

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.14.024

异位组合人工湿地用于河流水质净化

王翔¹, 朱召军¹, 张金菊¹, 张瑜倩¹, 李鸿², 张红川¹

(1. 河南省正大环境科技咨询工程有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 驻马店市污水处理有限责任公司, 河南 驻马店 463000)

摘要: 针对人工湿地在北方寒冷地区运行效果不佳、容易堵塞、抗冲击负荷低等问题, 河南省某河道在其河滩地采用生物曝气塘+表面流人工湿地+复合垂直潜流人工湿地+稳定塘的异位组合工艺对其水体进行深度处理, 设计处理规模 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2019年实际运行数据表明, 在进水水质不稳定的情况下, 出水水质依然稳定达到或优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV类标准, 对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的平均去除率分别为39.52%、55.53%、35.97%。该技术在原位生态修复用地紧张、水质提标要求较高、水量波动较大等微污染河流治理中具有推广价值。

关键词: 河道治理; 异位处理; 垂直流人工湿地

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)14-0137-05

Application of Ex-situ Composite Constructed Wetlands in River Purification

WANG Xiang¹, ZHU Zhao-jun¹, ZHANG Jin-ju¹, ZHANG Yu-qian¹, LI Hong²,
ZHANG Hong-chuan¹

(1. Henan Zhengda Environmental Technology & Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China;
2. Zhumadian Sewage Treatment Co. Ltd., Zhumadian 463000, China)

Abstract: Constructed wetlands are often suffering from poor operation effect, easy blockage and low impact load resistance in the northern cold regions. In terms of these problems, a combined process of biological aeration pond, surface flow constructed wetland, composite vertical flow constructed wetland and stable pond are utilized in a river channel of Henan Province for advanced treatment of its water body, and the designed treatment capacity could reach to $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. The operation results in 2019 showed that the effluent quality could still reach or surpass the level IV criteria in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002) even under the condition of unstable influent quality, and the average removal percentage of COD, $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP were 39.52%, 55.53% and 35.97%, respectively. This technology could provide reference for managing micro-polluted river, especially in the areas short of in-situ ecological restoration lands, with high raising water quality standard and great fluctuation of water quantity.

Key words: river management; ex-situ treatment; vertical flow constructed wetland

随着工业化、城镇化进程的迅猛发展,水、大气及土壤污染等环境问题随之而来,并逐渐成为全球

性问题^[1]。为达到河道水体修复运行费用低、操作简单、出水水质稳定且兼具生态景观效果等目标,20

世纪 70 年代以来,异位人工湿地河道修复技术应运而生^[2-3]。所谓异位人工湿地河道修复技术,是指将受污染的河水从河道转移到邻近地点(现有河滩地、洼地、沟渠或者废弃坑塘等),采用人工湿地技术对其中的污染物进行治理的方法^[4]。目前,该技术措施已在国内多项河道水质净化工程中得以应用,并取得较好的环境效益^[5-6]。

河南省某河道发源于新密市赵庙沟村,属淮河流域,长 171 km,流域面积 1 758 km²。由于河道自净能力下降,入河污染物(工业点源、农业面源等污染)含量较大,造成河道水质恶化,藻类泛滥。为满足下游出境断面水质目标,本工程采用异位组合人工湿地技术,将河水拦截后自流进入生态处理系统,出水达标后自流回补入河。

1 项目概况

本工程设计处理规模为 $12 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,占地面积约 13.2 hm²,生态湿地系统占地 9.6 hm²,鸟瞰图见图 1。



图 1 人工湿地鸟瞰图

Fig. 1 Aerial view of the constructed wetland

设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab. 1 Design influent and effluent quality

项目	$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		
	COD	$\text{NH}_3 - \text{N}$	TP
进水水质	50	4	0.5
出水水质	30	1.5	0.3

该工程处理水源为该河道上游来水,包括沿岸生活污水、工业废水及造纸群企业处理后的生产废

水。河水水质、水量具有季节性,波动较大。该工程于 2016 年建成并投入运行至今,湿地运行趋于平稳并能达到设计标准。

2 工程设计

2.1 工艺流程

河道水处理工艺流程见图 2。

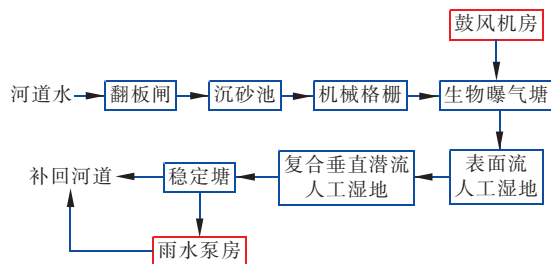


图 2 河道水处理工艺流程

Fig. 2 Flow chart of river water treatment process

本项目选址为河道南侧一块未利用的河滩地,上游 500 m 处设置一道翻板闸,水位提升后自流进入项目区,处理流程全部重力自流。河水经管道流至沉砂池,去除泥砂及大部分悬浮颗粒物;再经机械格栅去除植物残体、漂浮物等杂质;设置生物曝气塘主要作用是冬季河水中溶解氧较低时,对水体进行复氧;河水复氧后经配水渠均匀,依次进入表面流人工湿地、复合垂直潜流人工湿地及稳定塘,利用吸附、沉淀、过滤、离子交换、微生物同化分解和植物吸收作用去除大部分污染物^[7],水质达标后自流汇入河道下游。

2.2 工艺单元设计参数

① 翻板闸

翻板闸位于上游河道较窄处,为三孔水力翻板钢闸门,每道孔宽 6 m,共 18 m,闸门高 2 m;可将原河面高程抬高约 1.8 m。立坝可蓄水,卧坝可行洪排涝。

② 沉砂池

采用平流式沉砂池。尺寸为 30 m × 6 m × 1.5 m,2 格,有效水深 1.2 m,停留时间 2.6 min,根据泥砂量定期清理。

③ 格栅渠

格栅渠尺寸 5 m × 6 m × 1.2 m,1 座,设置机械细格栅 2 台,栅条间隙 5 mm,过栅流速为 0.6 m/s,功率为 3 kW;设置无轴螺旋输送机 1 台,功率 1.1 kW。

④ 生物曝气塘

生物曝气塘尺寸 $30\text{ m} \times 20\text{ m} \times 2.5\text{ m}$, 4格, 有效水深 2 m , 水力停留时间 0.96 h ; 池底设置穿孔曝气管; 配套鼓风机房内设置罗茨鼓风机 6 台 (4 用 2 备), 风量 $41.63\text{ m}^3/\text{min}$, 风压 24.5 kPa , 功率 30 kW , 水力搅拌强度 $4.2\text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。池内设置在线溶氧仪, 含氧量 $<0.5\text{ mg/L}$ 时开启风机。

⑤ 表面流人工湿地

表面流人工湿地为扇形结构, 尺寸 $38\text{ m} \times (29 \sim 31)\text{ m} \times 1.5\text{ m}$, 15 格, 有效水深 0.9 m , 有效水力停留时间 3.2 h , 表面负荷 $16\text{ gCOD}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。采用防渗土工布及黏土夯实防渗。基质采用陶粒、活性钙石、砾石, 厚 15 cm 。自水流方向依次设置沉水植物区、挺水植物区、浮叶植物区, 沉水植物区种植狐尾藻、轮叶黑藻、菹草、金鱼藻, 挺水植物区种植芦苇、菖蒲、香蒲、水葱, 浮叶植物区种植耐寒睡莲。池内设置三道石笼网, 内部填充砾石。

⑥ 复合垂直潜流人工湿地

采用上升流与下降流相结合的复合流形式, 复合垂直潜流人工湿地尺寸 $30\text{ m} \times 30\text{ m} \times 1.8\text{ m}$, 56 格, 水深 1.55 m , 有效水力停留时间 6.2 h , 表面负荷 $36.7\text{ gCOD}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。采用防渗土工布及黏土夯实防渗。收布水管采用枝状形式, 上下 2 层, 主管中间设置阀门井, 用于切换基质层中水流方向, 出水管阀门控制高、中、低水位运行。池内基质层厚 1.55 m , 粒径由下至上依次降低 ($\phi 50 \sim 5\text{ mm}$), 基质层填料为砾石、沸石。植物全部为挺水植物: 芦苇、菹草、香蒲、菖蒲。

⑦ 稳定塘

稳定塘根据地形布置, 形状不规则, 总占地面积 $28\,000\text{ m}^2$, 有效水深 $0.9 \sim 1.5\text{ m}$, 有效水力停留时间 8.4 h 。采用黏土夯实防渗。根据垂直流湿地排水渠位置, 采用暗管多点进水, 既能有效防止死水区形成, 又美观、自然。植物种植面积约占 30% , 主要为芦苇、芦竹、香蒲、菹草、美人蕉、旱伞草及金鱼藻、轮叶黑藻、菹草。通过投放鱼类 (滤食性: 植食性: 肉食性 = $6:3:1$), 建立、完善水生态系统, 保持水生态系统平衡, 鱼苗投放密度 $8\text{ kg}/1\,000\text{ m}^2$, 鱼苗规格 $50 \sim 100\text{ g}/\text{尾}$ 。

⑧ 雨水泵房

正常运行时, 河水通过集水井自流汇入下游河道; 洪水期时, 关闭出水管道闸门, 开启雨水提升泵, 及时排出湿地区雨水并防止河水倒流进入湿地区。

雨水泵房尺寸 $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 4.2\text{ m}$, 1 座; 设置雨水提升泵 3 台, 流量 $2\,000\text{ m}^3/\text{h}$, 扬程 90 kPa , 功率 75 kW 。

⑨ 配水渠

表面流人工湿地配水渠有效水深 0.5 m , 宽 4 m , 渠底坡比降 0.0005 , 渠长 473 m , 水力损失 0.24 m 。复合垂直潜流人工湿地配水渠共 13 道, 长 $31 \sim 244\text{ m}$, 坡降 0.001 。

2.3 设计特点

① 异位修复技术保留了原河道的生态系统, 易于施工, 投资成本低, 净化效果好, 便于后期运行维护。

② 选址合理, 通过设置翻板闸提高上游水位, 实现全程自流, 大大降低运行成本。河水深度净化后补充河道水源, 具有较大的环境、生态效益。

③ 表面流人工湿地采用可旋转弯头均匀进水, 比固定溢流式进水更易控制各池进水量。单池运行出现问题时, 可切断进水进行维修, 水量平均进入剩余池体, 具有较强抗冲击能力。

④ 垂直潜流人工湿地采用复合潜流人工湿地, 通过控制主管上的阀门实现上升流与下降流自由切换, 改变水流方向, 有效延缓湿地基质堵塞。

⑤ 复合垂直潜流人工湿地出水设置高、中、低不同水位, 既能提高基质表面与空气的接触面积, 提高脱氮能力, 又能在冬季运行保证一定的去除能力 (低水位运行), 更适用于北方的人工湿地。

3 运行效果及经济分析

本项目于 2016 年通过市环境保护局竣工环保验收。以 2019 年湿地进出水在线 COD 、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 TP 监测数据分析湿地运行效果。以进、出口在线监测仪整月数据为依据, 去掉最大值及最小值后取平均值作为当月运行数据。

3.1 COD 去除效果

人工湿地处理系统主要由植物、基质及微生物组成。污水中 COD 的去除途径主要有: ① 植物生长同化吸收作用; ② 植物根系及基质间附着的微生物的吸收、降解作用^[8]。人工湿地对 COD 的去除率分析见图 3。由图 3 可知, 进水 COD 变化幅度较大, 5 月份平均值超过设计进水标准, 但出水平均浓度为 26.23 mg/L , 达标率 100% 。不同月份 COD 去除率存在明显差异, 5 月份最高, 11 月份最低, 平均去除率为 39.52% 。

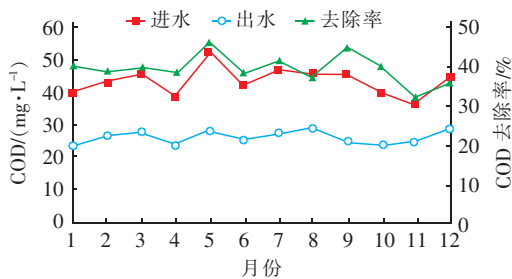
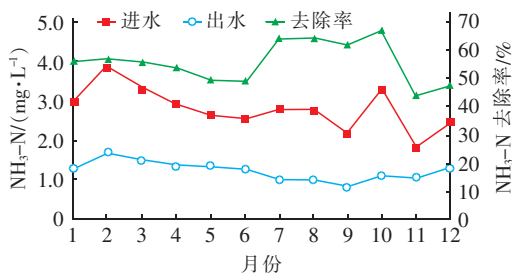


图3 人工湿地进、出水 COD 及 COD 去除率变化

Fig. 3 Change of COD concentration and total removal rate in the influent and effluent of constructed wetland

3.2 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除效果

污水中氮的存在形态分为无机氮(氨态氮、亚硝态氮、硝态氮)及有机氮2种。人工湿地对污水中氮的去除途径主要有:①氨态氮自身挥发,但挥发量较小;②湿地植物对氮的吸收作用;③基质间微生物通过硝化反硝化对氮进行分解代谢,是人工湿地系统脱氮最主要的途径^[9]。人工湿地对 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 的去除率分析见图4。

图4 人工湿地进、出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 及 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 去除率变化Fig. 4 Change of $\text{NH}_3 - \text{N}$ concentration and total removal rate in the influent and effluent of constructed wetland

由图4可知,9月出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 效果最佳,为0.83 mg/L;年平均进水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为2.79 mg/L,均低于设计标准;平均出水 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 为1.22 mg/L,达标率100%。 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 年去除率为43.72%~66.67%,平均为55.53%。

3.3 TP 去除效果

污水中的磷主要以无机磷的形态存在,其去除途径主要有:①基质对磷的物理吸附、过滤及沉淀作用;②湿地植物的同化吸收作用;③微生物对磷的同化吸收及聚磷菌超量摄磷作用^[10]。人工湿地对 TP 的去除率分析见图5。

由图5可知,各月出水 TP 与进水浓度变化趋势相同且变化较大,但全年 TP 去除率变化不大,受季节影响较小。4月份进水浓度较高,平均为0.43 mg/L,是10月份的1.48倍,但均低于设计标准;平

均出水 TP 为0.22 mg/L,达标率100%。TP 去除率为29.41%~41.47%,平均为35.97%。

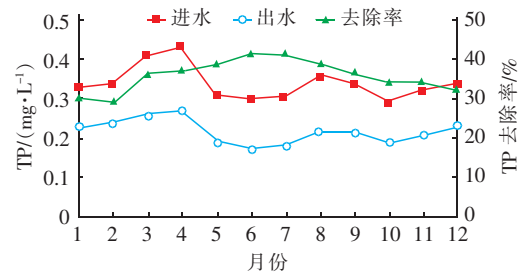


图5 人工湿地进、出水 TP 浓度及 TP 去除率变化

Fig. 5 Change of TP concentration and total removal rate in the influent and effluent of constructed wetland

3.4 主要经济技术指标

本项目工程建设总投资为5600万元,其中直接投资(土建、材料等)为4490万元,折合投资为467元/ m^3 。直接运行费用(包括人工费、电费、植物收割及补栽等费用)为0.06元/ m^3 。

4 结语

异位组合人工湿地处理法适合用于处理北方地区受污染河道,具有耐冲击负荷强、操作方便、不影响雨季行洪等特点。

① 采用生物曝气塘+表面流人工湿地+复合垂直潜流人工湿地+稳定塘组合工艺处理污染河流,具有出水水质稳定、生态景观效果好等优点。

② 本工程投资成本为467元/ m^3 ,直接运行费用为0.06元/ m^3 。

③ 本组合工艺对 COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP 的平均去除率依次为39.52%、55.53%、35.97%,出水水质可稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准。

参考文献:

- [1] 向衡,韩芸,潘瑞玲,等. 潜流-垂直流改进型人工湿地处理河道水的研究[J]. 环境工程,2015,33(3): 60-64.
XIANG Heng, HAN Yun, PAN Ruiling, et al. Study on treatment of river water by improved subsurface flow-vertical flow wetland[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(3): 60-64 (in Chinese).
- [2] 张列宇,饶本强,熊瑛,等. 人工湿地黑臭水体处理系统微生物脱氮机理研究[J]. 水生生物学报,2010,34(2): 256-261.
ZHANG Lieyu, RAO Benqiang, XIONG Ying, et al. The

- microbial mechanism of horizontal constructed wetland used to treat black-odor river[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(2): 256–261 (in Chinese).
- [3] 王硕,刘恋,熊茂. 表面流-垂直流人工湿地用于某受污染河道水质净化[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(24): 95–98, 103.
WANG Shuo, LIU Lian, XIONG Ji. Surface flow-vertical flow constructed wetland for purification of polluted river water[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(24): 95–98, 103 (in Chinese).
- [4] 马书占,潘继征,吴晓东,等. 旁路多级人工湿地对巢湖流域南淝河水的净化效果[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(2): 303–311.
MA Shuzhan, PAN Jizheng, WU Xiaodong, *et al.* Purification efficiencies of a multi-stage bypass constructed wetland for treating polluted water from Nanfei river, Chaohu catchment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(2): 303–311 (in Chinese).
- [5] 郝胜杰. 垂直潜流人工湿地异位修复再生景观水体的研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2014.
HAO Shengjie. Ecological Remediation of Regeneration Landscape Water with Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2014 (in Chinese).
- [6] 陈思莉,常莎,邴永鑫,等. 接触氧化+人工湿地工艺异位处理受污染河水[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(22): 47–50.
CHEN Sili, CHANG Sha, BING Yongxin, *et al.* Application of biological contact oxidation process and constructed wetland in ex-situ treatment of polluted river water[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(22): 47–50 (in Chinese).
- [7] 王翔,朱召军,尹敏敏,等. 组合人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(6): 97–101.
WANG Xiang, ZHU Zhaojun, YIN Minmin, *et al.* Application of hybrid constructed wetland in tail water treatment of municipal sewage plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(6): 97–101 (in Chinese).
- [8] 于水利,修春海,杨月杰. 人工湿地基质对微污染原水中有有机物的去除效果[J]. *中国给水排水*, 2011, 27(3): 56–58.
YU Shuili, XIU Chunhai, YANG Yuejie. Study on removal effect of organic matters in micro-polluted raw water by substrate in constructed wetland[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(3): 56–58 (in Chinese).
- [9] 冀泽华,冯冲凌,吴晓芙,等. 人工湿地污水处理系统填料及其净化机理研究进展[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(8): 2234–2243.
JI Zehua, FENG Chongling, WU Xiaofu, *et al.* Research progress on filler application and purification mechanisms in constructed wetland wastewater treatment system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(8): 2234–2243 (in Chinese).
- [10] 王荣,贺锋,徐栋,等. 人工湿地基质除磷机理及影响因素研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(增刊): 12–18.
WANG Rong, HE Feng, XU Dong, *et al.* The study on the mechanisms and influencing factors of substrates in constructed wetlands removing phosphorus[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(S1): 12–18 (in Chinese).

作者简介:王翔(1976–),男,河南禹州人,本科学历,高级工程师,主要研究方向为水污染控制与生态修复。

E-mail: wx0056@163.com

收稿日期: 2020–06–08

修回日期: 2020–06–24

(编辑:衣春敏)

节约用水,人人有责