

工程实例

滤墙/AF/BAF/复合流人工湿地用于黑臭水体治理

马 越

(陕西省西咸新区沣西新城开发建设<集团>有限公司, 陕西 西安 712000)

摘 要: 以沣西新城新河黑臭水体治理为目标,在控源截污等措施基础上,采用装配式滤墙/AF/BAF/复合流人工湿地组合工艺进行系统治理。经过4个月的运行调试,新河水质已得到明显改善,上游来水COD、BOD₅、TP、NH₃-N平均浓度分别为44.98、9.39、0.91、7.71 mg/L的情况下,出水平均浓度分别降至24.71、2.88、0.35、1.33 mg/L,DO、透明度由平均2.3 mg/L、13 cm上升至5.3 mg/L、40 cm,达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ~Ⅴ类水平。该技术在河道修复空间有限、原水可生化性差等污染河流治理中具有参考借鉴价值。

关键词: 黑臭水体; 滤墙; 厌氧生物滤池; 曝气生物滤池; 复合流人工湿地

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)20-0076-06

Black-odorous Water Governance by a Combined Process of Fabricated PB, AF, BAF and ICW

MA Yue

(Fengxi New City Development and Construction Group Co. Ltd. of Shaanxi Xixian New Area, Xi'an 712000, China)

Abstract: On the basis of source pollution control, a combined process of fabricated permeable barrier (PB), anaerobic filter (AF), biological aerated filter (BAF) and integrated constructed wetland (ICW) was used for black-odorous water governance of Xinhe River in Fengxi New City. After four months of operation and commission, the river water quality was significantly improved. When the average upstream concentrations of COD, BOD₅, TP and NH₃-N were 44.98 mg/L, 9.39 mg/L, 0.91 mg/L and 7.71 mg/L, the average downstream concentrations were reduced to 24.71 mg/L, 2.88 mg/L, 0.35 mg/L, and 1.33 mg/L, respectively. DO and transparency were increased from 2.3 mg/L, 13 cm to 5.3 mg/L, 40 cm, respectively. They could meet the standard for level Ⅳ-Ⅴ in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002). The effective treatment performance indicated that combined process was suitable for treatment of polluted river with poor biodegradability and limited restoration space inside and outside of river channel.

Key words: black-odorous water; permeable barrier (PB); anaerobic filter (AF); biological aerated filter (BAF); integrated constructed wetland (ICW)

西咸新区沣西新城 2015 年 3 月入选全国首批海绵城市建设试点示范区。根据国家《海绵城市建设绩效评价与考核办法》水环境指标要求,试点区域地表水不得出现黑臭现象。然而,试点区内一条过境河流——新河长期以来污染严重、黑臭明显,严重影响试点达标。为此,新城结合国家《水污染防治行动计划》及《陕西省水污染防治工作方案》要求,依据《城市黑臭水体整治工作指南》,启动了新河黑臭水体系统化治理工作,并计划于 2018 年底消除黑臭,2020 年达到地表水Ⅳ类水质。由于该河跨上下游不同行政区、污染分散、水量波动大、影响因素多,治理任务紧迫而艰巨。

1 项目概况

新河总长 32.3 km,其中上游西安市鄠邑区段长 20.3 km,沣西新城段长 12 km,国家海绵城市试点区段长约 3 km。河道平均比降为 0.85%,流域面积为 303.8 km²,多年平均降雨量为 650 mm,多年平均自然径流量为 0.182 × 10⁸ m³。新河(沣西新城段)位置如图 1 所示。

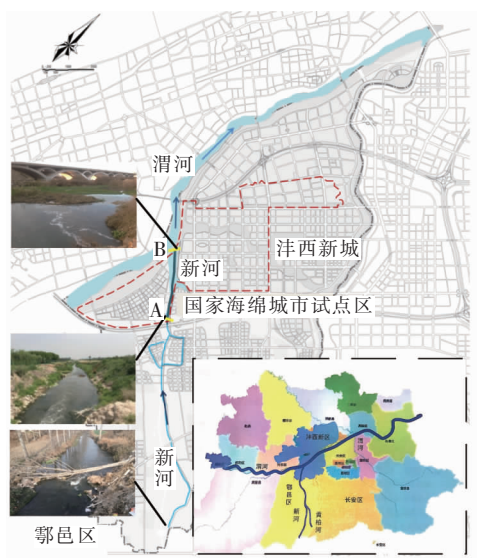


图 1 新河(沣西新城段)区位示意

Fig. 1 Location map of Xinhe River (in Fengxi New City)

1.1 黑臭水体识别分级

2015 年 4 月,新城根据前期污染投诉及调查评估情况,启动新河(沣西新城段)出入境水质监测工作,监测数据见图 2。结果显示:2015 年新河出入境断面水质整体处于地表水环境劣Ⅴ类水平,COD、TP、NH₃-N 等超标严重。其中 13% 的 DO 数据达到轻度黑臭,透明度数据 22% 达到重度黑臭,

53% 达到轻度黑臭,NH₃-N 数据 19% 达到轻度黑臭,ORP 数据 81% 达到轻度黑臭,整体评定为轻度黑臭^[1]。

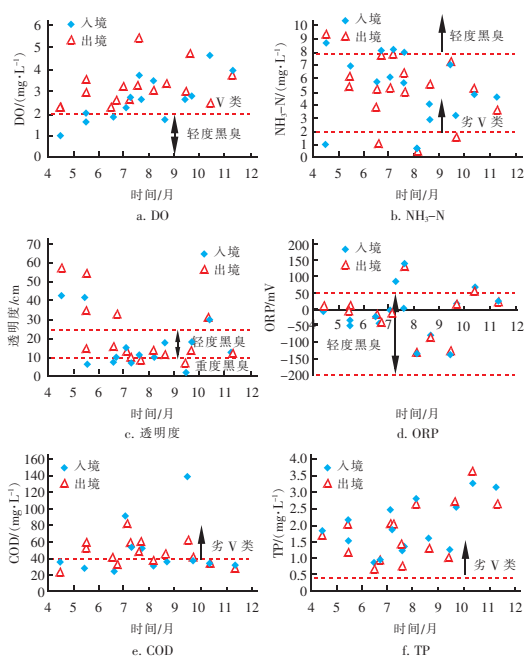


图 2 新河(沣西新城段)2015 年水质监测情况

Fig. 2 Water quality of Xinhe River (in Fengxi New City) in 2015

1.2 污染源调查及成因分析

1.2.1 污染源调查

经排查,新河(沣西新城段)主要点源污染包含:村庄生活污水、大王镇污水厂尾水、造纸厂废水、畜禽养殖废水等 10 个集中直排口及若干暗排口。面源污染包括:农业生产(化肥、农药)污染、水土流失及农村散排污水、废弃物。另外,河道底泥和各种漂(悬)浮物、腐败物、岸边垃圾等带来内源污染。新河上游(鄠邑区段)主要污染来自鄠邑区第二污水厂及周边 46 个村庄生活污水、工业退水、雨季合流污水排放及农业面源污染。经调查,鄠邑区共有雨、污水及混流排污口 93 个,截至 2016 年初,仍有 58 个未封堵,协调治理难度大。

1.2.2 污染量核算及成因分析

根据污水排放量及水质估算点源污染(污水厂出水按一级 A 标准取值、村庄污水按《室外排水设计规范》取值、养殖废水按同地区无处理原水监测水质取值、工业废水按环保监测数据取值),内源污染根据底泥污染释放试验估算。农业面源污染按引入降雨影响的输出系数修正模型^[2]估算。

$$E = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \times \frac{\lg R_i^2}{R} - 0.8188)} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{E_k}{\bar{E}} \quad (2)$$

$$O_p = \beta \cdot \sum_{j=1}^n Y_j \cdot S_j \quad (3)$$

式中 E ——年降雨侵蚀因子

R_i ——月累积降雨量

R ——年累积降雨量

β ——降雨影响系数

E_k ——第 k 年降雨侵蚀因子

\bar{E} ——多年平均降雨侵蚀因子

O_p ——各类型土地某类污染物总输出量

Y_j ——第 j 种土地利用类型输出系数

S_j ——第 j 种土地利用类型面积

经核算,新河不同污染负荷贡献情况见表1。新河水环境容量低,流域雨污水收集处理系统不健全,点源及农业面源污染为其水质恶化主要原因。

表1 新河不同类型污染物输入贡献核算

Tab.1 Contribution of different source pollution to Xinhe

River	t · a ⁻¹		
项 目	COD	TN	TP
点源污染负荷	1 284.80	403.33	31.39
面源污染负荷	554.52	114.72	10.57
内源污染负荷	14.56	2.91	0.06

2 黑臭水体治理方案

鉴于新河污染的复杂性,结合其污染成因,从流域治理角度出发,构建包括阻源截污(封堵排污口、截污纳管、污水厂提标扩容、工业及畜禽养殖污染整治)、面源控制(加强农药化肥管理、农村环境提升)、内源治理(清淤疏浚、打捞垃圾)、生态修复(湿地修复)、活水保质(再生水补给)、落实“河长制”(巡查机制、排水许可)、城乡协同等在内的新河水体治理系统策略^[3,4]。

考虑到上游客流污染(水体及污染物流动特性)对治理工作影响较大等实际情况,经与上游水行政主管部门沟通协调,其生活及工业污染源虽在制定截污治污计划,但近几年内难以全面到位,且时序不定、随机性强。因此,在充分参考上游治理方案基础上,新城从自身出发,结合考核要求,近期计划完成沔西段污染源截留净化、客流污染治理、河道底泥与垃圾清理、河水水质净化与水环境修复初期工程;远期完成清水补给及生态多样性修复工程,以期

实现近期“不黑不臭”,远期“长制久清”的治理目标。此过程中结合景观、规划、土地利用等因素,充分考虑分步实施可能性,并为远期上游水污染负荷及水力演变等预留发展处置空间。

截至2016年7月,新城先后完成境内10处集中排污口封堵、农村污水截污纳管(东西两岸敷设 $d500$ mm 钢筋混凝土截污管,长9 km)、大王镇污水厂提标改造(处理水量由1 400 m³/d提升至5 000 m³/d)、毛纺厂和造纸厂工业废水治理;清理污染底泥 15×10^4 m³;建立河长制,拆除养殖户违建,打捞漂浮物及垃圾 1.1×10^4 m³,畜禽退养110余户。通过上述措施,新河水质较2015年好转,COD、TN、TP不同程度降低,但仍为劣V类且存在波动。新城随即开展水质修复工程。

3 水处理修复工程设计

3.1 工程设计水量及进、出水水质

根据统计资料与现场实测数据,新河丰水期(7月—10月)平均自然径流量为87 301 m³/d,枯水期(11月—3月)为14 705 m³/d,平水期(4月—6月)为57 600 m³/d;鄞州区第二污水厂排放水量为 5×10^4 m³/d,大王镇污水厂排放水量为5 000 m³/d。因此确定项目设计水量为 14×10^4 m³/d。

根据2016年实际复测水质(均值)及近期水环境质量考核目标,确定进、出水水质如表2所示。

表2 设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality

项目	COD/ (mg · L ⁻¹)	BOD ₅ / (mg · L ⁻¹)	TP/ (mg · L ⁻¹)	NH ₃ - N/ (mg · L ⁻¹)	DO/ (mg · L ⁻¹)	透明度/cm
进水	50	9	1	8	2.5	12
出水	≤30	≤6	≤0.4	≤1.5	≥3	≥25

由于 $BOD_5/COD = 0.18 < 0.3$, $BOD_5/TN = 0.65 < 4$, $BOD_5/TP = 9 < 20$,原水可生化性差、生物脱氮除磷碳源不足,因此在强化生化处理的同时还需结合其他生态处理技术。

3.2 处理流程

项目结合沿岸滩面治理及景观提升工程,采用装配式滤墙/厌氧生物滤池(AF)/曝气生物滤池(BAF)/复合流人工湿地组合技术^[5]。河水首先经景观坝抬升后(保证水头差),通过与河道主流方向平行的滤墙滤除泥沙及部分SS;而后由水泵提升至AF预水解、BAF去除COD、NH₃ - N及SS;BAF出水部分返回河道,部分进入新河沿岸梯级复合人工

湿地(水平潜流湿地 HS-FCW+表面流人工湿地 SFCW,河滩地采用极浅型潜流湿地)进一步去除 N、P、COD,净化后排入新河。工艺流程及设施布局如图 3、4 所示。

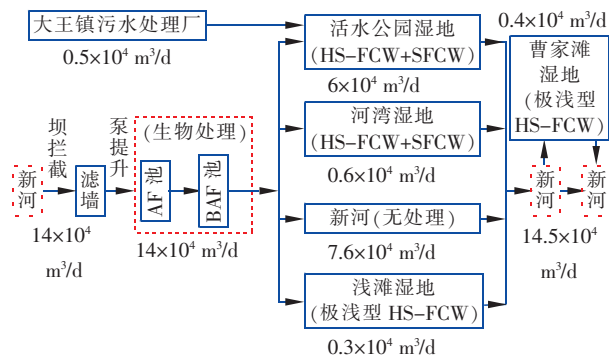


图 3 新河水处理工艺流程

Fig. 3 Flow chart of Xinhe River water treatment process

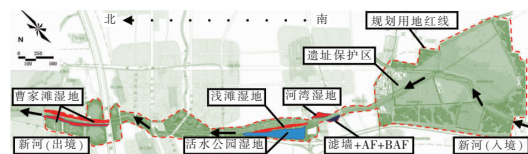


图 4 新河水处理设施平面布置

Fig. 4 Plane arrangement of treatment facilities for Xinhe River

3.3 主要处理单元设计

① 装配式滤墙

装配式滤墙布置及结构见图 5。

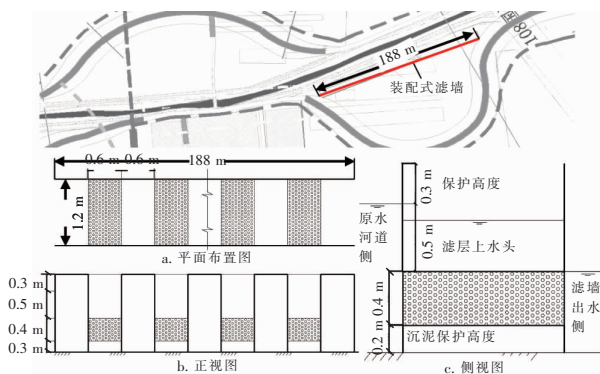


图 5 装配式滤墙布置及结构

Fig. 5 Layout and structure diagram of permeable barrier

总长 188 m, 宽 1.2 m, 高 1.5 m, 每隔 0.6 m 布置滤墙模块 ($L \times B \times H = 1.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$), 单宽渗流量为 $2\,338 \text{ m}^3/\text{d}$, 侧向淹没出流, 进、出水侧分别设置布水和出水廊道, 出水侧最高水位与滤层上顶面平齐, 前后水头差 0.5 m, 沉泥保护高度 0.3

m; 出水侧廊道后设置泵吸水池, 面积 $3\,000 \text{ m}^2$, 平均深 1.8 m, 泵坑深 2.5 m, 总容积 $6\,000 \text{ m}^3$, 设泵 12 台 (8 用 4 备), 提水至后续构筑物 (AF + BAF); 滤墙填充 $\phi 3 \sim 5 \text{ mm}$ 球型轻质陶粒, 孔隙率为 0.3, 定期从模块槽移出, 经机械振动、水力冲洗后复用。

② 厌氧生物滤池 (AF)

2 座, 有效容积 $14\,000 \text{ m}^3$, 总占地 $7\,200 \text{ m}^2$, $\text{HRT} = 1.2 \text{ h}$, 水力负荷为 $20 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 容积负荷为 $0.2 \text{ gCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$, 升流式。每座滤池设计为方形 4 格, 每格尺寸为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 3.3 \text{ m}$ 。滤床选择 $15 \sim 20 \text{ mm}$ 碎石填料, 高 2 m。

③ 曝气生物滤池 (BAF)

4 座, 有效容积 $2\,333 \text{ m}^3$, 总占地 800 m^2 , $\text{HRT} = 0.2 \text{ h}$, 氨氮负荷为 $0.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 上流式。每座滤池分 5 格, 每格尺寸为 $6.35 \text{ m} \times 6.35 \text{ m} \times 6.3 \text{ m}$ 。滤床选择 $\phi 5 \text{ mm}$ 陶粒填料 (比表面积为 $1\,200 \text{ m}^2/\text{m}^3$), 高 3 m。滤料层下设 0.3 m 承托层, 采用鹅卵石级配布置; 底部设穿孔曝气系统 (单格滤池 16 根, 每根开孔 88 个, $\phi 5 \text{ mm}$)。采用长柄滤头配水, 单滤头缝隙宽 2 mm, 安装密度为 $40 \text{ 个}/\text{m}^2$; 单堰出水, 设栅型稳流器。采用气水联合反冲洗, $30 \text{ min}/\text{次}$, 强度为 $40 \text{ m}^3 \text{ 气}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $25 \text{ m}^3 \text{ 水}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

④ 河湾湿地

曝气生物滤池出水由 DN350 管道引入河湾湿地。湿地总面积 2.5 hm^2 , 设计水量为 $0.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 水力负荷为 $0.4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。其中, 水平潜流湿地面积 1.5 hm^2 , 深 0.6 m, 水力坡度为 0.8%, $\text{HRT}_1 = 18 \text{ h}$, 划分为两排 20 个单元, 每排设 PVC 配水管均匀配水至各单元, 出水由集水渠排入表面流湿地; 表面流湿地为 1 hm^2 , 按深浅结合设计, 最大水深 1.5 m, 最小水深 0.3 m, 水力坡度为 0.3%, $\text{HRT}_2 = 30.5 \text{ h}$ 。湿地填料自上而下设为 10 cm 表层 (沙土)、20 cm I 型基质层 ($0 \sim 3 \text{ mm}$ 水洗砂)、30 cm II 型基质层 ($3 \sim 5 \text{ mm}$ 米石与除磷基质) 及防渗层 (HDPE 膜)。湿地挺水植物选择芦苇、香蒲、菖蒲、美人蕉、灯芯草, 陆生植物选择黑麦草、水花生, 沉水植物自然接种。

⑤ 活水公园湿地

总面积 $23 \times 10^4 \text{ m}^2$, 设计水量为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 水力负荷为 $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。其中水平潜流湿地面积 12 hm^2 , 深 1.1 m, 水力坡度为 1%, $\text{HRT}_3 = 21.6 \text{ h}$, 划分为 4 排 150 个单元, 设两条 $D600 \text{ mm}$ 钢

钢筋混凝土配水干管分配水量;表面流人工湿地面积为 11 hm^2 ,深为 0.35 m ,水力坡度为 0.3% , $\text{HRT}_4 = 13.2 \text{ h}$ 。填料(20 cm 表层、 35 cm I 型基质层、 45 cm II 型基质层)及植物选配同④。

⑥ 浅滩湿地

总面积为 3.28 hm^2 ,设计水量为 $0.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水力负荷为 $0.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。由于该段湿地在河滩内,有洪水淹没风险,存在堵塞基质和湿地床增大可能,不宜用大深度潜流湿地,故设为极浅型,深为 0.15 m ,水力坡度为 0.5% , $\text{HRT}_5 = 18 \text{ h}$ 。填料(5 cm 表层、 5 cm I 型基质层、 5 cm II 型基质层)及植物选配同④。

⑦ 曹家滩湿地

总面积为 4.56 hm^2 ,设计水量为 $0.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,水力负荷为 $0.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,分为东、西岸两部分。西岸为 1.52 hm^2 ,单排 19 个单元;东岸 3.04 hm^2 ,双排 38 个单元。均为极浅型,深 0.15 m ,水力坡度为 0.2% ,PVC 管配水, $\text{HRT}_6 = 18 \text{ h}$ 。填料(5 cm 表层、 5 cm I 型基质层、 5 cm II 型基质层)及植物选配同④。

3.4 技术特点

① 针对河道两岸村庄密集、可利用空间有限、来水碳源不足、惰性有机物浓度高等实际情况,采用

装配式滤墙、AF 预水解、BAF 组合工艺降解 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$,提高原水可生化性及碳源利用率,显著降低能耗且节约占地,远低于城市污水厂规划用地指标 $[0.6 \sim 0.8 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})]$ 。

② 专利技术装配式滤墙,采用剩余污泥烧结球型填料,质轻价廉,可高效滤除水中 SS 和部分 COD,迅速提升水体透明度;模块化拆装清洗、滤床水头自动化监控,易维护。

③ 结合防洪工程,充分利用河滩地建设极浅型潜流湿地,填料床深度仅为规范规定的 $1/8 \sim 1/4$,既减少工程投资,又使填料床保持高溶解氧条件,在高效去除 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 的同时,降低堵塞风险。

④ 湿地填料中使用 1 cm 厚的高效铝基多元复合金属除磷基质(密度为 $2400 \text{ kg}/\text{m}^3$,48 h 磷吸附容量 $12.37 \text{ mg}/\text{g}$),为国内文献可见吸附容量较大吸附剂,成本低于同类产品一半以上;湿地植物采用根系超长增殖诱导技术,可使栽培根系 $3 \sim 4$ 个月形成如棕床垫般密实结构,解决洪水冲击和泥沙淤积带来植物长势恶化及湿地运行稳定性下降问题。

4 运行效果及技术经济指标

该项目于 2018 年 1 月建成,通过近 4 个月的调试运行及河道断面水质监测,其处理效果见表 3。

表 3 运行期主要水质指标

Tab. 3 Water quality of Xinhe River during system operation

日期	项目	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3 - \text{N}$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	DO/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	透明度/ cm
2 月 28 日	进水	42.9	8.7	0.86	7.89	3.12	21
	出水	25.31	3.82	0.43	1.65	4.86	45
3 月 10 日	进水	45.1	9.1	0.98	8.95	2.25	19
	出水	25.38	3.35	0.46	1.61	5.24	42
3 月 20 日	进水	40.7	8.5	1.07	6.82	2.80	11
	出水	22.69	2.45	0.48	1.19	5.52	39
3 月 30 日	进水	38.4	8.2	1.04	8.77	1.91	15
	出水	21.08	2.33	0.36	1.45	5.29	42
4 月 10 日	进水	51	9.8	0.96	7.61	1.83	9
	出水	27.9	3.06	0.3	1.23	5.43	37
4 月 20 日	进水	57.8	11.8	0.78	7.99	1.66	7
	出水	29.1	3.17	0.27	1.28	4.96	35
4 月 30 日	进水	38.3	9.9	0.67	5.65	2.89	13
	出水	22.5	2.24	0.22	0.92	5.80	40
5 月 10 日	进水	45.6	9.1	0.94	8.03	2.03	12
	出水	23.7	2.59	0.29	1.28	5.42	41

结果显示:经过 4 个月的试运行,新河水质已得

到明显改善。DO 平均浓度由平均 $2.3 \text{ mg}/\text{L}$ 上升

至 5.3 mg/L,透明度由平均 13 cm 提升至 40 cm, COD、BOD₅、TP、NH₃-N 等主要污染物平均去除率分别达 44.8%、69.1%、61.6%、82.9%;出水 COD、BOD₅、NH₃-N、DO 指标达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水平;TP 介于Ⅳ~Ⅴ类。

该项目总投资为 14 489 万元,单位水量投资为 1 034 元/m³,单位运行成本为 0.39 元/m³。

5 结论及建议

① 应用装配式滤墙/AF/BAF/复合流人工湿地组合技术处理沔西新城新河黑臭水体,有效克服河道治理修复空间有限、来水惰性有机物含量高、活性污泥曝气降解试验效果不佳、水力停留时间不足等困难。在系统进水 COD、BOD₅、TP、NH₃-N 平均分别为 44.98、9.39、0.91、7.71 mg/L 条件下,出水平均分别可达 24.71、2.88、0.35、1.33 mg/L,DO、透明度由平均 2.3 mg/L、13 cm 上升至 5.3 mg/L、40 cm,黑臭全面消除,并基本达到 GB 3838—2002 中Ⅳ类水平(TP 介于Ⅳ~Ⅴ类间),实现阶段治理目标。

② 创新采用装配式滤墙降低进水悬浮固体浓度及部分惰性有机物,提高 AF-BAF 处理效率,降低湿地堵塞风险;设计极浅型潜流人工湿地,大大减少湿地床深及工程投资,拓展堤内河滩治理空间;湿地填料掺入高效铝基多元复合金属除磷介质,弥补生化单元因碳源不足所致除磷效能不佳问题。

③ 伴随湿地生态系统逐步构建成熟(土壤、植物、微生物有效协同),系统运行效果将进一步提升,但应持续关注雨洪期漫淹、冬季气温下降、来水水质波动等因素对系统稳定性的影响。

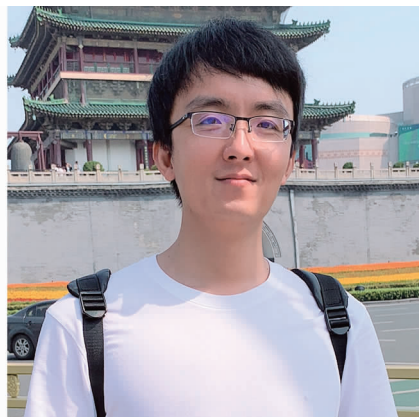
④ 在客流污染无法短期改善、流域污染治理补偿机制尚未建立的情况下,通过分段治理实现了区域改善目标,并为未来区域水系环境提升提供了重要保障与处置空间。然而,阻源截污始终是整治新河水质的根本性措施。强化上下游联动,推动全流域治理是实现其“长制久清”的必由之路。

参考文献:

- [1] 丁晓雯,沈珍瑶,刘瑞民,等. 基于降雨和地形特征的输出系数模型改进及精度分析[J]. 长江流域资源与环境,2008,17(2):306-309.
Ding Xiaowen, Shen Zhenyao, Liu Ruimin, et al. Improved export coefficient model considering precipitation

as well as terrain and its accuracy analysis [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17 (2):306-309 (in Chinese).

- [2] 陈中博,孔祥娟. 城市黑臭水体整治的技术路径——保护、恢复、修复[J]. 中国给水排水,2017,33(14):29-32.
Chen Zhongbo, Kong Xiangjuan. Training technology of urban malodorous black waters: Protection, recovery and restoration [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33 (14):29-32 (in Chinese).
- [3] 李骏飞,杨磊三,周炜峙. 海绵城市与黑臭水体治理共同建设途径探讨[J]. 中国给水排水,2016,32(24):35-38.
Li Junfei, Yang Leisan, Zhou Weizhi. Discussion on common construction of sponge city and malodorous black river treatment project [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(24):35-38 (in Chinese).
- [4] 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. Functional recovery and water quality improvement of urban black-odor water bodies [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(4):34-36 (in Chinese).
- [5] 俞骏,占子杰,张毅,等. A/O-MBBR-BAF 一体化设备处理中乐河黑臭水体[J]. 中国给水排水,2017,33(20):92-95.
Yu Jun, Zhan Zijie, Zhang Yi, et al. Study on the process of A/O-MBBR-BAF integrated facility for treating black-odor water in Zhongle River [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(20):92-95 (in Chinese).



作者简介:马越(1986-),男,陕西西安人,硕士,工程师,从事给水排水、水环境科学及海绵城市技术研究。

E-mail:rain_horse@126.com

收稿日期:2018-05-16