

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.20.016

污水厂地表水准Ⅲ类标准提标改造方案和工程设计

莫文婷¹, 杨涛², 郭军²

(1. 武昌首义学院 城市建设学院, 湖北 武汉 430064; 2. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023)

摘要: 武汉某污水处理厂现状出水水质执行一级A标准, 提标改造工程要求出水水质执行地表水准Ⅲ类标准($TN \leq 6$ mg/L)。根据现状处理效果分析, 提标改造工程的处理难点是TN、COD和TP的深度去除, 需增加对应的专用深度处理单元。根据污染物去除机理和中试研究结果, 深度脱氮单元采用反硝化深床滤池工艺, 深度降解COD单元采用三级臭氧催化氧化工艺, 深度除磷单元采用溶气气浮工艺。此外, 通过中试确定了溶气气浮工艺的絮凝剂投加量和回流比、臭氧催化氧化工艺的 O_3 消耗量与COD去除量的质量比以及催化剂填充高度。

关键词: 提标改造; 反硝化深床滤池; 三级臭氧催化氧化; 溶气气浮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)20-0090-06

Upgrading Scheme and Project Design of a WWTP for Quasi-level III Surface Water Criteria

MO Wen-ting¹, YANG Tao², GUO Jun²

(1. School of Urban Construction, Wuchang Shouyi University, Wuhan 430064, China; 2. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430023, China)

Abstract: The current effluent quality of a wastewater treatment plant (WWTP) in Wuhan implements with first level A discharge standard, which will be promoted to quasi-level III criteria of surface water ($TN \leq 6$ mg/L) in its upgrading and reconstruction project. Based on the analysis of current treatment effect, further removal of TN, COD and TP is regarded as the difficulty of the project and the correspondingly special advanced treatment process shall be supplemented. According to the results of the mechanism analysis for pollutants removal and the pilot study, denitrification deep-bed filter, three-step ozone catalytic oxidation and dissolved air flotation are selected for the further removal of TN, COD and TP, respectively. Besides, the flocculant dosage and reflux ratio of dissolved air flotation, the mass ratio of O_3 consumption to COD removal and loading height of catalyst bed in ozone catalytic oxidation are determined based on the results of pilot study.

Key words: upgrading and reconstruction; denitrification deep-bed filter; three-step ozone catalytic oxidation; dissolved air flotation

基金项目: 教育部给排水科学与工程专业的教指委教改项目(GPSJZW2020-10); 武昌首义学院一流本科课程建设项目(2021XE01); 武昌首义学院课程思政示范项目(2020SZ16)

1 工程概况

武汉某污水处理厂现状处理规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主要处理流程:改良氧化沟(有独立的厌氧、缺氧、好氧分区)+二沉池+高效沉淀池+微过滤器,采用紫外消毒工艺,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。提标改造后出水水质达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的准Ⅲ类标准,即:在一级A标准的基础上,COD、 BOD_5 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP达到地表水Ⅲ类标准,TN达到 6 mg/L 。提标改造工程设计规模为 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,设计进、出水水质见表1,达标尾水作为河湖补水和城市杂用水水源。

表1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	设计进水	实际进水水质置信区间($\alpha=0.1$)	原设计出水	本次设计出水
BOD_5	160	(45.9, 67.6)	≤ 10	≤ 4
COD	320	(118.7, 161.9)	≤ 50	≤ 20
SS	220	(156.3, 220.7)	≤ 10	≤ 10
$\text{NH}_3\text{-N}$	30	(5.2, 16.3)	$\leq 5(8)$	≤ 1
TN	40	(8.2, 21.5)	≤ 15	≤ 6
TP	3	(0.5, 1.9)	≤ 0.5	≤ 0.2

注: 除特殊说明外,文中置信区间的置信水平均为0.1。

2 总体思路分析

根据张鹤清等^[1]的研究,出水水质达到地表水准Ⅳ类标准(TN除外)时,提标改造的核心问题是TN和COD的深度去除。鉴于本次提标改造对出水水质的要求更高,需对TN、COD和TP的深度去除进行认真分析、充分论证。

2.1 TN现状去除效果

TN和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的现状去除效果见图1。TN的去除主要通过生物脱氮,其核心机理是好氧硝化和缺氧反硝化。由图1可知,该厂出水TN均值为 7.6 mg/L ,置信区间为 $(4.3, 11.0) \text{ mg/L}$;出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 均值为 0.4 mg/L ,置信区间为 $(0, 1.4) \text{ mg/L}$ ——理论计算值为 $(-0.7, 1.4) \text{ mg/L}$ 。可见, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除较为充分,而TN在此情况下仍然无法稳定降至 6 mg/L ,表明现状改良氧化沟的硝化过程较为充分而反硝化过程不彻底。TN的去除与硝化液的回流量密切相关,根据设计标准和工程实践,常规 A_2O 生物反应池的混合液回流比不宜超过400%,常规AAO生物反应池的混合液回流比一般取200%~300%^[2]。

因此,现状改良氧化沟的生物脱氮能力存在极限,无法确保出水TN稳定达到本次设计出水水质要求。

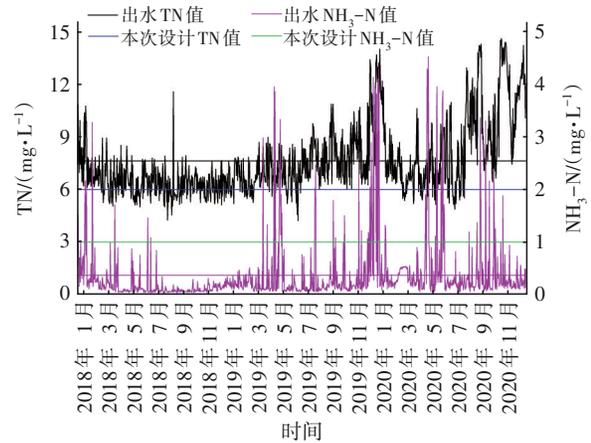


图1 TN和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 现状去除效果

Fig.1 Current treatment effect of TN and $\text{NH}_3\text{-N}$

2.2 COD现状去除效果

污水中的COD一般可分为易降解组分、难降解组分和不可降解组分三类,可降解部分主要通过微生物的新陈代谢去除,难降解和不可降解部分主要通过排泥去除^[3]。但是,随着前端生物处理过程的进行,水中易降解有机物占比逐渐减小、难降解有机物占比逐渐增大,尾水中的难降解有机物无法继续通过原有处理设施有效去除^[4-5]。现状出水COD均值为 20.4 mg/L ,置信区间为 $(10.4, 30.3) \text{ mg/L}$;出水 BOD_5 均值为 4.6 mg/L ,置信区间为 $(2.8, 6.4) \text{ mg/L}$ 。可见,现状改良氧化沟的碳化作用较为充分,这也反映出现状出水中残留的COD可生化性较差,因此单纯地削减水中 BOD_5 对降低出水COD帮助有限。

2.3 TP现状去除效果

TP现状去除效果见图2。由图2可知,出水TP均值约为 0.4 mg/L ,置信区间为 $(0.3, 0.5) \text{ mg/L}$,表明现状设施除磷效果良好,但仍达不到本次设计要求。TP的去除分为生物除磷和化学除磷两种。生物除磷过程和生物脱氮降碳过程相互影响,且彼此对环境要求不同,因此生物除磷过程深挖潜力不大、化学除磷过程需要加强。根据现场试验,增大现状高效沉淀池絮凝剂投加量难以将出水TP降至 0.2 mg/L ,且会导致出水pH快速降低。

另外,由表1可知该厂现状进水水质尚未达到设计值,其处理效果仍需满足设计工况需求。因

此,本次提标改造需增加 TN、COD 和 TP 深度去除单元。

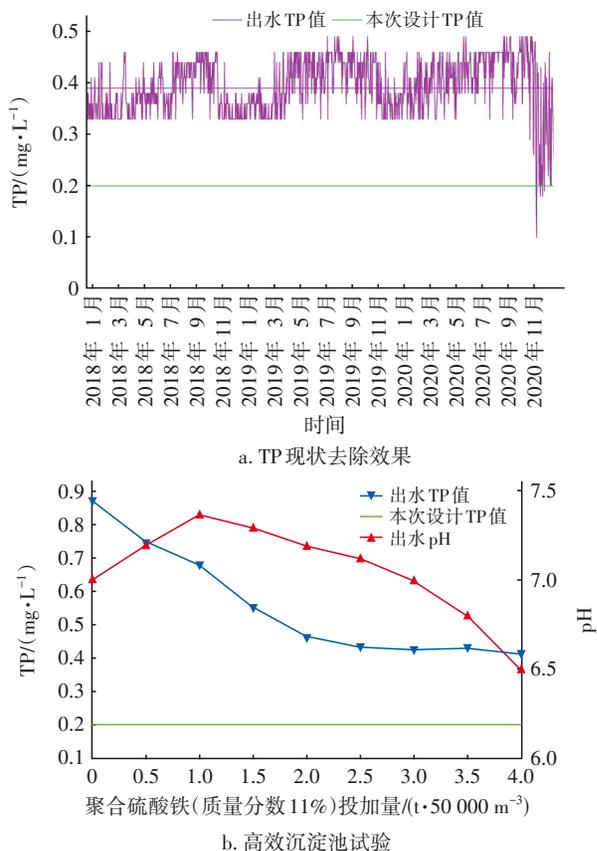


图2 TP 现状去除效果和高效沉淀池试验

Fig.2 Current treatment effect of TP and test in DensaDeg

3 深度处理方案

3.1 案例分析

根据我国污水处理工程实践^[6-12](见表2),深度脱氮单元多采用反硝化深床滤池工艺,深度降解 COD 单元多采用臭氧氧化工艺^[6-7]。另外,根据武汉市排水公司在某污水处理厂开展的溶气气浮工艺中试,聚合硫酸铝铁投加量为 10 mg/L、分流比为 12% 时,出水 TP 大部分低于 0.1 mg/L,该工艺可用于深度除磷^[8]。因此,本工程深度处理工段组成确定为反硝化深床滤池、溶气气浮和臭氧氧化工艺。反硝化深床滤池的基本构造与普遍快滤池相似,但其填料兼作表面过滤介质和微生物的挂膜介质^[9]。溶气气浮工艺先通过过饱和溶气水的快速泄压在水中形成微气泡,然后微气泡与目标去除物形成夹气絮体并浮升至水面形成浮渣层,最终通过浮渣层的撇除从水中分离目标去除物,主要影响因素为絮凝剂投加量和回流比^[8]。臭氧氧化可分为直接氧化

和高级氧化两种,二者氧化能力不同、氧化范畴不同,主要影响因素为氧化方式、O₃消耗量与 COD 去除量的质量比和接触时间^[7]。为更好地指导设计,对溶气气浮和臭氧氧化工艺进行了中试研究,以验证其适用性、确定工艺形式和相关设计参数。

表2 国内部分高标准污水处理工程案例

Tab.2 Cases of some high-standard WWTPs

工程名称	规模/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	出水标准	深度处理工艺
北京良乡污水处理厂	4	北京地标 (DB 11/890—2012) A 标	高密度沉淀池+超滤膜+臭氧池
北京密云新城再生水厂	6.5	北京地标 (DB 11/890—2012) A 标	MBR 膜池+臭氧催化氧化池
北京门头沟第二再生水厂	8	北京地标 (DB 11/890—2012) A 标	MBR 膜池+臭氧催化氧化池
北京吴家村河污水处理厂	8	地表水准Ⅳ类, TN≤15 mg/L	脱氮滤池+滤布滤池+臭氧氧化
长沙敢胜垸污水处理厂	10	地表水准Ⅳ类, TN≤10 mg/L	活性炭吸附池+反硝化深床滤池
青岛李村河污水处理厂	11	地表水准Ⅳ类, TN≤10 mg/L	Bardenpho-MBBR 复合工艺
昆明第十四污水处理厂	20	地表水准Ⅲ类, TN≤5(8) mg/L	反硝化生物滤池+气浮池+砂滤池+活性炭滤池
合肥清溪污水处理厂	20	地表水准Ⅳ类, TN≤5 mg/L	反硝化深床滤池
合肥市王小郢污水厂	30	地表水准Ⅳ类, TN≤5 mg/L	反硝化生物滤池+臭氧接触池+活性砂滤池
天津东郊污水处理厂	50	天津地标 (DB 12/599—2015) A 标	纤维滤池+反硝化深床滤池+臭氧氧化池
郑州马头岗污水处理厂	60	地表水准Ⅲ类, TN≤15 mg/L	活性焦吸附池+V 型滤池
天津津沽污水处理厂	60	天津地标 (DB 12/599—2015) A 标	高效沉淀池+反硝化深床滤池+臭氧氧化池

3.2 溶气气浮中试

溶气气浮工艺中试装置见图 3,处理规模为 150 m³/d,进水接自现状二沉池。絮凝剂采用厂区现有聚合硫酸铁(PFS),质量分数为 11%。

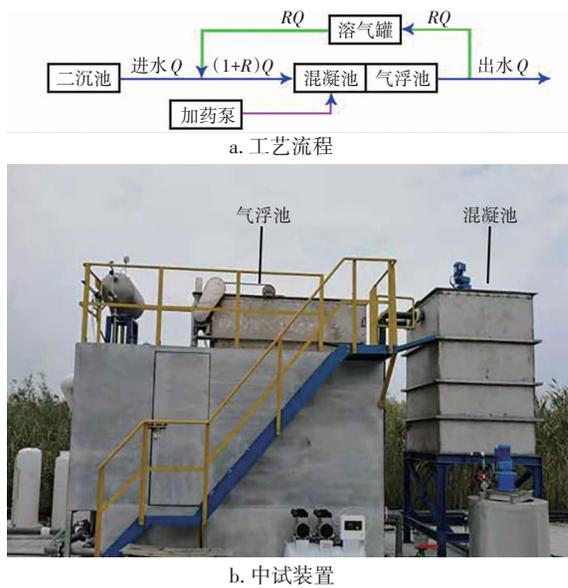


图3 溶气气浮工艺中试装置

Fig.3 Pilot-scale test device of dissolved air flotation

溶气气浮工艺中试结果见表3。由表3可知, 试验期TP去除率为80%~90%, 出水TP<0.2 mg/L, 满足本次设计出水水质要求。因此, 该工艺可用于本工程深度除磷。根据设计标准, 当铁盐用于深度除磷时, 其投加量和污水中总磷的物质的量之比可适当增加^[2]。根据中试结果, 本工程铁盐和总磷的物质的量之比取10, 设计工况下PFS的投加量取50 mg/L。

表3 溶气气浮中试结果

Tab.3 Pilot-scale test results of dissolved air flotation

时间/d	回流比/%	加药量/(mL·L ⁻¹)	出水TP/(mg·L ⁻¹)	去除率/%	物质的量之比(Fe/P)	
调 试 期	1	32.0	0.10	1.22	13.48	6.26
	2	28.4	0.10	0.41	71.92	6.05
	3	30.6	0.15	0.41	55.43	14.40
	4	26.5	0.05	1.12	31.29	2.71
	5	28.4	0.20	0.31	78.17	12.44
试 验 期	6	33.0	0.20	0.04	95.84	18.37
	7	30.1	0.10	0.07	94.29	7.20
	8	28.6	0.08	0.18	86.62	5.25
	9	29.0	0.08	0.12	89.75	6.03
	10	28.6	0.07	0.06	91.75	8.50
	11	30.0	0.07	0.05	92.04	9.84
	12	28.9	0.06	0.15	82.79	6.08
	13	30.0	0.06	0.17	77.88	6.89
	14	29.0	0.10	0.08	91.22	9.69

3.3 臭氧氧化工艺中试

臭氧氧化工艺中试装置见图4, 处理规模为140 L/h, 进水接自现状巴氏计量槽。

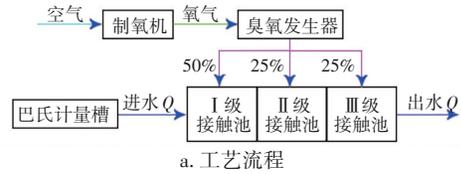


图4 臭氧氧化工艺中试装置

Fig.4 Pilot-scale test device of ozone oxidation

臭氧氧化工艺中试结果见表4。

表4 臭氧氧化工艺中试结果

Tab.4 Pilot-scale test results of ozone oxidation

时间/d	臭氧投加量/(mg·L ⁻¹)	催化剂装填高度/m	O ₃ 消耗量与COD去除量的质量比	出水COD/(mg·L ⁻¹)	去除率/%
1	20.73	2.6	4.17	6.40	43.70
2	20.79	2.6	3.68	5.35	51.36
3	8.51	2.6	1.40	6.60	48.03
4	7.48	1.9	1.23	4.00	60.30
5	7.24	1.3	1.27	4.08	58.31
6	7.52	1.3	1.91	4.73	45.48
7	7.00	1.3	1.29	8.81	38.03
8	7.00	1.3	1.16	8.05	42.91
9	7.11	1.0	1.95	4.40	45.34
10	7.53	1.0	1.56	5.13	48.49
11	6.61	1.0	2.72	8.10	23.10
12	7.43	0	1.86	8.80	31.25
13	7.71	0	3.87	8.45	19.06

中试进水COD低于一级A标准, 由表4可知, 出水COD满足本次设计出水水质要求; 直接氧化的O₃消耗量与COD去除量的质量比偏大, COD去除率偏低。鉴于中试进水COD基本处于现状出水值置信

区间的下限,未能覆盖其实际变化范围,为适应实际生产中的处理负荷、稳定COD的处理效果,本工程深度降解COD单元采用三级催化氧化池,臭氧分配比为2:1:1。由现状处理效果分析可知,现状出水COD基本不超过30.3 mg/L,因此COD的常态去除率为34%。当 O_3 消耗量与COD去除量的质量比取1.3、催化剂装填高度取1.3 m时,COD去除率为38%,能够满足常态工况需求,但需考虑极端情况下的应对措施。

4 提标改造流程和主要工艺设计

4.1 工艺流程

为了充分利用厂区现状处理设施和水力条件,深度处理工段进水接自现状高效沉淀池。为减少溶解氧对反硝化碳源的消耗,反硝化深床滤池位于深度处理工段起端。鉴于臭氧可同时对外出水进行消毒,臭氧催化氧化池位于深度处理工段末端并处于次氯酸钠消毒池之前,当臭氧催化氧化池运行时次氯酸钠消毒池不加药。

工艺流程见图5。

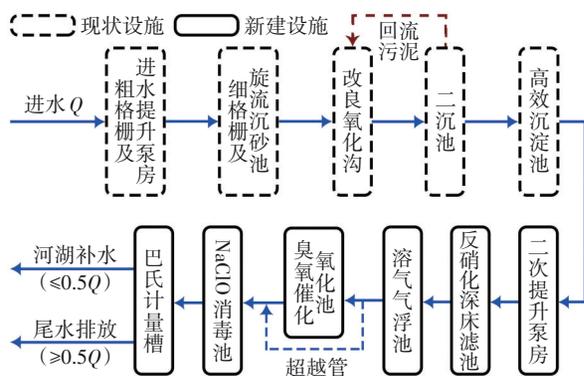


图5 提标改造工艺流程

Fig.5 Flow chart of upgrading and reconstruction process

4.2 反硝化深床滤池

反硝化深床滤池共1座6组,并联运行,另设进水提升泵房、反冲洗风机房、废水池及清水池等,并与滤池合建。滤池石英砂滤料层厚度为1.83 m,硝态氮容积负荷为 $0.72 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$;平均滤速为6.14 m/h,强制滤速为7.36 m/h。气水反冲洗步骤:气洗2 min→气-水联合冲洗10 min→水洗5 min,运行时序可根据实际需求调整。反冲洗水洗强度为 $15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,气洗强度为 $90 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,周期为1~2 d。

4.3 溶气气浮池

溶气气浮池共1座6组,并联运行,另设混合

池、絮凝池、浮渣池及设备间,并与气浮池合建。混合池水力停留时间为2 min,絮凝池水力停留时间为10 min,浮渣池水力停留时间为3.6 h。气浮池水力停留时间为30 min,接触区上升流速为26.7 mm/s,分离区下降流速为1.93 mm/s,回流比为30%。

4.4 臭氧催化氧化池

臭氧催化氧化池1座4组,并联运行,并与新建次氯酸钠消毒池、巴氏计量槽合建。臭氧催化氧化池总水力停留时间为75 min,平均水深为7.6 m;铝硅基催化剂($\phi 3\sim 5 \text{ mm}$)填料床的厚度为1.3 m;气体反冲洗强度为 $15 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,单级冲洗时间为5 min;臭氧额定投加量为36 mg/L。臭氧制备系统额定制备能力为120 kg/h(质量分数为10%),采用4台臭氧发生器,实际运行台数和制备浓度可根据需求适当调整。

5 结语

武汉某污水处理厂提标改造工程要求出水水质达到地表水准Ⅲ类标准($\text{TN} \leq 6 \text{ mg/L}$),处理难点是TN、COD和TP的深度去除。通过充分的现状处理效果分析、处理理论分析和中试研究,深度处理工段工艺流程确定为:反硝化深床滤池+溶气气浮池+臭氧催化氧化池。该工程总投资为21 885.62万元,其中工程费用为17 010.19万元(含厂外河湖补水管道工程),经营成本为0.59元/ m^3 ,污水处理总成本为1.00元/ m^3 。目前,该工程正处于施工阶段,建成后将进一步改善周边水环境质量、促进再生水回用。

参考文献:

- [1] 张鹤清,朱帅,吴振军,等. 城镇污水处理厂“准Ⅳ类”标准提标改造技术简析[J]. 环境工程,2019, 37(6): 26-30, 36.
ZHANG Heqing, ZHU Shuai, WU Zhenjun, et al. Analysis of “quasi-category IV” standard upgrading and reconstruction technology for municipal wastewater treatment plants[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(6): 26-30, 36(in Chinese).
- [2] 住房和城乡建设部. 室外排水设计标准:GB 50014—2021[S]. 北京:中国计划出版社,2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Standard for Design of Outdoor Wastewater Engineering: GB 50014-2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021(in Chinese).

- [3] 王晓昌,金鹏康,赵红梅,等.城市生活污水中的污染物分类及处理性评价[J].给水排水,2004,30(9):38-41.
WANG Xiaochang, JIN Pengkang, ZHAO Hongmei, *et al.* Classification of contaminants and treatability evaluation of domestic wastewater [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2004, 30 (9) : 38-41 (in Chinese).
- [4] 杨枫,王圣瑞,郭伟,等.滇池入湖污水处理厂尾水COD降解过程及光谱特征[J].环境工程技术学报,2017,7(5):558-564.
YANG Feng, WANG Shengrui, GUO Wei, *et al.* Spectroscopic analysis and degradation kinetics study of COD in sewage plant effluent into Dianchi Lake [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2017, 7(5) : 558-564(in Chinese).
- [5] 王旭东,刘佩,王磊,等.城市污水二级出水中溶解性有机物特性分析[J].环境工程学报,2014,8(6):2186-2190.
WANG Xudong, LIU Pei, WANG Lei, *et al.* Analysis characteristics of dissolved organic matters in the secondary effluent of municipal wastewater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8 (6) : 2186-2190(in Chinese).
- [6] 刘亦凡,陈涛,李军.中国城镇污水处理厂提标改造工艺及运行案例[J].中国给水排水,2016,32(16):36-41.
LIU Yifan, CHEN Tao, LI Jun. Process analysis of upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plants in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(16) : 36-41(in Chinese).
- [7] 曾木海.污水处理厂污水深度处理工艺综述与案例分析[J].净水技术,2021,40(5):75-80,102.
ZENG Muhai. Overview and case analysis on advanced treatment process in wastewater treatment plant [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40 (5) : 75-80, 102(in Chinese).
- [8] 杨墨,田中凯,邓涛,等.接续A²O的气浮过滤污水深度处理工艺研究[J].中国农村水利水电,2018(6):88-91,96.
YANG Mo, TIAN Zhongkai, DENG Tao, *et al.* Study of dissolved air flotation-filtration on A²O process for advanced wastewater treatment [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(6): 88-91, 96(in Chinese).
- [9] 徐一兰,沈晓佳,陈雪祥,等.深床滤池多模式运行用于城镇污水处理厂提标改造[J].中国给水排水,2018,34(16):85-87,92.
XU Yilan, SHEN Xiaojia, CHEN Xuexiang, *et al.* Application of deep-bed filter with multi-mode operation in wastewater treatment plant upgrading reconstruction [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(16) : 85-87, 92(in Chinese).
- [10] 杨宇星,吴迪,宋美芹,等.新型MBBR用于类地表Ⅳ类水排放标准升级改造[J].中国给水排水,2017,33(14):93-98.
YANG Yuxing, WU Di, SONG Meiqin, *et al.* Application of new MBBR in WWTP upgrading to meet class IV surface water standard [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(14) : 93-98(in Chinese).
- [11] 李伟,卢东昱,陈永玲,等.北京市某污水厂基于准地表Ⅲ类水体出水标准的工程实践[J].中国给水排水,2017,33(2):56-60.
LI Wei, LU Dongyu, CHEN Yongling, *et al.* Engineering practice of a WWTP in Beijing City based on quasi-class III criteria of surface water [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33 (2) : 56-60 (in Chinese).
- [12] 何翔.深度处理技术用于北京某污水处理厂升级改造[J].中国给水排水,2018,34(8):80-84.
HE Xiang. Application of advanced treatment technology in the upgrading project of an existing wastewater treatment plant in Beijing [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(8) : 80-84(in Chinese).

作者简介:莫文婷(1980-),女,广西桂林人,硕士,副教授,主要从事水处理及雨洪管理理论研究与实践工作。

E-mail:wentingmo_hust@126.com

收稿日期:2022-04-20

修回日期:2022-05-05

(编辑:衣春敏)