



DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.03.001

论述与研究

南方污水处理厂污泥厌氧发酵制取碳源及投加策略

罗 锋^{1,2}, 彭进湖², 张忠祥², 邱林清², 彭敬衡², 梁伟广²

(1. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 东莞市水务集团有限公司, 广东 东莞 523000)

摘 要: 为应对污水厂出水总氮标准日益提升的要求,提高生化池的反硝化能力,减少对外加碳源的依赖,考察了利用南方某污水处理厂的剩余污泥厌氧发酵制取碳源的效能、影响因素和回用投加比例,分析了剩余污泥厌氧发酵制取碳源的可行性、污泥减量效果和经济效益。当控制初始MLSS约为15 000 mg/L时,厌氧发酵的ORP基本在-400 mV左右,有利于碳源的制取;可采用按比例更换新污泥的方式进行厌氧发酵,换泥比例为每天50%左右,折合SRT约为48 h;以2.5%厌氧发酵污泥结合75 mg/L复合碳源投加到缺氧系统中,可增强脱氮能力,且发酵污泥的总氮、总磷和重金属离子基本不会对生化系统造成不良影响。以折合SRT计算,厌氧发酵的污泥削减率约为7%;以 10^4 m³/d的污水处理厂为例,采用厌氧发酵技术每年可节省运营成本约410.6万元。

关键词: 剩余污泥; 厌氧发酵; 碳源; 生物脱氮; 污泥减量

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)03-0001-06

Preparation of Carbon Source by Anaerobic Fermentation of Sludge in Wastewater Treatment Plant in Southern China and Its Dosing Strategy

LUO Feng^{1,2}, PENG Jin-hu², ZHANG Zhong-xiang², QIU Lin-qing²,

PENG Jing-heng², LIANG Wei-guang²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Dongguan Water Group Co. Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: In order to meet the increasing demand of the total nitrogen standard of effluent from wastewater treatment plant (WWTP), enhance the denitrification capacity of biochemical tank and reduce the dependence on the external carbon source, the influencing factors of carbon source preparation by anaerobic fermentation of excess sludge from a WWTP in Southern China and the ratio of reuse were investigated. The feasibility, sludge reduction and economic benefit were analyzed. When the initial MLSS was controlled at about 15 000 mg/L, the ORP was about -400 mV during anaerobic fermentation, which was beneficial to the preparation of carbon source. Anaerobic fermentation was carried out by replacing new sludge in proportion, and the replacement ratio was about 50% per day, in which sludge retention time was about 48 hours. 2.5% anaerobic fermentation sludge combined with 75 mg/L composite carbon source was added to the anoxic system to enhance the nitrogen removal capacity, and the total

nitrogen, total phosphorus and heavy metal ions of sludge would not cause adverse effects on the biochemical system. Based on SRT, the sludge reduction rate of anaerobic fermentation was about 7%. Taking a WWTP with capacity of $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ as an example, the adoption of anaerobic fermentation technology could save operating cost about 4.106 million yuan each year.

Key words: excess sludge; anaerobic fermentation; carbon source; biological nitrogen removal; sludge reduction

随着国家对污水处理厂出水总氮标准的日益提高,生物反硝化工艺的原有设计难以满足要求,需通过人工投加外碳源来增强反硝化能力。但投加外碳源一方面增加了污水处理厂药剂费用,同时还会提高剩余污泥量,增加了污泥处置费用,给污水处理厂运营带来较大的经济负担。污水处理厂的剩余污泥不仅仅是废弃物,同时也是良好的碳源,近年来将污水处理厂污泥通过厌氧发酵制取碳源逐渐受到国内外学者的关注。

徐安安^[1]通过研究发现,温度和pH值越高,氧化还原电位(ORP)在 $-200 \sim -300 \text{ mV}$,发酵时间越长,有机负荷率越高,污泥粒径越小,越有利于厌氧发酵制取挥发性脂肪酸(VFAs)。刘智晓等^[2]通过对王家山污水处理厂采用污泥厌氧发酵技术进行升级改造后发现,无外加碳源情况下的出水指标得到显著改善。丹麦Dragør污水处理厂^[3]将二期设计的DE型氧化沟的厌氧池改造为侧流活性污泥水解池后,系统对氮、磷的去除效果得到提高。在南方特别是珠三角区域,普遍认为剩余污泥有机质含量较北方地区低^[4],因此较少得到关注,而对污水处理厂污泥厌氧发酵技术的研究较少。

利用剩余污泥厌氧发酵制取碳源,一方面可将产生的碳源回用,既解决了反硝化碳源不足的难题,又能进一步提高脱氮效率。另一方面,可减少剩余污泥产量,降低其处理难度和处理费用,实现资源化和无害化的双重效益。笔者通过考察南方某污水处理厂的剩余污泥厌氧发酵释放碳源的影响因素和回用投加比例,分析了剩余污泥厌氧发酵制取碳源的可行性、污泥减量化效果和经济效益,旨在为南方污水处理厂的升级改造提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验反应器由搅拌系统、罐体、鼓风机、ORP仪组成。试验污泥为南方某污水厂的剩余污泥,该污

水厂采用AAO工艺,主要处理城镇生活污水,出水水质执行一级A标准,C/N日均值为3.87,外加碳源为市售复合碳源,COD当量约为 $24 \times 10^4 \text{ mg/L}$,目前污水厂的日均碳源投加量为 150 mg/L 。试验期间剩余污泥的初始MLVSS/MLSS值在0.5~0.6之间。

1.2 试验方案

1.2.1 污泥厌氧发酵试验

① 分别将MLSS约为9 000、15 000 mg/L的剩余污泥加入到反应器中进行厌氧发酵,反应前后取泥水混合样并检测VFAs和溶解性化学需氧量(SCOD),并以此表征碳源的制取效果。

② 将剩余污泥加入到反应器中,分别控制ORP在 $-150 \sim -250 \text{ mV}$ 和 $-350 \sim -500 \text{ mV}$,每12 h取泥水混合样并检测VFAs和SCOD。

③ 将剩余污泥厌氧发酵72 h后,分别每24 h更换50%和33%的新剩余污泥,在每次更换前取泥水混合样并检测VFAs和SCOD。

1.2.2 反硝化模拟试验

将污水处理厂缺氧池的泥水混合物加入到六联搅拌机的烧杯中,加入一定量硝酸盐氮使混合液浓度达到约 30 mg/L 后,分别加入2.5%发酵污泥、5%发酵污泥、 150 mg/L 复合碳源和2.5%发酵污泥+ 75 mg/L 复合碳源,搅拌2 h。搅拌前后取样并检测硝酸盐氮、总氮、总磷,以及消解检测镉、铅、汞、铬、砷等重金属。

1.2.3 污泥减量化试验

分别将不同剩余污泥加入到反应器中,并控制ORP分别在 $-150 \sim -250 \text{ mV}$ 和 $-350 \sim -500 \text{ mV}$ 进行厌氧发酵,每24 h取泥水混合样并检测MLSS含量。

2 结果与分析

2.1 初始污泥浓度对厌氧发酵的影响

初始污泥浓度对污泥厌氧发酵效果的影响见表1。当初始污泥浓度较高时,SCOD和VFAs的产量也较高。这可能与污泥中所含基质的浓度有

关^[5],高浓度基质有利于水解菌的培养与水解作用。同时,污泥浓度较高时 ORP 值较低,更有利于厌氧环境的形成和产酸菌的培养。因此,高初始污泥浓度更有利于污泥厌氧发酵制取碳源。

表 1 不同初始 MLSS 下 SCOD 和 VFAs 产量变化
Tab.1 Changes of SCOD and VFAs under different initial MLSS

初始 MLSS/ (mg·L ⁻¹)	ORP/mV	SCOD 增量/ (mg·L ⁻¹)	VFAs 增量/ (mg·L ⁻¹)
8 801	-200	69	19
8 434	-185	39	24
16 389	-468	297	118
16 571	-464	348	125

2.2 ORP 对污泥厌氧发酵的影响

作为污泥厌氧发酵的生态因子,ORP 对污泥发酵的影响见表 2。可见,ORP 达到 -400 mV 以下时,制取碳源的效果较好。ORP 主要影响菌群中专性厌氧菌和兼性厌氧菌的比例^[6],ORP 的控制一般通过搅拌或曝气等方式引入溶解氧来进行调节,虽然一般认为产酸菌的最适 ORP 范围为 -200~-300 mV^[7],但产酸菌属于严格的厌氧菌,该操作将会严重破坏其生长环境,导致其产量大幅度降低,甚至降低其原有含量。

表 2 不同 ORP 下 SCOD 和 VFAs 产量变化
Tab.2 Changes of SCOD and VFAs under different ORP

初始 MLSS/ (mg·L ⁻¹)	ORP/mV	SCOD 增量/ (mg·L ⁻¹)	VFAs 增量/ (mg·L ⁻¹)
8 801	-200	69	19
8 434	-185	39	24
16 389	-468	297	118
16 375	-250	-2	-10
16 571	-464	348	125

初始 MLSS 约为 15 000 mg/L 的剩余污泥在厌氧发酵过程中 ORP 与 SCOD 含量的变化如图 1 所示。在厌氧发酵的过程中,ORP 持续下降,在 -400 mV 之后降幅开始趋于稳定,其间不需要通过其他手段进行调节,在此过程中 SCOD 含量逐步增加,这与 Chiu 等^[8]得到的结论相同。因此,建议控制初始 MLSS 在 15 000 mg/L 左右,此时厌氧发酵的 ORP 基本在 -400 mV 左右,有利于碳源的制取。同时,当 ORP 在 -350 mV 以下时,产甲烷菌也会开始不断生长^[9],降低碳源产量,因此,当试验过程中开始出现甲烷

生成的现象时,可通过间歇曝气或缩短发酵时间来抑制产甲烷菌的生长。

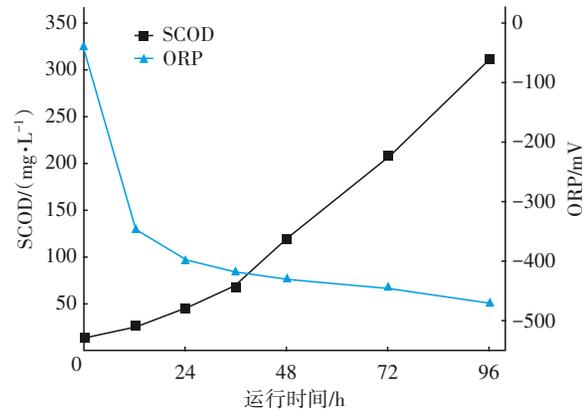


图 1 厌氧发酵过程中 ORP 与 SCOD 含量变化

Fig.1 Variation of ORP and SCOD during anaerobic fermentation

2.3 不同换泥比例对污泥厌氧发酵的影响

不同换泥比例对污泥厌氧发酵的影响如图 2 所示。污泥厌氧发酵实质是生物作用释放污泥中碳源物质的过程,菌种的数量及优势菌种的类型与碳源产量存在较大的相关性。从图 2 可以看出,SCOD 含量逐步增加,而 VFAs 产量的增长较为缓慢。试验过程中,污泥基本处于水解菌种的培养与繁殖阶段,同时在其作用下污泥持续释放出大量糖类、蛋白质、氨基酸等基质,而基质生成的时间较短,难以在该阶段培养出大量的产酸菌并生成 VFAs,从而导致出现 SCOD 持续增加而 VFAs 产量较低的情况。将发酵 72 h 后的剩余污泥每 24 h 更换 50% 或 33% 新污泥,能将有效菌种保留在发酵池中,其间反应器内的 SCOD 含量变化不大,并且和原污泥发酵 72 h 后的含量相近。对比更换 50% 或 33% 新污泥的发酵结果,两者无明显差异,这表明每 24 h 保留 50% 原始发酵污泥即可保证足量水解菌种和 VFAs 菌种在发酵池。

同时还观察到,长时间的运行会有无色无味气体冒出,其间反应池中 pH 值也偏高,初步判断是生成了甲烷,而甲烷的生成会消耗析出的有机物,降低碳源产量,因此,基于占地和抑制产甲烷菌的考虑,建议每日换泥比例控制在 50% 左右,折合污泥停留时间(SRT)约为 48 h。同时当 pH 值异常升高时,可通过间歇曝气或提高换泥比例来抑制产甲烷菌的生长,将污泥厌氧发酵进程控制在水解和产酸阶段,确保碳源的产量。

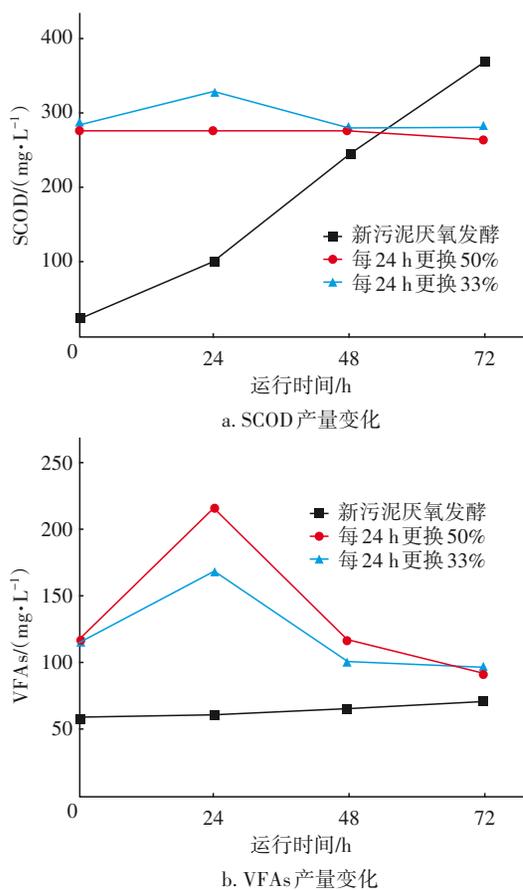


图 2 不同换泥比例时 SCOD 和 VFAs 产量变化
Fig.2 Variation of SCOD and VFAs under different sludge replacement ratios

2.4 不同投加比例的反硝化提升效果

模拟投加不同比例厌氧发酵污泥于缺氧反应器,其效果如图 3 所示。其中,横坐标 1~5 分别表示本底、投加 2.5% 发酵污泥、投加 5% 发酵污泥、投加 150 mg/L 复合碳源和投加 2.5% 发酵污泥+75 mg/L 复合碳源(下同)。由图 3 可见,投加 5% 发酵污泥的反硝化效果比投加 150 mg/L 复合碳源更优。以厌氧发酵污泥 SCOD 含量为 300 mg/L 计,5% 发酵污泥为反硝化系统增加 COD 约 14.5 mg/L,而 150 mg/L 复合碳源增加约 36 mg/L。厌氧发酵污泥释放的碳源是 VFAs、多糖等有机质,复合碳源多为大分子有机质,因此厌氧发酵污泥释放的碳源更易被微生物利用。同时,长时间的厌氧发酵可能使系统中的微生物菌群发生改变,间接增强了缺氧系统的脱氮效果。另外,投加 2.5% 厌氧发酵污泥+75 mg/L 复合碳源时对硝酸盐氮的去除效果最佳,因此,综合考虑投加成本和反硝化效果,建议投加 2.5% 厌氧发酵污泥+75 mg/L 复合碳源,以增强系统生物脱氮

能力。

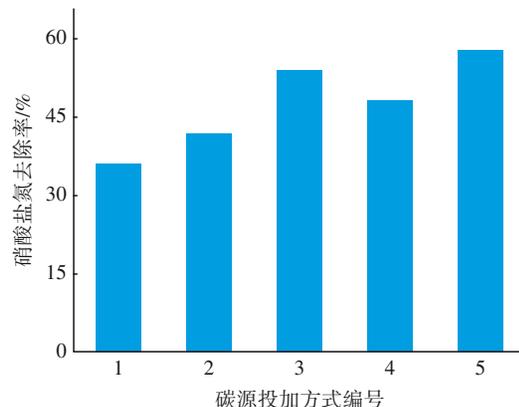


图 3 发酵污泥投加比例对硝酸盐氮去除效果的影响
Fig.3 Removal efficiency of nitrate nitrogen by fermentation sludge with different dosing ratios

2.5 对风险指标的影响

在污泥厌氧发酵过程中除了生成碳源外,也会伴随总氮、总磷、重金属等物质的析出^[10],总氮、总磷的引入无疑会增加生化系统的处理负荷,而重金属离子也会对活性污泥系统造成负面影响,使其处理能力明显下降^[11]。厌氧发酵污泥投加比例对缺氧反应器中总氮和总磷含量的影响见图 4。在设定的投加比例下,缺氧系统中的总氮和总磷含量基本无明显变化,同时发酵污泥消解后总镉、总汞、总铅、总铬、总砷、六价铬含量分别为 0.014、0.005、0.27、0.3、0.12、0.12 mg/L,都在 GB 8978—1996 中规定的限值以下。因此,在 2.5% 厌氧发酵污泥+75 mg/L 复合碳源投加方式下,上述风险因子基本不会对生化系统造成不良影响。

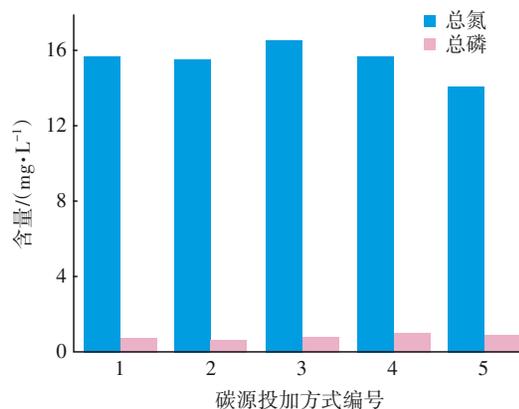


图 4 不同发酵污泥投加比例下总氮、总磷含量变化
Fig.4 Variation of total nitrogen and total phosphorus with different dosing ratios

2.6 厌氧发酵的污泥减量化效果

污泥厌氧发酵是在厌氧环境下通过微生物作用将污泥中的有机物转化为碳源,该过程必然导致污泥量降低,经过厌氧发酵后污泥减量化效果如图 5 所示。从上文可知,低初始污泥浓度和控制 ORP 在较高水平,厌氧发酵效果较差,而污泥减量情况与厌氧发酵效果有较大关系,在低初始 MLSS 和高 ORP 的不利厌氧发酵条件下,MLSS 的削减率较低,基本在 5% 以下。污泥减量化效果可能与污泥厌氧发酵过程中的水解有关,在水解阶段水解菌对污泥中的有机质进行水解并溶于水中,产酸阶段主要是产酸菌将水解的有机质进一步酸化生成 VFAs。因此,在高初始 MLSS 和低 ORP 条件下,污泥削减量也较大,如 SRT 为 48 h 时污泥削减量约为 7%。另外,由于外碳源与发酵污泥协同投加,必然会减少外碳源的使用量,即外碳源所产生的污泥量也会减少。

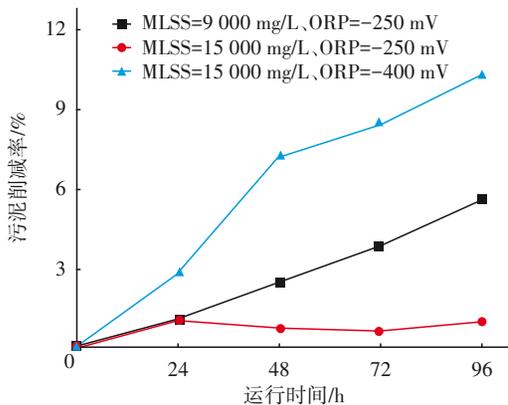


图 5 不同发酵条件下的污泥减量化效果

Fig.5 Sludge reduction under different fermentation conditions

2.7 经济效益估算

以处理量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂为例,复合碳源的平均使用量为 150 mg/L ,即每年复合碳源使用量为 $5 475 \text{ t}$,污泥转化率按 5% 计,即污泥转化量为 273.8 t (含水率为 80%)。复合碳源市场价约为 $1 400 \text{ 元/t}$,全年复合碳源投加费用为 766.5 万元 。若投加 2.5% 厌氧发酵污泥+ 75 mg/L 复合碳源,即每日厌氧发酵污泥投加量为 $2 500 \text{ t}$ (含水率约 99.8%),若含水率按 80% 进行折算,则污泥量为 25 t ,根据前文结果,污泥削减率按 7% 计算,即每日减少污泥约 1.75 t ,全年污泥削减量(含水率为 80%)达 319.4 t ,即全年污泥总削减量为 456.3 t 。按目前市场上含水率为 80% 污泥的处置费用为 600 元/t 计

算,全年可节省污泥处置费用约 27.4 万元 。因此,若投加 2.5% 厌氧发酵污泥+ 75 mg/L 复合碳源,污水处理厂每年碳源使用量可减少 50%,算上污泥处置费用,每年可节省运营成本约 410.6 万元 。

3 结论

① 初始 MLSS 宜控制在约为 $15 000 \text{ mg/L}$,此时厌氧发酵的 ORP 基本在 -400 mV 左右,有利于碳源的制取。

② 建议采用按比例更换新污泥的方式进行厌氧发酵,每天换泥比例为 50% 左右,折合 SRT 约为 48 h。

③ 按照 2.5% 厌氧发酵污泥+ 75 mg/L 复合碳源投加,可以增强生化系统脱氮能力,而且在该投加比例下发酵污泥中的总氮、总磷和重金属离子基本不会对生化系统造成不良影响。

④ 以折合 SRT 计算,厌氧发酵的污泥削减率约为 7%。以 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理厂为例,采用厌氧发酵技术每年可节省运营成本约 410.6 万元 。

参考文献:

- [1] 徐安安. 城市污水厂剩余污泥发酵液作为生物脱氮除磷碳源的研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015: 36-45.
XU An'an. Fermentative Liquid Produced from Municipal Treatment Plant Excess Sludge as the Carbon Sources of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015: 36-45 (in Chinese).
- [2] 刘智晓, 季民, 郝赞, 等. 利用活性污泥水解发酵补充碳源优化脱氮除磷[J]. 中国给水排水, 2013, 29(4): 12-16.
LIU Zhixiao, JI Min, HAO Yun, et al. Application of activated sludge hydrolysis and fermentation to supplement of carbon source for optimized nutrient removal[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4): 12-16 (in Chinese).
- [3] HOUWELING D, DOLD P, BARNARD J. Theoretical limits to biological phosphorus removal: rethinking the influent COD : N : P ratio [C]// Water Environment Federation. Proceedings of the 83rd Annual Technical Exhibition and Conference of the Water Environment Federation. Alexandria: Water Environment Federation, 2010: 7044-7059.
- [4] 周亚梁, 黄东月. 南方某污水处理厂提标改造工艺优

- 化运行[J]. 中国给水排水, 2020, 36(8):113-118.
ZHOU Yaliang, HUANG Dongyue. Process optimization of a municipal WWTP in South China after upgrading [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(8):113-118 (in Chinese).
- [5] 李桂荣, 李雪, 许文峰, 等. 污泥浓度对碱预处理剩余污泥水解产酸的影响[J]. 给水排水, 2011, 37(7):132-135.
LI Guirong, LI Xue, XU Wenfeng, *et al.* Effect of sludge concentration on acid production by hydrolysis of excess sludge from alkali pretreatment [J]. Water and Wastewater Engineering, 2011, 37(7):132-135 (in Chinese).
- [6] 傅婵媛. 剩余污泥碱解发酵上清液用于生活污水脱氮的效能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010: 4-7.
FU Chanyuan. Study on Properties of Sewage Denitrification with Recycle of Supernatant from WAS Alkaline Anaerobic Acid-phase Digester [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010: 4-7 (in Chinese).
- [7] 李圭白, 张杰. 水质工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 513-514.
LI Guibai, ZHANG Jie. Water Quality Engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 513-514 (in Chinese).
- [8] CHIU Y, CHANG C, LIN J, *et al.* Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion [J]. Water Science & Technology, 1997, 36(11):155-162.
- [9] 李建政, 昌盛, 刘枫. 不同预处理方法对剩余污泥厌氧发酵产氢的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(6):45-50.
LI Jianzheng, CHANG Sheng, LIU Feng. Effects of different pretreatment methods on fermentative hydrogen production of excess sludge [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(6):45-50 (in Chinese).
- [10] 朱赵冉, 黄显怀, 唐玉朝, 等. 低速搅拌球磨破解剩余污泥高效释放碳源[J]. 中国给水排水, 2021, 37(13):1-6.
ZHU Zhaoran, HUANG Xianhuai, TANG Yuchao, *et al.* High efficient release of carbon source from excess sludge disintegrated by low-speed stirring and ball-milling [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(13):1-6 (in Chinese).
- [11] 李鸿, 张立秋, 张绍青, 等. Cd²⁺胁迫对短程反硝化的影响与微生物群落变化[J]. 中国给水排水, 2021, 37(5):10-16, 25.
LI Hong, ZHANG Liqiu, ZHANG Shaoqing, *et al.* Effects of Cd²⁺ stress on partial denitrification and change of microbial community [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5):10-16, 25 (in Chinese).

作者简介:罗锋(1985-),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要从事水处理技术研究与工程管理工作。

E-mail:hust0402@163.com

收稿日期:2021-07-27

修回日期:2021-08-13

(编辑:李德强)

尊法学法守法用法, 治水管水兴水护水