

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.15.002

多点进水对前置预缺氧 A^2/O 工艺脱氮除磷的影响

吕利平^{1,2}, 李航^{2,3}, 张欣³, 周洋³

(1. 长江师范学院 化学化工学院, 重庆 408100; 2. 西南石油大学 化学化工学院, 四川成都 610500; 3. 重庆市三峡水务渝北排水有限责任公司, 重庆 401120)

摘要: 某城市污水处理厂采用前置预缺氧 A^2/O 工艺, 为了考察多点进水对该工艺脱氮除磷的影响, 设置预缺氧池、厌氧池、缺氧池进水流量分配比分别为 8:1:1、7:1:2、6:1:3、5:1:4、6:2:2、6:3:1。结果表明, 进水流量分配比对处理过程中的硝态氮浓度以及出水总氮、总磷浓度具有显著影响, 而对出水氨氮浓度影响较小; 优化进水流量分配比能实现预缺氧池与缺氧池两个脱氮单元碳源的合理配置, 实现总氮的高效去除, 同时, 能减弱高浓度硝态氮对厌氧释磷产生的抑制作用, 为后续好氧阶段的过量吸磷提供强大动力。相比之下, 较优的预缺氧池、厌氧池、缺氧池进水流量分配比为 6:2:2, 该工况下出水氨氮平均浓度为 0.26 mg/L, 总氮浓度为 4.88~6.69 mg/L, 总磷浓度在 0.15 mg/L 以下, 出水水质显著优于国家一级 A 排放标准。与原工况相比, 优化进水流量分配比后, 全年可节省 200 余万元的碳源投加费用, 且出水水质能实现更加稳定的控制, 有效促进了水质与成本的双赢。

关键词: A^2/O 工艺; 前置预缺氧; 多点进水; 流量分配比; 脱氮除磷; 碳源

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)15-0008-06

Effect of Step-feed on Nitrogen and Phosphorus Removal of Pre-anoxic A^2/O Process

LÜ Li-ping^{1,2}, LI Hang^{2,3}, ZHANG Xin³, ZHOU Yang³

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Chongqing Three Gorges Water Yubei Drainage Co. Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: Effect of step-feed on nitrogen and phosphorus removal in the pre-anoxic A^2/O process of an urban wastewater treatment plant was investigated. Influent flow distribution ratio of pre-anoxic tank, anaerobic tank and anoxic tank was set to be 8:1:1, 7:1:2, 6:1:3, 5:1:4, 6:2:2 and 6:3:1, respectively. The influent flow distribution ratio had significant effects on nitrate nitrogen in the treatment process and total nitrogen and total phosphorus in the effluent. However, it had little effect on ammonia nitrogen in the effluent. Optimization of the influent flow distribution ratio could achieve a rational allocation of carbon sources in the two denitrification units of pre-anoxic and anoxic

基金项目: 重庆市教委科学技术研究计划青年项目(KJQN201901429); 长江师范学院大学生创新创业训练计划项目(2017ccx156)

通信作者: 李航 E-mail: lihang0213@163.com

tanks, and achieve efficient removal of total nitrogen. Meanwhile, it could also weaken the inhibition of high nitrate nitrogen on anaerobic phosphorus release, and significantly promote the subsequent excessive phosphorus absorption in the aerobic stage. Among the six different conditions, the optimal influent flow distribution ratio of pre-anoxic tank, anaerobic tank and anoxic tank was 6 : 2 : 2. Under this operating condition, the average ammonia nitrogen in the effluent was 0.26 mg/L, the total nitrogen was between 4.88 mg/L and 6.69 mg/L, and the total phosphorus was lower than 0.15 mg/L. The effluent quality was significantly better than the national first level A standard. Compared with the original operating condition, after optimizing the influent flow distribution ratio, the annual carbon source cost of more than 2 million yuan could be saved, and the effluent quality was more stable, which effectively promoted the win-win situation in water quality and operating cost.

Key words: A^2/O process; pre-anoxic process; step-feed; flow distribution ratio; nitrogen and phosphorus removal; carbon source

随着国家对生态环境要求的不断提高,污水处理的目的已从单纯的满足现状排放要求进入到排放标准的不断升级,其中,氮、磷等营养元素的去除是影响标准升级的一大障碍。传统的 A^2/O 工艺由于能较好地兼顾脱氮除磷而得到广泛应用^[1],但该工艺存在聚磷菌与反硝化菌对碳源的需求竞争等固有缺陷^[2-3],使得高效脱氮除磷一直是一个技术难点,因此也备受研究人员和工程技术人员的广泛关注。针对脱氮除磷争夺碳源的问题,普遍的做法是通过外加碳源实现氮、磷的同步去除^[4-6],但高昂的碳源投加费用在一定程度上增加了企业的污水处理成本,导致该方法在实际生产中只能作为应急手段间歇使用,此举严重影响了出水水质的长期稳定性。

多点进水是将原水分点进入预缺氧池、厌氧池、缺氧池,各池体分别利用原水中的碳源进行反硝化脱氮与厌氧释磷,从而达到充分依靠进水碳源实现氮、磷稳定去除的目的。但在实际生产中,如何合理分配预缺氧池、厌氧池、缺氧池的进水流量,以实现进水碳源在各个区域的优化配置,保证反硝化脱氮与厌氧释磷均能充分进行,成为了一大技术难题。鉴于此,笔者在采用前置预缺氧 A^2/O 工艺的某污水处理厂中,探讨了预缺氧池、厌氧池、缺氧池多点进水流量分配比对脱氮除磷的影响,以期为该工艺在实际生产运行中的优化控制提供参考。

1 材料与方法

1.1 工程概况

重庆市某污水处理厂二期扩建工程设计规模为 $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,采用前置预缺氧 A^2/O +滤布滤池工艺,工程占地约 1.83 hm^2 ,总投资约1.34亿元,于

2015年4月建成投运,主要收集处理服务片区内的生活污水,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,具体工艺流程如图1所示。

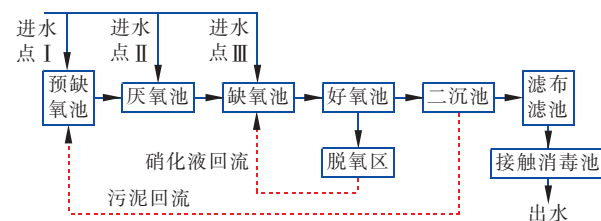


图1 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of treatment process

1.2 试验背景

为切实改善长江重庆段水环境质量,重庆市政府要求区域内城镇污水处理厂排放标准全部提升至一级A标准,但大多数污水处理厂经改扩建后,部分指标仍在高位运行,尤其是氮、磷指标。该污水处理厂自建成投运以来,出水总氮常年在 $12.0 \sim 14.0 \text{ mg/L}$ 徘徊,已接近一级A标准浓度限值,存在严重的超标风险,极大地削弱了提标改造的现实意义。

1.3 试验方法

根据工艺需要,控制外回流比为 $50\% \sim 60\%$ 、内回流比为 $200\% \sim 260\%$ 、污泥浓度为 $4\,000 \sim 5\,000 \text{ mg/L}$,调整预缺氧池、厌氧池、缺氧池的进水流量分配比分别为:8 : 1 : 1(工况I)、7 : 1 : 2(工况II)、6 : 1 : 3(工况III)、5 : 1 : 4(工况IV)、6 : 2 : 2(工况V)、6 : 3 : 1(工况VI),探讨连续流多点进水流量分配比对前置预缺氧 A^2/O 工艺脱氮除磷效果的影响。

试验期间,进水 TN 为 29.3 ~ 38.8 mg/L、氨氮为 14.9 ~ 24.7 mg/L、TP 为 3.16 ~ 4.46 mg/L、C/N 值为 2.81 ~ 5.32。不同进水流量分配比工况下的运行参数如表 1 所示。

表 1 不同工况的运行参数

Tab. 1 Operating parameters under different conditions

项目	HRT/h			污泥龄/d	好氧池 DO/ (mg · L ⁻¹)			水温/ ℃
	预缺氧池	厌氧池	缺氧池		前端	中端	末端	
工况 I	0.71	2.22	5.23	17	<0.5	1.0 ~ 1.2	1.5 ~ 2.0	19.5
工况 II	0.81	2.50	5.21	16	<0.5	1.0 ~ 1.2	1.5 ~ 2.0	19.0
工况 III	0.94	2.86	5.21	16	<0.5	0.8 ~ 1.2	1.5 ~ 2.0	18.2
工况 IV	1.13	3.33	5.22	15	<0.5	0.8 ~ 1.0	1.5 ~ 2.0	17.7
工况 V	0.96	2.55	5.23	15	<0.5	1.0 ~ 1.2	1.5 ~ 2.0	17.6
工况 VI	0.93	2.19	5.22	16	<0.5	1.0 ~ 1.2	1.5 ~ 2.0	17.0

1.4 分析项目与方法

TN:碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;TP:过硫酸钾消解-钼青分光光度法;NH₃-N:比色法(Amtax Compact II);NO₃⁻-N:离子选择电极法(CAS40D)。

2 结果与讨论

2.1 氮素的去除效果

2.1.1 总氮的去除效果

试验期间,不同进水流量分配比工况下,前置预缺氧 A²/O 工艺对总氮的去除情况如图 2 所示。

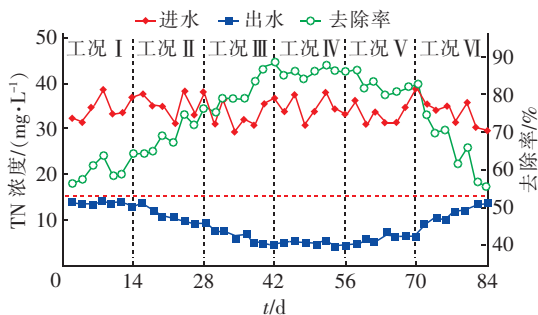


图 2 进水流量分配比对总氮去除效果的影响

Fig. 2 Effect of influent flow distribution ratio on removal of TN

从图 2 可以看出,六种工况下出水总氮平均浓度分别为 13.6、10.7、6.07、4.80、5.92、11.4 mg/L。

从工况 I 至工况 IV,出水总氮浓度呈现明显下降趋势,在工况 IV 条件下,变化幅度趋于平缓,出水总氮浓度维持在 4.80 mg/L 左右,总氮平均去除率达到最大值即 86.0%;随后在工况 V 和工况 VI 条件下出水总氮浓度出现急剧反弹,与此同时,总氮去除率也呈现急剧下降趋势。

分析原因,主要有两个方面,一方面,好氧阶段为反硝化系统提供了大量的硝化液,再经过脱氧区后,使得进入缺氧池的硝化液溶解氧浓度较低,这为反硝化脱氮创造了良好的环境;另一方面,由于预缺氧池与缺氧池分别对二沉池回流液和好氧池末端硝化液进行反硝化脱氮,从工况 I 至工况 IV,预缺氧池进水流量分配比逐渐减小,缺氧池进水流量分配比逐渐增大,逐步实现了两个脱氮单元进水碳源的合理优化配置,反硝化脱氮得以充分进行,从而使得出水总氮浓度下降趋势明显。而在工况 V 和工况 VI,随着预缺氧池与缺氧池总体进水流量分配比减小,反硝化所需碳源减少,脱氮效率呈下降趋势,导致出水总氮浓度反弹明显。这一解释从图 3 的硝态氮浓度变化以及图 4 的总氮浓度沿程变化可以看出。

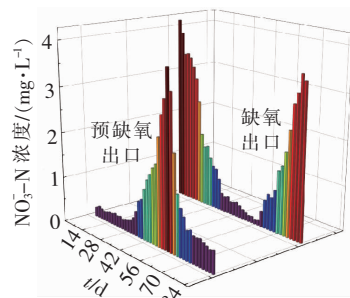


图 3 硝态氮浓度的变化

Fig. 3 Variation of NO₃⁻-N concentration

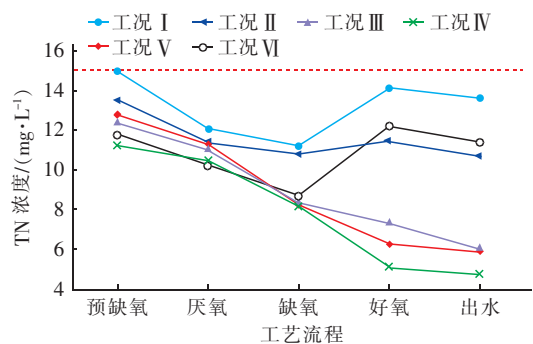


图 4 总氮浓度的沿程变化

Fig. 4 Variation of TN concentration along the process

从工况 I 至工况 IV,预缺氧池出口处硝态氮浓

度先呈现缓慢上升趋势,到工况Ⅳ后,由于该池进水流量分配比过小,使得碳源不足,反硝化所需电子供体及动力不够,导致该池硝态氮浓度呈现急剧上升趋势,脱氮效率降低,但由于回流液的稀释作用,使得预缺氧池总氮浓度仍呈现轻微下降趋势;在工况Ⅴ和工况Ⅵ,随着预缺氧池进水流量分配比的增大,反硝化所需电子供体及动力充分,使得出口硝态氮浓度又呈现缓慢下降趋势。与此同时,从工况Ⅰ至工况Ⅳ,由于缺氧池进水流量分配比逐渐增大,其出口处硝态氮浓度因碳源充足、反硝化效率较高而呈现出显著下降趋势,总氮浓度下降明显,在工况Ⅲ后期,因反硝化效率逐渐趋于饱和,使得硝态氮浓度下降趋势减缓;在工况Ⅴ和工况Ⅵ,随着缺氧池进水流量分配比的减小,使得碳源不足,反硝化效率减弱,导致硝态氮浓度呈现明显上升趋势,总氮浓度也出现了轻微上升。在工况Ⅰ、工况Ⅱ、工况Ⅵ条件下,由于缺氧池进水流量分配比过小,使得主要的脱氮单元碳源不足,导致整体脱氮效率较低,出水总氮浓度较高,而在工况Ⅲ至工况Ⅴ,将进水碳源在预缺氧池与缺氧池间进行了合理分配后,整体脱氮效率得到了提高,出水总氮浓度下降明显。可以看出,进水流量分配比对过程硝态氮浓度和出水总氮浓度具有显著影响。

2.1.2 氨氮的去除效果

试验期间,不同进水流量分配比工况下,前置预缺氧A²/O工艺对氨氮的去除情况如图5所示。

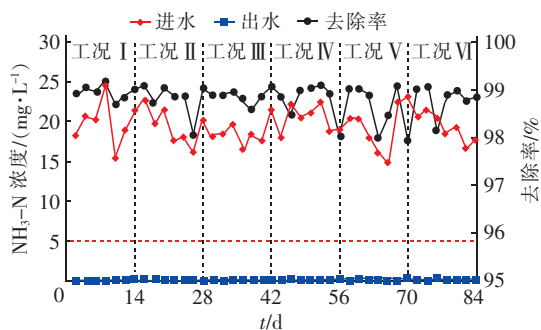


图5 进水流量分配比对氨氮去除效果的影响

Fig. 5 Effect of influent flow distribution ratio on removal rate of $\text{NH}_3 - \text{N}$

从图5可以看出,在6种试验工况条件下,出水氨氮浓度基本稳定,总体维持在0.47 mg/L以下,说明进水流量分配比对出水氨氮浓度影响较小。究其原因,主要是因为进水流量分配比作用的主要场所是预缺氧和缺氧反硝化单元以及厌氧释磷单元,对

氨氮转化的主要场所好氧单元几乎无影响。这一解释从图6的氨氮浓度沿程变化可以看出,从预缺氧池到缺氧池,各工况下氨氮浓度总体下降趋势较缓,经过好氧池后,氨氮浓度均呈现出急剧下降趋势。试验期间,出水氨氮平均浓度为0.23 mg/L,平均去除率为98.8%。

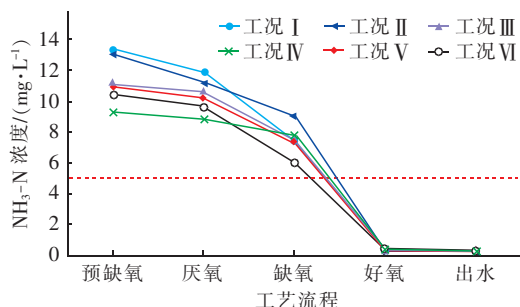


图6 氨氮浓度的沿程变化

Fig. 6 Variation of $\text{NH}_3 - \text{N}$ concentration along the process

2.2 总磷的去除效果

试验期间,不同进水流量分配比工况下,前置预缺氧A²/O工艺对总磷的去除情况如图7所示。可以看出,从工况Ⅰ至工况Ⅲ,出水总磷浓度随着预缺氧池进水流量分配比的减小呈现缓慢上升趋势,从0.10 mg/L上升至0.19 mg/L,在工况Ⅳ,预缺氧池进水流量分配比相比工况Ⅰ减小37.5%的情况下,出水总磷浓度最高升至0.33 mg/L,相比工况Ⅰ升幅达到了230%,并接近国家一级A标准浓度限值的2/3,指标可控性较差,而在工况Ⅴ和工况Ⅵ,随着预缺氧池和厌氧池进水流量分配比的逐渐增大,出水总磷浓度降至0.08 mg/L左右,下降趋势明显。

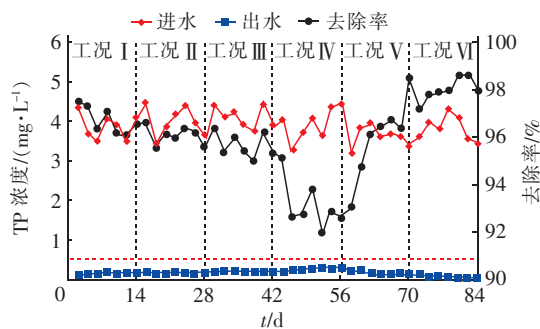


图7 进水流量分配比对总磷去除效果的影响

Fig. 7 Effect of influent flow distribution ratio on removal of TP

究其原因,从图3的硝态氮浓度变化和图8的总磷浓度沿程变化可以发现,从工况Ⅰ至工况Ⅳ,随着预缺氧池进水流量分配比逐渐减小,预缺氧池反

硝化所需碳源不足,使得进入厌氧池的硝态氮逐渐增多,而高浓度硝态氮会对厌氧池聚磷菌的厌氧释磷产生抑制作用^[7],导致厌氧池总磷浓度较低,从而严重影响后续好氧阶段的过量吸磷,此举造成了出水总磷浓度升高。而在工况Ⅴ和工况Ⅵ,一方面,随着预缺氧池进水流量分配比的增大,进入厌氧池的硝态氮减少,这种抑制作用逐渐减小,使得此工况下厌氧释磷较为充分,厌氧池内的总磷浓度较高,这为后续好氧阶段的过量吸磷创造了良好的前置条件;另一方面,随着厌氧池进水流量分配比逐渐增大,大量有机物被降解转化成聚羟基脂肪酸酯(PHA),这为后续好氧阶段的过量吸磷提供了强大动力^[8],以上两方面原因使得出水总磷浓度呈现显著下降趋势。

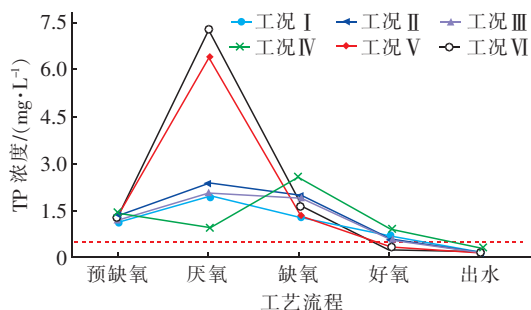


图8 总磷浓度的沿程变化

Fig. 8 Variation of TP concentration along the process

2.3 碳源的使用情况

碳源是维持微生物正常生长繁殖的重要因素,对微生物去污功能的发挥具有重要影响。我国城市污水的 C/N 值普遍偏低,碳源不足,对反硝化和厌氧释磷均会产生抑制作用,导致氮、磷的去除率偏低^[9-11]。一般理论认为,当 C/N 值介于 5~7 时,即可确保系统反硝化与厌氧释磷所需碳源,不必再靠外加碳源来脱氮除磷。但本工程中进水 C/N 值常年介于 2.5~3.5,属于典型的低 C/N 值污水,需要额外投加碳源来实现氮、磷的深度去除。

试验期间碳源的使用情况如图 9 所示。可以看出,在工况 I 条件下,碳源投加量为 1 200 kg/d,此时出水总氮仅能勉强控制在国家一级 A 标准范围内,一旦遭受水质、水量冲击,就有出水水质超标风险。随着预缺氧池和缺氧池两个脱氮单元进水流量分配比的调整,实现碳源的优化配置后,出水总氮浓度呈现急剧下降趋势,而碳源投加量也呈现逐步下降趋势。在工况 III 条件下,碳源投加量已降至 200

kg/d,经过一段适应期后,该工况下出水总氮浓度能稳定控制在 7 mg/L 以内。为了进一步降低碳源投加量,达到仅依靠进水碳源实现稳定脱氮的目的,继续对预缺氧池和缺氧池两个脱氮单元的进水流量分配比进行优化。工况 IV 条件下,在未投加碳源的情况下,出水总氮浓度降至 4.80 mg/L 左右,但由于该进水流量分配比对出水总磷造成了实质性影响,为了同时兼顾脱氮除磷,将预缺氧池、厌氧池、缺氧池进水流量分配比优化为 6:2:2(工况 V),该工况下出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度为 0.26 mg/L、TN 浓度为 4.88~6.69 mg/L、TP 浓度在 0.15 mg/L 以下,出水水质显著优于一级 A 排放标准,按照目前葡萄糖市场价格 4 427 元/t 计算,与工况 I 相比,优化进水流量分配比后,全年可节约 200 余万元的碳源投加费用,且对出水水质能实现更加稳定的控制,有效促进了水质与成本的双赢。

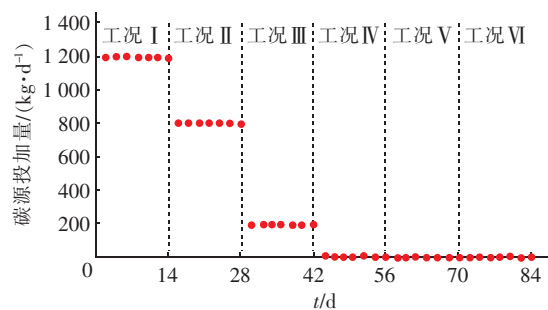


图9 碳源的使用情况

Fig. 9 Usage of carbon source

3 结论

① 进水流量分配比对过程硝态氮浓度和出水总氮、总磷浓度具有显著影响,而对出水氨氮浓度影响较小。

② 进水流量分配比的优化能实现预缺氧池与缺氧池两个脱氮单元碳源的合理配置,从而实现总氮的高效去除。

③ 进水流量分配比的合理优化能减弱高浓度硝态氮对厌氧释磷产生的抑制作用,促使厌氧池内有机物的大量转化,为后续好氧阶段的过量吸磷提供强大动力。

④ 基于本试验设置的 6 种工况,较优的预缺氧池、厌氧池、缺氧池进水流量分配比为 6:2:2,该工况下出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度为 0.26 mg/L、TN 浓度为 4.88~6.69 mg/L、TP 浓度在 0.15 mg/L 以下,出水水质显著优于一级 A 排放标准。与原工况

I相比,进水流量分配比经优化后,全年可节约200余万元的碳源投加费用,且对出水水质能实现更加稳定的控制,有效促进了水质与成本的双赢。

参考文献:

- [1] LIU Y, CHENG X, LUN X X, *et al.* CH_4 emission and conversion from A^2/O and SBR processes in full-scale wastewater treatment plants [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(1): 224 – 230.
- [2] ZHANG W, PENG Y, REN N, *et al.* Improvement of nutrient removal by optimizing the volume ratio of anoxic to aerobic zone in AAO – BAF system [J]. *Chemosphere*, 2013, 93(11): 2859 – 2863.
- [3] ZHAO W H, HUANG Y, WANG M X, *et al.* Post-endogenous denitrification and phosphorus removal in an alternating anaerobic/oxic/anoxic (AOA) system treating low carbon/nitrogen (C/N) domestic wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 339: 450 – 458.
- [4] 郭小春. 污水脱氮工艺外部碳源投加量计算方法探讨[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(13): 97 – 100.
GUO Xiaochun. Discussion on calculation method of external carbon source dosage in sewage denitrification process[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(13): 97 – 100 (in Chinese).
- [5] KAMPAS P, PARSONS S A, PEARCE P, *et al.* An internal carbon source for improving biological nutrient removal [J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(1): 149 – 154.
- [6] 魏楠, 赵思东, 孙雁, 等. 污水处理厂强化脱氮过程中碳源投加策略研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(1): 71 – 75.
WEI Nan, ZHAO Sidong, SUN Yan, *et al.* Strategies for dosing carbon source for enhanced nitrogen removal in wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(1): 71 – 75 (in Chinese).
- [7] KAPAGIANNIDIS A G, ZAFIRIADIS I, AIVASIDIS A. Upgrading the efficiency of an external nitrification BNR system – the modified Dephanox process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 175: 124 – 135.
- [8] 徐宇峰, 王让, 唐锋兵, 等. 分配比对分段进水 A^2/O 工艺脱氮除磷的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(4): 761 – 768.
XU Yufeng, WANG Rang, TANG Fengbing, *et al.* Affection of distribution ratio of influent on nitrogen and phosphorus removal of step feed – A^2/O process [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(4): 761 – 768 (in Chinese).
- [9] TIAN W D, LI W G, ZHANG H, *et al.* Limited filamentous bulking in order to enhance integrated nutrient removal and effluent quality [J]. *Water Research*, 2011, 45(16): 4877 – 4884.
- [10] TIAN W D, LOPEZ-VAZQUEZ C M, LI W G, *et al.* Occurrence of PAOI in a low temperature EBPR system [J]. *Chemosphere*, 2013, 92(10): 1314 – 1320.
- [11] 李思敏, 杜国帅, 唐锋兵. 改良 A^2/O 工艺对低碳源污水的脱氮除磷性能分析[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(12): 25 – 29.
LI Simin, DU Guoshuai, TANG Fengbing. Analysis of nitrogen and phosphorus removal from low-carbon municipal sewage by modified A^2/O process [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(12): 25 – 29 (in Chinese).

作者简介: 吕利平(1987 –), 女, 四川简阳人, 博士, 讲师, 主要从事水处理理论与技术研究。

E-mail: lvliping@yznu.edu.cn

收稿日期: 2020 – 11 – 20

修回日期: 2021 – 01 – 21

(编辑: 刘贵春)