

城镇给排水工程设计案例专栏

王瀚哲. 复合型人工湿地在城市污水厂尾水净化中的应用——君山湿地案例[J]. 净水技术, 2025, 44(10): 180–187.

WANG H Z. Application of composite constructed wetlands in tailwater purification of urban WWTP——Case of Junshan Wetland[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(10): 180–187.

复合型人工湿地在城市污水厂尾水净化中的应用——君山湿地案例

王瀚哲*

(中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘 要 【目的】 为了有效减少污水处理厂尾水对洞庭湖域的影响,降低污染物浓度,改善水环境质量,优化区域水循环,促进再生水资源化利用,文章以岳阳君山尾水湿地为例,通过建设人工湿地对君山区第一、第二污水处理厂尾水进行水质提升,系统介绍了该人工湿地设计进出水水质指标的确定、采用的工艺流程、主体设计、运营维护及净化效果。【方法】 人工湿地设计规模为 20 000 m³/d,采用“复合垂直潜流人工湿地+多级表面流人工湿地+生态塘”组成的复合型人工湿地工艺,选用对污染物净化效果较好的沸石作为填料主体层,并栽种具有良好污染物拦截吸附效果的本土水生植物,利用微生物-填料-水生植物的物理、化学、生物三重协同作用,使污水处理厂尾水得到净化。【结果】 该复合型人工湿地工艺对污水处理厂尾水具有较好的去除效果,净化后的水满足设计出水水质要求,实现污染物年削减量:化学需氧量(COD)为 146.0 t、五日生化需氧量(BOD₅)为 29.2 t、总氮为 36.5 t、氨氮为 25.6 t、总磷为 2.2 t。【结论】 该复合型人工湿地对去除污水处理厂尾水的污染物具有较好的效果,同时具有占地面积小、管理维护容易的优点,有效减少了入洞庭湖域的污染物浓度,改善了水环境质量,为类似污水处理厂尾水的水质净化工程提供示范与参考。

关键词 污水处理厂尾水 复合型人工湿地 水质净化 水处理技术 再生水

中图分类号: TU992 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-0177(2025)10-0180-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.10.019

Application of Composite Constructed Wetlands in Tailwater Purification of Urban WWTP——Case of Junshan Wetland

WANG Hanzhe*

(China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract [Objective] To effectively mitigate the impact of wastewater treatment plant (WWTP) tailwater on the Dongting Lake basin, reduce pollutant concentrations, improve water environment quality, optimize regional water cycles, and promote reclaimed water reuse, this paper takes the Yueyang Junshan tailwater wetland as a case example. By constructing a constructed wetland system to enhance the water quality of tailwater from the Junshan District first WWTP and second WWTP, the paper systematically elaborates on key aspects including: determination of influent/effluent quality indices, adopted treatment processes, main design features, operation and maintenance practices, and purification performance evaluation. [Methods] The constructed wetland system is designed with a treatment capacity of 20 000 m³/d, employing an integrated hybrid process comprising "composite vertical subsurface flow constructed wetlands, multi-stage surface flow constructed wetlands, and ecological ponds". Zeolite is selected as the primary substrate material due to its enhanced pollutant removal efficiency, while native aquatic plants with superior contaminant interception and adsorption capabilities are introduced. The system achieves efficient purification of tailwater from WWTP through tripartite synergistic mechanisms

[收稿日期] 2025-03-08

[通信作者] 王瀚哲(1993—),男,工程师,研究方向为水环境治理、环境工程设计,E-mail:993558635@qq.com。

involving microbial degradation, physicochemical interactions within the substrate media, and biological uptake by hydrophytes. [Results] The composite constructed wetland process shows good removal efficiency for the tailwater from the WWTP. The purified water meets the requirements of the designed effluent quality standards, and realizes an annual pollutant reduction of 146.0 t of chemical oxygen demand (COD), 29.2 t of five-day biochemical oxygen demand (BOD_5), 36.5 t of total nitrogen, 25.6 t of ammonia nitrogen, and 2.2 t of total phosphorus. [Conclusion] This composite constructed wetland demonstrates high efficiency in removing pollutants from tailwater of WWTP. With the advantages of small occupied area and easy operation/maintenance, it effectively reduces pollutant concentrations discharged into the Dongting Lake basin, improving water environment quality. The project serves as a demonstration and reference for similar water purification projects treating WWTP tailwater.

Keywords WWTP tailwater composite constructed wetland water quality purification water treatment technology reclaimed water

人工湿地是湿地功能经人工强化后用于水处理的一种方法和技术。因具有成本、能耗较低,管理维护较易且设计应用灵活的特点,人工湿地成为了世界上公认的环境友好型“绿色”水处理技术之一^[1]。我国建设了多座复合型人工湿地,用于污水处理厂尾水净化,如浙江某镇污水厂尾水湿地处理规模为 20 000 m^3/d ,采用“稳定塘+表面流人工湿地+水平潜流人工湿地”组合工艺将尾水处理至地表水Ⅲ类标准,其氨氮和总磷的去除率为 57.2%和 35.2%^[2];芜湖朱家桥污水厂尾水湿地处理规模为 40 000 m^3/d ,采用“潜流湿地与强化表流湿地并联运行,生态涵养塘深度净化”工艺将尾水处理至地表水Ⅲ类标准,其总氮和总磷的去除率为 17.6%和 33.7%^[3];宁夏昊盛污水厂尾水湿地处理规模为 10 000 m^3/d ,采用“水平潜流人工湿地+表面流人工湿地”组合工艺将尾水处理至地表水Ⅳ类标准,其氨氮和总磷的去除率为 70.0%和 40.0%^[4]。上述尾水湿地工艺中多采用水平潜流人工湿地,硝化和反硝化能力一般,而且潜流区填料的主体层多以碎石为主,吸附能力有限,使得脱氮除磷效果一般,需优化填料配置和工艺组合^[5]。

君山北依长江,南濒洞庭,有洞庭明珠的美誉。而君山区大量污水处理厂出水直接排入洞庭湖,既给洞庭湖水质达标带来压力,又造成了大量再生水资源的浪费,所以亟需对该区第一、第二污水处理厂尾水进行净化处理。以复合垂直潜流人工湿地为核心,使尾水呈上下折流式运动,延长了水力停留时间,提高了硝化和反硝化能力。根据沸石、陶粒、石英砂、砾石 4 种填料对污染物净化效果的比选,其中沸石对各类污染物的净化效果

较好^[6],所以选用沸石做为填料主体层,以提升脱氮除磷效果。

1 项目概况

工程厂址位于岳阳市君山区柳林洲街道洞庭大道以北,红线范围面积约为 84 000 m^2 ,人工湿地总占地面积为 68 608 m^2 ,其余为配套设计建设用地。人工湿地处理规模为 20 000 m^3/d ,采用“复合垂直潜流人工湿地+多级表面流人工湿地+生态塘”组成的复合型人工湿地工艺,对 COD、 BOD_5 、总氮、氨氮、总磷的浓度进行进一步削减,尾水经处理后满足设计出水水质要求。

2 工程设计

2.1 处理规模

本工程建设的人工湿地处理对象唯一,即污水处理厂尾水,按照《人工湿地水质净化技术指南》(环办水体函〔2021〕173号)(以下简称《指南》)要求,人工湿地处理规模需与污水处理厂尾水量相匹配^[7]。目前君山区建有 2 座污水处理厂,君山区第一、第二污水处理厂的设计污水处理规模分别为 20 000、5 000 m^3/d 。

分析君山区 2 座污水处理厂连续 2 年的出水量数据,第一污水处理厂尾水量为 11 400 ~ 14 800 m^3/d ,第二污水处理厂尾水量为 4 010 ~ 4 210 m^3/d ,两厂的出水量相对平稳。结合厂址面积大小等因素,综合研究确定处理第一污水处理厂尾水量为 15 000 m^3/d ,处理第二污水处理厂尾水量为 5 000 m^3/d ,即人工湿地总处理规模为 20 000 m^3/d 。

2.2 设计进出水水质

分析君山区第一、第二污水处理厂 2022 年—2023 年尾水水质,各污染物浓度波动范围较大,但数值均在《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB

18918—2002)一级 A 标准限值内,考虑到该地区居住人口增长、污水处理厂出水水质异常等情况,确定

将一级 A 标准限值作为人工湿地设计进水水质。污水处理厂出水水质如表 1 所示。

表 1 污水处理厂尾水水质(单位:mg/L)
Tab. 1 Tailwater Quality of WWTPs(Unit: mg/L)

项目	COD	BOD ₅	总氮	氨氮	总磷
第一污水处理厂尾水	13.4 ~ 33.0	1.4 ~ 7.0	8.2 ~ 13.1	0.9 ~ 3.2	0.21 ~ 0.46
第二污水处理厂尾水	23.7 ~ 32.3	4.0 ~ 9.0	7.6 ~ 13.7	0.8 ~ 3.4	0.13 ~ 0.41

人工湿地出水水质按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类标准执行(总氮和总磷除外),总磷限值应根据《岳阳市洞庭湖域总磷浓度偏高问题整改方案》中尾水排放总磷质量浓度不得高于 0.2 mg/L 的要求确定。人工湿地净化后的水除了排入指定的地表水体外还应满足

再生水利用的水质指标,应符合《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)和《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)的要求,净化后的水用作城市绿化、道路清扫和景观环境。设计进出水水质如表 2 所示。

表 2 设计进出水水质(单位:mg/L)
Tab. 2 Designed Quality of Influent and Effluent(Unit: mg/L)

项目	COD	BOD ₅	总氮	氨氮	总磷
进水	≤50.0	≤10.0	≤15.0	≤5.0	≤0.5
出水	≤30	≤6(10 [*] 、6 ^{**})	≤10 ^{**}	≤1.5(8 [*] 、3 ^{**})	≤0.2(0.3 ^{**})

注:人工湿地出水应按表 2 中最严格数值执行;出水项中无上标的数值为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类标准的限值;* 表示《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)中城市绿化、道路清扫、消防、建筑施工的限值;** 表示《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)中观赏性景观环境用水(湖泊类、水景类)、娱乐性景观环境用水(湖泊类、水景类)的限值。

2.3 工艺流程

处理工艺的确定不仅要考虑处理水量、进出水水质、建设投资,还应结合厂址地势条件和工程建设的土方平衡等因素,因地制宜选择处理效果好、运行稳定、技术成熟的工艺。本着以“潜流人工湿地为主,表面流人工湿地为辅”的设计思路,经研究确定采用“复合垂直潜流人工湿地+多级表面流人工湿地+生态塘”组成的复合型人工湿地工艺。

复合垂直潜流人工湿地作为本处理工艺的主

动力,其内部形成了厌氧-缺氧-好氧的环境,利用各种微生物和植物之间的竞争影响,发挥其生化相克作用^[8],具有降解有机物和脱氮除磷的功能,能够实现对污染物的高效去除。多级表面流人工湿地和生态塘通过植物根系泌氧和大气复氧提高水体中溶解氧含量,能够进一步净化复合垂直潜流人工湿地的出水,确保人工湿地出水稳定达标。工艺流程如图 1 所示,人工湿地总平面布置如图 2 所示。

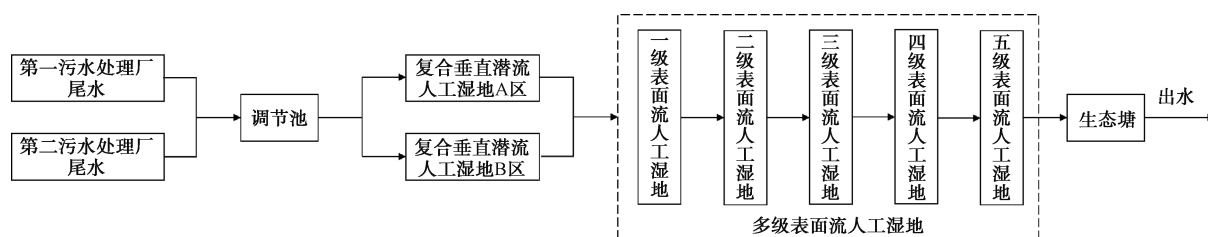


图 1 工艺流程

Fig. 1 Process Flow

3 主体工艺设计

3.1 竖向设计

3.1.1 场地设计

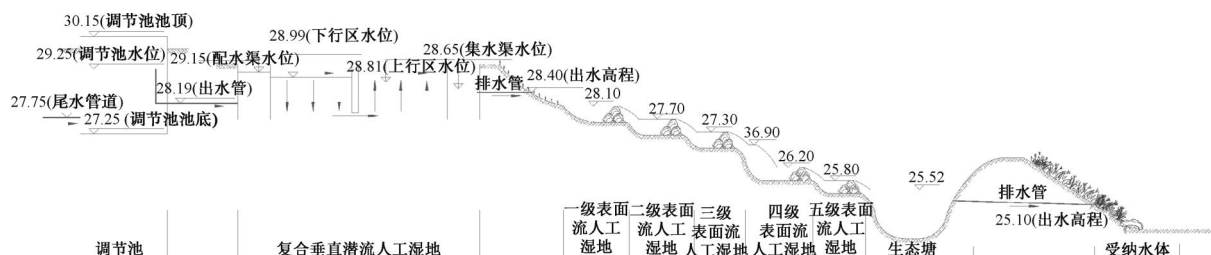
本工程建设厂址整体地势平缓,总体上呈现南

高北低、西高东低的形态,最大高差不足 2 m。场地设计要考虑厂址内土方挖填平衡、厂址与周围市政道路的关系、厂址内水体流动性等因素,综合考虑后确定,复合垂直潜流人工湿地的配水渠、集水渠、处



图2 人工湿地总平面布置

Fig. 2 General Layout of Constructed Wetland



注:图中单位为m。

图3 高程布置

Fig. 3 Layout of Elevation

因2座污水处理厂的处理水量和尾水水质略有不同,因此在复合垂直潜流人工湿地前端设置具有均质功能兼预处理功能的调节池。调节池参照相关标准进行设计,处理规模为20 000 m³/d,停留时间为0.5 h,有效水深为2 m,有效面积为208.4 m²,池体呈矩形,长宽比为2.1:1.0,在池体中间均匀设置4座格挡,使水流呈“S”形状,起到均匀混合水体的作用。调节池设计水位高程为29.25 m。

3.2.2 复合垂直潜流人工湿地

复合垂直潜流人工湿地划分为并联运行的A区和B区,总占地面积为40 000 m²,有效净化面积为30 800 m²,其中A区有效净化面积为15 472 m²,

理单元隔墙的顶高程一致,即29.39 m,较原始地面高程高出1.2 m;多级表面流人工湿地设计底高程为25.0~27.6 m,共分5级,每级高程等分递减,制造明显跌水复氧的效果;生态塘利用既有藕塘进行改造,根据原始高程进行设计,即24.02 m。总体上满足因地制宜的设计原则。

3.1.2 水流高程设计

2座污水处理厂的尾水通过水渠进入人工湿地,进水高程为29.15 m,出水水位高程为25.1 m。其中复合垂直潜流人工湿地出水高程为28.4 m,多级表面流人工湿地水位高程为25.8~28.1 m,生态塘水位高程为25.52 m。高程布置如图3所示。

3.2 工艺单元设计

3.2.1 调节池

根据《人工湿地污水处理工程技术规范》(HJ 2005—2010)和《指南》的要求,进水水质悬浮物浓度高于指标要求时宜设置预处理措施,但2座污水处理厂的尾水悬浮物指标低于HJ 2005—2010的100 mg/L和《指南》的20 mg/L的要求,可不设置预处理设施。

B区有效净化面积为15 328 m²。表面水力负荷为0.65 m³/(m²·d),水力停留时间为0.8 d。主要污染物削减负荷:COD为11.18~11.29 g/(m²·d)、BOD₅为2.24~2.26 g/(m²·d)、总氮为2.79~2.82 g/(m²·d)、氨氮为2.19~2.21 g/(m²·d)、总磷为0.17 g/(m²·d);处理单元为不规则形状,共66个,其有效净化面积为190~890 m²,长宽比控制为2:1~4:1;平均设计水深为1.3 m,填料选用碎石和沸石,填料孔隙率为40%;湿地下行区与上行区的连通管处铺设大粒径碎石,并安装聚丙烯(PP)多孔板防止因碎石进入连通管导致堵塞。水体通过上行区的集水管进入集水渠后进入多级表面

流人工湿地。该区域污染物去除效率如表 3 所示。复合垂直潜流人工湿典型断面如图 4 所示。

表 3 污染物去除效率

Tab. 3 Removal Efficiency of Pollutants

项目	COD	BOD ₅	总氮	氨氮	总磷
进水/(mg·L ⁻¹)	≤50.0	≤10.00	≤15.00	≤5.00	≤0.50
出水/(mg·L ⁻¹)	≤32.7	≤6.54	≤10.68	≤1.61	≤0.24
去除效率	34.6%	34.6%	28.8%	67.8%	52.0%

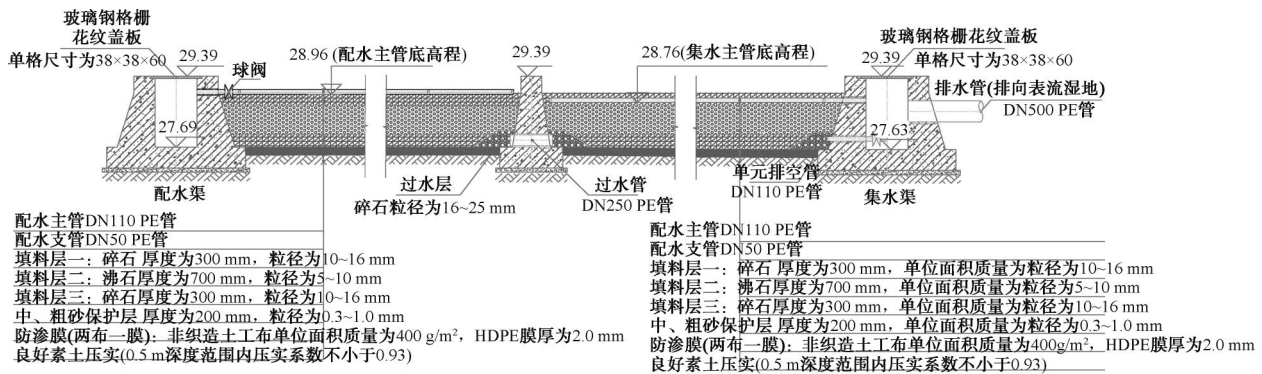


图 4 复合垂直潜流人工湿地典型断面

Fig. 4 Typical Cross-Section of Composite Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland

3.2.3 多级表面流人工湿地

多级表面流人工湿地采用蜿蜒式设计,模拟自然河流的弯曲形态,利用水流与湿地底质和植物根系的摩擦、碰撞等作用,减缓水流速度,延长水体在湿地中的停留时间,从而为污染物的净化提供更多的时间和空间。多级表面流人工湿地占地面积为 21 486 m²,

水域面积为 8 685 m²,设计平均水深为 0.5 m,设计超高为 0.5 m;除了水面外,同时构建了一些小型岛屿、斑块、跌水堰、连通管涵等,以营造一定的植物、水位梯度。湿地四周边坡坡比≤1:5,湿地底部散铺一层 15~25 cm 卵石,并种植不同类型的水生植物。多级表面流人工湿地典型断面图如图 5 所示。

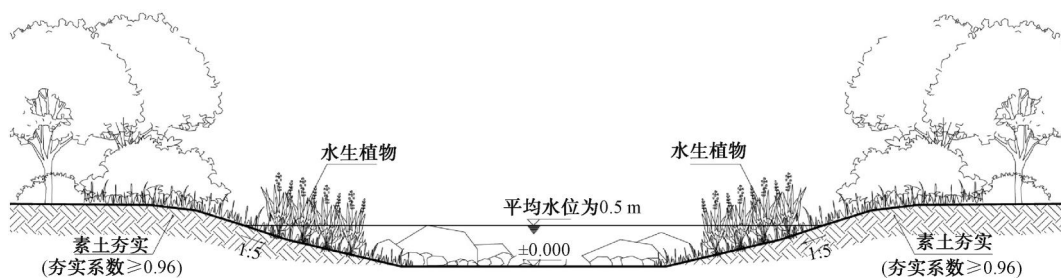


图 5 多级表面流人工湿地典型断面

Fig. 5 Typical Cross-Section of Multi-Stage Surface Flow Constructed Wetland

该区域表面水力负荷为 2.3 m³/(m²·d),总水力停留时间为 0.22 d,主要污染物削减负荷:COD 为 3.92 g/(m²·d)、BOD₅ 为 0.78 g/(m²·d)、总氮为 1.06 g/(m²·d)、氨氮为 0.21 g/(m²·d)、总磷为 0.04 g/(m²·d),该区域污染物去除效率如表 4 所示。

3.2.4 生态塘

生态塘是利用现状藕塘打造具有雨洪管理与水质净化功能的小微湿地,塘内主要种植沉水和浮水植物,形成良好的生态环境。生态塘占地面积约为 7 122 m²,其中水域面积约为 4 633 m²,设计水深为 1.5 m,生态塘边坡坡比与卵石厚度的设计参数与多

表 4 污染物去除效率
Tab. 4 Pollutant Removal Efficiency

项目	COD	BOD ₅	总氮	氨氮	总磷
进水/(mg·L ⁻¹)	≤32.7	≤6.54	≤10.68	≤1.61	≤0.24
出水/(mg·L ⁻¹)	≤31.0	≤6.20	≤10.22	≤1.52	≤0.22
去除效率	5.2%	5.2%	4.3%	5.6%	8.3%

级表面流人工湿地一致。生态塘是整个净化过程的最后一步,净化后的水通过管道排入受纳地表水体。

该区域水力停留时间为 0.35 d,主要污染物削

减负荷:COD 为 4.32 g/(m²·d)、BOD₅ 为 0.86 g/(m²·d)、总氮为 0.94 g/(m²·d)、氨氮为 0.09 g/(m²·d)、总磷为 0.09 g/(m²·d),该区域污染物去除效率如表 5 所示。

表 5 污染物去除效率
Tab. 5 Removal Efficiency of Pollutants

项目	COD	BOD ₅	总氮	氨氮	总磷
进水/(mg·L ⁻¹)	≤31.0	≤6.20	≤10.22	≤1.52	≤0.22
出水/(mg·L ⁻¹)	≤30.0	≤6.00	≤10.00	≤1.50	≤0.20
去除效率	3.2%	3.2%	2.2%	1.3%	9.1%

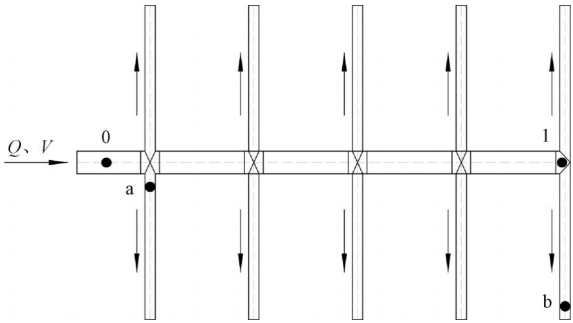
3.3 湿地内部细化设计

3.3.1 湿地集配水系统设计

复合垂直潜流人工湿地的集配水系统主要由配水渠、布水管、集水管、集水渠组成。配水渠、集水渠横断面形状为矩形,宽为 1 m,深为 1.75 m,底坡水平。布水管、集水管的管路采用“丰”型布置^[9],由 DN110 的主管和 DN50 的穿孔管组成,为实现潜流湿地均匀配水,控制穿孔管配水管道中最不利的 2 点流量为 1 ~ 20/19^[10](最不利 2 点如图 6 所示),确定配水孔孔径为 10 mm,孔间距为 0.4 m,穿孔管间距为 2 m,布水穿孔管配水孔斜向下 45°交错布置,而集水穿孔管集水孔是反向开设的,其孔口参数与配水穿孔管一致。各处理单元格底部设置有与集水渠连通的放空阀。A 区与 B 区系统相对独立,相互不影响。

3.3.2 植物种植设计

选择适应当地气候条件、根系发达、输氧能力强、耐病虫害、收割与管理容易、具有良好污染物拦截吸附效果的本土水生植物,以建立良好的填料-植物-微生物水质净化系统。复合垂直潜流人工湿地种植黄花鸢尾、再力花、风车草、菖蒲 4 种挺水植物,种植密度为 9 ~ 10 株/m²;多级表面流人工湿地和生态塘在岸边种植挺水植物,近岸种植浮水植物,深水区(0.5 ~ 1.5 m)种植沉水植物,如千屈菜、美人蕉、水葱、梭鱼草等主要的挺水植物,黑藻、狐尾



注:0—1 为主管道;a、b 为支管不利点;Q、V 分别为进水流量、流速。

图 6 湿地配水系统

Fig. 6 Water Distribution System of the Wetland

藻、竹叶眼子菜等主要沉水植物和睡莲浮水植物,挺水植物种植密度为 16 ~ 25 株/m²,沉水和浮水植物种植密度为 16 株/m²。形成水生植物错落有致、相互衬托的美丽景色。

3.3.3 防渗层设计

为避免潜流湿地内尾水对周边地下水水质造成影响,需要对湿地底部和侧面进行防渗处理,本项目采用复合土工膜防渗,两布一膜的形式,非织造土工布单位面积质量为 400 g/m²,HDPE 膜厚度为 2.0 mm,其技术性能指标要满足相关产品标准。

4 湿地运行与维护

君山区位于亚热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季温和湿润,适合湿地水生植物的生长。在湿地

运行期需注重植物和填料的管护、进出水水质监测、汛期湿地水位巡查。

适时对水生植物进行收割和残体处理。春、夏季植物生长最为旺盛也是净化水质效率最高的时期,要适度对植物进行修剪,确保植物的光合作用不受影响,确保植物间通风顺畅不易滋生细菌;冬季植物生长缓慢且会出现枯落,应及时收割和清理枯萎植株防止腐烂污染水体。

通过在湿地前端设置调节池(起到预处理作用),种植根、茎发达的湿地植物,配比大孔隙率的填料等措施,能缓解填料堵塞情况,延长其使用寿命,但也要对填料层定期进行清理维护。定期耙松湿地表面的填料以改善其通透性;有发生堵塞现象的趋势时,应对湿地填料上层 $0 \sim 30 \text{ cm}^{[1]}$ 的填料进行更换,即“填料层一”。

为保证湿地平稳运行,对系统各环节的进出水水质进行监测。监测频率为每月 1 次,各监测项目

应按国家或行业相关标准的监测方法进行。如发现监测数据异常,应及时溯源排查并采取应对措施。

应加强汛期(6 月—8 月)湿地水位的巡查。汛期内降水频繁、降水量大时,巡查频次为每天 1 次;无上述情况时,巡查频次为每周 1 次。当汛期雨水使湿地水位升高且对湿地运行造成影响时,巡查员应及时通知污水处理厂调控三通阀门,使尾水按原排污口排出,不流入湿地,此时湿地只接纳降水,可避免湿地内涝风险。

5 水质净化效果

基于本工程设计参数对人工湿地净化效果进行核算,年削减量预计:COD 约为 146.0 t、BOD₅ 约为 29.2 t、总氮约为 36.5 t、氨氮约为 25.6 t、总磷约为 2.2 t。复合垂直潜流人工湿地作为净水核心,此单元对污染物的去除率占整体人工湿地去除率的 87%,多级表面流人工湿地和生态塘的占比分别为 9%和 4%。本工程水质净化效果详情如表 6 所示。

表 6 水质净化效果
Tab. 6 Effect of Water Purification

项目	COD	BOD ₅	总氮	氨氮	总磷
设计进水/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	50.0	10.00	15.00	5.00	0.50
潜流湿地设计出水/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	32.7	6.54	10.68	1.61	0.24
多级表流湿地设计出水/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	31.0	6.20	10.22	1.52	0.22
生态塘设计出水/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	30.0	6.00	10.00	1.50	0.20
总去除效率	40.0%	40.0%	33.3%	70.0%	60.0%
总削减量/($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	146.0	29.2	36.5	25.6	2.2

注:潜流湿地有效面积为 $30\,800 \text{ m}^2$,多级表流湿地有效面积为 $8\,685 \text{ m}^2$,生态塘有效面积为 $4\,633 \text{ m}^2$ 。

6 结论

本工程处理规模为 $20\,000 \text{ m}^3/\text{d}$,有效净化面积为 $44\,118 \text{ m}^2$,采用复合型人工湿地工艺,出水水质达到Ⅳ类标准(总氮和总磷除外),湿地对污染物的去除效果较好,去除率:COD 为 40.0%、BOD₅ 为 40.0%、总氮为 33.3%、氨氮为 70.0%、总磷为 60.0%,其中复合垂直流人工湿地的去除效果最佳。有效提升污水处理厂尾水入洞庭湖域水质,可为湖南省地区及与本工程条件相似地区的污水处理厂尾水水质净化工程提供示范与参考。

参考文献

- [1] 回蕴珉,冯辉,丁晔. 市政污水处理人工湿地和水生植物系统设计手册[M]. 北京:化学工业出版社,2020.

HUI W M, FENG H, DING Y. Design manual for municipal sewage treatment constructed wetlands and aquatic plant systems [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020.

- [2] 何凡,刘军,丁宏云,等. 复合型人工湿地在城镇污水处理厂尾水提标中的设计与应用[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43(9): 11-15.

HE F, LIU J, DING H Y, et al. Design and application of hybrid constructed wetlands for advanced treatment of municipal wastewater treatment plant tailwater [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2023, 43(9): 11-15.

- [3] 陆盛森,刘敏,左倬. 长江大保护中尾水型人工湿地的应用研究:以江东生态公园为例[J]. 环境工程, 2023, 41(1): 181-188.

LU S S, LIU M, ZUO Z. Application of tailwater constructed wetland in the great protection of Yangtze river: A case study of Jiangdong water ecological park[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(1): 181-188.

- [4] 王宁, 田广宇, 陈泉. 针对黄河上游地区污水厂尾水的人工湿地净化系统研究与设计: 以宁夏吴盛污水厂尾水湿地为例[J]. 环境工程, 2023, 41(s1): 33-35.
WANG N, TIAN G Y, CHEN X. Research and design of constructed wetland purification system for wastewater treatment plant tailwater in upper yellow river area: Taking Ningxia Haosheng wastewater treatment plant tailwater wetland as an example[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(s1): 33-35.
- [5] 纪伟, 朱洛炯, 张舒, 等. 人工湿地深度处理市政尾水研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(6): 9-19.
JI W, ZHU M X, ZHANG S, et al. Research progress on constructed wetland for advanced treatment of municipal tailwater[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6): 9-19.
- [6] 刘小婷, 张翔凌, 沈俊, 等. 人工湿地常用填料及其不同改性方式对主要污染物净化效果研究进展[J]. 净水技术, 2025, 44(1): 16-25, 177.
LIU X T, ZHANG X L, SHEN J, et al. Research advances on common fillers and different modification modes of constructed wetlands for purification effectiveness of main pollutants[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(1): 16-25, 177.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 人工湿地水质净化技术指南[EB/OL]. (2021-04-14)[2025-03-05]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202104/t20210430_831538.html.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for water quality purification using constructed wetlands[EB/OL]. (2021-04-14)[2025-03-05]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202104/t20210430_831538.html.
- [8] 陈永华. 人工湿地污水处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
CHEN Y H. Constructed wetland technology for sewage treatment[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [9] 贺锋. 复合垂直流构建湿地水处理工艺的设计及其对营养物质氮的净化效果研究[D]. 北京: 中国科学院水生生物研究所, 2004.
HE F. Design of composite vertical flow constructed wetland water treatment process and its purification efficiency for nitrogen nutrients[D]. Beijing: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [10] 谢小龙, 贺锋, 徐栋, 等. 垂直流人工湿地配水均匀性的研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(8): 828-832.
XIE X L, HE F, XU D, et al. Uniformity of water distribution system in vertical constructed wetland[J]. China Environmental Science, 2009, 29(8): 828-832.
- [11] 赵文喜, 陶磊, 刘红磊. 人工湿地堵塞机理及防堵措施浅析及研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(8): 8-16.
ZHAO W X, TAO L, LIU H L. Analysis on clogging mechanism of constructed wetlands and clogging prevention measures[J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(8): 8-16.

(上接第 107 页)

- CHEN X Y, FENG J, WANG H M, et al. Isolation and identification of sulfate-reducing bacteria in goaf water in Yangquan of Shanxi Province and domestication for the reduction[J]. Acta microbiologica Sinica, 2022, 62(6): 2104-2118.
- [13] FAN N S, QI R, HUANG B C, et al. Factors influencing *Candidatus* *Microthrix parvicella* growth and specific filamentous bulking control: A review[J]. Chemosphere, 2020, 244: 125371. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125371.
- [14] 周家中, 吴迪, 郑临奥. 纯膜 MBBR 工艺在国内外的工程应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(22): 37-47.
ZHOU J Z, WU D, ZHENG L A, et al. Engineering application of pure MBBR process at home and abroad[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(22): 37-47.