



水解酸化-BBR-高效沉淀在污水厂提质增效中的应用

赵旭雍¹, 徐欣¹, 吴永明², 邓觅²

(1. 南昌鑫淼源环保有限公司, 江西南昌 330038; 2. 江西省科学院微生物研究所, 江西南昌 330096)

[摘要] 南昌市某污水处理厂提标改造工程设计规模为20 000 m³/d, 工程设计出水水质执行地表水Ⅳ类标准(TN除外)。为确保稳定达标, 结合以往工程经验和进水水质情况, 确定采用“粗格栅+细格栅曝气沉砂池+初沉池+水解酸化池+BBR池+二沉池+高效沉淀池+纤维转盘滤池+紫外消毒”工艺。介绍了主要工艺流程和运行参数, 并结合稳定运行结果, 得到该工艺对COD、BOD₅、SS、TN、NH₄⁺-N、TP等具有明显去除效果, 其出水相应指标分别可达17.1、5.7、6.4、9.2、1.3、0.20 mg/L, 满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中地表水Ⅳ类标准(TN除外)。技术经济分析表明, 该工艺处理废水所需电费和药剂费为0.30元/m³。

[关键词] 污水处理厂; 提标改造; 植物生态生物膜反应器; 高效沉淀

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** B **[文章编号]** 1005-829X(2022)07-0173-06

Application of hydrolysis acidification-BBR-high efficiency sedimentation in improving quality and efficiency of wastewater treatment plant

ZHAO Xuyong¹, XU Xin¹, WU Yongming², DENG Mi²

(1. Nanchang Xinmiaoyuan Environmental Protection Co., Ltd., Nanchang 330038, China;

2. Institute of Microbiology, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

Abstract: The design scale of the upgrading and renovation project of a wastewater treatment plant in Nanchang was 20 000 m³/d and the water quality of the engineering design shall comply with the Surface Water Quasi IV Criteria (TN excepted). In order to ensure stable compliance, combined with previous engineering experience and the water quality of the influent, the process of “coarse grille+fine grille+primary sedimentation tank+hydrolysis acidification tank+BBR tank+secondary sedimentation tank+high-efficiency sedimentation tank+fiber turntable filter+UV disinfection” technology was determined to be adopted. Through the introduction of the main process flow and operating parameters, combined with the stable operation results, it was obtained that the process had obvious removal effects on COD, BOD₅, SS, TN, NH₄⁺-N and TP, and the corresponding indicators of the effluent were 17.1, 5.7, 6.4, 9.2, 1.3, 0.20 mg/L, respectively. These indicators met the level quasi IV criteria specified in the Environmental Quality Standards for Surface Water (GB 3838—2002) (TN excepted). The technical economical evaluation analysis showed that the electricity and reagent cost required for the treatment of wastewater by this process was 0.30 yuan/m³.

Key words: wastewater treatment plant; upgrading and reconstruction; botany bio-reactor; high efficiency sedimentation

随着区域企业产业链增加和经济快速发展, 出现污水排放量大幅增加以及进水各主要水质指标提升的问题, 进而导致部分现有污水处理厂超负荷运行并无法满足当前污水处理要求, 因此, 亟待采用高效工艺改扩建原有污水处理厂来进一步提高污水

处理效率。在我国土地资源紧张、污水负荷日益加大且环境要求不断提高的背景下, 污水处理工艺也面临新的选择^[1]。目前常用的污水处理工艺主要包括A²/O工艺^[2]、氧化沟工艺^[3]、SBR工艺^[4-5]和MBR工艺^[6-7]等。其中, A²/O工艺存在出水NH₄⁺-N和TP

[基金项目] 江西省科学院省级科技计划项目包干制试点示范项目(2021YSBG10003, 2021YSBG22024); 江西省重点研发计划项目(20202BBGL73082); 江西省科技创新基地计划项目(20212BCD42014)

较高且占地面积较大等问题;氧化沟工艺除氮效果有限;SBR工艺出水不连续,设备利用率不高;MBR虽然处理效率好且占地面积小,但耗材更换频繁,费用高,不利于后期的运行。由此可见以上工艺均存在一定的局限性,不太适用于污水处理厂的原址改扩建。在当前“绿色发展”理念的影响下,随着污水排放标准的日益严格,对污水处理设施的高效化、低能耗化、生态化改扩建将成为未来主要方向^[8-9]。

植物生态生物膜(Botany bio-reactor, BBR)工艺是一种基于FCR(Food chain reactor)技术的生物膜处理工艺^[9-10],其从生物接触氧化法衍化而来,通过植物根系和仿生填料构建水生态与生物处理,利用附着在植物根系和载体表面的微生物、原生动物以及微型动物去除污水中污染物,并利用工艺自身特色同步实现除臭和景观改造,实现花园式现代化污水处理厂的建设。该技术利用自然和人工根须作为生物膜载体,比表面积巨大,可达到12 000 m²/m³,并可培养和维持3~4倍于活性污泥法的“等效生物浓度”^[10-12];同时植物与填料交织生长,可改善根系泌氧,促进DO在水中的运输^[13];此外独特的生态系统可大量聚集各类微生物和小型动植物,通过食物链捕食与被捕食的关系,稳定系统内生物膜结构并降低污泥产生量^[14]。

本工程针对污水处理厂原有处理设施处理能力有限,出水标准提高的问题,经分析研究及结合公司以往类似工程经验,选用“水解酸化-BBR-高效沉淀”为主体的耦合工艺对南昌某污水处理厂进行提标改造,取得良好的处理效果。项目案例可为国内同类污水处理厂提标改造提供参考。

1 工程概况

该污水处理厂原设计处理规模为10 000 m³/d,其原工艺以“格栅-沉砂池-氧化沟-二沉池”为主,由于日均进水量及各主要水质指标均超设计值,导致污水处理系统长时间处于超负荷运行状态,使得其出水水质勉强能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准^[15],但并不能满足当前环保排放要求。据此,决定采用“水解酸化-BBR-高效沉淀”为主体的耦合工艺对其进行改造,设计规模为20 000 m³/d,并考虑远期增加10 000 m³/d污水处理规模的可能性,部分工艺处理规模按30 000 m³/d规划建设。根据运行监测结果显示,提标改造后,污水处理厂出水COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP等污染物指标稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的地表水Ⅳ类标

准(TN除外),且SS满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A标准,进一步降低了出水对水环境的影响。

2 原有工程问题分析及改造方案

(1)地区发展带动水质、水量的提升,导致该污水处理厂原有“格栅-沉砂池-氧化沟-二沉池”处理工艺长时间处于超负荷运行状态,出水仅能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B标准,而尾水排入的水系下游为一省控断面,为满足新环保要求,采取“水解酸化-BBR-高效沉淀”为主体的耦合工艺对污水处理厂进行提标改造,使之出水优于一级A标准甚至达到地表水Ⅳ类标准(TN除外)。

(2)该污水处理厂地处经济发达地区,可供扩建的土地资源紧缺,而BBR技术因其特殊的设计方式,可在原有氧化沟池体基础上进行直接改造形成BBR池,这样既能增加污水处理厂景观,又可有效解决城市污水处理厂新建和改扩建中新增土地的问题。

(3)针对污水处理厂来水中工业废水含量增多和偶尔出现黄泥较多影响生化系统正常运行的问题,采取新建应急池、pH调节及初沉池和水解酸化池等处理措施。在调节pH并投加PAC等混凝剂后将上清液排至水解酸化池,在有效降解部分COD、BOD等的同时提高废水可生化性,以利于后续高效的生化处理过程。

3 工艺流程

本项目采用“粗格栅+细格栅曝气沉砂池+反应初沉池+水解酸化池+BBR池+二沉池+高效沉淀池+纤维转盘滤池+紫外消毒”工艺,具体工艺流程见图1。

污水经粗格栅拦截大颗粒物后进入泵池,经提升泵提升进入细格栅及后续曝气沉砂池。沉砂池出水自流进入反应池。反应池设NaOH、PAC、PAM加药点,在调节pH、加药后经混凝絮凝反应,出水自流进入平流式初沉池。污水在平流式初沉池泥水分离后出水自流进入水解酸化池,提高可生化性后出水再经配水渠进入BBR反应池。由于初沉阶段投加PAC可能导致水体pH下降,再经水解阶段pH会进一步下降,故在BBR池进水端预留加药口,方便投加Na₂CO₃以提高水体pH和碱度,确保系统的去除效率。

污水在BBR池内经微生物和植物协同作用逐级去除大部分COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TN、TP、SS等各类污染物后,出水自流进入二沉池泥水分离。二沉池出水自流进入高密沉淀池,经加药除磷并进一步

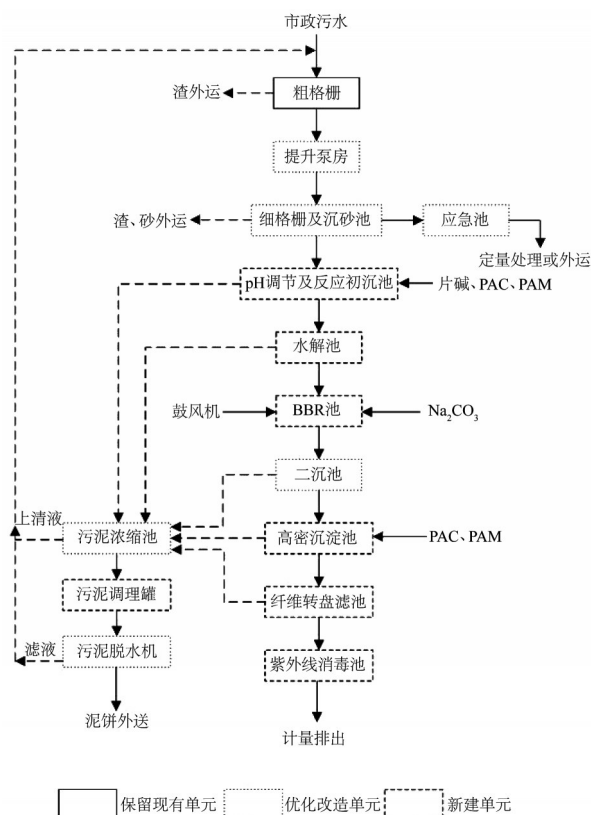


图1 废水处理工艺流程

Fig. 1 Flow diagram of wastewater treatment process

处理去除其他各类污染物后,出水自流进入纤维转盘滤池,再经过滤后自流进入紫外线消毒渠,经消毒后即可达标计量排放。

初沉池污泥排至污泥池;水解池末端污泥部分回流至水解池进水端,部分排至污泥池;二沉池污泥排至污泥池;高密度沉淀池污泥根据工艺需要部分回流至高密度沉淀系统前端反应池,剩余污泥排至污泥池。纤维转盘滤池反洗水排至粗格栅。污泥池污泥经螺杆泵提升至叠螺脱水机后自流进入污泥调理罐,经投加氯化铁、PAM、石灰调理后再经泵输送进入高压板框压滤机脱水,泥饼输送至污泥堆放区后外运至政府指定地点统一处理。污泥压滤液和重力浓缩池上清液自流进入粗格栅渠再回至处理系统。

4 主要工艺单元及设备

4.1 粗格栅及提升泵房

原有粗格栅分2组建设,设计规模30 000 m³/d,用于对进水大颗粒悬浮物拦截去除,防止堵塞水泵机组及管道阀门。泵池设4个潜水泵位,单台设计流量为630 m³/h。本次新增1台水泵,冷备1台,并配套变频。

4.2 细格栅和曝气沉砂池

原有细格栅及沉砂池土建和设备按10 000 m³/d建设。本工程需要提高沉砂池出水水位,同时因平面布置调整,需拆除原有细格栅及沉砂池后重新建设。重建细格栅和曝气沉砂池设计规模30 000 m³/d,分2组,每组按15 000 m³/d规模建设。

设计参数:流量 $Q=30\,000\text{ m}^3/\text{d}=1\,250\text{ m}^3/\text{h}$,总变化系数 $K_z=1.45$,最大流量 $Q_{\max}=1\,812.5\text{ m}^3/\text{h}$ 。

(1)细格栅。共计2座,单座尺寸为9.3 m×1.5 m×1.5 m,结构为钢筋砼地上式。

(2)曝气沉砂池。共计2座,单座尺寸为3.2 m×15.0 m×4.8 m,结构为钢筋砼地上式。

4.3 应急处理工序

由于处理厂部分时段进水pH偏低且含有较多黄泥,故新增pH调节及反应沉淀单元,将污水pH调整至合理值后沉淀去除黄泥等。同时,因处理厂进水中含有大量预处理后的医药废水,COD较高且可生化性较差,为保障污水处理系统稳定运行和出水水质达标,故在初沉工序后增设水解酸化系统,使之在兼性微生物的吸附和水解酸化作用下将大分子难降解有机物转化为小分子易降解有机物,实现有机物和色度的良好去除,从而有利于后续处理工序的高效运行^[16]。

(1)反应池。1座,分2组独立运行,每组4格,单组总尺寸为17 m×8.3 m×7.3 m,结构为钢筋砼半地上式。

(2)初沉池。类型为平流式沉淀池,1座,分2组,每组2格,表面水力负荷 $q=3.2\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,结构为钢筋砼地上式。

(3)水解酸化池。1座,设计规模30 000 m³/d, HRT=5.8 h,尺寸为42.4 m×25.8 m×7.3 m,结构为钢筋砼半埋地式。当进水COD较高并含有较多难降解物质时,水解酸化工序可去除部分COD并提高污水的可生化性。本项目水解酸化池采用完全混合式活性污泥法,水解段通过机械搅拌使泥水充分混合,加强微生物作用;水解酸化池池顶适量配种植物,改善池顶绿化效果,并提高水解段的污染物去除效率。

4.4 BBR池

1座,分2组运行,总有效容积为14 359 m³,有效水深5.5 m,总停留时间17.32 h。BBR池新建设计规模20 000 m³/d,单座尺寸为63.2 m×43.2 m×6.2 m, BBR组件填充率控制在40%~45%,混合液回流比为150%~300%,供气量约5 283.6 m³/h,结构为钢筋砼半埋地式。池内种植适应本地生长和达到处理要求的植物,依据不同植物的特性(如喜阴、喜湿等)进行

合理搭配,在提高植物存活率的同时提升观赏价值。工艺利用仿生根系填料和植物根系使得微生物更容易附着生长,从而形成较厚的生物膜系统^[10-11]。

4.5 二沉池

二沉池为1座辐流式沉淀池,利用原有设备,尺寸为 $D\ 32\text{ m}\times 4\text{ m}$,表面水力负荷 $q=1.04\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,结构为钢筋砼地上式。二沉池的主要作用是对BBR池出水进行泥水分离,便于后续工艺处理污水。经核算原有二沉池可满足 $20\ 000\text{ m}^3/\text{d}$ 生物膜法工艺后沉淀需求,保留使用。

4.6 高密度沉淀池

1座,新建设计规模 $20\ 000\text{ m}^3/\text{d}$,反应区 $\text{HRT}=10\text{ min}$,沉淀区 $q=8.3\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,尺寸为 $18.7\text{ m}\times 16.9\text{ m}\times 5.5\text{ m}$,结构为钢筋砼地上式。二沉池出水自流进入高密度沉淀池经高效混凝沉淀去除TP和SS。高密度沉淀池由3个技术模块组成,分别是集成式絮凝区、沉淀区及污泥浓缩区^[17],集合了混合、絮凝、沉淀和浓缩功能。本工艺段通过混凝、强化絮凝、斜管沉淀等措施增强了高密度沉淀池的絮凝和沉淀效果,使之具有水力负荷高、耐冲击负荷、沉淀效率高、出水水质较好、污泥易于浓缩和脱水等特点^[18]。

4.7 纤维转盘滤池

1座,新建设计规模 $20\ 000\text{ m}^3/\text{d}$,尺寸为 $9.2\text{ m}\times$

$6.1\text{ m}\times 4\text{ m}$,结构为钢筋砼半埋式。高密度沉淀池后设纤维转盘滤池,用于去除水中以悬浮状态存在的各种杂质,保障出水稳定达标。纤维转盘滤池为一种新型过滤设备,主要功能是利用滤片截留水中的悬浮杂质,进一步去除水中的SS^[19]。

4.8 污泥处理工艺

(1)污泥池。污水处理厂原有污泥池1座,有效容积约 220 m^3 ,尺寸为 $7\text{ m}\times 7\text{ m}\times 5\text{ m}$,结构为钢筋砼地埋式。据测算,本工程生化污泥产生量约 $226\text{ m}^3/\text{d}$,物化污泥产生量约 $270\text{ m}^3/\text{d}$,污泥池污泥停留时间 12 h ,以污泥含水率 99.5% 计,经重力浓缩后含水率约为 99% ,湿污泥量约 $113\text{ m}^3/\text{d}$,上清液量约 $113\text{ m}^3/\text{d}$,表明原有污泥池有效池容可满足改造后污泥处理需求,故本工程保留原有污泥池。

(2)污泥脱水间。污水处理厂原有污泥脱水间1座,平面尺寸 $24.0\text{ m}\times 15.0\text{ m}$,房高 6.5 m ,安装带式污泥脱水机2台,因脱水效果较差,泥饼含水率较高,不能满足要求,故进行优化改造。

新建污泥脱水间1座,尺寸为 $24.0\text{ m}\times 15.0\text{ m}\times 6.5\text{ m}$,门刚结构形式。本工程污泥脱水后泥饼含水率不超过 60% ,故脱水前需先对污泥进行调理,以确保脱水后泥饼含水率达标。

本工程工艺的主要设备见表1。

表1 主要设备及型号

Table 1 Main equipment and models

序号	设备名称	型号尺寸/技术参数	数量	备注
1	潜污泵	$Q=630\text{ m}^3/\text{h}$, $H=16\text{ m}$, $N=37\text{ kW}$ (1用1备)	2台	提升泵房
		$Q=417\text{ m}^3/\text{h}$, $H=5\text{ m}$, $N=11\text{ kW}$, 铸铁, 配自耦安装导轨 (1用1备)	2台	回流污泥池
2	内径流细格栅	栅前水深 1.2 m , 渠深 1.5 m , 渠宽 $1\ 500\text{ mm}$, $b\leq 3\text{ mm}$, $N=1.5\text{ kW}$, 格栅过栅水损小于 0.3 m	2台	细格栅, 附密封罩, 配套增压泵
3	链板式刮砂机	宽 800 mm , $N=0.37\text{ kW}$, 池长 15 m	2台	
4	排沙泵	$Q=15\text{ L/s}$, $H=7\text{ m}$, $N=8\text{ kW}$	4台	曝气沉砂池
5	罗茨鼓风机	$Q_s=3.40\text{ m}^3/\text{min}$, $P=24.5\text{ kPa}$, $N=3.0\text{ kW}$	3台	
6	框式搅拌机	$D=3\ 500\text{ mm}$, $H=7\ 500\text{ mm}$, $n=3.9\text{ r/min}$, $N=0.75\text{ kW}$, 液下 SUS304 衬胶	2台	反应池
		$D=3\ 500\text{ mm}$, $H=7\ 500\text{ mm}$, $n=2.5\text{ r/min}$, $N=0.37\text{ kW}$, 液下 SUS304 衬胶	2台	
7	植物系统	优选植物及配套 SUS304 安装装置	916套	BBR池
8	BBR组件	改性 PP 丝线组合填料, SUS316 安装框架	1 368组	
9	微孔曝气器	ABS 材质, $D=265\text{ mm}$, 通气量 $3\sim 5\text{ m}^3/\text{h}$	3 262套	
10	混合液回流泵	600QJB-W4型, $Q=1\ 300\text{ m}^3/\text{h}$, $H=0.8\text{ m}$, 液下 SUS304, 带起吊装置	8台	
11	污泥回流泵	$Q=42\text{ m}^3/\text{h}$, $H=0.3\text{ MPa}$, $N=7.5\text{ kW}$, 变频电机 (1用1备)	2台	高密度沉淀池
12	污泥外排泵	$Q=42\text{ m}^3/\text{h}$, $H=0.3\text{ MPa}$, $N=7.5\text{ kW}$ (1用1备)	2台	
13	纤维转盘过滤装置	滤盘直径 2 m , 12片, 配套不锈钢中心管装置及滤盘、驱动装置、反抽吸装置、排泥系统、阀门仪表等	2台	纤维转盘滤池
14	叠螺式污泥浓缩机	$Q>70\text{ m}^3/\text{h}$, $N=5\text{ kW}$, 配套螺旋轴、搅拌机, 可调速, 浓缩液含水率 $\leq 96\%$	2套	
15	污泥压滤机	滤板 $1\ 250\text{ mm}\times 1\ 250\text{ mm}$, 过滤面积 250 m^2 , 配套机架、板框滤板、液压站、程控系统、空压机、冷干机、储气罐、接液翻板及滤布等	2台	污泥脱水间
16	清洗水泵	柱塞泵, $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$, $H=600\text{ m}$, $N=30\text{ kW}$, 变频控制	1台	

5 处理效果及运行费用

5.1 处理效果

污水处理厂采用“水解酸化-BBR-高效沉淀”为主体的耦合工艺改建完成并投入正常运转后,长达1 a的持续运行监测结果显示,出水COD、BOD₅、NH₄⁺-N、TP分别可达17.1、5.7、1.3、0.2 mg/L,能稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中地表水Ⅳ类标准,而TN达9.2 mg/L,不满足地表水Ⅳ类标准中≤1.5 mg/L(湖泊、水库)的要求,这也跟刘平波等关于TN≤10 mg/L的研究结果类似^[20]。究其原因,很大程度上跟低碳源导致的反硝化脱氮效能不佳密切相关^[21-22],但TN和SS(6.4 mg/L)均优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A标准,可一定程度上降低出水对受纳水体的影响。

对本工程各主要处理单元的去除效能做汇总,结果见表2(取平均值,均整化处理)。

表2 各主要功能单元的水质处理效能

处理单元		指标						mg/L
		COD	BOD ₅	SS	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP	
细格栅及沉砂池	进水	350.0	180.0	250.0	45.0	35.0	5.0	
	出水	330.0	171.0	237.0	44.3	34.5	5.0	
BBR池	出水	21.5	7.1	82	9.6	1.37	2.1	
高密沉淀池	出水	19.3	6.4	22.8	9.4	1.35	0.2	
纤维转盘滤池	出水	17.1	5.7	6.4	9.2	1.3	0.2	
一级A标准	排放限值	50	10	10	15	5(8)	0.5	
Ⅳ类标准	排放限值	30	6	—	1.5 (湖、库)	1.5	0.3	
一级A标准	是否达标	是	是	是	是	是	是	
Ⅳ类标准	是否达标	是	是	—	否	是	是	

由表2可得,该工艺对COD、BOD₅、SS、TN、NH₄⁺-N、TP的总去除率分别为95.1%、96.8%、97.4%、79.6%、96.3%、96.0%。

5.2 技术经济分析

本污水处理系统(20 000 m³/d)运行过程中费用主要为电费、药剂费。其中,电费主要来源于泵、罗茨风机等设备的使用,每日实际使用功率约为5 882.35 kW·h,电费以0.68元/(kW·h)计,折合费用0.20元/m³;药剂费主要来自于PAC、PAM、氯化铁和石灰,用于污水处理和污泥处理,其投加质量浓度分别为20、0.59、3.82、9.56 mg/L,经过测算,药剂费约

为0.1元/m³。因此,该套处理工艺的处理费用为0.30元/m³。

6 结论

采用“水解酸化-BBR-高效沉淀”为主体的耦合工艺对南昌某污水处理厂进行提标改造。改扩建后其处理规模达到20 000 m³/d。经过调试及1 a的稳定运行发现,系统对COD、BOD₅、SS、TN、NH₄⁺-N、TP的最终去除率分别达95.1%、96.8%、97.4%、79.6%、96.3%、96.0%,且对应出水指标分别达17.1、5.7、6.4、9.2、1.3、0.2 mg/L。由此可见,经该工艺处理后,主要污染物指标能稳定满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中地表水Ⅳ类标准(TN除外),且TN、SS能稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A标准,从而进一步降低出水对受纳水体的影响。整套工艺运行电费、药剂费合计0.30元/m³。此外,由于BBR技术特殊的设计方式,既能增加污水处理厂景观,又可以有效解决城市污水处理厂新建和改扩建中新增土地的问题,因此,本工程可为国内同类污水处理厂的提标改造提供参考。

参考文献

- [1] 杨晨宵,盛铭军,黄继会,等. “准Ⅳ类”标准下城镇污水厂提标改造的难点与举措[J]. 工业水处理, 2020, 40(11): 15-21.
YANG Chenxiao, SHENG Mingjun, HUANG Jihui, et al. Difficulties and measures for upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plants under quasi-Ⅳ standard[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(11): 15-21.
- [2] 肖磊,罗衍,何金锋,等. A/O+MBR工艺对盐化城污水厂提标改造的中试研究[J]. 工业水处理, 2019, 39(11): 70-72.
XIAO Lei, LUO Kan, HE Jinfeng, et al. Pilot study on upgrading of salification city sewage treatment plant by A/O+MBR process[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(11): 70-72.
- [3] 王庆永. 农村污水处理现状及处理模式探讨[J]. 农技服务, 2009, 26(3): 141-142.
WANG Qingyong. Discussion on current situation and treatment mode of rural sewage treatment[J]. Agricultural Technology Service, 2009, 26(3): 141-142.
- [4] 吴昊,杨非,王海芹,等. 太湖流域4种农村生活污水处理工艺运行效果比较[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 309-313.
WU Hao, YANG Fei, WANG Haiqin, et al. Comparison of operation effects of four rural domestic sewage treatment processes in Taihu Lake Basin[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(13): 309-313.
- [5] 马岑鑫. 探究SBR工艺在城市污水处理厂的应用[J]. 环境与发展, 2017, 29(3): 113-114.
MA Cenxin. Explore the application of SBR process in municipal

- wastewater treatment plant [J]. Environment and Development, 2017, 29(3): 113-114.
- [6] LEI Zhen, YANG Shuming, LI Xiang, et al. Revisiting the effects of powdered activated carbon on membrane fouling mitigation in an anaerobic membrane bioreactor by evaluating long-term impacts on the surface layer [J]. Water Research, 2019, 167: 115137.
- [7] HUANG Jinhui, GU Yanling, ZENG Guangming, et al. Control of indigenous quorum quenching bacteria on membrane biofouling in a short-period MBR [J]. Bioresource Technology, 2019, 283: 261-269.
- [8] 邓钦祖, 赵远清, 周克钊, 等. 污水处理厂用地情况分析 & 节地探讨 [J]. 给水排水, 2018, 54(3): 16-19.
- DENG Qinzhu, ZHAO Yuanqing, ZHOU Kezhao, et al. Analysis on utilization and saving of wastewater treatment plant lands [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(3): 16-19.
- [9] 罗翔, 吴君伟. 城市污水处理厂规划模式探索 [J]. 城市规划, 2014, 38(9): 90-92.
- LUO Xiang, WU Junwei. Exploration on planning mode of urban sewage treatment plant [J]. City Planning Review, 2014, 38(9): 90-92.
- [10] 张显忠. FCR 工艺机理探讨及其技术应用展望 [J]. 中国市政工程, 2017(5): 36-39.
- ZHANG Xianzhong. FCR process mechanism discussion & its technology application prospect [J]. China Municipal Engineering, 2017(5): 36-39.
- [11] 杨欣, 谭周权. FCR 技术在工业园污水处理工程中的应用 [J]. 中国给水排水, 2017, 33(8): 82-85.
- YANG Xin, TAN Zhouquan. Industrial Park wastewater treatment with FCR technology [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 82-85.
- [12] 赖长邈, 李真臣, 杨平. FCR 技术在国内的研究进展和应用展望 [J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(12): 15-19.
- LAI Changmiao, LI Zhenchen, YANG Ping. Research progress and application prospect of FCR technology in China [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2018, 38(12): 15-19.
- [13] 余瑞彰, 张慧, 蒋俊, 等. 微生物在生物栅植物根系和填料生物膜上的数量分布差异 [J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2010(4): 58-66.
- YU Ruizhang, ZHANG Hui, JIANG Jun, et al. Differences of microbial amounts on plant roots and packing biofilms in the biological grid [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2010(4): 58-66.
- [14] 李旭东, 汪群慧, 李祎飞, 等. FCR 多级接触氧化系统处理乳品工业废水的研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(9): 2020-2024.
- LI Xudong, WANG Qunhui, LI Yifei, et al. Study on treatment of simulant dairy processing wastewater using FCR multilevel [J]. Environmental Science, 2007, 28(9): 2020-2024.
- [15] 王素兰, 段胜君, 邢传宏, 等. 改良氧化沟工艺处理城市污水除磷试验研究 [J]. 工业水处理, 2015, 35(2): 37-40.
- WANG Sulan, DUAN Shengjun, XING Chuanhong, et al. Experimental research on the modified oxidation ditch process for the removal of phosphorus from urban sewage [J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(2): 37-40.
- [16] 刘伟, 黄蕾, 杜伟伟. 造纸厂废水处理工艺方案研究 [J]. 产业与科技论坛, 2021, 20(15): 46-47.
- LIU Wei, HUANG Lei, DU Weiwei. Study on paper mill wastewater treatment technology scheme [J]. Industrial & Science Tribune, 2021, 20(15): 46-47.
- [17] 许嘉炯, 郑毓佩, 沈裘昌, 等. 新型中置式高密度沉淀池的开发与应用 [J]. 给水排水, 2007, 33(2): 19-24.
- XU Jiajiong, ZHEN Yupei, SHEN Qiuchang, et al. Development and application of a new type of middle high density sedimentation tank [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(2): 19-24.
- [18] 包木平, 冯振鹏, 赵芳, 等. 高密度沉淀池/BAF 工艺处理生活污水的应用 [J]. 水处理技术, 2021, 47(8): 137-140.
- BAO Muping, FENG Zhenpeng, ZHAO Fang, et al. Application of high-density sedimentation tank/BAF process for domestic sewage [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(8): 137-140.
- [19] 崔艳堂. 揭阳某污水处理厂提标改造设计实例 [J]. 低碳世界, 2021, 11(7): 136-137.
- CUI Yantang. Design example of a sewage treatment plant in Jieyang [J]. Low Carbon World, 2021, 11(7): 136-137.
- [20] 刘平波, 张俊, 王家乐, 等. BioDopp 工艺应用于污水厂提标改造工程实例探讨 [J]. 工业水处理, 2022, 42(1): 163-166.
- LIU Pingbo, ZHANG Jun, WANG Jiale, et al. Case analysis on the application of BioDopp technology in upgrading of sewage treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(1): 163-166.
- [21] 黄潇. 多级 AO-深床滤池工艺深度处理城市污水效能及微生物特征 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- HUANG Xiao. Multistage A/O combined with deep bed filter process treating municipal wastewater: Performance and microbial characteristics [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [22] 张森, 彭永臻, 张建华, 等. 进水 C/N 对 A²/O-BCO 工艺反硝化除磷特性的影响 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(5): 1366-1375.
- ZHANG Miao, PENG Yongzhen, ZHANG Jianhua, et al. Effect of influent C/N ratios on denitrifying phosphorus removal characteristics in the A²/O-BCO process [J]. China Environmental Science, 2016, 36(5): 1366-1375.

[作者简介] 赵旭雍(1982—), 工程师. E-mail: 156275829@qq.com。

通讯作者: 邓觅, 博士, 助理研究员. E-mail: dengmi@jxas.ac.cn。

[收稿日期] 2022-03-09(修改稿)