

组合人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理

王翔¹, 朱召军¹, 尹敏敏², 张瑜倩¹, 张振兴³

(1. 河南省正大环境科技咨询工程有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 河南省图天新能源科技有限公司, 河南 郑州 450000; 3. 长葛市污水净化站, 河南 许昌 461500)

摘要: 针对城市污水处理厂尾水特性,采用强化澄清调节池+微曝气垂直潜流人工湿地+水平潜流人工湿地+表面流人工湿地+氧化塘组合工艺进行处理,介绍了湿地工艺流程及设计参数,分析和讨论了稳定期的运行数据。实际运行结果表明,该组合工艺对COD、NH₃-N、TP平均去除率分别为47.4%、72.6%、45.8%;垂直流人工湿地中4种不同挺水植物(芦苇、西伯利亚鸢尾、香蒲、菖蒲)对污染物去除效果差异不显著;垂直流人工湿地中植物对COD、NH₃-N、TP去除贡献占比依次为20.18%、20.22%、9.75%。目前,该工程出水水质稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准,具有较好的环境效益和社会效益。

关键词: 城镇污水厂尾水; 深度净化; 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(2020)06-0097-05

Application of Hybrid Constructed Wetland in Tail Water Treatment of Municipal Sewage Plant

WANG Xiang¹, ZHU Zhao-jun¹, YIN Min-min², ZHANG Yu-qian¹, ZHANG Zhen-xing³

(1. Henan Zhengda Environmental Technology & Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China;

2. Henan Tutian New Energy Technology Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China; 3. Changge

Sewage Treatment Station, Xuchang 461500, China)

Abstract: According to the characteristics of tail water of municipal sewage treatment plant, a combined process of enhanced clarification and regulation pool, micro-aeration vertical flow constructed wetland, horizontal flow constructed wetland, surface flow constructed wetland, and oxidation pond was adopted to treat it. The technical process and design parameters were introduced, the operation results during the steady period were analyzed and discussed. The practical operation showed that the average removal rates of COD, ammonia nitrogen and total phosphorus were 47.4%, 72.6% and 45.8% respectively. There was no significant difference in pollutant removal effect of four different emergent plants (*Phragmites australis*, *Iris sibirica*, *Typha orientalis* and *Acorus calamus*) in vertical flow constructed wetland. The contribution of plants to the removal of COD, NH₃-N and TP in vertical flow constructed wetlands were 20.18%, 20.22%, and 9.75%, respectively. At present, the project effluent could stability reach the level Ⅳ criteria of *Environment Quality Standard for Surface Water* (GB 3838-2002), which had great environmental and social benefits.

Key words: tail water of sewage treatment plant; advanced purification; vertical flow constructed wetland

人工湿地污水处理技术起源于20世纪70年代,后来逐渐发展成为污水生态处理重要手段之一。该技术利用植物、动物、微生物的协同作用,通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、微生物同化分解和植物吸收等多种途径去除污水中的悬浮物、有机物、氮磷等^[1-2],最终将污水处理工程打造成为生态景观工程。

清颍河为长葛市主要河流之一,为了使清颍河出境断面(长葛市)水质达到Ⅳ类水标准,需要对沿岸污水处理厂进行提标改造。在清颍河旁选取合适位置,采用“强化澄清调节池+微曝气垂直潜流人工湿地+水平潜流人工湿地+表面流人工湿地+氧化塘”组合工艺构建杜村寺人工湿地。以该工程为研究对象,对各工况进、出水水质进行监测分析,以得出适合该工程的人工湿地处理工艺,并为探讨适合北方城市污水处理厂尾水人工湿地深度处理提供科学依据。

1 工程概况

杜村寺人工湿地处理来水为长葛市污水处理厂尾水,尾水经杜村寺人工湿地处理后再排入清颍河(见图1)。本项目处理规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,占地面积约 14.7 hm^2 ,湿地植物占地面积约 14.3 hm^2 。本工程进水水质为《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,即 $\text{COD} \leq 50 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N} \leq 5(8) \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.5 \text{ mg/L}$,设计出水水质需满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类水标准($\text{COD} \leq 30 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3 - \text{N} \leq 1.5 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.3 \text{ mg/L}$)。

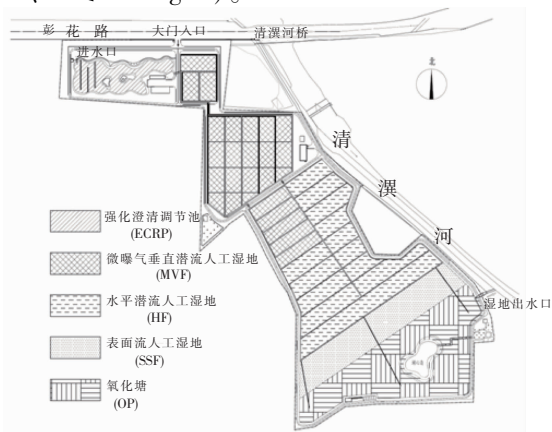


图1 杜村寺人工湿地位置

Fig.1 Location of the constructed wetland in Ducunsi village

2 工程设计

目前,虽然大部分城市污水处理厂出水能够达到一级A排放标准,但是河流水功能区划目标也逐步提升且尾水总量大、可生化性低、出水不稳定,尾水直排入河仍会对自然水体造成一定程度的破坏^[3]。同时由于人工湿地具有操作简单、维护费用低、出水水质稳定且景观效果好等特点^[4-6],越来越广泛地应用于尾水深度处理。

① 强化澄清调节池

强化澄清调节池位于湿地的最前端,污水厂尾水经管道长距离运输后进入调节池。调节池前端设置3道折流墙,内设弹性填料,利用填料的吸附、沉淀作用将SS降至 15 mg/L 以下,同时提高污水可生化性。本单元占地面积为 6290 m^2 ,土石结构;平均水深为 2 m ,水力停留时间约 5 h ;填料区高度为 2.5 m ,填料体积为 1100 m^3 。

② 微曝气垂直潜流人工湿地

微曝气垂直潜流人工湿地采用升流式。底部平行设置DN100布水管,间距 0.5 m ,污水由配水渠进入布水管均匀布水后呈上升流态,经池上部收水管收集后进入收水渠,出口设置DN200可旋转变头,用于调节水深及均衡各池流量。池底同时设置DN50曝气管道,由鼓风机房统一布气,气水比为 $1:2$ 。池内基质层深度为 2 m ,粒径由下至上依次减小($\varnothing 30 \sim 50 \text{ mm}$ 至 $\varnothing 5 \sim 8 \text{ mm}$),材质为砾石、沸石。本单元占地面积为 26685 m^2 ,共26格,钢混结构;设计水力负荷为 $2.25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,COD表面负荷为 $26.8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,水力停留时间为 8.5 h ;填料层高度为 2 m ,空隙率约为 39.81% 。

③ 水平潜流人工湿地

水平潜流人工湿地是最后一道将反硝化脱氮与有机物分解耦合起来的净化工序。进水端及出水端池壁预留3排 $\varnothing 200 \text{ mm}$ 的孔洞,垂直间隔 0.3 m ,水平间隔 0.5 m ;两端至中间填料粒径由大变小,填料材质为聚磷卵石($\varnothing 150 \sim 200 \text{ mm}$)、钙质公分石($\varnothing 30 \sim 50 \text{ mm}$)。本单元占地面积为 29934 m^2 ,共13格,钢混结构;设计水力负荷为 $2.00 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,COD表面负荷为 $11.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,水力停留时间为 9.5 h ;填料层高度为 2 m ,空隙率约为 39.81% 。

④ 表面流人工湿地

污水经水平潜流收水渠均匀投配到表面流人工湿地,但由于表面流人工湿地及氧化塘面积较大且

不规则,容易形成死水区,故设置3根DN300的导流管,分别通向容易形成死水区的区域。本单元占地面积为14 351 m²,土石结构,平均水深为0.5 m,设计停留时间为2.9 h。

⑤ 氧化塘

氧化塘以景观塑造为主、水质净化为辅。设置深槽—浅滩,为水生植物、鱼类及微生物创造最优生境。本单元占地面积为26 123 m²,土石结构,平均水深为0.8 m,设计停留时间为8.4 h。

⑥ 植物配置

垂直潜流人工湿地及水平潜流人工湿地主要种植挺水植物,如芦苇、西伯利亚鸢尾、菖蒲、香蒲等;强化澄清调节池、表面流人工湿地及氧化塘以种植沉水和浮叶植物为主、挺水植物为辅,如菹草、轮叶黑藻、伊乐藻、睡莲、再力花等。

3 运行效果及经济分析

本项目于2016年4月建成并投入运行。2017年3月—2018年2月对各处理单元出口进行取样监测,监测周期为1年,取样频率为每周1次,监测主要因子为COD、NH₃-N、TP。由于每个处理单元面积较大,故在每个工艺单元总出水渠不同位置取样3次,取样间隔5 min,每次取样前用采样点水样将采样器充分清洗后再采样。

3.1 COD去除效果

人工湿地对有机物的去除途径较多^[7],主要为基质间微生物吸收、吸附,植物根系吸收利用等。各单元出水COD浓度及总体去除率变化见图2。

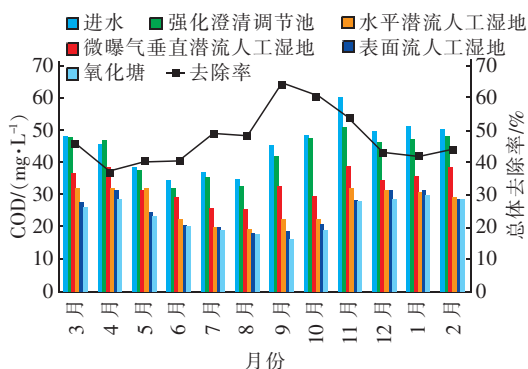


图2 各单元出水COD浓度及总体去除率变化

Fig. 2 Variation of COD concentration and total removal rate of each unit

由图2可知:湿地进水COD部分时段超出设计标准,但出水水质均能稳定达到Ⅳ类水标准;COD

平均去除率为47.4%,9月份去除率最高,是4月份的1.75倍;冬季表面流人工湿地及氧化塘出水水质出现反弹现象,分析原因可能为湿地植物冬季死亡且未收割导致有机质腐烂、释放进入水体;强化澄清调节池的COD去除率为(5.0±4.5)%,微曝气垂直潜流人工湿地的COD去除率为(22.1±7.0)%,水平潜流人工湿地的COD去除率为(20.1±6.1)%,表面流人工湿地的COD去除率为(5.9±6.3)%,氧化塘的COD去除率为(5.7±4.0)%。

3.2 NH₃-N去除效果

水体中氮的去除方法主要有两种:①通过硝化、反硝化作用,将氮转变为氮气逸出水体;②通过以沉水植物为主的水生植物同化作用,作为营养元素被吸收^[8]。各单元出水NH₃-N浓度及总体去除率变化见图3。

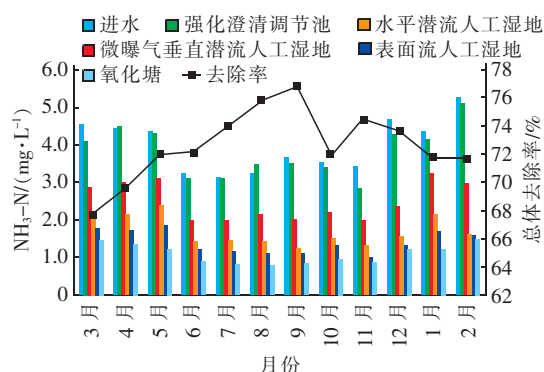


图3 各单元出水NH₃-N浓度及总体去除率变化

Fig. 3 Variation of NH₃-N concentration and total removal rate of each unit

由图3可知,8月份出水水质最佳,平均NH₃-N浓度为0.78 mg/L,2月份出水水质最差,平均NH₃-N浓度为1.49 mg/L;去除率平均为72.6%;强化澄清调节池的NH₃-N去除率为(3.8±6.2)%,微曝气垂直潜流人工湿地的NH₃-N去除率为(34.6±6.8)%,水平潜流人工湿地的NH₃-N去除率为(32.1±6.0)%,表面流人工湿地的NH₃-N去除率为(17.3±6.2)%,氧化塘的NH₃-N去除率为(21.4±9.5)%。

3.3 TP去除效果

人工湿地对TP的去除主要通过物理、化学、生物三种形式,人工湿地基质(富含钙、铝、铁元素的砾石)及附着的微生物对磷的吸附、沉淀、吸收为主要途径,其次为湿地植物对磷的吸收、转化^[9-10]。

各单元出水 TP 浓度及总体去除率变化见图 4。

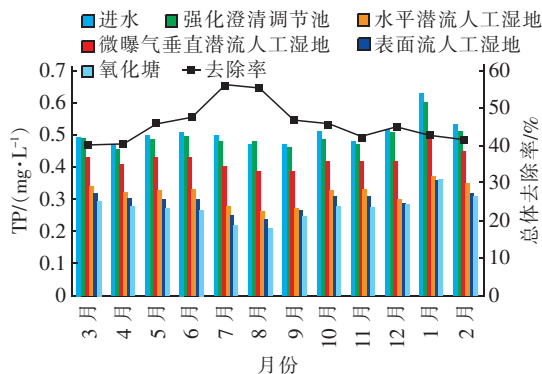


图4 各单元出水 TP 浓度及总体去除率变化

Fig. 4 Variation of TP concentration and total removal rate of each unit

由图 4 可知,TP 去除率随时间变化浮动较小(去除率平均为 45.8%),仅 7 月和 8 月相对较高;各单元 TP 去除率由大到小依次为水平潜流人工湿地、微曝气垂直潜流人工湿地、氧化塘、表面流人工湿地、强化澄清调节池,原因可能为水平潜流湿地内

表 1 不同类型垂直潜流人工湿地对污染物的去除率

Tab. 1 Removal efficiency of pollutants in different types of vertical flow constructed wetlands

%

种植类型	6 月			7 月			8 月		
	COD	NH ₃ -N	TP	COD	NH ₃ -N	TP	COD	NH ₃ -N	TP
无植物	23.49	35.37	12.90	27.04	34.76	14.87	25.38	38.14	17.29
芦苇	29.01	45.14	15.65	30.98	45.81	14.89	31.24	45.02	19.27
西伯利亚鸢尾	31.58	43.78	13.56	34.18	45.23	15.89	35.15	44.95	21.37
菖蒲	29.34	47.11	14.85	31.97	48.99	17.37	30.83	46.01	19.84
香蒲	30.87	42.89	12.99	32.16	43.57	15.67	32.92	44.48	18.94

3.5 主要技术经济指标

本工程总投资约 6 970 万元,折合投资成本为 1 162 元/m³,综合运行成本(电费、人工费、植物维护费等)为 0.11 元/m³。出水可用于城区绿化、城市内河水源补给等,以该地区自来水单价为 2.5 元/m³计,则可节约水费 15 万元/d,扣除运行费用 0.66 万元/d,则间接经济效益为 14.34 万元/d。

4 结语

组合人工湿地对进水污染物浓度变化具有一定的抗冲击能力,适用于城市污水处理厂尾水深度处理。清溪河杜村寺人工湿地采用了“强化澄清调节池+微曝气垂直潜流人工湿地+水平潜流人工湿地+表面流人工湿地+氧化塘”组合工艺,分析其运行结果可得:

① 在污水处理厂正常运行条件下,湿地出水水质可稳定达到《地表水环境质量标准》(GB

设置了含钙填料,增加了对磷的吸附,并保证冬季低温情况下总出水水质达到Ⅳ类水标准。

3.4 植物对污染物去除效果

湿地植物是人工湿地不可或缺的组成部分,对污染物去除发挥着重要作用。选取 5 格垂直流人工湿地为研究对象,在相同处理水量、水力负荷、气温、进水水质等条件下,研究基质(生物膜)、不同植物类型对污染物去除的贡献度,具体见表 1。由表 1 可知:有植物种植的湿地比无植物种植的湿地去除率略高,但植物对污染物去除贡献度占比较小,植物对 COD、NH₃-N、TP 去除贡献占比依次为 20.18%、20.22%、9.75%,说明植物对磷的去除率较小;四种不同植物类型的湿地对污染物去除率偏差较小,对 COD 去除率为(31.69±1.47)%,对 NH₃-N 去除率为(45.25±1.57)%,对 TP 去除率为(16.69±0.63)%;不同植物对不同污染因子去除效果不同,西伯利亚鸢尾对 COD 去除率相对较高,菖蒲对 NH₃-N、TP 去除相对较好。

3838—2002)Ⅳ类水标准,对 COD、NH₃-N、TP 平均去除率依次为 47.4%、72.6%、45.8%。组合处理工艺具有出水稳定、运行费用低等优点。

② 冬季时表面流人工湿地及氧化塘需进行植物收割和枯死植物残体清理,否则出水 COD 浓度可能出现反弹。

③ 垂直潜流人工湿地种植的 4 种不同植物对污染物去除效率偏差较小。

④ 植物对污染物去除贡献度占比较小,对 COD、NH₃-N、TP 去除贡献占比依次约 20.18%、20.22%、9.75%,且植物对磷的去除率较小。

参考文献:

- [1] 魏俊,赵梦飞,刘伟荣,等.我国尾水型人工湿地发展现状[J].中国给水排水,2019,35(2):29-33.
Wei Jun,Zhao Mengfei,Liu Weirong,et al. Development

- status of constructed wetland (CWs) for treatment of terminal effluent of wastewater treatment plants (WWTPs) in China[J]. *China Water & Wastewater*, 2019,35(2):29-33(in Chinese).
- [2] 刘舒巍,张从轩,杨兴桐,等. SBBR 与人工湿地组合工艺脱氮除磷[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(8): 4527-4534.
- Liu Shuwei, Zhang Congxuan, Yang Xingtong, *et al.* Biological phosphorus and nitrogen removal by combined process of sequencing biofilm batch reactor and constructed wetland [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(8): 4527-4534 (in Chinese).
- [3] 孔令为,邵卫伟,梅荣武,等. 浙江省城镇污水处理厂尾水人工湿地深度提标研究[J]. *中国给水排水*, 2019,35(2):39-43.
- Kong Lingwei, Shao Weiwei, Mei Rongwu, *et al.* Study on constructed wetland for advanced treatment of terminal effluent of wastewater treatment plant in Zhejiang Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2019,35(2):39-43(in Chinese).
- [4] 张长宽,倪其军,杨栋,等. 低温条件下高效复合人工湿地对尾水的净化效应[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4):2034-2040.
- Zhang Changkuan, Ni Qijun, Yang Dong, *et al.* Running effectiveness of integrated constructed wetland on purifying discharge from waste water treatment plant in cold season [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(4):2034-2040(in Chinese).
- [5] 段田莉,成功,郑媛媛,等. 高效垂直流人工湿地+多级生态塘深度处理污水厂尾水[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(11):5828-5835.
- Duan Tianli, Cheng Gong, Zheng Yuanyuan, *et al.* Advanced treatment of tail water from sewage plant by high-efficiency vertical flow constructed wetland - multistage ecological ponds [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(11):5828-5835 (in Chinese).
- [6] 廖波,林武. 强化型垂直流人工湿地用于污水处理厂尾水深度处理[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(16): 74-77.
- Liao Bo, Lin Wu. Application of enhanced vertical flow constructed wetland to advanced treatment of effluent from wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(16): 74-77(in Chinese).
- [7] Vymazal J. The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development [J]. *Water Res*, 2013, 47(14): 4795-4811.
- [8] 王中玉,白小晶,王华林,等. 城郭河白腊湾段近自然河道湿地设计及冬季运行效果[J]. *环境工程*, 2018, 36(10): 70-74.
- Wang Zhongyu, Bai Xiaojing, Wang Hualin, *et al.* Design and winter operation effect of the near natural river wetland in Bailawan section of Chengguo River [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(10): 70-74 (in Chinese).
- [9] 管策,郁达伟,郑祥,等. 我国人工湿地在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的研究与应用进展[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(12): 2309-2320.
- Guan Ce, Yu Dawei, Zheng Xiang, *et al.* Removing nitrogen and phosphorous of effluent from wastewater treatment plants by constructed wetlands in China: An overview [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12): 2309-2320(in Chinese).
- [10] 杨林,李咏梅. 组合人工湿地处理工业园区污水厂尾水的中试研究[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(6): 1846-1850.
- Yang Lin, Li Yongmei. Pilot-scale study on advanced treatment of tail-water from wastewater treatment plant in industrial park using hybrid constructed wetland system [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(6): 1846-1850(in Chinese).



作者简介:王翔(1976-),男,河南禹州人,本科,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:2019-08-27