

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.03.015

剩余污泥碱性发酵产酸及脱水性能研究

刘子娟¹, 王寅义², 徐肖甜², 范磊³, 高子慧⁴, 逢鸿儒¹,
钱浩¹, 李雨忻⁴, 董文杰⁴, 饶宾期¹

(1. 中国计量大学 机电工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 安吉净源污水处理有限公司, 浙江 湖州 313000; 3. 浙江长兴水务有限公司, 浙江 湖州 313000; 4. 中国计量大学 质量与安全工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对污水厂进水碳源不足的问题,采用南方某污水厂剩余污泥进行碱性发酵实验,系统考察了产酸量、氨氮和总磷释放量,研究微生物对发酵液的利用以及污泥脱水情况。结果表明:在pH值=10、25℃条件下,发酵第7天,挥发性有机酸含量达到峰值3 262 mg/L,其中乙酸积累量占比76.52%。采用发酵液作为原料,微生物反硝化过程、硝化过程、厌氧释磷过程均不受影响。在pH值为4的条件下,聚合硫酸铁投加量(以干基计)为70 kg/t时,发酵污泥含水率可降至64.02%。污泥碱性发酵后可产生大量脂肪酸,且发酵液中的有机物组分能作为微生物需要的反硝化碳源,对硝化过程、磷的释放均未产生明显不利影响,发酵产生的污泥经过聚合硫酸铁调理后脱水性能良好。

关键词: 剩余污泥; 发酵产酸; 脱水性能; 絮凝剂; 挥发性有机酸

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)03-0092-07

Acid Production and Dewatering Performance of Excess Sludge with Alkaline Fermentation

LIU Zi-juan¹, WANG Yin-yi², XU Xiao-tian², FAN Lei³, GAO Zi-hui⁴,
PANG Hong-ru¹, QIAN Hao¹, LI Yu-xin⁴, DONG Wen-jie⁴, RAO Bin-qi¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. Anji Jingyuan Sewage Treatment Co. Ltd., Huzhou 313000, China; 3. Zhejiang Changxing Water Co. Ltd., Huzhou 313000, China; 4. School of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Excess sludge from a sewage treatment plant in South China was fermented under alkaline condition to solve the problem of insufficient carbon source in sewage treatment plants. The acid production, ammonia nitrogen and total phosphorus release were systematically investigated, and the utilization of fermentation broth by microorganisms and sludge dewatering performance were explored. When pH and temperature were 10 and 25℃, the volatile organic acids content reached the peak of 3 262 mg/L on the 7th day of fermentation, among which the accumulation of acetic acid accounted for 76.52%. The processes of microbial denitrification, nitrification and anaerobic phosphorus release were not affected by using fermentation broth as raw material. When pH and PFS dosage of dry base were 4 and 70 kg/t, the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878635); 浙江省自然科学基金资助项目(LY18E080019)

通信作者: 董文杰 E-mail: dwenjie@cjlz.edu.cn

water content of fermented sludge could be reduced to 64.02%. A large number of fatty acids were produced after alkaline fermentation of sludge, and the organic components in the fermentation broth could be used as the denitrifying carbon source required by microorganisms, which had no significant adverse effect on the nitrification process and phosphorus release. In addition, the sludge produced by fermentation had a good dewatering performance after PFS conditioning.

Key words: excess sludge; acid produced by fermentation; dewatering performance; flocculant; volatile organic acids

国内污水厂普遍存在进水碳源不足的现象,实际运行中通过投加大量有机物(葡萄糖、乙酸钠、甲醇、乙酸等)补充碳源以保证后续脱氮除磷效果,但是投加大量碳源会导致污水厂运行成本急剧上升^[1]。同时,污水厂在处理污水时会产生大量剩余污泥,导致国内污泥处理压力巨大^[2]。

污泥组分中含有大量的有机物,可以通过发酵的方式产生大量可被生物利用的挥发性脂肪酸^[3-9]。另外,剩余污泥经过发酵后,其粒度会变小并且伴随大量黏性物质,使得脱水处理过程非常困难^[10]。Higgins等人^[11]研究发现,当单价阳离子过多时,添加钠离子会导致沉降和脱水性能恶化。Neyens等^[12]发现用氢氧化钠处理污泥时,仅1 h污泥脱水性能就会恶化。苏高强等人^[13]发现,使用Ca(OH)₂调节污泥pH值时,其脱水效果要好于NaOH。国内大部分采用聚合氯化铝(PAC)、阳离子聚丙烯酰胺(PAM)对剩余污泥进行絮凝脱水^[14-17]。针对碱性条件下厌氧发酵后污泥,研究人员一般通过添加不同药剂和改变温度条件对比其脱水性能,但目前仍缺乏一种高效的脱水方式。

采用混合了工业废水和生活污水的南方某市政污水厂的剩余污泥进行碱性发酵实验,考察了微生物对发酵液的利用情况,对比了不同絮凝剂对发酵污泥脱水性能的改善程度,全面研究了污泥碱性发酵产酸、酸的利用、污泥脱水等,旨在为污泥碱性发酵提供基础性数据,并为解决污水处理过程中碳源不足和剩余污泥脱水提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 原水特性

实验所用原水取自南方某城镇污水处理厂进水,其中工业废水占70%,其余为生活污水。原水pH值为6.7~7.4,SS为67~2 436 mg/L,COD为74~192 mg/L,总氮为10~22 mg/L(主要以氨氮为主,氨

氮为7~19 mg/L),磷为0.3~2.0 mg/L。由于工业废水占比较大,原水中大部分COD不能被利用。

1.2 污泥特性

实验所用剩余污泥主要取自污水处理厂浓缩池中的生化排泥,VSS为14~18 g/L,TSS为30~36 g/L。污泥上清液的pH值在7.3左右,COD为20~89 mg/L,总氮为15~24 mg/L,氨氮为8~20 mg/L,总磷为2~4 mg/L,溶解性蛋白质含量为20~24 mg/L,溶解性多糖含量为10~14 mg/L。

1.3 污泥碱性发酵实验

剩余污泥自然沉降24 h,弃掉上清液后置于1 000 mL发酵瓶中,在150 r/min的振荡器上连续培养。采用2 mol/L的NaOH和1 mol/L的HCl每隔12 h调节一次pH值,使pH值维持在10左右。每次取样或调节pH值后,氮吹瓶口3 min,并密封瓶子以保证厌氧环境。

1.4 发酵液微生物利用实验

1.4.1 硝化与反硝化实验

污泥自然沉降24 h后弃掉上清液,污泥的MLSS为14~18 g/L、上清液的COD为20~89 mg/L。将500 mL污水厂进水和接种污泥混合均匀后置于反应器中,使其MLSS控制在4 000 mg/L左右,随后定量加入NaNO₃固体,使硝酸盐氮浓度保持在20~25 mg/L。以去除1 mg的N和1 mg的P分别需要2.86、15 mg的COD来计,发酵液按照30 mL/L投加。投加发酵液后将反应器置于磁力搅拌器上,转速设置为120 r/min,实验前充氮气4 min保证瓶内厌氧状态,进行60 min的反硝化实验。随后打开瓶口连续曝气3 h进行硝化实验,曝气过程DO浓度控制在2 mg/L左右。实验过程中定时取样分析。

1.4.2 厌氧释磷实验

剩余污泥自然沉降24 h后弃掉上清液,污泥的MLSS为14~18 g/L、上清液的COD为20~89 mg/L。

将500 mL原水和接种污泥混合均匀后置于反应器中,使其MLSS控制在4 000 mg/L左右,同样发酵液按照30 mL/L进行投加。投加后将反应器置于磁力搅拌器上,转速设置为120 r/min,实验之前充氮气4 min,使反应容器内保持厌氧状态,充气结束后密封瓶口进行180 min的厌氧释磷实验,实验过程中定时取样分析。

1.5 污泥脱水实验

污泥脱水实验采用压滤脱水和离心脱水两种方式。压滤脱水采用1 MPa压强对250 mL污泥压滤20 min,取出泥饼测定含水率。离心脱水采用离心机,转速设定为4 000 r/min,对污泥离心10 min,取下层沉淀测定含水率。分别采用PAM、PAC和聚合硫酸铁(PFS)调理污泥后进行压滤脱水,测定压滤后泥饼含水率。

1.6 分析方法

1.6.1 相关检测方法

挥发性有机酸采用气相色谱(GC)进行测定,实验中所使用的气相色谱仪为岛津UV-1780,色谱柱为CB-FFAP(30 m×0.32 mm×0.5 μm)。污泥发酵过程中涉及的挥发性有机酸及在本次气相法测试中的出峰时间分别是乙酸6.624 min、丙酸7.611 min、异丁酸7.904 min、正丁酸8.563 min、异戊酸8.994 min和正戊酸9.791 min。

COD采用重铬酸钾法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用α-萘胺分光光度法测定,TP采用钼锑抗分光光度法测定,VSS和TSS采用重量法测定,pH值使用pH计测定,溶解性蛋白质采用福林酚试剂法测定,溶解性多糖采用蒽酮比色法测定,蛋白质定性分析采用三维荧光法。

1.6.2 相关参数计算

① 比反硝化速率

对反硝化反应曲线进行拟合,其斜率的绝对值表示反硝化速率,再除以污泥浓度得到比反硝化速率。

$$v_D = r_D/X_V \quad (1)$$

式中: r_D 为反硝化速率,mg/(L·h); X_V 为污泥浓度,g/L; v_D 为比反硝化速率,mg/(gVSS·h)。

② 反硝化效率

反硝化效率以氮浓度的变化进行表征,

见式(2)。

$$v = \frac{C_0 - C_1 - C_2}{C_0} \quad (2)$$

式中: C_0 为初始硝酸盐氮浓度; C_1 为反应结束时硝酸盐氮浓度; C_2 为反应结束时亚硝酸盐氮浓度。

③ 比释磷速率

对释磷反应曲线进行拟合,其斜率的绝对值表示释磷速率,再除以污泥浓度得到比释磷速率。

$$v_P = r_P/X_V \quad (3)$$

式中: r_P 为释磷速率,mg/(L·h); v_P 为比释磷速率,mg/(gVSS·h)。

2 结果与讨论

2.1 污泥碱性发酵实验结果

发酵过程(pH值=10、温度为25℃)中VFAs、氮、磷浓度变化如图1所示。可以看出,在污泥碱性发酵过程中,反应前几天VFAs产率较低。从第5天开始,VFAs大量溶出,反应至第7天时,浓度达到峰值,主要包括乙酸2 496 mg/L、丙酸273 mg/L、异丁酸175 mg/L、正丁酸87 mg/L、异戊酸189 mg/L和正戊酸42 mg/L,6种酸折算后的COD为4 029 mg/L,占溶解性COD的54%。这是由于在碱性发酵过程中,剩余污泥中富含的蛋白质、碳水化合物和脂类等大分子有机物转化为短链脂肪酸。随着有机酸含量的增加,单位污泥产生的VFAs量呈上升趋势,在第7天达到了峰值272 mg/g,这与Yuan等人^[5]的研究结果相差不大。7 d以后VFAs浓度略微下降,可能是发生了甲烷化反应。

发酵实验中,氨氮在第1天快速溶出,这是由于蛋白质在碱性条件下水解释放出氨基^[18],之后呈缓慢上升趋势,在第7天达到峰值250 mg/L,随后变化不大。总磷的变化趋势与氨氮类似,都是呈先上升随后保持基本稳定,原因可能是初始阶段厌氧释磷较快,随后降低,并且一部分磷在碱性条件下与水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 以及 NH_4^+ 结合生成羟基磷灰石或鸟粪石沉淀^[19]。从数值上来看,未对发酵液中氮、磷进行回收的情况下,发酵液中挥发酸用于去除自身的氮和磷需要消耗约1 765 mg/L(以COD计),剩余的2 264 mg/L挥发酸可以用于提高生物脱氮除磷效率。此外,从溶解性COD(7 520 mg/L)判断还有一部分非VFAs有机物也能被作为碳源。实验过程中发酵液并未对反硝化过程和厌氧释磷过程产生明

显的抑制情况。综上所述,理论上发酵液可以作为强化生物脱氮除磷的碳源。

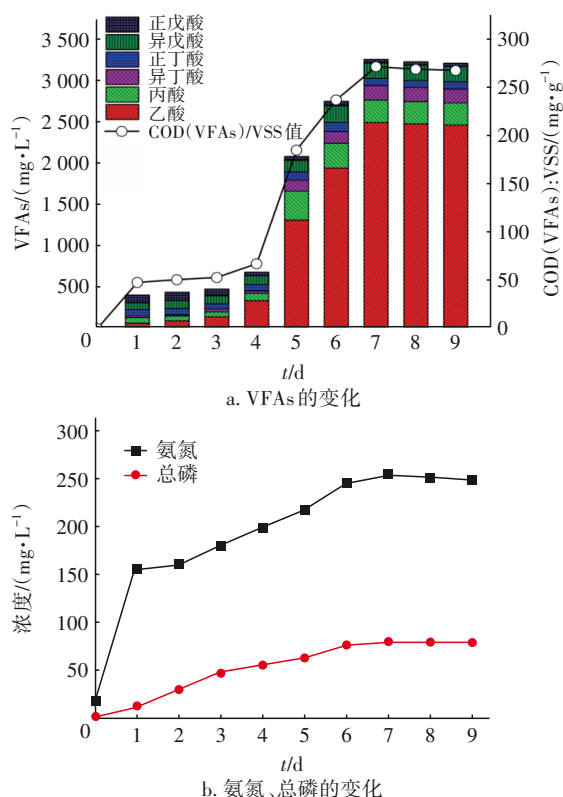


图1 发酵过程中挥发性脂肪酸、氮、磷浓度变化

Fig.1 Changes of volatile fatty acids, nitrogen and phosphorus concentration during fermentation

未发酵以及发酵第4、6天的三维荧光光谱表明:未发酵时,没有较为明显的荧光峰,这是因为初始阶段污泥中的固体有机物尚未被分解,蛋白质未被释放到溶液中;在污泥碱性发酵的第4天出现两个比较明显的荧光中心,分别出现在激发波长/发射波长=270 nm/290 nm、225 nm/290 nm附近,它们均为类蛋白质荧光峰,与此同时,污泥产酸量也开始快速增加,表明污泥已从水解阶段过渡到产酸阶段;第6天时荧光峰强度降低,表明蛋白类物质减少,可能是产酸菌大量繁殖,加大了对反应液中蛋白质的利用。

2.2 微生物利用污泥发酵液结果

2.2.1 硝化与反硝化脱氮过程

发酵液对硝化和反硝化过程的影响如图2所示。通过投加硝酸盐使得硝酸盐氮浓度在20~25 mg/L之间,接种后污泥浓度控制在4000 mg/L左右。此外,硝酸盐氮在反硝化阶段的60 min内从初始的

26.68 mg/L快速下降至14.66 mg/L,反应体系中的溶解性COD也出现快速下降。整个过程的反硝化率为35.4%,比反硝化速率为3 mg/(gVSS·h),与何岳兰等人^[7]在pH值=10条件下碱性发酵所得发酵液作为碳源的比反硝化速率相差不大。在以葡萄糖、乙酸钠和甲醇作为碳源时,比反硝化速率分别为7.42、6.90和2.50 mg/(gVSS·h)^[20]。说明发酵液中的有机物能够被反硝化菌快速利用,但利用速率要低于葡萄糖和乙酸钠等常用碳源,可能是发酵液中的成分复杂引起的。

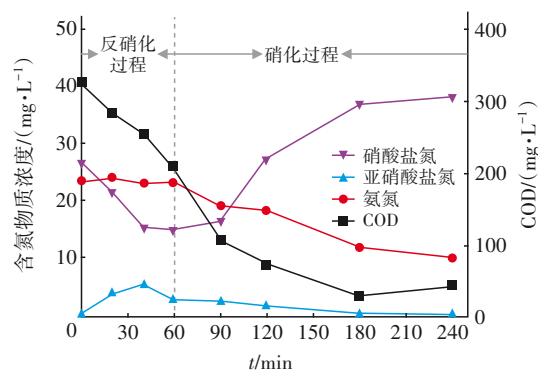


图2 发酵液对硝化和反硝化过程的影响

Fig.2 Effect of fermentation broth on nitrification and denitrification process

在硝化过程中,氨氮通过硝化作用转化为硝酸盐氮,从图2可以看出氨氮浓度从初始的23.63 mg/L持续下降至9.98 mg/L,同时硝酸盐氮浓度从16.48 mg/L上升到38.24 mg/L。因而可以确定,投加发酵液后未对生化反应的硝化过程产生明显的不利作用,碱性发酵液提供的有机质能够较好地被反硝化功能性微生物利用。

2.2.2 厌氧释磷过程

发酵液对厌氧释磷过程的影响如图3所示。可以看出,释磷效率在初始20 min内出现明显升高,TP从11.25 mg/L升至15.04 mg/L,但净释磷量较少,仅为3.79 mg/L。20 min后,释磷效率开始下降。实验过程还可以看到溶解性COD在初始20 min出现快速下降,从297 mg/L下降到251 mg/L。整个过程分为两个阶段,反应前20 min为快速释磷阶段,比释磷速率达到2.85 mg/(gVSS·h),同时COD快速降解,比速率达到34.5 mg/(gVSS·h)。20 min后比释磷速率降至0.032 mg/(gVSS·h),COD比降解速率降至1.125 mg/(gVSS·h)。以葡萄糖、乙醇和甲醇为碳源时前60 min比释磷速率分别为2.05、1.62、

0.37 mg/(gVSS·h)^[21],而利用发酵液为碳源时前60 min的比释磷速率为0.96 mg/(gVSS·h),较葡萄糖与甲醇低。这是因为,当污泥浓度一定时,即便有过量的溶解性有机物存在,聚磷菌也不会再释放磷。在实验中将发酵液投加到生化系统后,对厌氧释磷过程没有产生明显的抑制作用。

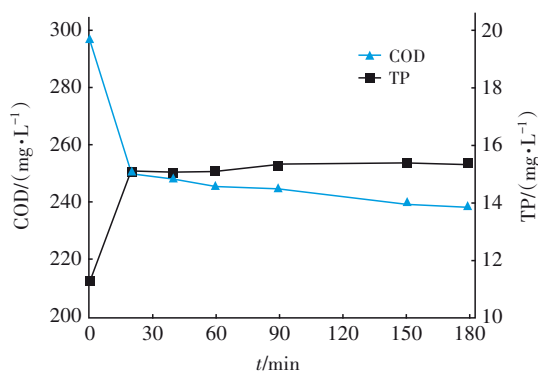


图3 发酵液对厌氧释磷过程的影响

Fig.3 Effect of fermentation broth on anaerobic phosphorus release process

2.3 污泥脱水性能

对碱性发酵前后的污泥均进行了脱水性能研究,结果见图4。

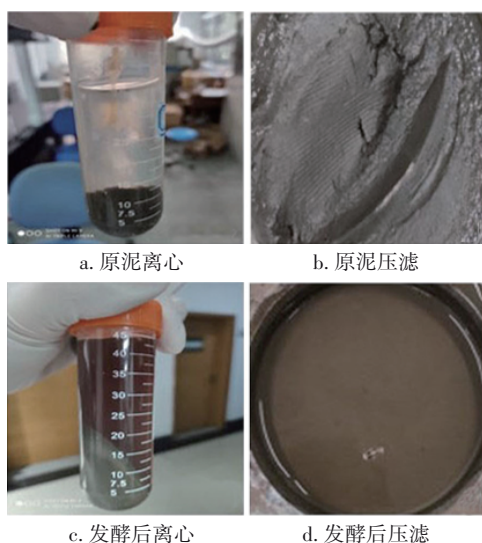


图4 发酵前后污泥离心与压滤脱水效果对比

Fig.4 Comparison of sludge centrifugation and pressure filtration dehydration before and after fermentation

由图4(a)、(b)可知,发酵前污泥不管是采用离心处理(10 min, 4 000 r/min)还是压滤方式(20 min, 1 MPa)泥饼均成型。经过碱性发酵之后,污泥黏度增加,离心后发酵液呈现浑浊状态[见图4(c)],压

滤后也无法形成泥饼,并且压滤过程中无滤液流出[见图4(d)]。原因可能是污泥中EPS溶解出的有机物附着在细胞表面,污泥黏度增加,同时EPS溶解使得污泥粒径减小。在进行机械压滤时,黏度较高、较致密的污泥无法更好地通过滤层。

针对发酵后的污泥,首先采用PAM对污泥进行调理,尽管采用不同的投加量,污泥脱水效果并未改变,调理后采用压滤脱水方式始终无法压滤成饼,含水率仍保持在96%左右。PAM的脱水原理是使絮体逐渐聚集,形成致密的污泥团聚体,主要絮凝模式为聚合物桥接而非聚合物吸附(静电作用、氢键)^[22]。污泥发酵过程中溶出的EPS带有大量负电荷,污泥的Zeta电位降低,不利于污泥的絮凝^[14]。

采用PAC对污泥进行调理,采用压滤(20 min, 1 MPa)脱水。结果表明,投加PAC(6%)后压滤未能形成泥饼,仍为液体状态。在压滤的上下盖板上发现附着有一层含水率较高的胶体状污泥,堵塞了水分脱除的通道。PAC调理效果不理想的原因可能是,发酵造成污泥粒径急剧减小,絮体结构和性质急剧恶化^[23]。

采用PFS对污泥进行调理,将其配制成15%或3%浓度的溶液进行投加,实验过程中pH值采用盐酸调节。结果表明,在pH值=10的条件下,当PFS投加量(以干基计)为35 kg/t时,泥饼可以成型,压滤后含水率为92.26%;进而将PFS投加量增大到300 kg/t,含水率降至85.93%,但是这种方法需要消耗的絮凝剂量比较大。通过调节污泥混合液的pH值,发现在较低pH值条件下,即使投加的PFS仅为70 kg/t,污泥含水率也能降至64.02%。根据DLVO理论,减少絮凝是静电斥力增加的结果,而降低pH值会导致表面负电荷密度降低,从而降低静电斥力和剪切灵敏度;另一个原因可能是,酸使胞外聚合物离开活性污泥表面,从而使污泥团聚体易于填充^[10],达到降低污泥含水率的效果。

3 结论

① 污泥在pH值=10条件下发酵7 d, VFAs积累量折算为COD高达4 029 mg/L, VFAs主要成分包括乙酸、丙酸、异丁酸、正丁酸、异戊酸和正戊酸,其中乙酸占比达到76.52%。碱性发酵方式能快速促进微生物溶胞作用,获得大量挥发性有机酸,为通过剩余污泥发酵获得有机酸碳源提供了可能。

② 将发酵液投入到工业废水占比较高的污水厂进水中,发酵液中的挥发性脂肪酸能够作为反硝化的碳源,且发酵液的投加未对硝化、反硝化以及厌氧释磷过程产生明显抑制作用。

③ 采用PAM、PAC调理未能理想地改善发酵后污泥脱水效果,调节pH值后采用PFS(70 kg/t)调理,可以获得含水率低至64.02%的泥饼层。

参考文献:

- [1] HWANG B, LU Q H, DE TOLEDO R A, *et al.* Enhanced nitrogen removal from sludge reject water by methanol addition using sequencing batch biofilm reactor [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57(19): 8730-8738.
- [2] 郝晓地,于晶伦,刘然彬,等. 剩余污泥焚烧灰分磷回收及其技术进展[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(4): 1149-1159.
HAO Xiaodi, YU Jinglun, LIU Ranbin, *et al.* Advances of phosphorus recovery from the incineration ashes of excess sludge and its associated technologies [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(4): 1149-1159(in Chinese).
- [3] 李淮,黄天寅,刘锋,等. 污泥厌氧发酵产酸中试反应器的启动研究[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(23): 43-47.
LI Huai, HUANG Tianyin, LIU Feng, *et al.* Study on start-up of pilot-scale anaerobic acidogenic fermentation reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(23): 43-47(in Chinese).
- [4] MA H J, CHEN X C, LIU H, *et al.* Improved volatile fatty acids anaerobic production from waste activated sludge by pH regulation: alkaline or neutral pH? [J]. *Waste Management*, 2016, 48:397-403.
- [5] YUAN H Y, CHEN Y G, ZHANG H X, *et al.* Improved bioproduction of short-chain fatty acids (SCFAs) from excess sludge under alkaline conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(6): 2025-2029.
- [6] 范荣桂,刘娜,尹利鹏,等. 污泥厌氧催化快速发酵产VFAs的实验研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(11): 69-74.
FAN Ronggui, LIU Na, YIN Lipeng, *et al.* Rapid production of VFAs in catalyzed anaerobic fermentation of sludge [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(11): 69-74(in Chinese).
- [7] 何岳兰,王淑莹,李夕耀,等. 不同剩余污泥发酵液对 NO_x^- 还原的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(10): 2964-2971.
HE Yuelan, WANG Shuying, LI Xiyao, *et al.* Effect of different waste activated sludge fermentation supernatants on NO_x^- reduction process [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10): 2964-2971 (in Chinese).
- [8] 李健弟,张伟,张小玲,等. 超声预处理污泥发酵液作为反硝化聚磷补充碳源研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(9):9-15.
LI Jiandi, ZHANG Wei, ZHANG Xiaoling, *et al.* Additional carbon source for denitrifying phosphorus removal based on hydrolysis acidification of sludge pretreated by ultrasound [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(9): 9-15(in Chinese).
- [9] 袁悦,刘瑾瑾,彭永臻. 污泥厌氧发酵物强化低碳氮比生活污水脱氮除磷[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(8):14-19.
YUAN Yue, LIU Jinjin, PENG Yongzhen. Enhancement of nitrogen and phosphorus removal from municipal waste water by sludge anaerobic fermentation products [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(8):14-19 (in Chinese).
- [10] NEYENS E, BAEYENS J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 98(1/3):51-67.
- [11] HIGGINS M J, NOVAK J T. The effect of cations on the settling and dewatering of activated sludges: laboratory results [J]. *Water Environment Research*, 1997, 69(2):215-224.
- [12] NEYENS E, BAEYENS J, CREEMERS C. Alkaline thermal sludge hydrolysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 97(1/3):295-314.
- [13] 苏高强,霍明昕,汪传新,等. 碱的类型对剩余污泥碱性发酵及脱水性能的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(1):140-146.
SU Gaoqiang, HUO Mingxin, WANG Chuanxin, *et al.* Effects of base types on waste activated sludge alkaline fermentation and dewaterability [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(1): 140-146 (in Chinese).
- [14] 朱建平,彭永臻,李晓玲,等. 碱性发酵污泥脱水性能的变化及其原因分析[J]. *化工学报*, 2013, 64(11): 4210-4215.
ZHU Jianping, PENG Yongzhen, LI Xiaoling, *et al.*

- Change and mechanism of sludge dewaterability during alkaline fermentation [J]. CIESC Journal, 2013, 64 (11):4210-4215 (in Chinese).
- [15] 姜洁,陈望彬,汪彬,等. 高分子絮凝剂在城市污泥脱水中的应用研究[J]. 当代化工, 2019, 48(6):1132-1135.
- JIANG Jie, CHEN Wangbin, WANG Bin, *et al.* Study on application of polymer flocculants in municipal sludge dewatering [J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(6):1132-1135 (in Chinese).
- [16] 周世嘉. 常见絮凝剂在城市污泥脱水中的比较研究[J]. 广州化工, 2018, 46(17): 96-97, 145.
- ZHOU Shijia. Comparative study on common flocculants in municipal sludge dewatering [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46 (17): 96-97, 145 (in Chinese).
- [17] 刘力荣. 污泥脱水药剂及工艺研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2015.
- LIU Lirong. Study on Sludge Dewatering Reagents and Process [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015 (in Chinese).
- [18] 李建勇, 童飞, 张杰, 等. 剩余活性污泥的碱性厌氧发酵特性[J]. 中国给水排水, 2013, 29(5):40-45.
- LI Jianyong, TONG Fei, ZHANG Jie, *et al.* Characteristics of waste activated sludge anaerobic fermentation under alkaline condition [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(5):40-45 (in Chinese).
- [19] 苏高强, 彭永臻, 汪传新, 等. 污泥类型对污泥碱性发酵的影响[J]. 化工学报, 2011, 62(12):3492-3497.
- SU Gaoqiang, PENG Yongzhen, WANG Chuanxin, *et al.* Effect of sludge type on sludge alkaline fermentation [J]. CIESC Journal, 2011, 62 (12): 3492-3497 (in Chinese).
- [20] 周圆, 支丽玲, 郑凯凯, 等. 城镇污水处理厂活性污泥反硝化速率的影响因素及优化运行研究[J]. 环境工程, 2020, 38(7):100-108.
- ZHOU Yuan, ZHI Liling, ZHENG Kaikai, *et al.* Influencing factors and optimization analysis of denitrification rate in urban wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2020, 38 (7): 100-108 (in Chinese).
- [21] 张强, 陈建平, 卢龙. 碳源对聚磷菌厌氧释磷影响的研究进展[J]. 江西科学, 2010, 28(5):614-617.
- ZHANG Qiang, CHEN Jianping, LU Long. The research progress on the effect of carbon source for the growth of bacteria anaerobic releasing phosphorus [J]. Jiangxi Science, 2010, 28(5):614-617 (in Chinese).
- [22] WANG H F, WANG H J, HU H, *et al.* Applying rheological analysis to understand the mechanism of polyacrylamide (PAM) conditioning for sewage sludge dewatering [J]. RSC Advances, 2017, 7 (48): 30274-30282.
- [23] 庞鹤亮, 赫俊国, 郑砚石, 等. 浓缩时间对剩余污泥性质及PAC调理特性的影响[J]. 中国给水排水, 2017, 33(23):109-114.
- PANG Heliang, HE Junguo, ZHENG Yanshi, *et al.* Effect of concentration time on excess sludge characteristics and PAC conditioning [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(23):109-114 (in Chinese).
-
- 作者简介:刘子娟(1996-),女,天津人,硕士研究生,研究方向为污泥资源化利用。
- E-mail:p1901085247@cjlu.edu.cn
- 收稿日期:2021-01-19
- 修回日期:2021-03-02

(编辑:任莹莹)

全面推行河长制湖长制,维护河湖健康生命