

“A²O+生态处理”耦合工艺对城市黑臭水体的综合治理应用研究

刘川岛

(上海市市政工程设计科学研究所有限公司, 上海市 200092)

摘要: 针对东莞市板湖河黑臭水体污染情况,采用“格栅+气浮+耦合工艺(A²O+生态处理+生物膜)+深度过滤+消毒”组合工艺构建物理—生化—生态系统进行综合整治。运行结果表明,经过系统深度处理,能够有效处理氮、磷、有机物等营养物质,化学需氧量、5 d生化需氧量、氨氮、总氮、总磷等指标均能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准,相应出水年平均值分别为16.65、4.11、0.31、8.79、0.14 mg/L,平均去除率分别达到了89.6%、91.3%、98.7%、70.6%、94.1%。

关键词: 纳管截污;黑臭水体;挺水植物;生态处理

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0210-06

Study on Application of “A²O+ Ecological Treatment” Coupled Process in Comprehensive Control of Urban Black Odorous Water Bodies

LIU Chuandao

(Shanghai Municipal Engineering Design Scientific Research Department Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Aiming at the pollution situation of the black and odorous water body in Banhu River of Dongguan City, the composite process of “grille + air flotation + coupled process (A²O + ecological treatment + biofilm) + deep filtration + disinfection” is used to build a physical biochemical ecological system for the comprehensive control. The operational results indicate that after the systematically advanced treatment, the nutrients such as nitrogen, phosphorus and organic matter can be effectively treated. The indicators including chemical oxygen demand, 5-day biochemical oxygen demand, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus can all meet the Class A standard of Pollutant Discharge Standard for Municipal Wastewater Treatment Plant (GB 18918—2002). The corresponding annual mean values of effluent are 16.65, 4.11, 0.31, 8.79, 0.14 mg/L, respectively. And the average removal rates are 89.6%, 91.3%, 98.7%, 70.6% and 94.1%, respectively.

Keywords: sewage collection and interception; black and odorous water body; aquatic plants; ecological treatment

0 引言

健康的河湖生态系统对城市生态环境具有至关重要的影响,但河道自净能力的局限性也使其容易发生黑臭或污染现象。城市河道水体一般有汇水总量小、对生态调节能力较差、抗冲击负荷差、水交换小、容易受到各自内源和外源污染等特点^[1-2]。

河道修复技术主要包括纳管截污和底泥清淤、微生物-植物及联合修复、化学沉淀等。但是在目前的研究工作和工程实际应用中,对于多项技术耦合的研究较少,大多技术路线侧重于中短期的处理效

果,未进行河流内在生态系统的长时间线治理研究,对河道生态系的长效治理效果不明显^[3]。对于黑臭水体,应秉持截污控制技术与生态修复相结合的理念进行治理,其中控源截污是基础和根本,在此基础上,辅以生态处理、底泥清淤等修复技术,才能达到易于养护,河道水质长效治理的效果。

本文在充分调查河道现状污染成因的基础上,综合考虑不同技术相结合的治理效果和可行性,关注长期的治理效果和生态系统恢复,采用“源头截污+组合修复工艺”的治理思路,利用A²O+生态处理的耦合工艺对水体进行改善治理^[4]。耦合处理工艺将生物处理、沉淀、消毒等各污水处理工艺单元和配套组件进行合理组合,在一定空间结构内组成高度集成装置,有占地面积小、施工工程量小、建设周期

收稿日期: 2024-06-04

作者简介: 刘川岛(1989—),男,硕士,工程师,从事市政给排水设计工作。

短等特点,是当前河道污水和市政污水的主要处理方式^[5-6]。

1 项目概况

1.1 项目河道现状

板湖河位于东莞市黄江镇板湖河中下游明渠段,长约150 m,河面宽度为6~25 m,宽窄交替,河深为0.4~2.0 m,河流速为0.06~0.30 m/s,急缓交替,枯水期下游流量约为15 000 m³/d,河水呈灰色,有臭味。

项目地理位置示意图见图1。



图1 项目地理位置示意图

1.2 项目河道水质情况

在进行方案设计前,对该河段主要排污口出口断面进行了水质监测,主要指标情况和处理标准见表1。

表1 下游暗渠出口断面实测水质数据 单位:mg/L

监测时间	5 d生化 需氧量 BOD	化学需 氧量 COD	氨氮 NH ₃ -N	总磷TP	总氮TN
2022-09	42.7	323.2	28.1	4.1	30.3
2022-10	51.8	300.1	17.8	3.1	29.9
2022-11	33.0	305.8	24.6	3.9	43.3
2022-12	52.7	301.5	19.2	4.0	45.2

1.3 项目总体建设方案

该项目建设地点位于东莞市黄江镇板湖河中下游明渠段,长约150 m,河面宽度为6~25 m,宽窄交替,河深为0.4~2.0 m,河流速为0.06~0.30 m/s,急缓交替,枯水期下游流量约为15 000 m³/d,河水呈灰色,有臭味。该项目于板湖河中下游暗渠出口段空置位置设置处理能力为5 000 m³/d的A²O污水处理设施,将拦截后的黑臭水体引入处理设施处理后排入下游河道。设施上部辅以挺水植物,经过A²O+生物处理后,出水满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,即其化学需氧量COD≤50 mg/L、氨氮NH₃-N≤5 mg/L、总磷TP≤0.5 mg/L

等(不考核总氮TN),然后排入下游河道。

1.4 项目总体技术路线

1.4.1 河道现状水质

由表1可知,板湖河中下游暗渠出口断面的COD、NH₃-N、TP值较高,均远超于地表V类水指标,设计中除了常规的考虑外,要着重考虑对COD、NH₃-N、TP的去除。

1.4.2 进水水质分析

根据室外排水设计标准,当BOD/COD值大于0.3时可进行生化处理,且比值越大生化效果越好;当BOD/TN值大于4时,表明碳源充足,反硝化进行得很彻底,BOD/TN值小于4时则需要外加碳源;BOD/TP值大于17时,其比值越高说明碳源越充足,除磷效果越好^[7]。由表2可知,全年BOD/TN值均小于3,表明在运行过程中需补充外界碳源;BOD/TP值均大于17,表明理论上生物法除磷效果较好。

表2 运营期间(2023年)主要进水指标及指标评估情况

月份	进水指标/(mg·L ⁻¹)				BOD/TN	BOD/TP
	BOD	NH ₃ -N	TN	TP		
1	64.44	31.38	41.02	3.432	1.57	18.8
2	103.10	35.20	39.10	4.028	2.63	25.6
3	79.42	29.46	34.68	3.150	2.29	25.2
4	56.18	26.62	37.18	2.828	1.51	19.9
5	72.52	28.10	32.52	3.068	2.23	23.6
6	37.32	17.60	23.98	2.052	1.55	18.2
7	40.00	24.12	26.98	2.190	1.48	18.3
8	34.16	12.19	23.70	1.108	1.44	30.8
9	39.58	18.46	22.70	2.000	1.74	19.8
10	27.50	18.88	23.28	2.116	1.18	13.0
11	34.06	20.54	24.72	2.056	1.38	16.6
12	41.96	24.52	29.20	2.430	1.44	17.3

1.4.3 出水水质监测及分析

经过系统深度处理,出水化学需氧量、5 d生化需氧量、氨氮、总氮、总磷等指标均能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》中一级A标准,相应的年平均值分别为16.65、4.11、0.31、8.79、0.14 mg/L,平均去除率分别达到了89.6%、91.3%、98.7%、70.6%、94.1%。

1.4.4 总体技术路线

A²O工艺的处理对象水质特点主要包括高有机物含量和较高的氮、磷浓度,适用于城市生活污水和某些工业废水的水质提升,能够有效去除污水中的有机物、氮和磷,改善水质,对于河道黑臭水体也有较好的治理效果。Chen等^[8]通过添加生态处理环节,增强了A²O工艺对氮和磷的去除效果,提高了污

水处理系统的性能。根据出水标准,结合当地实际情况,本项目采用“格栅+气浮+A²O+生态处理+深度过滤+消毒装置”的工艺流程,以保证出水稳定达标排放。

1.5 项目总体目标

经过该工程的处理后,出水达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准,即COD≤50 mg/L、NH₃-N≤5 mg/L、TP≤0.5 mg/L等(不考核总氮TN),然后排入下游河道。

2 工艺方案选择

2.1 控源截污

外源污染:该项目中河道的外源污染主要来自于河道周边少许雨污混接排污点,混入雨水管的生活污水未经处理便直接排入河道中,大量有机污染物的侵入导致河道水体黑臭。

内源污染:目标河道经探测底泥厚度较浅,但富集有机物、重金属和其他污染物质,这些污染物质可能是长期沉积在河床上的,也可能是由附近的城市活动引入的。当底泥中的污染物质受到扰动或氧化时,会释放到水体中,造成水质污染。

该工程通过对沿河排污管进行截污纳管,对岸上现有污水管网进行改造和更新,阻断未处理污水直排入河。沿河道新建污水截流主干管,管径为1 000 mm,收集的早流污水和初期污水经由末端设置的初期雨水泵,再经提升泵提升至市政污水管网后由污水厂处理。内源污染方面本项目对底泥淤积严重的区域采取清淤的方式,去除部分污染严重的河道底泥,来保障后续治理结果的持久性。

2.2 处理工艺比选

处理工艺比选表见表3。

根据表1可知,交汇处断面的COD、NH₃-N、TP值在检测段均远超地表V类水指标,设计中除了常规的考虑外,要着重考虑对这几项的去除。

由表3可知:AO工艺(厌氧-好氧)比较适合进水有机物含量较高的水体,若要提高脱氮效率,必须加大内循环比,因而会加大运行费用。当有机物浓度低时,氧化沟、SBR等延时曝气法^[14]具有明显的优势。但这2种工艺的污泥负荷较低,池容相对较大,对于用地面积紧张、构筑物集约的本项目而言并不合适。且对于小型污水处理站,氧化沟和SBR的处理费用也较高,不利于后期长期的运维。

A²O工艺的处理对象水质特点主要包括高有机

表3 工艺比选表

处理效果	氧化沟列 工艺	A ² O系列 工艺	SBR系列 工艺	AO系列 工艺
COD处理效果	好	好	较好	好
氨氮处理效果	较好	好	较好	较好
总磷处理效果	好	好	好	好
构筑物布置 集约化程度	较差	较高	一般	高
生反池体积利用率	高	高	一般	一般
出水水质控制	好	好	较好	一般
构筑物占地	较大	较小	一般	一般
运行费用	较高	一般	较高	一般
综合评价	好	好	较好	较好

物含量和较高的氮、磷浓度,适用于城市生活污水和某些工业废水的水质提升。通过厌氧、缺氧和好氧3个阶段的处理,能够有效去除污水中的有机物、氮和磷,改善水质。对于河道黑臭水体,也可以通过合理应用A²O工艺来达到有效的治理效果。Chen等^[8]通过添加生态处理环节,增强了A²O工艺对氮和磷的去除效果,提高了污水处理系统的性能。

将A²O工艺与生态处理结合的主要优势之一是植物的根系可以吸收余留的营养物质,例如氮和磷,从而减少污水中此类营养物质对水体造成的污染。Lu等^[9]探讨了A²O工艺与人工浮岛结合处理低碳氮比污水的效果,发现这种组合可以有效提高氮和磷的去除效率。卢萃云等^[10]评估了A²O工艺与一种新型连续流人工湿地结合处理污水中氮和磷的效果,并对该组合工艺的性能进行了分析,结果表明,通过A²O工艺与生态处理技术的合理组合,能有效提升污水中氮和磷的去处效率。此外,挺水植物还可以提供生态系统服务,如增加水体的生物多样性,改善水质等。

深度过滤技术能够有效去除污水中的悬浮物、胶体、细菌、病毒等污染物,保证处理后的水质达到排放标准或回用要求;可以有效适应不同的水质需求,能耗较低,通常采用自然或低能耗的驱动方式,如重力、静压等,从而降低了运行成本和能源消耗,同时减少了对环境的影响。

经过实地探勘发现,本项目地处城市建成区,周围可用地较少,且用地面积相对紧凑,宜选择占地面积小的处理工艺。根据工艺比选表可知,A²O工艺处理构筑物布置集约程度较高,比较适合本项目的现场工况。

根据工艺比选结果,并结合本项目水质和现场情况,A²O一体化处理设施+生态处理工艺效果更

好,经济性更高,且便于后期的运行维护,故以A²O一体化处理设施+生态处理作为本工程的主体工艺。本工程工艺流程见图2。

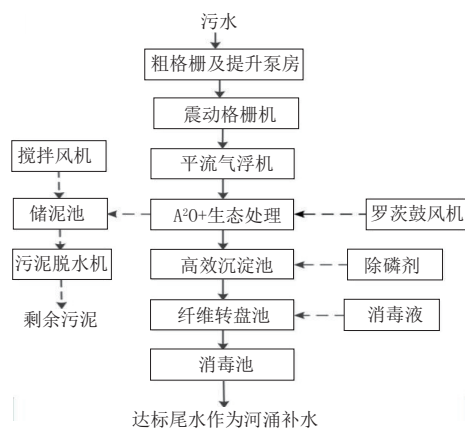


图2 本工程工艺流程

2.3 项目方案设计

该项目的主要构筑物有:(1)提升泵;(2)粗格栅;(3)震动格栅机;(4)平流气浮机;(5)A²O处理设施;(6)生态处理单元,以木本植物为主、草本植物为辅,主要有美人蕉、旱伞草、梭鱼草等;(7)纤维转盘滤池;(8)污泥储池。

整套处理工艺占地34 m×17 m,共计578 m²。

2.4 总体布置

于板湖河南岸空地布设“A²O+生态处理耦合装置”,河道水体由潜水泵抽至装置内,处理达标后排出下游水体。经过一个处理循环,达到河道水质净化的目的。

3 结果与分析

3.1 COD去除效果

COD去除效果折线图见图3。由图3可知,进水COD全年浓度变化表现为先升高后降低的趋势,2月份浓度达到最大,浓度范围为112.0~328.2 mg/L,平均值为173.8 mg/L,且同一月份不同监测时间的监测结果波动较大。出水COD浓度范围为13.6~21.2 mg/L,平均值为16.65 mg/L,COD平均去除率为89.6%,最大去除率为95.9%,说明虽然进水负荷波动较大,组合工艺仍能保证COD的稳定去除,始终保持良好的净化效果。6、7月份去除率较低,与在此期间进水BOD/COD值较小有一定关系,可能是在运营过程中并未根据水质和水量的变化来科学合理地调整工艺运行参数,导致水质可生化性未进行适当调节,使去除率下降。

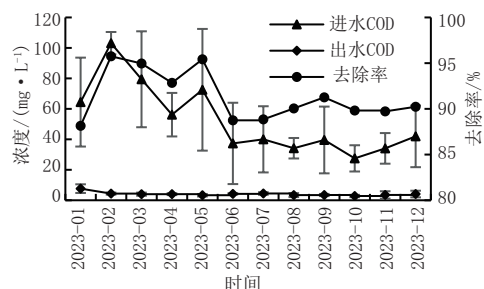


图3 COD去除效果折线图

3.2 BOD去除效果

BOD去除效果折线图见图4。

由图4可知,研究期间河道进水BOD浓度变化幅度为27.5~103.1 mg/L,平均值为52.52 mg/L,全年表现为先升后降的趋势,2月份达到峰值,与COD的变化趋势一致。出水BOD浓度保持在标准值10 mg/L以下,范围为2.8~7.64 mg/L,平均值为4.11 mg/L,平均去除率为91.3%。

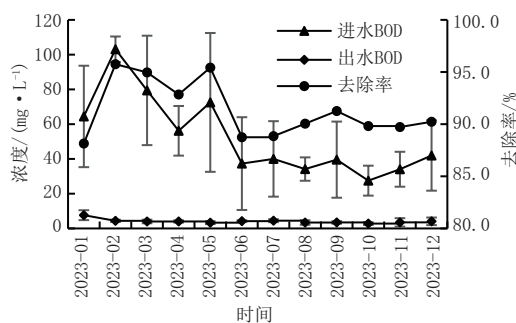


图4 BOD去除效果折线图

3.3 氨氮去除效果

氨氮去除效果折线图见图5。

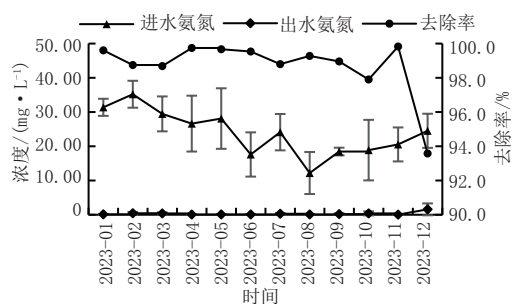


图5 氨氮去除效果折线图

氨氮去除主要依靠硝化反应。另外,近年来的研究表明,短程硝化-厌氧氨氧化反应也是去除氨氮的重要途径。由图5可知,进水氨氮全年浓度变化趋势为先降低后升高的趋势,8月份浓度最低,为12.19 mg/L,整体浓度为12.19~35.20 mg/L,平均值为23.92 mg/L;除12月份之外,出水氨氮浓度保持在0.5 mg/L以下,远低于标准值5 mg/L,平均浓度为0.31 mg/L。12月份出水氨氮浓度为1.57 mg/L,原因可能与冬季低温条件下植物吸收作用降低、硝化/反

硝化微生物活性降低、水的黏度增大等因素有关^[11]。氨氮全年平均去除率为98.7%,表明氨氮整体去除效果较好。

3.4 总氮去除效果

总氮去除效果折线图见图6。

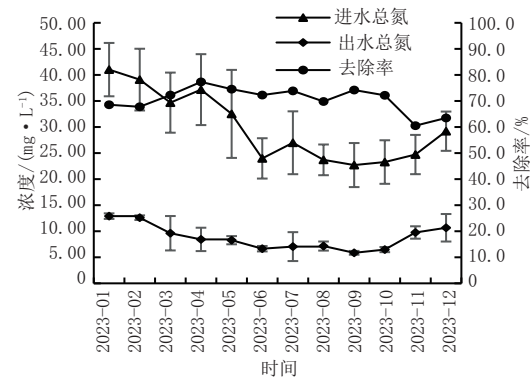


图6 总氮去除效果折线图

由图6可知,进水总氮全年(1~12月)浓度变化趋势为先升高后降低,进水浓度波动较大,范围为22.70~41.02 mg/L,平均浓度为29.92 mg/L。出水总氮浓度表现出一定的波动性,范围为5.86~12.90 mg/L,平均浓度为8.79 mg/L,全年去除率均在60%以上,平均去除率达到70.6%。与氨氮全年平均去除率98.7%相比,总氮平均去除率相对较低,原因是受到反硝化作用影响,硝化液回流比较低,好氧池内的NO₃-N并未充分回流到厌氧池,使得反硝化反应不充分,造成出水TN值偏高。经过调整后,总氮整体去除率有所好转。6月份之后,进水COD浓度降低,碳源缺乏,不利于反硝化的进行;11~12月份,由于温度降低,降低了微生物活性,限制了反硝化过程,导致TN去除效果变差。与此同时,在生态处理系统中,水生植物的生长需要大量的营养物质,其中N、P化合物主要以离子形式存在,通过富集吸收等方式固定在植物体内,保证植物的正常生长、发育和繁殖^[12],从而确保了系统的去除效果。

3.5 总磷去除效果

总磷去除效果折线图见图7。

由图7可知,进水中总磷含量全年呈现上下波动性变化,范围为1.11~4.03 mg/L,平均浓度为2.54 mg/L;出水总磷浓度相对稳定,除3月份为0.22 mg/L之外,其他月份总磷浓度均在0.2 mg/L以下,出水总磷浓度为0.09~0.22 mg/L,平均浓度为0.14 mg/L,总磷平均去除率为94.1%。总磷去除主要通过高效沉淀池沉淀排泥实现。7月份总磷去除率最低,为91.2%,可能与系统COD负荷有关。尹军等^[13]研究表明,COD

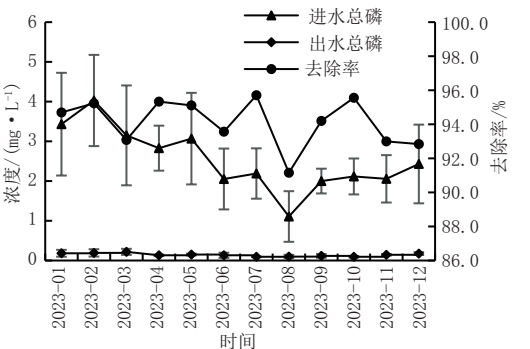


图7 总磷去除效果折线图

负荷对除磷效果影响较大,较低的COD值减少了微生物对磷的吸收作用,并且自身的生长也会受到限制。由图3可知,7月份进水COD为160.8 mg/L,在全年进水中属于偏低水平。

3.6 其他指标去除效果分析

系统运营监测分析见表4。

系统运营期间同时对其他理化和生物指标进行了检测分析,包括悬浮物SS、色度、阴离子表面活性剂、石油类、动植物油、粪大肠杆菌群数等,以监测系统对这些指标的去除效果。由表4可知,上述各项指标平均去除率分别为81.0%、75.0%、96.3%、87.7%、95.4%和88.3%,表明该系统对各个指标均有较好的去除效果。

表4 系统运营监测分析

检测项目	标准限制	进水平均值	出水平均值	平均去除率/%
pH值	6~9	7.62	7.90	
悬浮物浓度/(mg·L ⁻¹)	10	35	6.67	81.0
色度/倍	30	8	2.00	75.0
阴离子表面活性剂浓度/(mg·L ⁻¹)	0.5	5.40	0.20	96.3
石油类浓度/(mg·L ⁻¹)	1	0.87	0.11	87.7
动植物油浓度/(mg·L ⁻¹)	1	2.19	0.10	95.4
粪大肠杆菌群数/(个·L ⁻¹)	10 ³	2.2×10 ³	257	88.3

3.7 进出水pH值

不同时间段进水、出水pH值变化情况见图8。

pH值对于系统的稳定运行具有重要影响,一般控制在6~8。pH值过低容易酸化,造成系统崩溃;过高会影响微生物的活性从而抑制生化反应。

由图8可知,进水pH值波动性较大,变化范围为6.2~7.4,出水pH值基本稳定在7.0左右。说明经过系统处理后废水pH值得到了一定的调整,能够确保

系统的稳定运行。

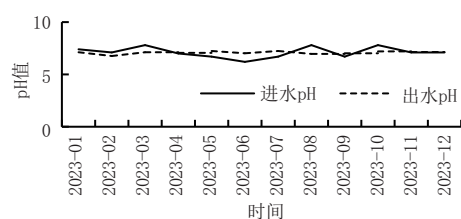


图8 不同时间段进水、出水 pH 值变化情况

3.8 检测指标相关性分析

各个指标的相关性分析结果见表5。由表5可见：COD与TN相关($p<0.05$)；BOD与COD、TN、TP、NH₃-N显著相关($p<0.01$)；TP与BOD、COD、TN显著相关($p<0.01$)；TN与BOD显著相关($p<0.01$)；但是pH值与其余指标均不相关($p>0.05$)。

表5 相关性分析结果

指标	BOD	COD	TN	TP	NH ₃ -N	pH值
BOD	1					
COD	0.929**	1				
TN	0.829**	0.693*	1			
TP	0.899**	0.766**	0.892**	1		
NH ₃ -N	0.874**	0.727**	0.905**	0.977**	1	
pH值	0.059	-0.02	0.141	-0.011	0.006	1

注：* $p<0.05$ ；** $p<0.01$ 。

4 结 语

(1)在研究时段内河道进水水质各项指标呈现较大的波动性,采用“A²O+生态处理”组合工艺对河道污水进行处理具有较好的效果,能够稳定、高效处理达标,COD、BOD、NH₃-N、TN、TP平均去除率可分别达到89.6%、91.3%、98.7%、70.6%和94.1%,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准。

(2)组合工艺针对悬浮物、色度、阴离子表面活性剂、石油类、动植物油和类大肠杆菌均有较好的去除效果,各项指标平均去除率分别为81.0%、75.0%、96.3%、87.7%、95.4%和88.3%。

(3)除pH值与各指标均不相关外,进水阶段水质主要检测指标之间均具有较好的相关性,故通过

处理系统能够对水质进行有效调节。

(4)在总氮的去除过程中,根据试验结果显示,污泥回流比、硝化液回流比不宜过低。

(5)根据实际运营的水质监测数据可知,经过A²O+生态处理耦合工艺处理后,出水水质达到了预期处理目标,为后续的河道水处理工程提供了有效的数据支持。

参考文献：

- [1] 雷沛,王超,张洪,等.重庆园博园龙景湖水水质保持及其上游流域水污染治理方案[J].环境工程学报,2019,13(2):481-495.
- [2] 骆其金,谌建宇,许振成,等.曝气生态浮床-渗透性反应墙组合工艺水质净化特性研究[J].环境工程学报,2010,4(9):1995-1999.
- [3] ZHOU Y, MA H, ZHANG J. Enhancement of nitrogen and phosphorus removal in an A²O system by adding floating plant bed[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(14): 13650-13659.
- [4] 张怡,刘本洪,刘蕾,等.硬质河岸和水体富营养化河道的综合治理技术:以柴桑河为例[J].环境工程学报,2021,15(12):3875-3882.
- [5] 邱勇军,张玉峰,杨永前,等.移动式一体化生活污水处理设备的研究进展[J].净水技术,2023,42(11):27-36;66.
- [6] 翟袁桢.农村生活污水一体化处理设备工艺研究[J].科技风,2020(27):111-112.
- [7] GB 50014—2021,室外排水设计标准[S].
- [8] CHEN Y, ZHU W, LI X. The performance of A²O integrated with artificial floating island for treating sewage with low C/N ratio[J]. Environmental Technology, 2019, 40(19): 2509-2517.
- [9] LU X, LIU Y, ZHANG J. Evaluation of nitrogen and phosphorus removal in an anaerobic - anoxic - oxic (A²O) process and an A²O process integrated with a novel continuous flow constructed wetland[J]. Ecological Engineering, 2019(132): 46-54.
- [10] 卢萃云,庞志华,林方敏,等.曝气充氧和人工造流技术修复河道污染水体[J].环境工程学报,2012,6(4):1135-1141.
- [11] 童昌华,杨肖娥,濮培民.水生植物控制湖泊底泥营养盐释放的效果与机理.农业环境科学学报,2003,22(6):673-676.
- [12] 王敬富,陈敬安,濮培民,等.红枫湖富营养化水体生态修复中水生植物化学成分[J].生态学杂志,2012,31(9):2312-2318.
- [13] 尹军,王建辉,王雪峰,等.污水生物处理若干影响因素分析[J].环境工程学报,2007,1(4):6-11.
- [14] 刘波,王国祥,王风贺,等不同曝气方式对城市重污染河道水体氮素迁移与转化的影响[J].环境科学,2011,32(10):2971-2978.