

论述与研究

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.17.001

餐厨垃圾废水预处理发酵回收溶解性碳源的研究

柯水洲¹, 莫祺扬¹, 马晶伟¹, 赖涵², 刘颖²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中南水务科技有限公司, 湖南 长沙 410015)

摘要: 针对餐厨垃圾废水资源化利用的问题,分别采用烷基糖苷(APG)与游离型亚硝酸(FNA)对含有较高浓度乳酸的餐厨垃圾废水进行预处理后再进行产酸发酵回收碳源,考察了发酵过程中挥发性脂肪酸(VFAs)与乳酸浓度的变化。结果表明,APG最佳投加量为0.10 g/gTS,可使溶解性COD(SCOD)浓度提高38%;FNA的最佳投加量为1.66 mg/L,可使SCOD浓度提高26%。APG的主要作用体现在提高发酵液的SCOD浓度和产乙酸、丙酸菌活性,而FNA在提高发酵液SCOD浓度的同时还促进了乳酸积累。预处理可使溶解性碳源的反硝化潜能和速率均有所提升,而FNA预处理还可以减少发酵液作为外加碳源时的亚硝酸盐积累。

关键词: 餐厨垃圾废水; 挥发性脂肪酸; 乳酸; 厌氧酸化; 溶解性碳源

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)17-0001-08

Pretreatment of Kitchen Waste Wastewater and Recovery of Soluble Carbon Source by Fermentation

KE Shui-zhou¹, MO Qi-yang¹, MA Jing-wei¹, LAI Han², LIU Ying²

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Zhongnan Water Technology Co. Ltd., Changsha 410015, China)

Abstract: To recover resources from kitchen waste wastewater, the kitchen waste wastewater with high lactic acid concentration was pretreated by alkyl polyglycoside (APG) and free nitrous acid (FNA), respectively, and then the carbon sources were recovered by acidogenic fermentation. Variations in concentrations of volatile fatty acids (VFAs) and lactic acid during fermentation were investigated. The soluble chemical oxygen demand (SCOD) increased by 38% when the APG was added at the optimum dosage of 0.10 g/gTS, and SCOD increased by 26% when the FNA was added at the optimum dosage of 1.66 mg/L. The main role of APG was to increase the SCOD concentration in the fermentation broth and the activities of acetic acid producing bacteria and propionic acid producing bacteria, while the FNA improved the SCOD concentration in the fermentation broth and promoted the accumulation of lactic acid. The pretreatment increased the denitrification potential and rate of dissolved carbon source, while the FNA pretreatment reduced the nitrite accumulation when the fermentation broth was used as the additional carbon source.

Key words: kitchen waste wastewater; volatile fatty acids; lactic acid; anaerobic

acidification; soluble carbon source

餐厨垃圾是城市固体废弃物的重要组成部分,我国的餐厨垃圾约占城市垃圾总产量的 37% ~ 62%^[1],如何实现餐厨垃圾的无害化、资源化利用是当前亟待解决的问题。典型的餐厨垃圾处理工艺为去渣、制浆、蒸煮除油,产生的废水进入厌氧发酵罐产沼气。厌氧消化是目前餐厨垃圾废水最主要的资源化利用工艺之一,而除用于沼气发电以外的研究鲜见报道。因此,研究餐厨垃圾废水的发酵特点及预处理方法,对拓展其资源化利用途径有一定的指导意义。

餐厨垃圾废水厌氧发酵过程包括水解、酸化以及产甲烷 3 个过程,而其中高固含量有机物的水解过程是限速步骤。一般而言,水解的程度和产物直接影响发酵过程,只有溶解性有机物才能进一步被微生物降解。因此,在厌氧发酵之前对底物进行适当的预处理,促进颗粒状难降解部分的降解,能够极大地加快厌氧发酵进程,同时能提高目标产物的产量。目前常见的预处理方法有酸、碱等化学预处理以及超声、热等物理预处理方法^[2]。烷基糖苷(APG)是一种绿色环保型生物表面活性剂,常被用于各类固体废弃物的降解处理^[3-4],目前认为 APG 能增强厌氧发酵过程中水解程度的原因是其可以降

低疏水分子与水的表面张力,从而提高有机物的溶解度。另外,游离型亚硝酸(FNA)是目前厌氧发酵预处理的研究热点,已有研究表明,其在纳克级水平即对污水处理中的关键微生物有明显的抑制作用^[5];同时,FNA 对于活性污泥厌氧发酵的加速溶解,促进水解和酸化产挥发性脂肪酸(VFAs)作用也已经被证实^[6]。因此,通过投加 APG 和 FNA 对餐厨垃圾废水进行预处理是可行的。

餐厨垃圾废水发酵液中含有较多的乳酸、挥发性脂肪酸等小分子有机酸,将其作为污水处理厂的反硝化外加碳源是目前餐厨垃圾资源化利用的发展方向之一^[7]。为此,笔者分别采用 APG 和 FNA 对餐厨垃圾废水进行预处理,重点探究了不同投加量的 APG 和 FNA 预处理对餐厨垃圾废水产酸发酵回收溶解性碳源的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

接种污泥取自实验室长期运行的餐厨垃圾中温发酵装置,发酵温度为 35 ℃。餐厨垃圾废水取自长沙市联合餐厨有限公司,为餐厨垃圾经去渣、制浆、蒸煮除油后的废水。接种污泥及餐厨垃圾废水的性质见表 1,其小分子有机酸含量见表 2。

表 1 餐厨垃圾废水及接种污泥的性质

Tab. 1 Characteristics of kitchen waste wastewater and inoculated sludge

项 目	pH 值	COD/(g · L ⁻¹)	SCOD/(g · L ⁻¹)	TS/(g · L ⁻¹)	VS/(g · L ⁻¹)
餐厨垃圾废水	3.96 ± 0.07	169.03 ± 4.78	78.32 ± 1.92	103.18 ± 1.52	95.18 ± 1.00
接种污泥	5.95 ± 0.12	125.00 ± 6.00	92.43 ± 0.40	96.66 ± 2.45	86.54 ± 1.76

表 2 餐厨垃圾废水及接种污泥的小分子有机酸含量

Tab. 2 Content of small molecular organic acids in kitchen waste wastewater and inoculated sludge g · L⁻¹

项 目	乙酸	丙酸	丁酸	戊酸	乳酸
餐厨垃圾废水	3.00 ± 0.03	1.28 ± 0.03	3.31 ± 0.07	0.00 ± 0.00	31.07 ± 0.54
接种污泥	7.00 ± 0.16	9.65 ± 0.12	10.66 ± 0.05	0.00 ± 0.00	3.33 ± 0.05

试验用 APG 的纯度为 50% (质量分数),其他试剂均为分析纯。FNA 通过在血清瓶中添加亚硝酸钠水解得到,FNA 浓度由公式(1)确定。试验中 APG 的投加量分别为 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25 g/gTS,亚硝酸钠的使用量分别为 0.40、0.80、1.60、3.20、4.00 g/L。

$$C_{\text{FNA}} = \frac{C_{\text{t,NO}_2^-}}{[1 + e^{-2.300/(273+T)}]10^{\text{pH}}} \quad (1)$$

式中: C_{FNA} 为 FNA 浓度,mg/L; $C_{\text{t,NO}_2^-}$ 为亚硝酸盐总浓度,mg/L; T 为温度,℃。

1.2 试验设计

试验在恒温振荡摇床中进行,所使用的血清瓶容量为 500 mL。先对餐厨垃圾废水进行预处理,具体操作方法如下:将一定量的预处理药剂(APG 和 FNA)分别加入到餐厨垃圾废水中,混匀后调节 pH 值至 6,在 35 ℃下放置 24 h。预处理完成后,将 pH

值再次调节至6,投入血清瓶并充入氮气2 min 确保无氧条件,加入50 mL 的厌氧接种污泥,放置到恒温振荡摇床开始发酵试验,设置温度为35℃、转速为150 r/min。每隔8 h 用5 mol/L 的硫酸溶液及10 mol/L 的氢氧化钠溶液调节血清瓶的pH 值,使其稳定在6左右。

反硝化试验使用六联式磁力搅拌仪,反硝化的污泥取自长沙市某污水处理厂,试验前用所要进行试验的碳源进行14 d 的驯化,维持pH 值在7~7.8,待出水水质稳定后进行试验。试验前用自来水数次洗涤,将其中残留的有机物洗净。试验前使用硝酸钠固体作为反硝化试验中的硝态氮来源,投加溶解性碳源控制C/N 值在8左右,封闭容器,每30 min 测定一次硝态氮浓度。

1.3 测定指标及方法

TS 与 VS 采用重量法测定;pH 值采用便携式pH 计测定;COD、SCOD 和硝态氮均采用国家标准方法测定;VFAs 采用气相色谱法测定^[8],测定前先对样品进行冷冻离心,在10 000 r/min 下离心7 min,之后经0.45 μm 针孔滤膜过滤;乳酸采用高效液相色谱法测定^[9]。

2 结果与分析

2.1 APG 预处理对餐厨垃圾废水产酸发酵的影响

2.1.1 餐厨垃圾废水中温厌氧发酵特征

在不投加预处理药剂的条件下,餐厨垃圾废水在144 h 的厌氧发酵过程中各类小分子有机酸浓度随时间的变化如图1所示。乳酸浓度在72 h 后开始急剧下降,到144 h 时,反应器中的小分子有机酸由以乳酸为主变为以丙酸和丁酸为主。由于餐厨垃圾废水中乳酸浓度较高,推断在发酵前餐厨垃圾废水中积累了大量的产乳酸菌,在72 h 前,乳酸的合成成为主要反应;72 h 后,以乳酸为原料合成VFAs 的微生物开始占据优势,主要反应为利用乳酸合成丁酸和丙酸,合成丁酸的主要反应如式(2)和式(3)所示,总反应如式(4)所示^[10];合成丙酸的反应如式(5)所示^[11]。根据以上反应式,可将乳酸开始急剧下降的时刻作为以乳酸为原料合成丁酸的开始时刻。发酵初期主要进行的是乳酸发酵,餐厨垃圾废水中的糖类、蛋白质等先转化为乳酸;而48 h 时反应器内的VFAs 含量相较于24 h 时略有降低,这可能是因为即将开始合成丁酸的反应,反应器内的微生物发生竞争,微生物群落的组成短时间发生较大

变化而消耗部分有机物所致^[12]。

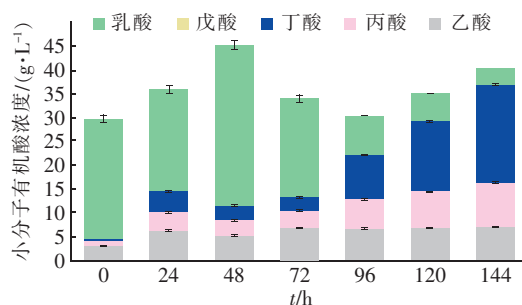
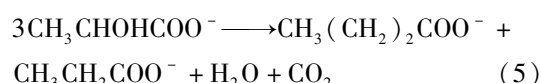
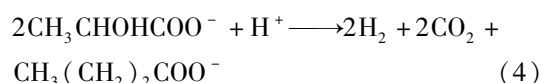
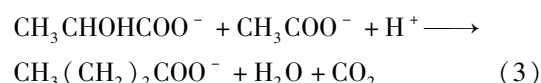
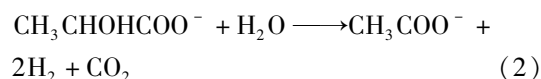


图1 餐厨垃圾废水中温厌氧发酵产酸量变化

Fig. 1 Acids production from mesophilic anaerobic fermentation of kitchen waste wastewater

2.1.2 APG 预处理对餐厨垃圾废水产酸发酵的影响

微生物利用SCOD 的效率高于不溶性COD,因而SCOD 是评价预处理效果的重要指标。所有使用APG 预处理的反应器在24 h 后SCOD 浓度均有所上升,经APG 预处理的反应器中SCOD 浓度随APG 浓度的增加而先上升后下降。APG 投加量在0.10 g/gTS 以上的反应器中SCOD 的增加量比APG 投加量为0.10 g/gTS 的反应器更低,说明过量的APG 对餐厨垃圾废水中难溶性有机物的增溶效果不明显,这可能是因为较高浓度的表面活性剂产生了毒性效应,使得微生物产生胞外聚合物,以免受到恶劣环境条件的影响^[13]。APG 预处理的最佳投加量为0.10 g/gTS,最终使SCOD 浓度提高了38%。

经APG 预处理后餐厨垃圾废水的产酸发酵效果见图2。由图2(a)、(b)可知,APG 对产酸发酵的促进作用主要体现在提高VFAs 的产量;在48 h 时,APG 投加量为0.10 g/gTS 的反应器内乳酸浓度相比其他反应器较低,在96 h 后乳酸浓度、72 h 后VFAs 浓度的上升速度高于其他试验组,这可能是因为试验前期由于水解效果的提高和APG 对产乙酸及丙酸菌的活化作用^[13-14],使该反应器中乳酸转化为VFAs 的时间提前。

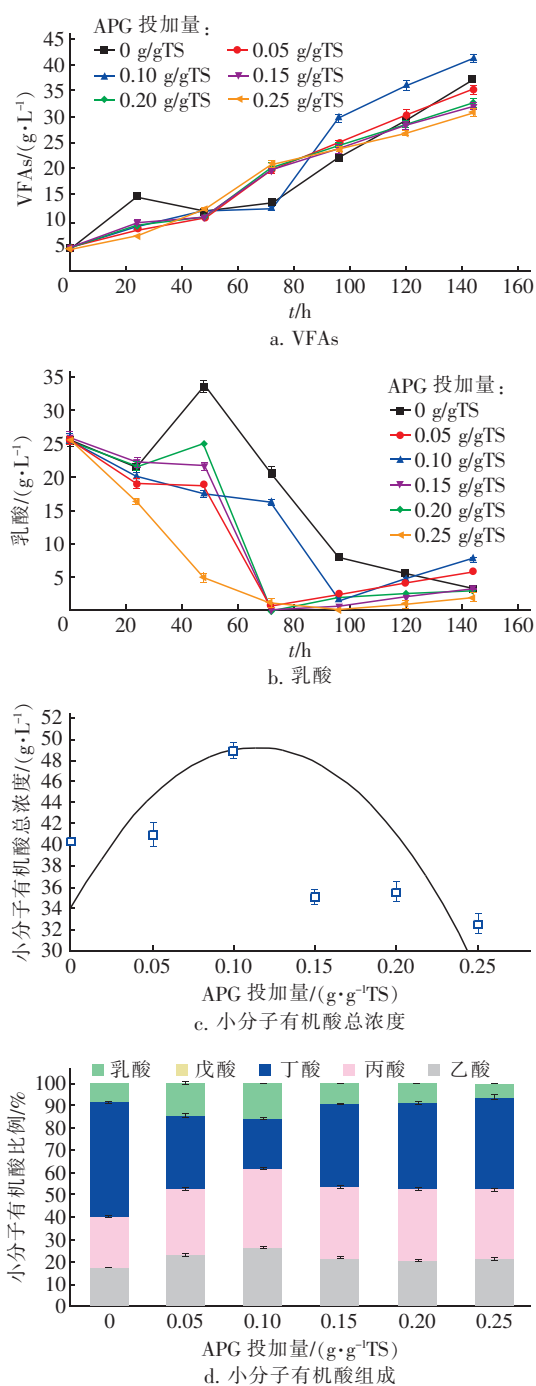


图 2 经 APG 预处理后餐厨垃圾废水的产酸发酵效果

Fig. 2 Effect of acid production and fermentation of kitchen waste wastewater pretreated by APG

由图 2(c)可知,当 APG 投加量为 0.10 g/gTS 时,反应器中的小分子有机酸总浓度高于其他反应器,这是由于在该投加量下,APG 有较好的增溶效果,且由于投加量不大,不会对微生物的生长代谢产生过于严重的负面影响。有研究表明,APG 对厌氧发酵产酸有促进作用,主要归因于其可以提高相关

酶活性和产乙酸菌的活性^[12]。

分析图 2(a)和(b)可知,在未进行预处理的反应器中,小分子有机酸总浓度在 48 h 达到一个峰值,此后快速下降,在 72 h 后开始恢复,并在 144 h 时恢复到与第 48 小时相当的水平。而在 APG 投加量为 0.10 g/gTS 的反应器中,小分子有机酸总浓度则单调递增,可见在 72 h 时快速下降的乳酸并未通过式(5)所示的主要途径转化为丁酸,因此需要对发酵产物中的各类小分子有机酸组成进行分析。

分析图 2(d)各反应器中 VFAs 和乳酸的比例可知,经 APG 预处理的各个反应器中乙酸含量相较于未进行预处理的对照组均有所上升,这与之前所认为的 APG 的促进作用在于提高产乙酸菌活性的观点一致;此外,所有投加了 APG 的试验组中的丁酸含量均有所下降,这可能是因为 APG 抑制了将乳酸转化为丁酸的微生物活性^[15];而 APG 投加量较少的试验组中乳酸浓度相对较高,是因为低投加量的表面活性剂不会产生明显的抑制效应。

综合来看,APG 对餐厨垃圾废水的厌氧发酵过程具有促进作用,主要体现在对水解过程的促进以及对产乙酸及丙酸菌的活化。APG 对餐厨垃圾废水进行预处理的最佳投加量为 0.10 g/gTS ,可以使 SCOD 浓度提高 38%,可以生产以乙酸、丙酸、丁酸为主要发酵产物的小分子有机物。相关研究表明,乙酸和乳酸是优秀的反硝化外加碳源,而丙酸则是较好的污水处理厂生物除磷的外加碳源^[16],因此 APG 预处理既能提高餐厨垃圾废水发酵产物中的小分子有机酸浓度,又能改变发酵产物的组成,获得可以用于脱氮除磷的溶解性碳源。

2.2 FNA 预处理对餐厨垃圾废水产酸发酵的影响

在试验条件下,随着 FNA 投加量的增大,SCOD 浓度先上升后下降,当 FNA 投加量为 1.66 mg/L 时 SCOD 增加幅度最大,相对于不投加 FNA 的反应器,SCOD 浓度提高了 26%。FNA 的主要作用是对胞外聚合物中蛋白质的增溶以及对细胞壁的破壁作用^[17]。相关研究表明,在厌氧反应器中可以同时存在产酸过程和反硝化过程,因此在使用更高浓度的 FNA 预处理时,反应器内的反硝化菌由于亚硝酸盐浓度的提高而更为活跃,会消耗部分有机物进行反硝化作用,因此 SCOD 浓度反而低于 FNA 投加量较低的反应器。

经 FNA 预处理后餐厨垃圾废水的产酸发酵效

果如图3所示。

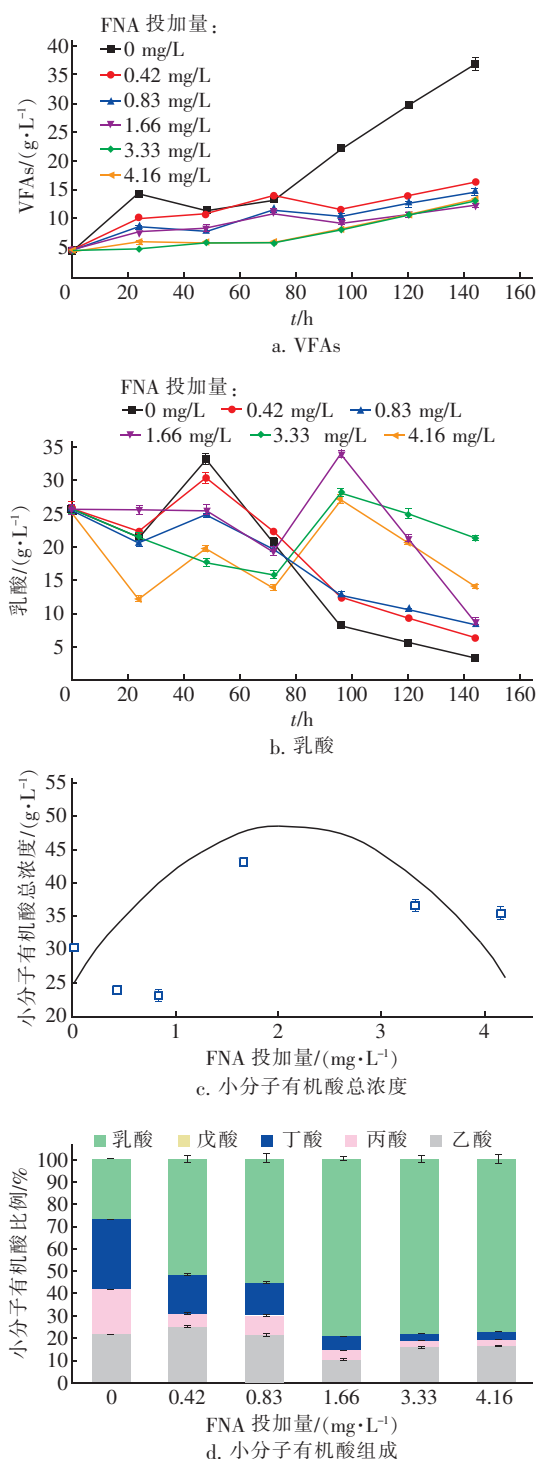


图3 经FNA预处理后餐厨垃圾废水的产酸发酵效果

Fig.3 Effect of acid production and fermentation of kitchen waste wastewater pretreated by FNA

厌氧发酵过程中,采用FNA进行预处理的反应器中VFAs浓度始终低于未投加FNA的对照组反应器,且VFAs浓度随FNA投加量的增加总体呈下降

趋势,这可能是因为FNA在微克级水平就能表现出的生物毒性所致^[18-19]。同时,由于FNA除了可以作为产乳酸菌的氮源外,还可以作为反硝化过程的电子受体,这使得产VFAs菌更加处于竞争的不利地位。

分析各反应器中乳酸的生成情况,未经预处理的反应器以及FNA投加量为0.42、0.83 mg/L的反应器中乳酸浓度变化规律相似,乳酸浓度在48 h时达到最大值,此后由于被转化为VFAs而持续降低。而采用FNA预处理的各反应器中的乳酸浓度均高于对照组反应器,但出现最高值的时间延迟到了96 h,这与之前推断的产VFAs菌受到抑制的结论相符,由于产乳酸菌能利用对产VFAs菌有生物毒性的亚硝酸盐,延长了乳酸的积累时间^[7]。当FNA投加量为1.66 mg/L时,发酵96 h时乳酸浓度达到最大值,这是因为在更高的FNA投加量下反硝化作用可能消耗更多乳酸,而FNA在更低投加量下的破壁作用较弱,且将乳酸转化为VFAs的反应时间会提前;96 h后乳酸浓度下降速度较快,这可能与该反应器内较低的乙酸浓度以及较高的乳酸与乙酸浓度比有关[见图3(d)]^[20],由于FNA对微生物的同化和异化作用均有抑制作用^[18],此时VFAs尚未生成,因而VFAs产量较低。

由图3(c)可知,餐厨垃圾废水发酵96 h时,FNA投加量为1.66 mg/L的反应器中的小分子有机酸总浓度达到最高值。由图3(d)可知,发酵96 h时,FNA投加量为0.42、0.83 mg/L的反应器中乳酸已经被部分消耗,但乳酸所占比例依然较未预处理的反应器大,而更高FNA投加量的反应器中乳酸浓度更高,说明随FNA投加量的增加,FNA对以乳酸为原料生成VFAs的微生物抑制作用也在增强。96 h后,由于FNA被反硝化作用消耗殆尽,因而产VFAs菌得以重新活跃消耗乳酸降低总酸浓度。

综合看来,FNA的最佳预处理投加量为1.66 mg/L,在该投加量下增溶效果较好且可以定向提高乳酸产量,所获得的小分子有机酸总浓度相对较高,同时由于含有较多的还原性较强的乳酸,因此可以作为污水处理反硝化脱氮的良好外加碳源。

2.3 碳平衡分析

分析APG和FNA预处理餐厨垃圾废水产酸发酵过程的碳(COD)质量平衡,结果如表3所示(采用APG预处理时,取发酵144 h的数据;采用FNA

预处理时,取发酵 96 h 的数据)。其中,采用 APG 预处理的反应器中厌氧发酵损失的碳(COD)在 10% 以内;而采用 FNA 预处理的反应器中由于 FNA 消耗的 COD 在 1% 以内,说明 FNA 预处理具有一定的合理性。APG 预处理投加量为 0.10 g/gTS 的反应器以及 FNA 预处理投加量为 1.66 mg/L 的反应

器中溶解性有机物的碳(COD)相较于未预处理的反应器均有所增加,说明预处理具有一定的意义。FNA 预处理投加量为 0.43 和 0.86 mg/L 的反应器中溶解性有机物的碳(COD)严重下降的原因可能是 VFAs 尚未生成,而乳酸已经被微生物的同化作用所吸收。

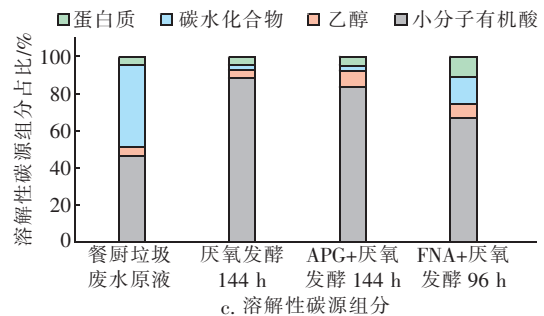
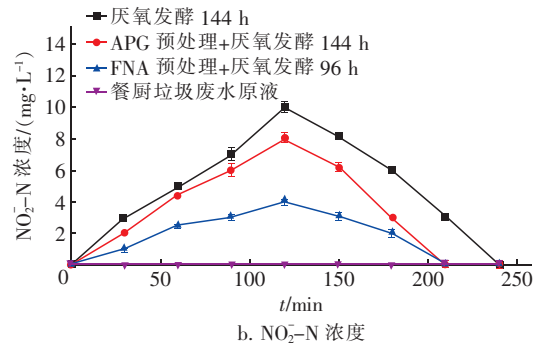
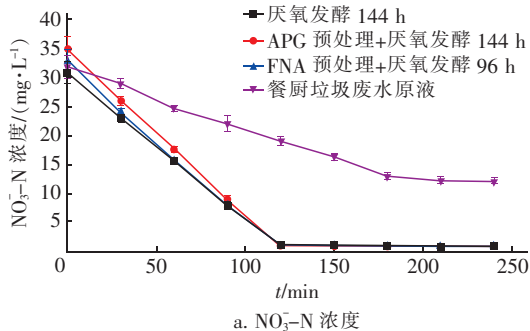
表 3 碳质量平衡计算结果

Tab. 3 Calculation results of carbon mass balance

项 目		初始 COD/%	小分子有 机酸/%	乙醇/ %	溶解性碳水 化合物/%	溶解性 蛋白质/%	FNA 消耗 COD/%	厌氧发酵消 耗 COD/%	不溶性 COD/%	SCOD/ %	残差/ %
APG 投加量/ (g · g ⁻¹ TS)	0	100.0	38.3	1.9	1.3	1.9	0.0	7.1	53.1	43.3	3.6
	0.05	100.0	36.0	4.4	1.3	3.8	0.0	7.2	40.6	45.4	-6.8
	0.10	100.0	41.0	4.4	1.3	2.5	0.0	8.2	41.3	49.2	-1.4
	0.15	100.0	31.7	4.4	1.3	5.0	0.0	6.3	48.8	42.3	-2.6
	0.20	100.0	32.4	4.4	1.3	5.0	0.0	6.5	50.0	43.1	-0.5
	0.25	100.0	30.1	4.4	1.3	5.0	0.0	6.0	45.6	40.7	-7.6
FNA 投加量/ (mg · L ⁻¹)	0	100.0	25.7	1.9	1.3	1.9	0.0	3.4	56.3	30.7	-9.7
	0.42	100.0	17.5	3.1	3.1	3.1	0.1	1.1	59.3	26.8	-12.7
	0.83	100.0	18.3	3.1	4.4	3.8	0.2	0.8	59.6	29.5	-9.9
	1.66	100.0	30.4	3.1	6.9	4.9	0.4	1.3	40.0	45.3	-13.0
	3.33	100.0	25.1	3.1	6.9	5.5	0.6	0.6	46.9	40.6	-11.3
	4.16	100.0	24.4	3.1	8.8	5.6	0.9	0.6	52.5	41.9	-4.1

2.4 预处理发酵液对反硝化脱氮的影响

分别将未进行预处理 + 发酵 144 h、0.1 g/gTS 的 APG 预处理 + 发酵 144 h、1.66 mg/L 的 FNA 预处理 + 发酵 96 h 以及未经任何处理的餐厨垃圾废水原液作为反硝化碳源,溶解性碳源组成以及反应器中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度变化如图 4 所示。可见,进行厌氧发酵后的溶解性碳源均比未进行厌氧发酵的有着更高的反硝化速率。使用 APG 预处理的以 VFAs 为主的溶解性碳源,由于其小分子有机酸总浓度更高,达到预期 C/N 值所需要的投加量更小,仅为未预处理组的 83%。而在有着更高反硝化速率的三组中,用 FNA 预处理的以乳酸为主的溶解性碳源的亚硝酸盐最高积累浓度更低,这说明采用 FNA 进行预处理有着应用上的优势。

图 4 溶解性碳源组成以及 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度变化Fig. 4 Dissolved carbon source composition and variation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and $\text{NO}_2^- - \text{N}$ concentrations

根据 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度曲线计算四种碳源的反硝化潜能 P_{DN} 和反硝化速率(快速反硝化速率 V_{ss} 、

慢速反硝化速率 V_{xs}),结果如表 4 所示。经过两种方式预处理后,餐厨垃圾废水发酵得到的溶解性碳源的快速反硝化速率大于餐厨垃圾废水原液和未进行预处理的发酵液,而且两种方式预处理后溶解性

碳源的反硝化潜能相等,这可能是因为 APG 预处理后提高了乙酸和丙酸浓度,而 FNA 预处理后碳源中乳酸更多,这些小分子有机酸都容易被反硝化细菌所利用。

表 4 四种溶解性碳源的反硝化特征参数

Tab.4 Denitrification parameters of four kinds of soluble carbon source

碳源	$COD_0/(mg \cdot L^{-1})$	$COD_e/(mg \cdot L^{-1})$	$NO_3^- - N_0/(mg \cdot L^{-1})$	$NO_3^- - N_e/(mg \cdot L^{-1})$	$P_{DN}/(mgNO_3^- - N \cdot mg^{-1}COD)$	$V_{ss}/(mgNO_3^- - N \cdot g^{-1}VSS \cdot h^{-1})$	$V_{xs}/(mgNO_3^- - N \cdot g^{-1}VSS \cdot h^{-1})$	$MLVSS/(g \cdot L^{-1})$
1	225.4	30.1	31.78	12.06	0.10	5.23	3.27	1.91
2	230.5	9.2	30.78	0.93	0.13	6.20	—	1.94
3	233.2	9.4	34.76	0.92	0.15	7.03	—	2.04
4	231.5	20.5	32.77	0.94	0.15	7.34	—	2.11

注: 1 为餐厨垃圾废水原液,2 为不进行预处理 + 厌氧发酵 144 h,3 为 APG 预处理 + 厌氧发酵 144 h,4 为 FNA 预处理 + 厌氧发酵 96 h。

3 结论

采用 APG 对餐厨垃圾废水进行预处理并产酸发酵,APG 的最佳投加量为 0.10 g/gTS,其作用机理主要为促进餐厨垃圾废水的水解产酸过程以及提高产乙酸及丙酸菌活性,从而可使发酵液的 SCOD 浓度提高 38%,同时提高了乙酸、丙酸和丁酸等小分子有机酸的总浓度。采用 FNA 预处理时,其最佳投加量为 1.66 mg/L,可使 SCOD 浓度提高 26%,且能够促进乳酸的积累,得到使 $NO_2^- - N$ 积累更低的溶解性碳源。经 APG 和 FNA 预处理的餐厨垃圾废水发酵产物可作为污水处理厂脱氮除磷的外加碳源,对于实现从餐厨垃圾废水中回收溶解性碳源具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 刘增革. 餐厨垃圾的处理技术[J]. 科技创新与应用,2016(35):155-156.
LIU Zengge. Treatment technology of kitchen waste[J]. Technology Innovation and Application, 2016 (35): 155-156(in Chinese).
[2] KARTHIKEYAN O P,TRABLY E,MEHARIYA S,*et al.* Pretreatment of food waste for methane and hydrogen recovery: a review[J]. Bioresource Technology,2018,249:1025-1039.
[3] ZHANG F B, GU W J, XU P Z, *et al.* Effects of alkyl polyglycoside (APG) on composting of agricultural wastes[J]. Waste Management,2011,31 (6): 1333-1338.
[4] LUO J Y, FENG L Y, CHEN Y G, *et al.* Alkyl polyglucose enhancing propionic acid enriched short-

chain fatty acids production during anaerobic treatment of waste activated sludge and mechanisms [J]. Water Research,2015,73:332-341.
[5] PIJUAN M, YE L, YUAN Z. Free nitrous acid inhibition on the aerobic metabolism of poly-phosphate accumulating organisms [J]. Water Research, 2010, 44 (20): 6063-6072.
[6] ZHANG F Z, PENG Y Z, LI B K, *et al.* Novel insights into integrated fermentation and nitrogen removal by free nitrous acid (FNA) serving as treatment method [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 381: 120835.
[7] TANG J L, WANG X C, HU Y S, *et al.* Nitrogen removal enhancement using lactic acid fermentation products from food waste as external carbon sources: performance and microbial communities [J]. Bioresource Technology, 2018, 256: 259-268.
[8] 赵兴涛,徐桂转,刘杰博,等. 气相色谱法测定厌氧发酵液中挥发性脂肪酸的研究[J]. 河南农业大学学报,2013,47(5):584-586,591.
ZHAO Xingtao, XU Guizhuan, LIU Jiebo, *et al.* Study on VFAs content in the anaerobic fermentation liquid by gas chromatography [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2013, 47(5): 584-586, 591 (in Chinese).
[9] 孙蕊,贾鹏禹,武瑞,等. 高效液相色谱法快速测定青贮饲料中 4 种有机酸的含量[J]. 饲料研究,2019,42(4):77-80.
SUN Rui, JIA Pengyu, WU Rui, *et al.* Fast determination of four kinds of organic acids in silage by high performance liquid chromatography [J]. Feed Research, 2019, 42(4): 77-80 (in Chinese).
[10] ZHU X Y, TAO Y, LIANG C, *et al.* The synthesis of *n*-caproate from lactate: a new efficient process for

- medium-chain carboxylates production [J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 14360.
- [11] 马小魁, 姚培鑫. 发酵法生产丙酸的研究进展[J]. 微生物学通报, 1999, 26(6): 443 - 446.
- MA Xiaokui, YAO Peixin. Research progress of propionic acid production by fermentation [J]. Microbiology China, 1999, 26(6): 443 - 446 (in Chinese).
- [12] 唐嘉陵, 王晓昌, 蒲云辉, 等. 餐厨垃圾酸性发酵及其产物为碳源的脱氮特性[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1426 - 1433.
- TANG Jialing, WANG Xiaochang, PU Yunhui, et al. Characteristics of food waste acidogenic fermentation and its products as external carbon sources for nitrogen removal [J]. China Environmental Science, 2017, 37(4): 1426 - 1433 (in Chinese).
- [13] GUAN R P, YUAN X Z, WU Z B, et al. Functionality of surfactants in waste-activated sludge treatment: a review [J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 1433 - 1442.
- [14] GUO L, ZHANG Z S, GAO M C, et al. Comparison of thermophilic bacteria and alkyl polyglucose pretreatment on two-stage anaerobic digestion with waste sludge: biogas production potential and substrate metabolism process [J]. Bioresource Technology, 2018, 249: 694 - 703.
- [15] 梁程, 陶勇, 朱晓宇, 等. 乳酸合成丁酸的工艺构建及其条件优化[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(5): 865 - 871.
- LIANG Cheng, TAO Yong, ZHU Xiaoyu, et al. Process construction and fermentation optimization for butyrate production from lactate [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2016, 22(5): 865 - 871 (in Chinese).
- [16] 吉芳英, 杨勇光, 万小军, 等. 碳源种类对反硝化除磷系统运行状态的影响[J]. 中国给水排水, 2010, 26(15): 5 - 9.
- JI Fangying, YANG Yongguang, WAN Xiaojun, et al. Effects of carbon source types on operation of denitrifying phosphorus removal system [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(15): 5 - 9 (in Chinese).
- [17] ZHAO J W, WANG D B, LI X M, et al. Free nitrous acid serving as a pretreatment method for alkaline fermentation to enhance short-chain fatty acid production from waste activated sludge [J]. Water Research, 2015, 78: 111 - 120.
- [18] LIU X R, HE D D, WU Y X, et al. Freezing in the presence of nitrite pretreatment enhances hydrogen production from dark fermentation of waste activated sludge [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119305.
- [19] DUAN H R, GAO S H, LI X, et al. Improving wastewater management using free nitrous acid (FNA) [J]. Water Research, 2020, 171: 115382.
- [20] YUAN Y Y, HU X Y, CHEN H B, et al. Advances in enhanced volatile fatty acid production from anaerobic fermentation of waste activated sludge [J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133741.
- 作者简介: 柯水洲 (1964 -), 男, 湖北鄂州人, 硕士, 教授, 主要研究方向为给水与废水处理技术、给排水系统优化。
- E-mail: ksz@hnu.edu.cn
- 收稿日期: 2020 - 07 - 07
- 修回日期: 2020 - 08 - 18

(编辑: 刘贵春)

做好水文监测分析预报, 保障国家水安全