

城镇给排水工程设计案例专栏

齐超元,原效凯,李晓春,等.广东省某污染河流生物接触氧化与人工湿地净化组合工艺的工程设计与优化[J].净水技术,2022,41(11):144-153.

QI C Y, YUAN X K, LI X C, et al. Engineering design and optimization of combined process of biological contact oxidation and constructed wetland purification for a polluted river in Guangdong Province [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11):144-153.



扫我试试?

广东省某污染河流生物接触氧化与人工湿地净化组合工艺的工程设计与优化

齐超元,原效凯*,李晓春,宋鹏飞

(广东省建筑设计研究院有限公司,广东广州 510010)

摘要 为探索人工湿地在河湖流域治理方面的更佳应用方式,以广东某流域人工湿地为例,本项目污水处理工艺采用“预处理+生物接触氧化+人工湿地”处理工艺。项目投产后针对出现的进水水质波动大、部分湿地区域干旱或内涝、植物生长不均、药剂投加量偏大、出水水质偶有超标等问题,通过强化生化预处理、优化人工湿地布水方式、填料层级配和植物种植搭配等措施进一步提升其处理效果稳定性。工程实践结果表明,优化后其对 COD_{Cr} 、氨氮、TP的平均去除率分别达到85.19%、91.37%、86.56%, COD_{Cr} 、氨氮、TP出水水质稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水质标准,后期运营费用约为0.62元/ m^3 ,达到合理经济的运行状态。

关键词 人工湿地 强化生化处理 布水方式 填料级配 植物搭配 污水处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-0177(2022)11-0144-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.11.020

Engineering Design and Optimization of Combined Process of Biological Contact Oxidation and Constructed Wetland Purification for a Polluted River in Guangdong Province

QI Chaoyuan, YUAN Xiaokai*, LI Xiaochun, SONG Pengfei

(Guangdong Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract In order to explore the better application method of constructed wetlands in the treatment of river and lake basins, a constructed wetland in a river basin in Guangdong is taken as an example, and the wastewater treatment process of this project adopts the "pretreatment + biological contact oxidation + constructed wetland" treatment process. After the project put into operation, in response to problems such as large fluctuations in the quality of influent water, drought or waterlogging in some wetland areas, uneven plant growth, excessive chemical dosage, and occasional excess water quality, the stability of the treatment effect is further improved by strengthening the biochemical pretreatment, optimizing the water distribution mode, packing hierarchy and plant planting collocation in the constructed wetland. The engineering practice results show that, after optimization, the average removal rates of COD_{Cr} , ammonia nitrogen and TP reached 85.19%, 91.37% and 86.56%, respectively. The effluent quality of COD_{Cr} , ammonia nitrogen and TP

[收稿日期] 2021-12-21

[作者简介] 齐超元(1990—),硕士,工程师,主要从事市政给排水、城市固废处置、危险废物处理处置、环境卫生管理等市政环保项目的规划、咨询、设计工作,E-mail:308199794@qq.com。

[通信作者] 原效凯(1973—),男,硕士,正高级工程师,主要从事市政给排水、城市固废处置、危险废物处理处置、环境卫生管理等市政环保项目的规划、咨询、设计和技术研究管理工作,E-mail:yxkcom@163.com。

stably reaches the class III water quality standard of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002), and the later operating costs is about 0.62 yuan/m³, achieving a reasonable and economical operating state.

Keywords constructed wetland enhanced biochemical treatment water distribution mode packing gradation plant collocation wastewater treatment

河道受污水体具有旱季流量小、雨季流量大、水质受水量波动影响较大、主要污染物含量相对较低、可生化性较差等特点^[1-2],导致其处理难度较大、成本较高^[3]。目前,国内外针对河道污染问题,主要采取的处理方式包括物理方法、化学方法、生态法。物理方法主要指疏挖底泥、机械除藻、引水冲淤和调水等。疏挖底泥意味着将污染物从河道系统中清除出去,较大程度地削减底泥对上覆水体的污染贡献率。调水的目的是通过水利设施的调控引入污染河道上游或附近的清洁水源以改善下游污染河道水质,但该方式对于持续性受污染水体效果难以维持,且投资较大。化学方法有混凝沉淀、化学药剂杀藻、铁盐促进磷的沉淀、石灰脱氮等方法,对浊度、BOD₅、SS、TP去除效果较好,对TN、重金属等也有一定的去除效果,但该法易造成二次污染。生态法主要包含河道曝气法、生物膜技术、人工湿地处理技术、水生植物净化技术。

人工湿地作为一种环境友好的污水生物生态处理技术,具有投资及维护费用低、出水水质好、二次污染轻等优势^[4],目前已广泛应用在不同的实际工程案例中,包括污水厂尾水处理、生态处理工艺强化应用^[5-6]等。人工湿地主要由填料、植物、微生物三大要素构成,对污染物的去除过程较为复杂^[6]。在研究以往案例中发现,人工湿地布水系统均匀性、排水系统通畅性,填料系统级配的合理性、植物系统选择的多样性对人工湿地处理效果存在较大的影响^[7]。传统的下行垂直潜流人工湿地布水方式一般采用“丰”字型布水,该方式实际运行过程中出现末端水压不足,导致人工湿地布水管末端布水不均匀等问题。

本文通过重点优化布水管结构形式来改善布水不均匀导致的人工湿地处理效果不佳问题,通过引入给水系统中“环状管网”的概念,创造性地将“丰”字型布水方式改为环状管布水方式,有效地提升了穿孔布水支管各处水力条件;通过优化湿地内道路布设,有效提升了后续湿地运营维护的便捷性;优化接触氧化池气水比、污泥回流比等参数,改善了前

处理效率;优化植物的种植种类,提高了湿地植物系统的稳定性。上述不同优化措施及创新优化设计为今后大型人工湿地的工程应用提供一定的参考。

1 项目背景

广东某地级市国考断面2018年水质现状为劣V类,2020年水质目标为IV类。本项目作为保障国考断面达标的专项行动工程之一,通过对汇入国考断面、流经城市建成区的受污染河道水体进行截流治理,改善国考断面上游水质情况,确保国考断面水质达标。根据当地相关规划,本项目属于生态湿地公园的组成部分。项目的建设将致力于将生态湿地公园打造为集“生态保护、休闲娱乐、特色生态农业生产、依据和科普教育”等多功能于一体的生态乐园。

该地级市第一水质净化厂现状出水指标执行国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B排放标准,其尾水直接排入黄竹河是造成河水水质变差的重要原因。随着当地经济社会的快速发展,城区中的建成区排入黄竹河的废/污水量逐年激增,给黄竹河带来了大量的污染物。另外,黄竹河的支涌收纳周边鱼塘与农村生活污水也是造成河水水质变差的主要原因。黄竹河流域内农业、水产养殖业比较发达,也给河道水体带来面源污染。农业、水产养殖业和畜禽养殖业等产生的污染会随地表径流汇入黄竹河,也是造成水体水质变差的重要原因之一。

本项目人工湿地所在位置、截流河道黄竹河与该市国考断面位置关系示意如图1所示。

2 工程设计

2.1 设计处理水量

本项目总设计处理规模为40 000 m³/d,采用重力流管道将受污染的河水引入处理厂内。

2.2 设计进出水水质

本项目进水水质参考近年来该地环境监测站出具的河水监测报告数据。出水水质参考该地首期人工湿地工程的出水水质,COD_{Cr}、BOD₅、氨氮和TP指



图 1 项目平面位置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Project Layout

标均执行地表水环境质量标准的Ⅲ类水质标准,如表 1 所示。

表 1 设计进出水质

Tab. 1 Designed Quality of Influent and Effluent

项目	COD _{Cr}	BOD ₅	氨氮	TP	SS
设计进水/(mg·L ⁻¹)	83.00	14.80	9.14	2.56	150.00
设计出水/(mg·L ⁻¹)	20.00	4.00	1.00	0.20	/
目标去除率	75.90%	72.97%	89.06%	92.19%	/

2.3 工艺设计计算

2.3.1 工艺比选与确定

生化工艺主要有按空间进行分割的连续流活性污泥法及生物膜法、按时间进行分割的间歇性活性污泥法。本项目选择间歇性活性污泥法中的接触氧化法,符合本项目进水水质不稳定的需求,且该方法占地面积省、投资省、耐冲击、适应性较强、无污泥回流、污泥产量少,后期运行维护简单,节能效果好。

结合本项目进水水质情况,本项目深度处理工艺拟采用自然净化工艺。目前常见的自然净化工艺主要分为 3 类:稳定塘处理技术、土地处理技术、人工湿地处理技术。综合考虑深度处理工艺建设难易程度、运营维护便捷性、占地面积大小、湿地负荷高低、建设

投资水平等多方面因素,本项目深度处理工艺采用人工湿地处理技术。人工湿地技术又分为表面流人工湿地、水平潜流人工湿地、垂直潜流人工湿地 3 种主要类型。垂直潜流人工湿地具有水力负荷大、污染去除率高、耐水质冲击性强等特点,因此,本项目选择垂直潜流人工湿地处理工艺作为深度处理工艺。

2.3.2 工艺计算

根据各污水处理单元处理效率的取值范围,对各工艺单位处理效果进行合理取值,对出水水质预测如表 2 所示。

1) 接触氧化池

本项目设接触氧化池 1 座,分 2 格。设计处理规模为 40 000 m³/d,表面负荷为 0.90 m³/(m²·h),容积负荷为 0.5 kg TKN/(m³·d),填料填充比为 0.7,污泥回流比为 30%,气水比为 5:1,曝气量为 55.7 kg O₂/h。

2) 二沉池

本项目设二沉池 2 座。单座处理规模为 20 000 m³/d,表面负荷为 1.20 m³/(m²·h),污泥停留时间为 4 h。

3) 人工湿地

人工湿地处理规模为 40 000 m³/d,占地面积为

表2 各工艺单元处理效果预测
Tab.2 Treatment Effect Prediction of Each Process Unit

项目	COD _{Cr}	BOD ₅	氨氮	TP	
原水/(mg·L ⁻¹)	83.00	14.80	9.14	2.56	
粗/细格栅、旋流沉砂池	设计去除率	10.00%	10.00%	10.00%	20.00%
	预计出水水质/(mg·L ⁻¹)	74.70	13.32	8.27	2.05
接触氧化池、二沉池	设计去除率	70.00%	40.00%	75.00%	80.00%
	预计出水水质/(mg·L ⁻¹)	22.41	7.99	2.06	0.41
垂直潜流人工湿地	设计去除率	60.00%	70.00%	65.00%	65.00%
	预计出水水质/(mg·L ⁻¹)	8.96	2.40	0.72	0.14
总去除率	89.20%	83.78%	92.12%	94.53%	
出水要求/(mg·L ⁻¹)	20.00	4.00	1.00	0.20	

54 218 m²。人工湿地设计参数参照《人工湿地水质净化技术指南》表7~表9。表面水力负荷计算如式(1)。

$$q = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

其中:q——表面水力负荷,m³/(m²·d);

Q——人工湿地设计流量,m³/d;

A——人工湿地表面积,m²;

计算得出表面水力负荷约为0.74 m³/(m²·d),满足《人工湿地水质净化技术指南》中表8设计参数规范值。

污染物负荷削减计算如式(2)。

$$N_A = \frac{Q(S_0 - S_1)}{A} \quad (2)$$

其中:N_A——污染物削减负荷(以COD_{Cr}、氨氮、TP计),g/(m²·d);

S₀——进水污染物质量浓度,g/m³;

S₁——出水污染物质量浓度,g/m³。

计算得出本项目人工湿地COD_{Cr}削减负荷为9.92 g/(m²·d)、氨氮削减负荷为1.0 g/(m²·d)、TP削减负荷为0.2 g/(m²·d)。满足《人工湿地水质净化技术指南》表8设计参数规范值。

2.3.3 人工湿地布水系统水力分析

本项目采用穿孔布水管DN65的PE管,布水穿孔管总长度约为12 050 m。配水泵后总水头为7.0 m,开孔孔径为50 mm,孔间距为0.6 m,对侧45°开孔,单根穿孔管长度为6.0 m。垂直潜流人工湿地

配水类似于水利工程中的农田灌溉,多孔出流管形式属于其中的滴灌,各个布水多孔出流管孔位间距及大小保持相同^[8]。

对于上述多孔布水管系统而言,本工程将传统的“丰”字型布水主干管改为环状布水主干管,加上压力进水,最大限度地保障各出水点的水恒定。故可以将多孔出流视作沿途均匀泄流,其水力计算分为孔口出流量与沿程水头损失计算。

1) 孔口出流量计算

根据《水力学》^[9]知识,孔口出流量计算如式(3)。

$$Q_1 = \mu A_1 \sqrt{2gh} \quad (3)$$

其中:Q₁——孔口出流流量,m³/h;

μ——孔口流量系数,取0.60~0.62;

A₁——孔口面积,m²;

g——重力加速度,m/s²,取9.81 m/s²;

h——孔口总水头,m。

经计算,单个孔口出流量约为0.013 8 m³/h,整个人工湿地全部孔出流量约为1 665.84 m³/h,与设计处理量(1 666.67 m³/h)基本吻合。

2) 沿程水头损失计算

沿程水头损失的计算在于确定多孔布水管径与长度的最佳组合,并通过管路水头损失确定所需的高差,其计算[式(4)]参考《给水工程》^[10]。

$$H_f = f \left(\frac{Q_2^m}{d^b} \right) L \quad (4)$$

其中:H_f——沿程水损,m;

f ——沿程水损系数,塑料管为 0.948×10^5 ;

m ——流量指数,塑料管为 1.77;

Q_2 ——单根布水管流量, m^3/h ;

d ——穿孔管内径, mm ;

b ——管径指数,塑料管为 4.77;

L ——穿孔管长度, m 。

经计算,设计长度下,穿孔管沿程损失约为 0.000 18 m。

2.4 处理工艺设计

本项目受污河道水体不同于常规生活污水,其进水 BOD_5 浓度值较低,可生化性较差。单纯依靠传统生化处理工艺难以实现处理目标,若采用膜处理工艺作为深度处理工艺,其运行成本又将大大增加。综合上述原因,本项目采用“预处理+生物接触氧化+人工湿地”处理工艺,人工湿地作为生态处理的强化应用已得到较好的认可。采用人工湿地作为深度处理工艺,一方面是为了保障污水处理效果达标,另一方面是能够降低后期运行成本。

本项目处理工艺流程如图 2 所示。污水依次经过粗格栅、细格栅、旋流沉砂池、接触氧化池、二沉

池、垂直潜流人工湿地等,然后达标排入受纳水体。

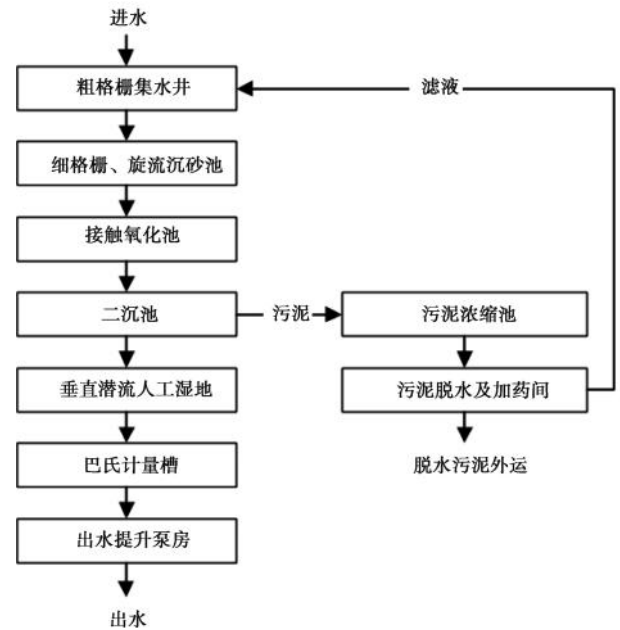


图 2 工艺流程图

Fig. 2 Diagram of Process Flow

2.5 主要构筑物及设计参数

本次工程设计主要构筑物如表 3 所示。

表 3 主要构筑物

Tab. 3 Main Buildings

建筑物名称	尺寸	主要设计参数	备注
1#预处理池	18.55 m×8.40 m×8.70 m	集水井有效容积为 91.67 m^3	钢砼全地埋
2#预处理池	18.10 m×8.00 m×8.10 m	集水井有效容积为 91.67 m^3	钢砼全地埋
细格栅-旋流沉砂池	14.55 m×7.05 m×4.00 m	池内径为 3 050 mm,排沙量为 0.6 m^3/h	钢砼半地埋
接触氧化池	29.70 m×17.60 m×5.00 m	2 池合建,表面负荷为 0.90 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,容积负荷为 0.5 $\text{kg TKN}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,填充比为 0.7,污泥回流比为 30%,气水比为 5:1,曝气量为 55.7 $\text{kg O}_2/\text{h}$	钢砼半地埋、挂式填料
二沉池	30.80 m(φ)×4.33 m	表面负荷为 1.2 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,污泥停留时间为 4 h	钢砼半地埋
配水配泥井	13.00 m(φ)×6.20 m	1 座	钢砼半地埋
人工湿地	54 213.00 m×1.30 m	水力负荷为 0.74 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,水力停留时间约为 0.70 d, COD_{Cr} 削减负荷为 9.92 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,氨氮削减负荷为 1.0 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,TP 削减负荷为 0.2 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$	高密度聚乙烯 (HDPE) 膜结构
污泥浓缩池	9.00 m×6.80 m×5.00 m	1 座	钢砼半地埋
巴氏计量槽	10.60 m×2.60 m×1.55 m	1 座	钢砼全地埋
污泥脱水及加药间	27.30 m×8.40 m×12.30 m	1 间	框架地上式

2.6 主要设备及参数

本项目主要设备及参数如表 4 所示。

2.7 人工湿地设计

人工湿地占地面积大,约为 54 218 m^2 ,通过合

表 4 主要设备及参数
Tab. 4 Main Equipments and Parameters

名称	规格、参数	数量
砂水分离器	螺旋直径为 250 mm,排沙量为 0.6 m ³ /h,转速为 5.8 r/min	1 台
罗茨鼓风机	风量为 1.45 m ³ /min,功率为 45.0 kW	1 用 1 备
剩余污泥排放泵	流量为 25 m ³ /h,扬程为 10 m,功率为 1.5 kW	1 用 1 备
污泥切割机	流量为 2~15 m ³ /h,扬程为 20 m,功率为 2.2 kW	1 用 1 备
污泥输送泵	流量为 8 m ³ /h,扬程为 30 m,功率为 3.0 kW	1 用 1 备
配水提升泵	300 QW1000-6-30,流量为 1 000 m ³ /h,功率为 30 kW,扬程为 6 m	2 用 1 备
聚丙烯酰胺(PAM)溶药槽	溶解能力为 3.0 m ³ /h,功率为 3×0.75 kW +0.37 kW=2.62 kW	1 台
PAM 加药泵	流量为 1.5 m ³ /h,扬程为 30 m,功率为 1.5 kW	2 台
聚合氯化铝(PAC)溶药罐	溶解能力为 1.8 m ³ /h,功率为 1.5 kW	1 台
PAC 加药泵	流量为 150 L/h,扬程为 30 m,功率为 0.25 kW	2 台

理的分区、分单元设计,将整个人工湿地划分为 4 个独立的分区,每个分区划分为 9~10 个单元格,共计 37 个单元格,保证单个人工湿地面积控制在 1 500 m² 左右。本项目采用下行潜流式人工湿地,人工湿地底部防渗层采用 600 g/m² 土工织造布、1.5 mm

双光面 HDPE 膜、400 g/m² 土工织造布的结构层。

考虑人工湿地大分区内单元格底部集水管处于连通状态,无法实现对人工湿地单元格内液位的控制,通过设置人工湿地单元格集水主管阀门实现了人工湿地单元格内液位控制。人工湿地断面如图 3 所示。

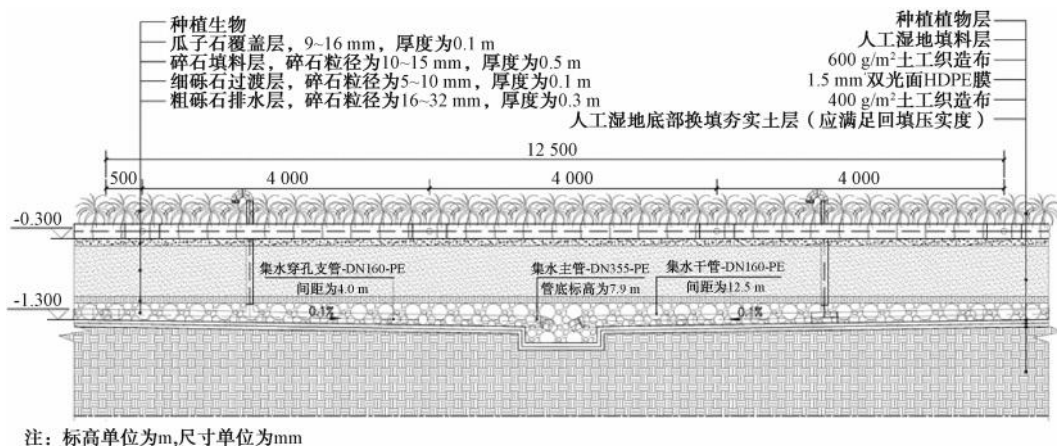


图 3 人工湿地断面图
Fig. 3 Diagram of Constructed Wetland Profile

3 工程实施及优化探索

(1)通过强化生化处理提升湿地前处理段的 COD_{Cr} 去除率,有效解决湿地进水水质波动大的问题。

试运行过程中,发现河道受污染水体水质波动较大,COD_{Cr} 跟氨氮含量会出现远超设计值的情况,对后续人工湿地处理产生了较大的冲击,导致出水水质不能保持连续稳定达标。在现有生物接触氧化池的基础上,通过新增接触氧化池污泥回流工序

(回流比为 30%)、增加曝气量调节水中溶解氧质量浓度至 3.0 mg/L、调整气水比至 5:1 等措施来增强好氧菌种的活性,有效改善了填料挂膜不佳、接触氧化阶段去除率低的问题。上述措施不仅提升了水体 COD_{Cr} 的去除率,保证了人工湿地进水水质的稳定,降低了对人工湿地的冲击负荷影响,还减少了接触氧化池的药剂投加量,降低了运营费用。

(2)通过优化布水方式有效解决部分湿地区域干旱或内涝问题。

在人工湿地处理污水的过程中,改善布水的方式可以提高湿地的处理效率,不理想的布水方式使湿地的效率降低,容易发生短流、堵塞和沟流^[11]。传统的“丰”字型布水方式在已有的工程实例中,出现各穿孔布水支管出水孔水头不一的现象,导致人工湿地单元内布水不均匀,局部水量超过设计负荷或无法达到设计负荷,不能完全充分利用人工湿地的处理能力。本工程采用压力布水,因此,参考供水方式里的环状管网概念,各单元格内布水主管设计为环状,在各个湿地单元格采用环状管上设计布水穿孔管,沿人工湿地的坡向由常规纵向重力式布

水改变为横向等标高压式布水,有效解决了部分湿地区域干旱或内涝的问题。通过布水管干管成环设计的创新优化设计,一方面,有效改善了各穿孔布水支管接驳处的水力条件,能够保障各穿孔布水管的有效水头,保障布水的均匀性;另一方面,布水干管的成环设计,在不改变进水方向的前提下,将各穿孔布水管由纵向改为横向,解决因人工湿地设计坡度导致的穿孔布水管各出水孔水头不一的问题,最大限度保证各出水孔出水的均匀连续性,保证整个人工湿地受水均匀,达到设计的水力负荷。布水方式调整前后对比如图4所示。

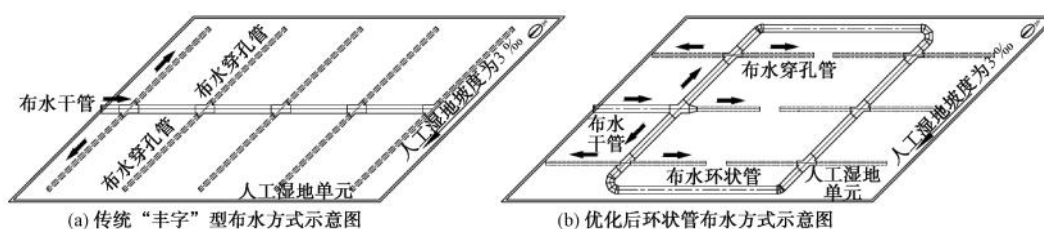


图4 布水方式调整前后对比示意图

Fig. 4 Comparison Diagram before and after Adjustment of Water Distribution Mode

试运行过程发现出水端经常出现“内涝”现象,后期通过设置人工湿地单元格集水主管阀门实现了人工湿地各单元格内液位控制,通过末端集水渠内

可转动排水弯头来实现人工湿地大分区内的液位控制,有效解决了人工湿地出水侧的“内涝”问题。出水方式调整前后对比如图5所示。

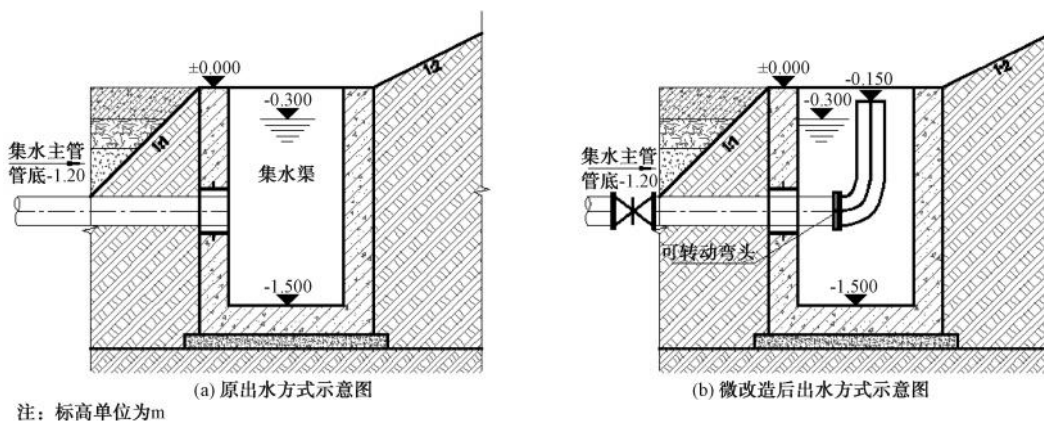


图5 出水方式调整前后对比示意图

Fig. 5 Schematic Diagram of Comparison before and after Adjustment of Effluent Mode

(3) 优化调配适地植物,解决植物生长不均问题。

水生植物是构成人工湿地系统不可缺少的一部分,水生植物系统主要包括浮游植物系统、挺水植物系统、沉水植物系统^[12],人工湿地水生植物系统对氮、磷的去除也起着很大的作用^[13]。本工程主要选

取了挺水植物象草、美人蕉、焦芋、再力花、千屈菜、花叶芦竹。

试运行过程当中发现千屈菜、花叶芦竹长势较差,且污水流经种植上述植物的单元格后出水水质明显劣于种植象草、美人蕉等植物的单元格。因此,通过将千屈菜、花叶芦竹替换为象草以改善其处理

效果差、长势不佳的问题。植物优化配置后对比如

图 6 所示。



(a) 优化前

(b) 优化后

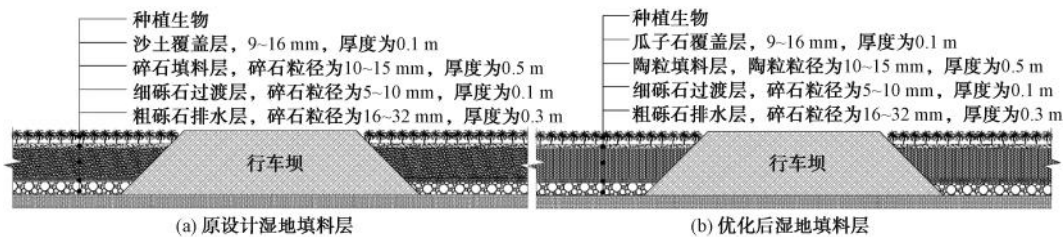
图 6 植物优化配置前后对比

Fig. 6 Comparison before and after Optimized Plant Configuration

(4) 优化填料级配降低湿地堵塞风险。

潜流式人工湿地填料层基质一般有砾石、沸石、粉煤灰^[14], 湿地基质是微生物生存的关键载体, 同时湿地基质可以通过吸附作用去除氨氮^[15]。本项目结合工程所在地取材便捷性, 同时兼顾填料基质

粒径对于湿地堵塞及去除率的影响, 原设计采用 5~32 mm 粒径的砾石进行分层级配填充来作为人工湿地填料基层, 实际施工过程中因砾石采购问题, 采用同等规格陶粒替换级配层中的填料层。填料级配优化前后对比如图 7 所示。



(a) 原设计湿地填料层

(b) 优化后湿地填料层

图 7 填料级配优化前后对比示意图

Fig. 7 Schematic Diagram of Comparison before and after Packing Gradation Optimization

(5) 加强维护和植物收割清运, 保障出水水质稳定。

人工湿地试运行期间, 部分短生长周期的植物出现了残枝落叶。原设计湿地内的道路系统只有大分区大路, 部分小单元格未设置物流通道, 导致植物收割清运困难, 部分残枝落叶落在湿地填料上, 腐败分解导致单元格内水中污染物指标增加, 进而影响出水水质不稳定。

为便于植物收割和清运, 后续通过优化道路, 将整个人工湿地采用大路和小路结合的方式, 大分区分格间设置大路, 小单元格之间设置小路, 方便管理和运输。同时加强人工湿地运营期间植物的维护工作, 根据象草、美人蕉、焦芋、再力花的生长周期特点, 加强对其收割、及时清理落叶等措施, 保障人工湿地处于稳定的运行状态。人工湿地道路系统如图 8 所示。

4 微改造优化后技术经济分析

4.1 运行效果分析

本工程于 2020 年 10 月建成, 2020 年 11 月投入试运行, 2021 年 6 月正式投入使用。分析所用水质数据来源于 2021 年 7 月—12 月实际总进水、人工湿地进水、出水水质数据。出水考核指标氨氮、COD_{Cr}、TP 稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类水质标准, 其运行效果如图 9 所示。本工程总体对 COD_{Cr}、氨氮、TP 的平均去除率分别为 85.19%、91.37%、86.56%。

4.2 运行成本分析

本项目污水处理厂运营、维护费用主要包括工资福利、外购材料及动力费、污水收集管网运营维护费、其他临时工程及管理费, 如表 5 所示。

经微改造优化后, 本项目年均经营成本为 904.93 万元/a, 单位经营成本约为 0.62 元/m³。相



图8 道路系统示意图

Fig. 8 Diagram of Roads System

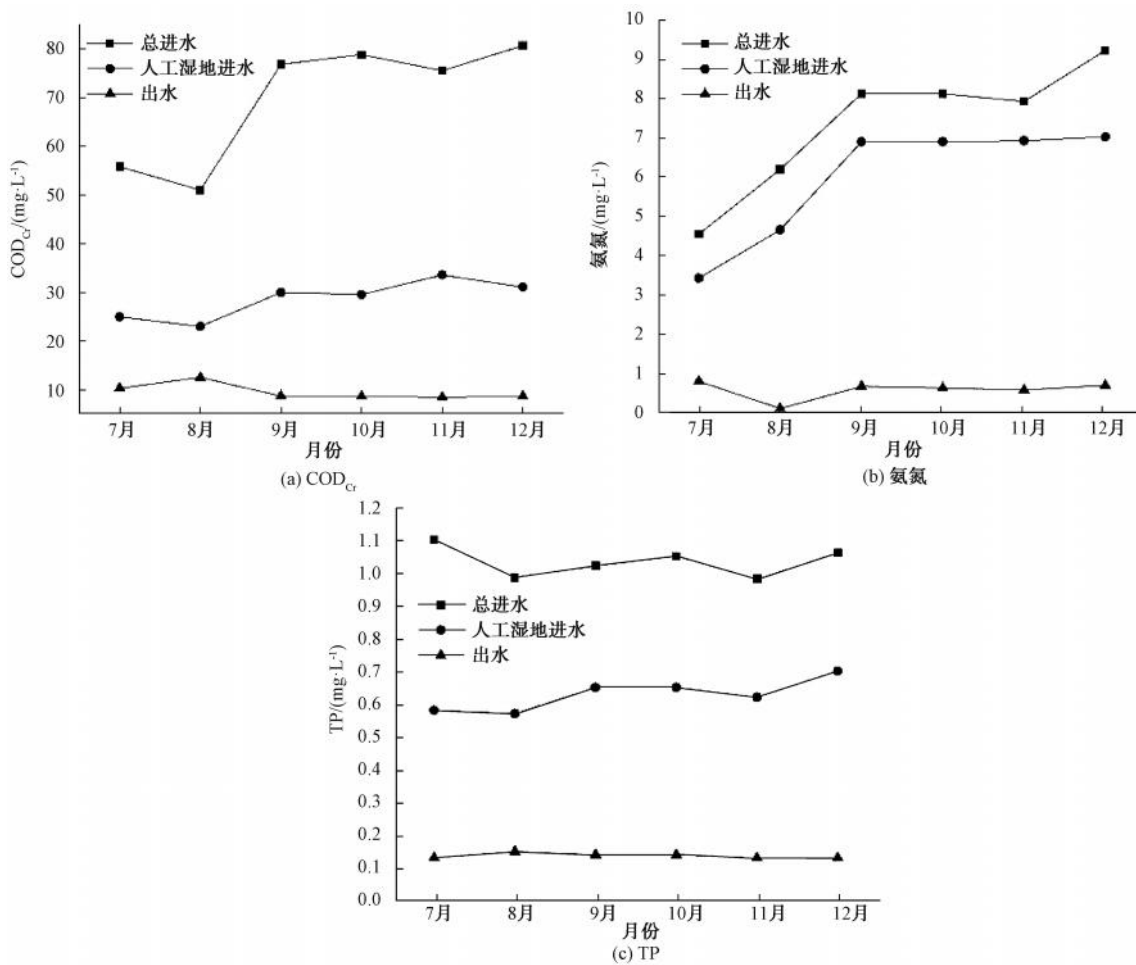


图9 人工湿地运行效果

Fig. 9 Operation Effect of Constructed Wetlands

较于传统水处理工艺运营成本 (1.14 ~ 1.30 元/m³)^[16]具有明显的优势。

4.3 效益分析

采用人工湿地工艺处理受污河水,具有效果良好、运行稳定的特点,本工程的实施有效地降低

受污河水主要指标污染物浓度,对改善区域水环境质量、提升景观环境、保障国考断面水质达标(目标Ⅳ类)具有显著的环境效益。预计 COD_{Cr}、氨氮、TP 削减量分别为 1 080.93、122.94、35.29 t/a。

表5 污水处理厂及配套管网运营成本
Tab.5 Operation Costs of the WWTP and Supporting Pipe Networks

项目名称	金额	备注
工资福利费	126.00 万元/a	/
PAM 药剂费	47.34 万元/a	/
PAC 药剂费	12.05 万元/a	/
水费	4.36 万元/a	/
电费	165.71 万元/a	/
污泥处理费	130.09 万元/a	含污泥脱水费用、按 20 km 计的费用及处置费用
维修维护费	337.11 万元/a	/
管理费	82.27 万元/a	按以上费用合计的 10%取
合计	904.93 万元/a	/
单位成本	0.62 元/m ³	/

5 结论

(1)采用“预处理+生物接触氧化+人工湿地”的工艺能够有效解决受污河道水体水质超标的问题,该工艺能够保障出水 COD_{Cr}、氨氮、TP 稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水质标准,改善流域水体环境质量。

(2)人工湿地占地面积约为 54 218 m²,设计处理规模为 40 000 m³/d,表面水力负荷为 0.74 m³/(m²·d),填料层厚度为 1.0 m,其孔隙率约为 0.50,水力停留时间约为 0.7 d。

(3)通过二沉池的污泥回流至接触氧化池,调整接触氧化池曝气量、气水比等有效地改善了填料因进水浓度的波动而造成的挂膜不稳定问题导致的进水水质波动对人工湿地的冲击。

(4)采取人工湿地布水系统环状布水干管布水方式,一定程度上降低了传统“丰”字型布水方式存在末端水力不利情况。

(5)结合当地取材的便捷性,采用不同粒径的陶粒进行填料级配,有效改善了人工湿地填料层堵塞等问题。

(6)对人工湿地大分区块、小单元格进行通道与小通道的结合设置,解决了湿地运营维护的便捷性。对小单元局部改造增设阀门,有效解决了湿地出水端“内涝”现象。

(7)实施人工湿地植物定期收割、加强植物管理维护实现人工湿地稳定出水。

人工湿地具有效果良好、运行稳定、低能耗、景观优美的特点,有效地改善了流域水质,对改善城乡景观环境、保障国考断面水质达标具有良好的工程效应。通过不同水生植物的单元块化种植,实现湿地景观的改善,将其打造为人工湿地生态公园,具有良好社会效益、环境效益。

参考文献

- [1] LU S, ZHANG X, WANG J, et al. Impacts of different media on constructed wetlands for rural household sewage treatment[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 127: 325-330. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.166.
- [2] 兰媛, 马楠, 徐力勇, 等. 人工湿地处理城镇生活污水技术的研究进展[J]. 化工管理, 2018(20): 192-193.
- [3] 闫龙, 王蓉. 组合人工湿地技术在农村生活污水治理中的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 81-86.
- [4] WU S, TAO L, ZHAO Y, et al. Rethinking intensification of constructed wetlands as a green eco-technology for wastewater treatment[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(4): 1693-1694. DOI: 10.1021/acs.est.8b00010.
- [5] 李拓, 吴华财, 郭静. 垂直潜流人工湿地在污水处理厂尾水深度处理中的设计应用[J]. 广东化工, 2019, 46(11): 170-171, 157.
- [6] 金洛楠, 吴家俊, 魏乐成, 等. 人工湿地污水生态处理工艺强化应用进展[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(9): 1830-1834, 1881.
- [7] 杨长明, 张翔, 郝彦璋, 等. 人工湿地污水生态处理技术研究现状、挑战与展望[J]. 工业水处理, 2021, 41(9): 18-25.
- [8] 高燕, 朱国平, 许明海, 等. 垂直流人工湿地的配水方式探讨[J]. 地球, 2016(6): 382-382.
- [9] 李炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.
- [10] 严熙世, 范谨初. 给水工程[M], 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [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.
- [12] 高天霞, 李毅, 郭婷, 等. 人工湿地系统改善滇池入湖水水质[J]. 净水技术, 2011, 30(2): 28-32.
- [13] 张春艳, 韩宝平, 王晓. 提高潜流式人工湿地氮去除率的方法研究进展[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(9): 77-79.
- [14] 肖辉煌, 张盼月, 曾光明, 等. 沸石用于去除废水中的氨氮[J]. 环境保护科学, 2007(2): 7-10.
- [15] 严立, 刘志明, 陈建刚, 等. 潜流式人工湿地净化富营养化景观水体[J]. 中国给水排水, 2005, 21(2): 11-13.
- [16] 刘平养, 沈哲. 基于生命周期的农村生活污水处理的成本有效性研究——以浙江省白石镇为例[J]. 资源科学, 2014(12): 2604-2610.