

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.22.017

人工湿地-稳定塘处理生活污水站尾水应用实例

陈涛¹, 李锋², 毛文龙², 李楠¹, 梁静¹

(1. 郑州大学环境技术咨询工程有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 郑州美泽景观设计有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 针对污水处理站执行的排放标准与地表水考核要求存在差距的问题,选择人工湿地-稳定塘系统对生活污水站处理尾水进行深度净化。以河南某乡镇污水处理站为例,结合尾水水质特性,设计了处理规模为2 000 m³/d的人工湿地(一级反硝化水平潜流湿地+二级水平潜流湿地+表面流湿地)-稳定塘系统,该系统稳定运行后,出水COD、NH₃-N、TP指标优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类标准,TN降至4.78 mg/L以下;玉米芯为反硝化菌持续性提供有机碳源,显著提升了湿地的脱氮效果;湿地基质床内丰富稳定的生物群落,保障了湿地系统的运行效果。

关键词: 生活污水; 人工湿地; 水平潜流湿地; 纤维素碳源; 表面流湿地; 稳定塘

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)22-0102-05

Application Example of Tail Water from a Sewage Treatment Station by Constructed Wetland and Stabilization Pond System

CHEN Tao¹, LI Feng², MAO Wen-long², LI Nan¹, LIANG Jing¹

(1. Zhengzhou University Environmental Technology Consulting Engineering Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China; 2. Zhengzhou Meize Landscape Design Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In view of the gap between the discharge standards of sewage treatment stations and the assessment requirements of surface water, the constructed wetland and stabilization pond system was selected for advanced treatment of domestic sewage. Taking a sewage treatment station of a town in Henan Province as an example, aiming at the characteristics of tail water quality, a constructed wetland, which consists of primary denitrification horizontal subsurface flow wetland, secondary horizontal subsurface flow wetland and surface flow wetland, and stabilization pond system with a treatment capacity of 2 000 m³/d was designed. After the stable operation of the system, the effluent quality indexes of COD, NH₃-N and TP were better than the level IV criteria in *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002), and the TN concentration was below 4.78 mg/L. Corn cob provided organic carbon source for denitrifying bacteria continuously, which significantly improved the nitrogen removal effect of wetland system. The abundant and stable biological community in wetland matrix bed ensured the operation effect of wetland system.

Key words: domestic sewage; constructed wetland; horizontal subsurface flow wetland; cellulose carbon source; surface flow wetland; stabilization pond

通信作者: 李锋 E-mail: 370756675@qq.com

生活污水主要为厕所冲洗水和洗涤污水^[1-3],其中含有大量有机物,如纤维素、淀粉、糖类、脂肪、蛋白质等,也常含有病原菌、病毒和寄生虫卵,以及无机盐类(氯化物、硫酸盐、磷酸盐、碳酸氢盐)等。选择生活污水处理工艺时以去除或降解有机物、氮和磷为主要目标,一般采用二级处理,常用的生化工艺有 A/O、A²/O、SBR、氧化沟、生物滤池和生物接触氧化等^[4-5],经过二级处理后尾水可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。

目前,污水处理厂尾水除部分中水回用外,大部分外排至地表水体。污水处理厂尾水水质即使达到一级 A 标准,也难以满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中 V 类标准,尤其是 TP 不达标日益凸显。对于尾水间接排入湖、库的污水处理厂而言,深度脱氮是另一个紧迫问题,亟需通过低成本的生态净化技术加以解决。

1 工艺设计

1.1 设计进、出水水质

河南某乡镇污水处理站设计处理规模为 2 000 m³/d,实际处理水量约 1 700 m³/d,选择 A/O 作为主体处理工艺,排水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,就近排入地表水体。该乡镇所处区域需执行河南省地方流域标准,相关管理部门要求污水处理站尾水水质提标至《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类标准,《河南省碧水工程行动计划》(豫政办〔2016〕35 号)明确要求有条件的地方建设尾水人工湿地提升尾水水质。该项目占地 9 000 m²,设计处理水量为 2 000 m³/d,设计进水水质满足一级 A 标准,各项出水指标(TN 除外)预计可以稳定达到地表水Ⅳ类标准,具体见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	mg·L ⁻¹			
	COD	NH ₃ -N	TN	TP
进水	50	5(8)	15	0.5
出水	30	1.5	8.0	0.3

1.2 工艺流程及参数

该工程设计采用人工湿地-稳定塘系统,针对生活污水中主要污染物,以及地方管理部门对脱氮

效果的实际要求,人工湿地选择“一级反硝化水平潜流湿地+二级水平潜流湿地+表面流湿地”,具体工艺流程见图 1。

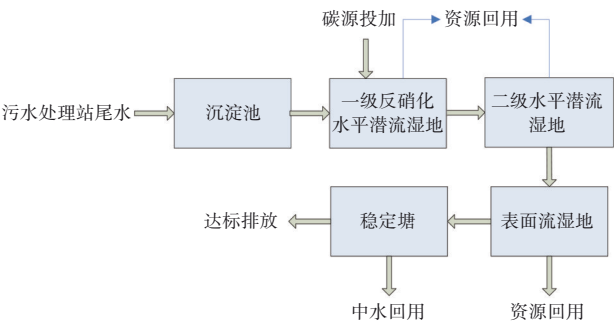


图 1 污水处理站尾水处理工艺流程

Fig.1 Tail water treatment process of a sewage treatment station

根据该项目的设计水质、水量,参阅《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)、河南省《污水处理厂尾水人工湿地工程技术规范》(DB 41/T 1947—2020)等规范中的相关设计参数,确定组合工艺的各工艺单元设计参数(见表 2)。

表 2 人工湿地-稳定塘系统设计参数

Tab.2 Design parameters of constructed wetland-stabilization pond system

项目	构(建)筑物尺寸/(m×m×m)	数量/座	面积/m ²	结构形式	备注
沉淀池	3.7×1.5×1.8	1	5.5	钢混	
一级反硝化水平潜流湿地	75×20.1×1.5	1	1 350	钢混	
二级水平潜流湿地	(11.3~22.7)×20×1.5	2	690	钢混	扇形
表面流湿地	(15.5~21.2)×15×1.2	3	840	钢混	扇形
出水井	2×1.5×1.5	1	3.0	钢混	
稳定塘		1	1 940	土石	不规则

1.3 工艺设计特点

该人工湿地-稳定塘系统的进水为乡镇污水处理站尾水,尾水水质具有如下特性:①尾水中氮以硝态氮为主;②B/C 一般不高于 0.2,有机质的可生化性与可降解性差;③C/N 不足 0.5,远低于最佳值(8),不利于反硝化脱氮作用;④C:N:P 比例失调,不利于微生物在湿地基质床填料上快速大量地形成活性生物膜^[6-7]。

针对尾水水质特性,创新湿地组合工艺,对组合工艺的关键环节——水平潜流湿地进行了创新

设计,具体见图2。

污水处理站尾水首先进入一级水平潜流湿地,在水平潜流湿地中后段设计了固态纤维素碳源投放渠,固态纤维素碳源选用农作废弃物——玉米芯,玉米芯经浸泡后持续释放有机可生化碳源,用于调节尾水的可生化性和C:N:P比例,为反硝化脱氮和后续单元生物降解污染物创造条件^[8];二级水平潜流湿地是去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的主体单元,选择功能性基质及组配,基质床自下而上铺设钙质石、沸石、陶粒和米石^[8-9],米石层种植挺水植物,通过物理

及生物过程强化湿地的硝化除氨、共沉淀及好氧除磷和复氧能力;表面流湿地铺设砾石、炉渣和陶粒,用以强化湿地的脱碳除磷能力;稳定塘作为人工湿地的后处理单元,进一步去除污染物,提升区域生态景观质量。

针对污水处理站尾水污染负荷相对较低的实际情况,选用相对较小的填料粒径,基质孔隙率控制在35%~45%,增大湿地基质床比表面积,提高基质床体对营养盐的吸附拦截能力,为微生物提供较大的附着面积,强化湿地的除污能力^[9]。

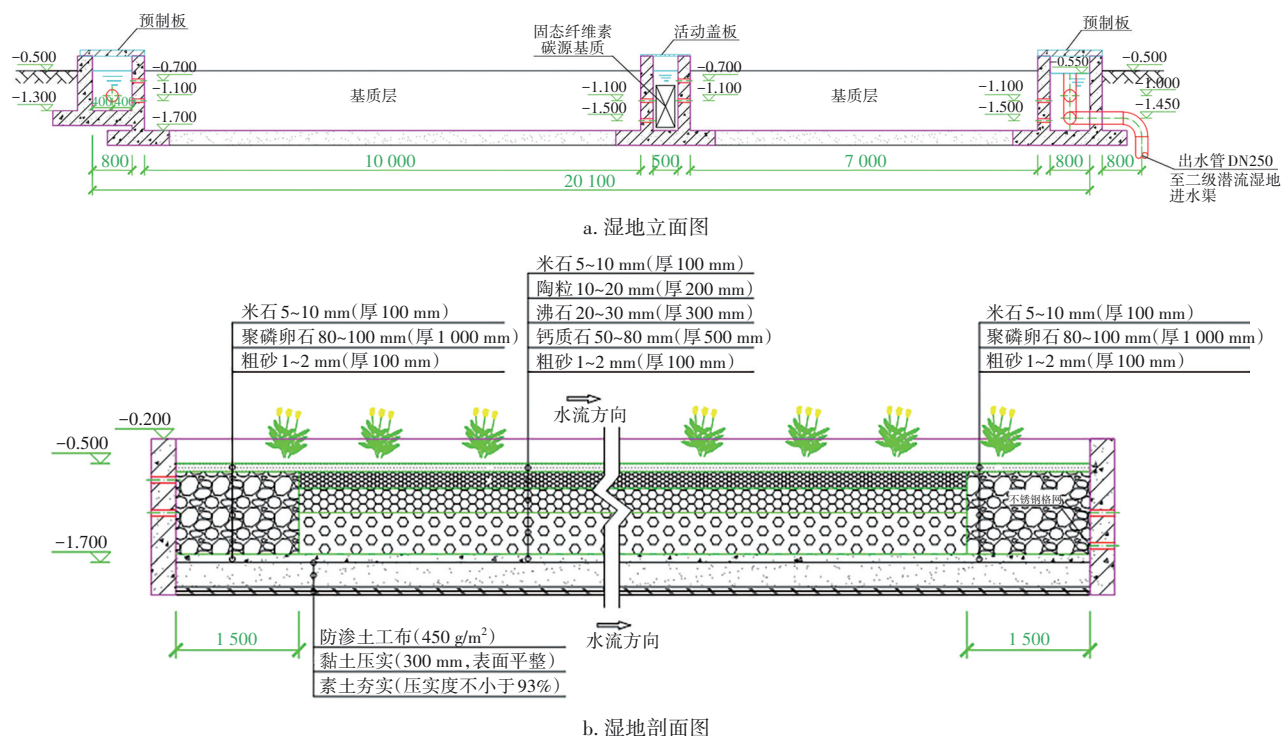


图2 水平潜流湿地立面图和剖面图

Fig.2 Elevation and section of subsurface flow wetland

2 运行效果及分析

2.1 监测数据分析

该人工湿地-稳定塘系统于2020年4月竣工,经过5个月的调试运行,水生植物成株和填料表面生物膜形成,当地生态环境监测站于2020年9月每月取样监测一次。从连续7个月的监测数据来看,该组合工艺出水 $\text{COD} \leq 28.41 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N} \leq 0.61 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 4.78 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.28 \text{ mg/L}$,除TN指标外,其他水质指标均优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类标准,具体见表3。

从表3可知,出水COD为22.01~28.41 mg/L,去除率为26.05%~42.33%,主要因为纤维素碳源的

添加改变了尾水可生化性(B/C由进水的0.17提升至0.37),稳定塘出水B/C再降至0.19,说明湿地基质床内的异养菌活性较高,保障了有机污染物的有效降解;对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TN的平均去除率分别为70.71%和68.90%,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 降至0.61 mg/L以下,说明氨氧化反应进行得比较彻底,玉米芯的添加持续为反硝化菌提供有机碳源,显著提升了湿地的脱氮效率^[10-11];系统对TP的平均去除率为36.54%,砾石-陶粒-炉渣混合基质和水生植物配置延续了人工湿地-稳定塘系统的除磷效力。

农灌季节周边居民自发将稳定塘内水就近用于农田浇灌,非农灌季节则就近排入地表水体,收

割的狐尾藻、芦苇等水生植物作为鸡、鸭、鹅、猪等饲料,也可以经晾晒至半干后,与污水处理站剩余污泥共同发酵制取有机肥,用于污水处理站绿化施肥。

表3 人工湿地-稳定塘系统出水水质

Tab.3 Effluent quality of constructed wetland-stabilization pond system $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD		$\text{NH}_3\text{-N}$		TN		TP	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
2020年9月	38.42	28.41	1.23	0.43	12.48	3.26	0.28	0.21
2020年10月	36.27	24.28	1.28	0.41	12.27	3.38	0.36	0.24
2020年11月	33.46	22.01	1.04	0.35	11.44	4.02	0.34	0.22
2020年12月	43.27	28.15	1.86	0.56	14.59	4.71	0.48	0.28
2021年1月	42.24	26.86	1.65	0.52	13.51	4.23	0.41	0.23
2021年2月	40.76	28.14	2.48	0.61	14.23	4.16	0.39	0.26
2021年3月	44.15	25.46	2.42	0.44	13.26	4.78	0.37	0.21

2.2 微观结构分析

植物不是去除污染物的主要途径,人工湿地基质中的微生物对污水的转移和净化起主要作用^[7,12]。为表征玉米芯微观结构(孔隙率、粗糙度等)及其表面附着生物状况,借助扫描电镜进行分析。SEM照片见图3。

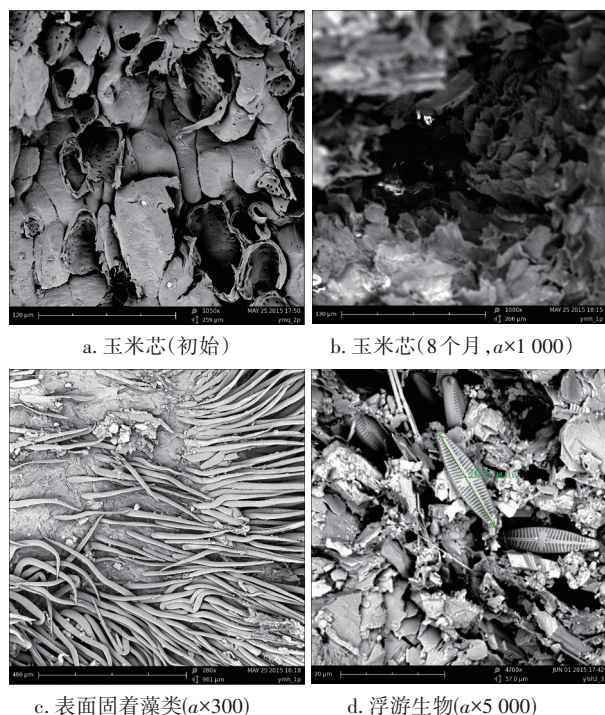


图3 纤维素碳源 SEM

Fig.3 SEM of cellulose carbon source

从图3可以看出,初始玉米芯呈现维管束状均匀排布,管壁上又呈多孔结构,比表面积大,一级水

平潜流湿地连续运行12个月,玉米芯持续释放可生化有机碳源,维管束结构逐渐变为多孔洞结构,但外框架结构不变;从图3也可以看出,基质表面不但附着大量微生物,还附着大量固着藻类、浮游生物等,固着藻类长度为200~500 μm ,浮游生物长度为20~30 μm ,多呈梭状。人工湿地系统内物种丰富度较高,间接反映出人工湿地运行效果稳定。

3 结论

① 针对污水处理站执行的排放标准与地表水环境质量考核要求之间的差距,可选用人工湿地-稳定塘系统对污水处理站尾水进行深度净化,该系统运行成本低,处理效果好,生态景观效果显著。

② 该2000 m^3/d 的人工湿地-稳定塘系统连续7个月的监测数据表明,系统出水 $\text{COD} \leq 28.41 \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N} \leq 0.61 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 4.78 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.28 \text{ mg/L}$, COD 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TP 指标优于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的IV类标准。

③ 添加固态纤维素碳源,可将B/C值由进水的0.17提升至0.37,可持续为反硝化菌提供可生化有机碳源,显著提高人工湿地的脱氮效率,提升湿地基质床内的异养菌活性,丰富稳定生物群落结构,保障湿地的运行效果。

参考文献:

- [1] SHENG X L, QIU S K, XU F, *et al.* Management of rural domestic wastewater in a city of Yangtze delta region: performance and remaining challenges [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2020, 11: 100507.
- [2] CHENG H, ZHANG M M. Occurrence and removal of antibiotic resistance genes in municipal wastewater and rural domestic sewage treatment systems in eastern China [J]. *Environment International*, 2013, 55: 9-14.
- [3] 胡小波, 骆辉, 荆肇乾, 等. 农村生活污水处理技术的研究进展[J]. *应用化工*, 2020, 49(11): 2871-2876.
HU Xiaobo, LUO Hui, JING Zhaoqian, *et al.* Research progress of rural domestic sewage treatment technology [J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(11): 2871-2876(in Chinese).
- [4] 韩庭苇, 王郑, 薛侨, 等. 曝气生物滤池在水处理中的应用研究进展[J]. *煤炭与化工*, 2017, 40(5): 22-26.
HAN Tingwei, WANG Zheng, XUE Qiao, *et al.* Research progress on application of biological aerated

- filter in water treatment [J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(5):22-26(in Chinese).
- [5] 吴杰. 分段进水多段A/O法处理农村生活污水的脱氮研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2014.
- WU Jie. Study on the Rural Domestic Wastewater Denitrification Discharged from Step-feed Multistage(A/O) Process[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2014(in Chinese).
- [6] 孙秀敏, 王琳, 甘泓, 等. 中水湿地去氮效果研究[J]. 水资源保护, 2010, 26(2):10-12, 31.
- SUN Xiumin, WANG Lin, GAN Hong, *et al.* Removal of nitrogen in reclaimed water by constructed wetland [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(2):10-12, 31(in Chinese).
- [7] 赵联芳, 朱伟, 赵建. 人工湿地处理低碳氮比污染河水时的脱氮机理[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11):1821-1827.
- ZHAO Lianfang, ZHU Wei, ZHAO Jian. Nitrogen removal mechanism in constructed wetland used for treating polluted river water with lower ratio of carbon to nitrogen [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(11):1821-1827(in Chinese).
- [8] 陈涛, 于鲁冀, 张新民, 等. 玉米芯强化水平潜流人工湿地脱氮研究[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(8):73-76.
- CHEN Tao, YU Luji, ZHANG Xinmin, *et al.* Advanced nitrogen removal under the condition of corncob laid in subsurface flow constructed wetland [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44(8):73-76(in Chinese).
- [9] 河南省生态环境厅. 污水处理厂尾水人工湿地工程技术规范:DB 41/T 1947—2020[S]. 郑州:河南省市场监督管理局, 2020.
- Department of Ecology and Environment of Henan Province. Technical Specification for Tail-water Constructed Wetland Engineering of Sewage Treatment Plant:DB 41/T 1947—2020[S]. Zhengzhou:Administration for Market Regulation of Henan Province, 2020 (in Chinese).
- [10] 邵留, 徐祖信, 金伟, 等. 农业废物反硝化固体碳源的优选[J]. 中国环境科学, 2011, 31(5):748-754.
- SHAO Liu, XU Zuxin, JIN Wei, *et al.* Optimization of solid carbon source for denitrification of agriculture wastes [J]. China Environmental Science, 2011, 31(5):748-754(in Chinese).
- [11] 晋凯迪, 于鲁冀, 陈涛, 等. 植物碳源调控对人工湿地脱氮效果的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10):5611-5616.
- JIN Kaidi, YU Luji, CHEN Tao, *et al.* Effect of adding plant carbon on nitrogen removal in constructed wetland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(10):5611-5616(in Chinese).
- [12] 吴振斌, 徐光来, 周培疆, 等. 复合垂直流人工湿地污水氮的去除效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):757-760.
- WU Zhenbin, XU Guanglai, ZHOU Peijiang, *et al.* Removal effects of nitrogen in integrated vertical flow constructed wetland sewage treating system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(4):757-760 (in Chinese).

作者简介:陈涛(1985-),男,河南周口人,硕士,高级工程师,主要研究方向为水污染防治。

E-mail:chentao7627@126.com

收稿日期:2021-05-19

修回日期:2021-11-13

(编辑:衣春敏)

加强河湖保护与管理,推进水生态文明建设