

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.015

多重叠组工艺用于污水厂原址准Ⅳ类提标扩容

付尧¹, 张丽婷¹, 苏大雄²

(1. 南京市市政设计研究院有限责任公司, 江苏 南京 210098; 2. 昆山建邦环境投资有限公司, 江苏 苏州 215300)

摘要: 苏州市某污水厂提标扩容工程设计规模为 $6.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 在不新征用地条件下进行提标扩容, 出水水质执行地表水Ⅳ类标准。扩容工程应用厌氧-缺氧/反应沉淀一体式环流生物反应器(A^2/RPIR)与转盘滤池组合叠合池、磁混凝与设备加药间叠合池、办公楼与消毒池叠合建筑的多重叠组合工艺; 提标工程采用多点进水工艺改造现有生化池。工程投入运行后, 出水水质稳定达标。本工程建设用地指标为 $0.237 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$, 为无用地条件的污水厂提标扩容提供了思路。

关键词: 多重叠组合工艺; 提标扩容; 准Ⅳ类标准; 反应沉淀一体式环流生物反应器(RPIR)

中图分类号: TU992 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2023)24-0087-06

Multi-overlapping Process for Upgrading and Expansion of Wastewater Treatment Plant to Surface Water Quasi IV Discharge Standard within the Existing Land

FU Yao¹, ZHANG Li-ting¹, SU Da-xiong²

(1. Nanjing Municipal Design and Research Institute Co. Ltd., Nanjing 210098, China;
2. Kunshan Jianbang Environmental Investment Co. Ltd., Suzhou 215300, China)

Abstract: The design scale of the upgrading and expansion project of a wastewater treatment plant in Suzhou is $62\,500 \text{ m}^3/\text{d}$. The project is carried out in the existing plant area without new land requisition, and the effluent quality is required to meet surface water quasi IV discharge standard. The multi-overlapping process including anaerobic-anoxic/rapid purification of sewage using sedimentation integrated rectangular airlift loop reactor (A^2/RPIR) overlapping rotary filter, magnetic coagulation sedimentation tank overlapping equipment room and dosing room, and office building overlapping disinfecting tank was applied in the upgrading and expansion project. The multi-point wastewater intake technology was employed to renovate the existing biochemical tank. After the project was put into operation, the effluent quality stably met the discharge standard. The index of land use of this project is $0.237 \text{ m}^2/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$, which provides a new idea for the upgrading and expansion of wastewater treatment plants without new land requisition.

Key words: multi-overlapping process; upgrading and expansion; quasi IV standard; rapid purification of sewage using sedimentation integrated rectangular airlift loop reactor(RPIR)

基金项目: 江苏省自然科学基金资助青年项目(BK20220453)

通信作者: 付尧 E-mail: 1563825156@qq.com

1 工程背景

苏州市某污水处理厂规划总规模为 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 现状处理规模为 $6.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 中一级 A 标准, 尾水达标后排放至吴淞江。

根据苏州市《关于高质量推进城乡生活污水治理三年行动计划的实施意见》的通知, 苏州市污水厂将“苏州特别排放限值标准”(地表水Ⅳ类) 作为出水执行标准, 全面推进污水厂提标工作; 同时, 随着工业园区的不断扩增和人口的不断增长, 污水厂进水量逐渐增加, 2018 年年中已超出设计值, 污水厂处于超负荷状态, 运行压力增大, 因此亟需对污水厂开展提标扩容工作。

2 污水厂概况

2.1 现状处理水质、水量

污水厂地处工业园区, 偶尔受工业废水冲击, 设计进水水质与现状实际进水水质在不同保证率下的指标、设计出水水质与实际出水水质见表 1, 2018 年—2019 年的实际进水量见图 1。

表 1 进、出水水质
Tab.1 Influent and effluent quality $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目		COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
进水	设计值	350	150	120	38.0	42.0	5.50
	85% 保证率	312	165	131	35.2	37.9	4.30
	90% 保证率	328	175	133	36.5	39.1	4.57
	95% 保证率	344	183	139	38.1	41.2	5.08
出水	设计值	≤50	≤10	≤10	≤4(6)	≤12(15)	≤6
	平均值	18.4	4.2	6.1	0.3	9.7	0.1
	95% 保证率	12	2.92	5	0.079	13.2	0.013

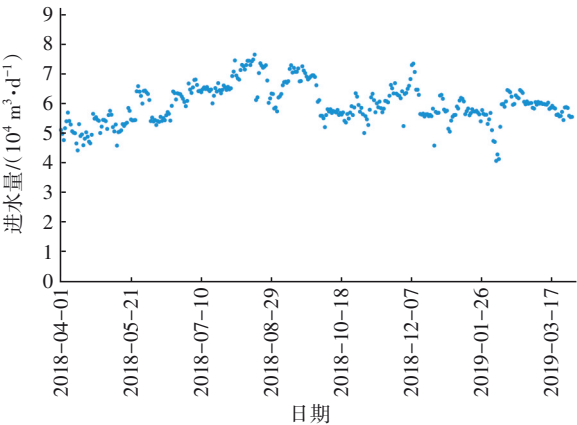


图 1 进水量日监测数据统计

Fig.1 Daily monitoring statistics of water inflow

2.2 现状处理工艺

污水厂现状一级处理采用粗格栅及进水提升

泵房、细格栅及曝气沉砂池; 二级处理采用改良 A²/O 生化池、二沉池; 三级处理采用高效沉淀池、V 型滤池, 尾水经紫外消毒满足排放标准后排入吴淞江。

根据本工程环境影响评价要求, 污水厂中水回用规模为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 采用超滤膜净化工艺满足水质要求后, 用于生态补水。

污泥采用浓缩池重力浓缩+离心脱水机脱水至污泥含水率为 75% 后, 外运焚烧处理。

臭气采用生物除臭滤池处理, 满足《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993) 及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 要求后, 进行高空排放。

2.3 现状处理情况

污水厂在进水量超负荷状态下, 出水水质能稳定达到一级 A 标准, 但是达不到“苏州特别排放限值标准”。设计进水水质中 COD、NH₃-N、TN、TP 的覆盖率可以满足实际进水水质的 95%, 而 BOD₅、SS 的覆盖率低于实际进水水质的 80%。污泥处理、臭气处理设施运行良好。

3 工程方案

3.1 设计水量、水质

根据规划及实际进水量增长趋势, 污水厂扩容工程设计规模为 $6.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 根据上述通知意见, 提标工程设计规模为 $6.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。设计进水水质在原设计的基础上, 根据实际情况对 BOD₅ 及 SS 进行调整, 其他指标沿用原设计进水水质; 出水中 COD、NH₃-N、TN、TP 执行“苏州特别排放限值标准”, 其余指标执行《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018), 即地表水Ⅳ类标准, 见表 2。

表 2 设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
设计进水	350	175	150	38	42	5.5
设计出水	30	10	10	1.5(3)	10	0.3
注: 括号外数值为水温>12℃时的控制指标, 括号内数值为水温≤12℃时的控制指标。						

3.2 设计重点、难点及措施

① 设计进水水质中 BOD₅ 的覆盖率低于实际进水水质的 90%, 因此要强化对 BOD₅ 的去除效果;

对比实际与设计出水水质,COD达标率为88%;本工程进水B/C=0.5,且无工业废水,可以采用以活性污泥法为主的生物除碳工艺。

② $\text{NH}_3\text{-N}$ 达标率为97.8%,TN达标率为45.6%。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果较好,TN去除效果较差,说明硝态氮和亚硝态氮含量高,需要提高反硝化效率;本工程C/N=8.33,可以采用生物强化脱氮工艺^[1]。

③ TP达标率为98.3%,不能稳定达标,除强化二级生物除磷外,还需辅助化学除磷工艺^[2]。

④ 本工程无新增用地,需在现状厂区内完成全部扩容、提标工程,故选择占地省的平面布置方案。

高翔等^[3]通过“反应沉淀一体式环流生物反应器(RPIR)+磁混凝”工艺成功在用地紧张条件下完成了污水厂的提标。本工程综合平面用地与污染物去除要求,确定了以生物脱氮除磷为主、化学除磷为辅,并加强SS去除的“强化 A^2/RPIR —磁混凝沉淀—转盘过滤”的主体工艺流程,见图2。

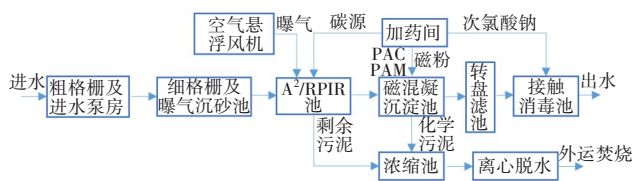


图2 提标扩容工程工艺流程

Fig.2 Process flow of upgrading and expansion project

针对扩容工程,拆除厂区西侧办公楼、食堂、仓库、机修间、危废间等办公、辅助设施,拆除现状设施后厂区可供扩容用地面积约为14 746.5 m²。从平面布置考虑,将可能进行组合的工艺池体进行模块化集合;从竖向布置考虑,充分利用竖向高度,将工艺的叠合变为可能。

统筹考虑现场可供建设的用地与平面形状,最终确定将厌氧池、缺氧池、RPIR池、转盘滤池进行组合,将磁混凝沉淀池与污泥泵房、加药间、设备间组合叠合,将接触消毒池与办公楼叠合的多重叠组合方案,提标扩容工程总平面布置见图3。扩容工程用地指标为0.236 m²/(m³·d⁻¹) [规范^[4]推荐指标为1.3~1.7 m²/(m³·d⁻¹)]。

吕利平等^[5]、李航等^[6]分别根据试验与工程实例确认,通过控制 A^2/O 工艺多点进水可以实现TN

与TP的高效去除。现状工程针对出水TP、TN去除效果差而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果好的特征,对原生生化池进行多点进水改造,在不增加生化单元停留时间的情况下提高污染物的去除率。

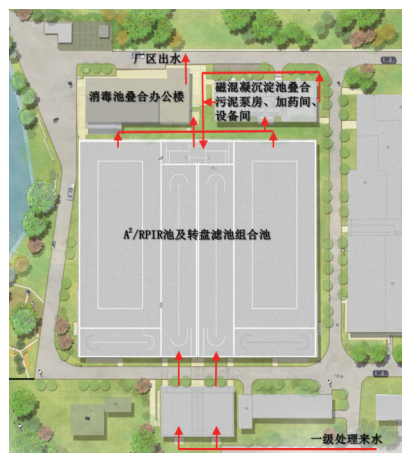


图3 提标扩容工程总平面布置

Fig.3 General layout of upgrading and expansion project

4 工程设计

4.1 A^2/RPIR 与转盘滤池组合叠合池设计

将 $6.25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 规模的厌氧池、缺氧池、RPIR池、转盘滤池按照“厌氧—缺氧—RPIR”的工艺流程进行模块化,设计成一个组合叠合池,其中RPIR工艺通过“反应沉淀一体式矩形环流反应器模块”在RPIR池下层进行好氧曝气,在上层进行沉淀,相当于将二沉池叠合到生化池上方,在满足工艺要求的同时省去了二沉池的占地面积^[3,7-8]。

组合叠合池设置1座,分2格并联运行,总平面尺寸为25.8 m×16.7 m+71 m×84.5 m。其中厌氧区、缺氧区、RPIR区、脱气区的有效水深分别为8.05、8、6.5、7.2 m。其平面布置见图4,主要设计参数见表3。

针对现状硝态氮和亚硝态氮含量高的情况,生化系统通过进水渠道多点进水至厌氧池、缺氧池,在充分利用原水碳源的同时保证了较高的反硝化效率^[5]并增加了缺氧区的停留时间。其中厌氧池安装4台立式水翼搅拌器;缺氧区及脱气区分别安装4、2台推流式搅拌器。生化混合液回流系统采用UCT工艺的多级回流,混合液通过池体两侧渠道采用穿墙泵回流至脱气区,由脱气区末端上侧渠道回流至缺氧区前端与进水充分混合;缺氧区混合液通过下侧箱涵及末端穿墙泵回流至厌氧池前端。这

种多级设计可以通过减少厌氧区的硝态氮,有效增加厌氧区聚磷菌的优势,进而提高厌氧池生物除磷效果^[9]。葛士建等^[10]由污水厂中试证实 UCT 工艺通过控制进水流量的合理分配与分级回流可以保证一定的同步硝化反硝化(SND)率并有效培养反硝化聚磷菌(DPAO),可以在保证 TN 去除率的同时大大降低出水 TP 浓度。组合叠合构筑物大量使用渠道配水与回流,厌氧池与组合池主体通过地下箱涵连接为一个整体,进水渠道与回流渠道分布于两侧箱涵,达到既节约用地又减少水损的目的。

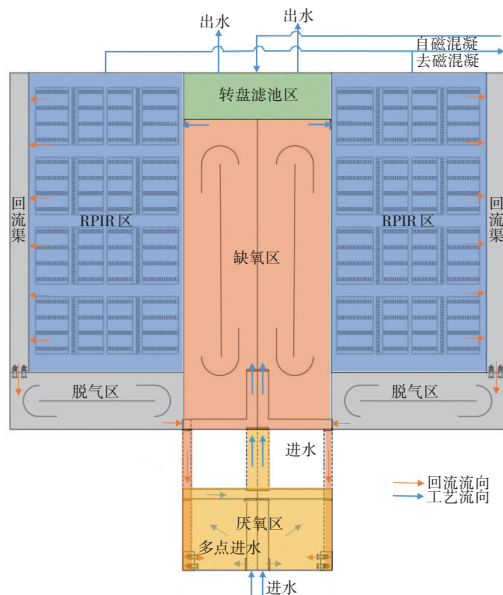


图 4 组合叠合生化池平面布置

Fig.4 Layout of combined biochemical tank

表 3 主要设计参数

Tab.3 Design parameters

设计指标	设计值	设计指标	设计值
厌氧区停留时间/h	1.1	污泥龄/d	15
缺氧区停留时间/h	4.4	污泥负荷/(kgBOD ₅ ·kg ⁻¹ MLSS·d ⁻¹)	0.1
RPIR 区停留时间/h	8.2	污泥浓度/(g·L ⁻¹)	5
脱气区停留时间/h	1.1	RPIR 区混合液回流比/%	250~500
总水力停留时间/h	14.8	缺氧区混合液回流比/%	150~300
RPIR 模块沉淀时间/h	0.7	气水比	5:1

合建的转盘滤池设置过滤盘片两套,单套为 14 片,单盘直径为 3 m,单盘有效过滤面积为 10 m²,转盘平均负荷为 9.3 m³/(m²·h)。

4.2 磁混凝与设备加药间叠合池设计

将 6.25×10⁴ m³/d 规模的磁混凝沉淀池、污泥泵

房、设备间、加药间通过下部两侧配置磁混凝沉淀池体,下部中间配置泵房,上部配置设备间及加药间的思路进行叠合组合,减少了 2/3 的占地面积。磁混凝沉淀池可以通过投加药剂增强对 COD 与 TP 的去除,在保证出水水质达标的同时降低絮凝沉淀工艺所需用地面积^[11]。

池体总平面尺寸为 36 m×14.75 m,设计为 1 座 2 格,混凝区、加载区、絮凝区分配停留时间分别为 1.35、1.35、2.21 min,每区安装 1 台搅拌器;斜管沉淀区负荷为 15.7 m³/(m²·h),污泥回流比为 3%~5%,磁粉、PAC、PAM 投加量分别为 5、30、1 mg/L;池体上部叠合了 PAM、PAC、磁粉、碳源的药剂储存与投加设备间,进行药剂的自动输送、配制与投加。

4.3 办公楼与消毒池叠合建筑设计

通过下部布置池体、上部布置办公建筑的思路,将接触消毒池与 3 层办公建筑组合成一体叠合建筑。将接触消毒池的顶板作为办公楼一楼的底板,在楼梯间布置法兰密封式检修人孔,通过管道轴流风机将接触消毒池内空气强制排放至办公楼顶部,保证了办公区域的环境友好。同时办公楼内通过降板及同层排水措施,避免了办公楼内部食堂、化验室、公共卫生间等的排水影响到下部的消毒池。此举既保证了消毒池的停留时间满足规范要求,又在用地范围内布置了办公设施。

4.4 配套设施设计

为满足扩容工程的配套设施要求,预处理增加 1 座规模为 6.25×10⁴ m³/d 的细格栅及曝气沉砂池,分 1 组 2 格,进水渠道过栅流速为 0.47 m/s,共设置 2 台内进流式网板格栅除污机;沉砂池最大水力停留时间为 7 min。现状鼓风机房新增 2 台 Q=5 800 m³/h, P=80 kPa, N=125 kW 的空气悬浮鼓风机;现状脱水机房新增 1 台 Q=80 m³/h 的离心脱水机及配套设备,厂区内污泥处理能力达到 200 m³/d;新增 1 座规模为 10 000 m³/h 的生物除臭设施。

4.5 现状提标工程设计

通过改造现状曝气沉砂池出水管线、新建曝气沉砂池后端出水设置可调节出水堰等措施,达到自由分配现状生化池与新建生化池水量的目的,提高厂区运行的安全性;针对本工程 TN 处理效果差、TP 出水标准提高的情况,增加多个进水点直接接入现状生化池缺氧区,对其进行多点进水改造,如图 5 所示。吕利平等^[5]经试验确认通过控制厌氧区和缺氧

区的进水流量分配比可以在减少碳源投加量的同时,实现TN的高效去除,并为好氧阶段的过量吸磷提供足够动力;侯亚辉等^[12]通过不同进水分配比试验确认了最佳进水配比范围,本工程根据理论进行现场调试,发现当缺氧区进水量占进水总量的30%~50%时,出水水质均可稳定达到设计标准。

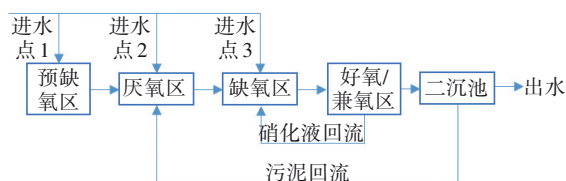


图5 现状生化池多点进水改造流程

Fig.5 Multi-point water inlet transformation process of current biochemical tank

5 实际运行效果及评价

本工程于2021年9月开始建设,于2022年6月正式投产,为验证运行效果,对经调试后一个月的水质进行分析,见表4。

表4 投产后的进、出水水质

Tab.4 Influent and effluent quality after production

mg·L⁻¹

指标	COD	BOD ₅	SS	NH ₃ -N	TN	TP
进水最大值	306	136	119	42.1	44.20	4.97
进水最小值	180	73.6	85	22.3	24.60	1.65
进水均值	238	102	102	35.9	38.30	3.53
出水最大值	24	2.8	8	0.870	9.66	0.16
出水最小值	10	2.1	5	0.125	5.40	0.05
出水均值	14	2.4	6	0.338	8.71	0.08

结果显示,出水各项污染物均能稳定达到设计出水水质标准。

6 结语与建议

① 苏州市某污水厂提标扩容工程通过将厌氧池、缺氧池、RPIR池、转盘滤池进行组合,将磁混凝沉淀池与污泥泵房、加药间、设备间组合叠合,将接触消毒池与办公楼叠合的多重叠组合方式,完成污水厂在不新增用地条件下的提标扩容,扩容占地指标为0.237 m²/(m³·d⁻¹);通过多点进水的方式改造生化池对现状工程进行提标。工程投产后,出水中COD、TN、NH₃-N、TP可稳定达到“苏州特别排放限值标准”,BOD₅、SS等指标可稳定达到《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018),即地表水准Ⅳ类标准。

② 本工程总投资为13 600万元,工程费用为11 530万元,根据成本增量分析,单位总成本为1.15元/m³,单位经营成本为0.72元/m³。

③ 在实际运行中,RPIR池存在沉淀模块内浮渣无法机械清除,仅能人工清渣的弊端;RPIR池的出水依靠真空虹吸出水,管道破损、虹吸管口水位降低等情况均会导致池体停产,存在运行风险。建议对RPIR模块增设清渣设备,进行机械清渣改造,并改进出水方式,提高池体运行安全性。

参考文献:

- [1] AKUNNA J C, BIZEAU C, MOLETTA R. Nitrate and nitrite reductions with anaerobic sludge using various carbon sources: glucose, glycerol, acetic acid, lactic acid and methanol[J]. Water Research, 1993, 27(8): 1303-1312.
- [2] 邱维,张智. 城市污水化学除磷的探讨[J]. 重庆环境科学, 2002, 24(2): 81-84.
QIU Wei, ZHANG Zhi. Disquisition on chemical phosphorus removal from municipal wastewater [J]. Chongqing Environmental Science, 2002, 24(2): 81-84(in Chinese).
- [3] 高翔,于水利. 某污水厂用地紧张情况下“RPIR+磁混凝澄清池”的应用[J]. 环境生态学, 2021, 3(9): 70-73, 78.
GAO Xiang, YU Shuli. Application of “RPIR+ magnetic coagulation clarifier” in a wastewater treatment plant under land shortage [J]. Environmental Ecology, 2021, 3(9): 70-73, 78(in Chinese).
- [4] 住房和城乡建设部. 城市排水工程规划规范: GB 50318—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 9.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction. Code for Urban Wastewater and Stormwater Engineering Planning: GB 50318—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 9(in Chinese).
- [5] 吕利平,李航,张欣,等. 多点进水对前置预缺氧A²/O工艺脱氮除磷的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(15): 8-13.
LÜ Liping, LI Hang, ZHANG Xin, et al. Effect of step-feed on nitrogen and phosphorus removal of pre-anoxic A²/O process [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(15): 8-13(in Chinese).
- [6] 李航,庞飞,张欣,等. 多点进水与多点化学除磷强化脱氮除磷工程实例[J]. 工业水处理, 2020, 40(12):

- 119-123.
- LI Hang, PANG Fei, ZHANG Xin, *et al.* Project case of multi-point influent and multi-point chemical dephosphorization for enhancing nitrogen and phosphorus removal [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(12): 119-123(in Chinese).
- [7] 吴明明,熊珍,徐海飞,等. A/RPIR+磁混凝工艺调试及能耗分析[J]. *净水技术*, 2021, 40(6): 158-162.
- WU Mingming, XIONG Zhen, XU Haifei, *et al.* Process commissioning and energy consumption analysis of A/RPIR+magnetic coagulation [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(6): 158-162(in Chinese).
- [8] 刘淑杰,陈福明,陈桂红,等. 反应沉淀一体式矩形环流生物反应器处理污水中试[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(23): 34-37.
- LIU Shujie, CHEN Fuming, CHEN Guihong, *et al.* Pilot-scale test on treatment of urban wastewater using reaction-precipitation integrative rectangular air-lift loop reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(23): 34-37(in Chinese).
- [9] 行智强,陈银广,杨海真. 影响强化生物除磷的关键因素研究进展[J]. *环境保护科学*, 2006, 32(1): 31-33.
- XING Zhiqiang, CHEN Yinguang, YANG Haizhen. Advances in the key fact or affecting enhanced biological phosphorus removal [J]. *Environmental Protection Science*, 2006, 32(1): 31-33(in Chinese).
- [10] 葛士建,彭永臻,曹旭,等. 改良UCT分段进水工艺处理生活污水性能优化研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(7): 2006-2012.
- GE Shijian, PENG Yongzhen, CAO Xu, *et al.* Optimization of a modified UCT step feed process treating municipal wastewater [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(7): 2006-2012 (in Chinese).
- [11] 王旭阳,刘天顺,陈伟楠. 磁混凝沉淀池在某污水处理厂升级改造中的应用[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(4): 73-75.
- WANG Xuyang, LIU Tianshun, CHEN Weinan. Application of magnetic coagulation sedimentation tank in upgrading of a wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(4): 73-75 (in Chinese).
- [12] 侯亚辉,高健磊,吕晶晶,等. 进水配比对前置缺氧A²/O工艺脱氮除磷处理的影响研究[J]. *河南科学*, 2011, 29(1): 93-94.
- HOU Yahui, GAO Jianlei, LÜ Jingjing, *et al.* Study the removal of nitrogen and phosphorus of the pre-anoxia A²/O on different ratio of influent distribution [J]. *Henan Science*, 2011, 29(1): 93-94(in Chinese).

作者简介:付尧(1991-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,工程师,主要从事市政工程与污水处理工艺研究设计工作。

E-mail: 1563825156@qq.com

收稿日期: 2022-12-05

修回日期: 2022-12-29

(编辑:沈靖怡)

借自然之力,护绿水青山