al. Research progress of aeration purification technology for black and odorous water body [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(10): 49-53 (in Chinese).
- [3] 聂俊英, 邹伟国. 城市黑臭水体的功能恢复与水质改善案例分析[J]. 给水排水, 2017, 43(4): 34-36.  
Nie Junying, Zou Weiguo. Case study on functional recovery and water quality improvement of urban black and smelly water [J]. Water and Wastewater Engineering, 2017, 43(4): 34-36 (in Chinese).
- [4] 段云霞, 檀翠玲, 石岩, 等. 黑臭水体组合工艺治理技术研究及设计[J]. 水处理技术, 2018, 44(6): 134-137.  
Duan Yunxia, Tan Cuiling, Shi Yan, et al. Research and design of combined process technology for black and odorous water body treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(6): 134-137 (in Chinese).
- [5] 孙建升, 张秀华, 张凯, 等. 集成式处理站在黑臭水体治理中的应用[J]. 中国给水排水, 2017, 33(6): 125-127, 134.  
Sun Jiansheng, Zhang Xiuhua, Zhang Kai, et al. Treatment of black and odorous water body with integrated treatment station [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(6): 125-127, 134 (in Chinese).
- [6] 刘亚南, 杨延梅, 李君超, 等.  $\text{KMnO}_4$  预氧化强化混凝工艺处理黑臭水的试验研究[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(1): 82-88.  
Liu Yanan, Yang Yanmei, Li Junchao, et al. Study on treatment of black and odorous water by  $\text{KMnO}_4$  pre-oxidation enhanced coagulation process [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(1): 82-88 (in Chinese).
- [7] 孟令鑫, 胡天媛, 宫政, 等. 超磁混凝/接触氧化/稳定塘工艺应急处理黑臭水体[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 93-96.  
Meng Lingxin, Hu Tianyuan, Gong Zheng, et al. Treatment of black-odorous river by super-magnetic coagulation/contact oxidation/stabilization pond process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 93-96 (in Chinese).
- [8] 王瑟澜, 孙从军, 张明旭. 水体曝气复氧工程充氧量计算与设备选型[J]. 中国给水排水, 2004, 20(3): 63-66.  
Wang Selan, Sun Congjun, Zhang Mingxu. Calculation of oxygenation amount and equipment selection for aeration and reoxygenation project of water body [J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(3): 63-66 (in Chinese).
- [9] 孙从军, 张明旭. 河道曝气技术在河流污染治理中的应用[J]. 环境保护, 2001(4): 12-14, 20.  
Sun Congjun, Zhang Mingxu. Application of aeration technique in river pollution control [J]. Environmental Protection, 2001(4): 12-14, 20 (in Chinese).
- [10] 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 Ming, Cai Ye, Liu Deqi, 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).
- [11] 张绍君, 张锡辉. 纯氧曝气快速消除河流黑臭的工程性研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(7): 76-79.  
Zhang Shaojun, Zhang Xihui. Full scale experiment of pure oxygen aeration for quick control of black and odor in river [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(7): 76-79 (in Chinese).



作者简介: 李婷(1990- ), 女, 安徽安庆人, 硕士, 工程师, 现从事污水厂站运营相关工作。

E-mail: 136692578@qq.com

收稿日期: 2019-06-07