

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.13.013

橙皮精油对橙渣与剩余污泥厌氧共消化的毒性分析

陈 刚¹, 陈思远¹, 肖向哲¹, 庞福静¹, 康月红¹, 董姗燕^{1,2}, 刘祖文^{1,2}

(1. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 赣江流域水质安全保障
工程技术研究中心, 江西 赣州 341000)

摘 要: 为了探究橙皮精油(EO)对橙渣与剩余污泥厌氧共消化系统的毒性,通过改变共消化底物中 EO 含量,研究其对厌氧共消化系统比产甲烷活性的影响及毒性抑制作用。结果表明,当 EO 为 550 和 750 mg/kg 时,其对厌氧发酵系统具有一定的促进作用,累积产气量较对照组分别提高了 16.8% 和 21.1%;当 EO 为 950 和 1 150 mg/kg 时,厌氧共消化系统分别受到轻度抑制和中度抑制,其累积产气量较对照组分别降低了 39.1% 和 49.9%;当 EO 为 1 350 mg/kg 时,厌氧共消化系统受到严重抑制,比产甲烷活性比对照组降低了 98.4%,产气量几乎为 0。毒性恢复实验表明,高含量 EO(1 150 和 1 350 mg/kg)对厌氧共消化系统的微生物产生了生理毒素,辅酶 F_{420} 含量显著降低,导致系统产甲烷活性受到严重抑制。

关键词: 橙皮精油; 厌氧共消化; 比产甲烷活性; 毒性

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)13-0077-06

Toxicity of Orange Peel Essential Oil to Anaerobic Co-digestion of Orange Residue and Excess Sludge

CHEN Gang¹, CHEN Si-yuan¹, XIAO Xiang-zhe¹, PANG Fu-jing¹, KANG Yue-hong¹,
DONG Shan-yan^{1,2}, LIU Zu-wen^{1,2}

(1. School of Civil and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. Research Center for Water Quality Security Technology at Ganjiang River Basin, Ganzhou 341000, China)

Abstract: In order to investigate orange residue essential oil (EO) toxicity to orange residue and excess sludge anaerobic co-digestion system, effect of EO on specific methanogenic activity and toxicity inhibition of the anaerobic co-digestion system was explored by changing EO content in the co-digestion substrate. When EO content was 550 mg/kg and 750 mg/kg in the toxicity tests, it had certain promoting effect on the anaerobic fermentation system, and the cumulative gas yield was increased by 16.8% and 21.1% compared with that of the control group. When EO content was 950 mg/kg and 1 150 mg/kg, the anaerobic co-digestion system was slightly and moderately inhibited, and its cumulative gas yield decreased by 39.1% and 49.9% compared with that of the control group, respectively. When EO content was 1 350 mg/kg, the anaerobic co-digestion system was seriously inhibited, and the specific methanogenic activity decreased by 98.4% compared with that of the control group, and the gas yield

was close to zero. Toxicity recovery experiment showed that high EO content (1 150 mg/kg, 1 350 mg/kg) produced certain physiological toxins to microorganisms in the anaerobic co-digestion system and coenzyme F_{420} content was significantly decreased. As a result, the methanogenic activity of the system was severely inhibited.

Key words: orange peel essential oil; anaerobic co-digestion; specific methanogenic activity; toxicity

我国每年产生约 500×10^4 t 柑橘皮渣,其中除小部分用来提取胶质和用作饲料添加剂等用途外,绝大多数皮渣被随意丢弃或填埋处理^[1]。脐橙废渣主要来自橙汁加工业,少数来源于因商业原因或生产限制而丢弃的水果,其酸性较强,容易引起霉变发臭和污染环境。然而,脐橙皮渣有机质含量高,且含有丰富的橙皮精油(EO)。王强等^[2]检测发现,赣南脐橙中3个品种(纽荷尔、朋娜、华盛顿)果皮的精油得率在0.75%~1.05%之间,精油中柠檬烯的含量为92%~93%。

据报道,柑橘皮渣中挥发性固体占总固体的比例在90%以上^[3],柑橘皮渣适宜厌氧发酵生物处理^[4]。近年来,利用多种有机固废进行共消化已成为厌氧发酵技术研究的热点之一^[5-6]。虽然有机固废共消化能有效促进挥发性脂肪酸(VFA)或甲烷(CH_4)等能源物质的产生,但底物中一些有害物质或中间代谢产物(如卤代化合物、酚类化合物、果蔬精油等)极易破坏厌氧系统的稳定性,并在一定程度上抑制厌氧发酵^[7]。相关研究表明,柠檬烯(EO的主要成分)具有抑制柑橘废弃物厌氧发酵作用^[8-9]。Ruiz等^[10]首先以沼液为接种物,得到柠檬烯的半抑制量 IC_{50} 为423 mg/kg;再以第一批发酵液为接种物,得到柠檬烯半抑制量 IC_{50} 为669 mg/kg。Demetrio等人^[11]研究了柑橘废弃物的半连续中温厌氧消化性能,结果表明,当有机负荷为1.0 gVS/(L·d)、EO浓度为47.6 mg/(L·d)时,甲烷日产

量最高;当有机负荷为1.98 gVS/(L·d)、EO浓度为88.1 mg/(L·d)时,厌氧消化过程受到部分抑制;当有机负荷为2.5 gVS/(L·d)、EO浓度为111.2 mg/(L·d)时,厌氧消化过程受到完全抑制。

目前,关于橙皮精油的厌氧共消化作用及其厌氧毒性研究鲜有报道。与此同时,大量剩余污泥的处理和处置成为污水处理厂面临的棘手问题。因此,笔者研究了不同橙皮精油浓度对橙渣与剩余污泥厌氧共消化及其毒性的影响,以期为后续橙渣与污泥厌氧发酵产酸提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用橙为产自江西省赣南地区的纽荷尔脐橙。将橙皮与已榨汁后的果肉残渣充分混合粉碎,然后加入等质量的蒸馏水稀释成浆液,再采用一定量70%的乙醇去除橙渣中的精油^[12],封装保存于4℃冰箱备用。剩余污泥取自赣州某污水处理厂浓缩池,经孔径1 mm筛网过滤,静沉24 h后弃去上清液,保存于4℃冰箱备用;接种污泥采用经实验室厌氧培养后的污水厂剩余污泥。橙皮精油购于吉安市惜缘香料油有限公司,其质量分数为95%。橙渣、去精油橙渣、种泥、剩余污泥及其混合底物的相关参数见表1。由表1可知,橙渣呈强酸性,有机质含量高达95%,精油含量为1.67 g/kg;橙渣与污泥混合后pH值呈中性,与剩余污泥相比,其TCOD和SCOD含量显著增加,可以有效促进产酸发酵过程。

表1 实验材料基本特性

Tab.1 Parameters of experimental material

项 目	橙渣	去精油橙渣	接种物泥	剩余污泥	混合底物
pH值	3.40	3.50	6.76	7.02	6.90
含水率/%	98.30	98.50	91.70	97.10	96.60
TSS/(g·L ⁻¹)	21.63	21.18	90.51	29.07	34.50
VSS/(g·L ⁻¹)	20.53	19.63	37.10	19.10	20.00
TCOD/(mg·L ⁻¹)	46 000.00	38 000.00	44 800.00	19 733.33	38 046.33
SCOD/(mg·L ⁻¹)	26 500.00	24 000.00	23 786.00	133.33	13 600.00
EO/(g·kg ⁻¹)	1.67	0.02	—	—	—

1.2 实验方法

1.2.1 厌氧毒性实验

取6个500 mL厌氧瓶,每个厌氧瓶中加入相同的混合底物(50 mL厌氧种泥、50 mL去精油橙渣和400 mL剩余污泥);然后,向6个厌氧瓶中加入一定量95%的橙皮精油,使受试样的精油含量分别为0、550、750、950、1 150和1 350 mg/kg(编号分别为0[#]、1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]),再用2 mol/L的NaOH溶液调节pH值至7左右;摇匀厌氧瓶,充氮气2 min,置于RSA PF-4000呼吸仪上进行厌氧消化。实验开始后,保持35℃恒温水浴,每12 h搅拌一次(转速为120 r/min),每1 h自动检测一次厌氧产气量(气体过滤装置中的吸收剂由固体CaSO₄和固体KOH按质量比为1:1混合而成)。厌氧发酵过程中,每日从厌氧瓶中取80 mL消化液分析pH值和SCOD的变化情况,然后再补加80 mL原混合底物,充氮气2 min;每两日检测一次EO含量。

1.2.2 产甲烷毒性恢复实验

在产甲烷毒性实验完成后,待各体系中污泥完全沉淀,弃去上清液,用无氧蒸馏水置换残余发酵液3次,然后在各体系中加入与产甲烷毒性测定实验中空白样相同浓度和相同体积的厌氧底物,充氮脱氧后开始实验(实验温度、搅拌速度同厌氧毒性实验)。实验过程中,检测各体系不同时间段的累积产气量和辅酶F₄₂₀含量。

1.3 检测项目及方法

实验中pH值采用雷磁PHS-3C pH计测定,SCOD采用重铬酸钾密闭消解法测定,TSS和VSS均采用差重法测定,CH₄累积产量采用RSA PF-4000呼吸仪自动检测,橙皮精油采用蒸馏滴定法测定^[13],辅酶F₄₂₀采用紫外分光光度法测定^[14]。

为了分析橙皮精油对厌氧消化系统的抑制程度,引入比产甲烷活性(λ)和产甲烷相对活性(RA)两个指标,二者均能间接反映毒物对厌氧系统的抑制程度^[15],计算公式如下:

$$\lambda = \frac{1\,000R}{V \cdot VSS} \quad (1)$$

$$RA = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中: λ 为底物的比产甲烷活性,mL/(gVSS·d);R为最大甲烷产率时的甲烷日累积产量,mL/d;V为反应器中发酵体积,mL;VSS为反应器中底物浓

度,g/L;V₁为某时刻对照组累积产甲烷量,mL;V₂表示同时刻受试组累积产甲烷量,mL。RA作为判断毒物对厌氧消化抑制的指标,当RA为-95%~-75%时,表示厌氧消化系统受到重度抑制;当RA为-75%~-40%时,表示厌氧消化系统受到中度抑制;当-40%<RA<0时,表示厌氧消化系统受到轻度抑制。

2 结果与讨论

2.1 厌氧毒性实验

2.1.1 EO含量对pH值和SCOD的影响

图1为厌氧共消化过程中pH值的变化。厌氧共消化过程中,EO含量对各组pH值的影响程度不同。低EO含量(≤ 950 mg/kg)实验组中,pH值呈先逐渐降低后略微升高的趋势,原因可能是厌氧消化前期,低含量EO促进了有机酸类物质的产生,使pH值快速降低,而厌氧消化后期产甲烷菌大量消耗易降解有机酸类物质使pH值逐渐升高。高EO含量实验组(4[#]和5[#])的pH值较低EO含量和空白组的偏高,但总体变化幅度不大,基本在6.2~6.9之间变化,表明高EO含量会抑制产酸发酵过程。

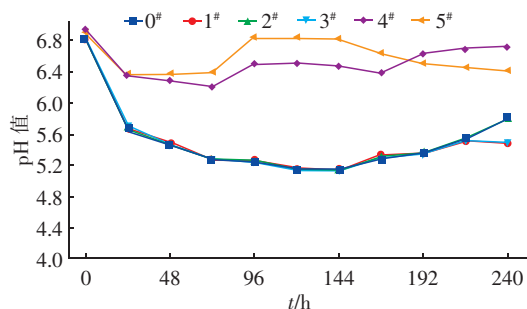


图1 厌氧共消化过程中pH值的变化

Fig.1 Change of pH during anaerobic co-digestion

图2为厌氧共消化过程中SCOD浓度的变化。

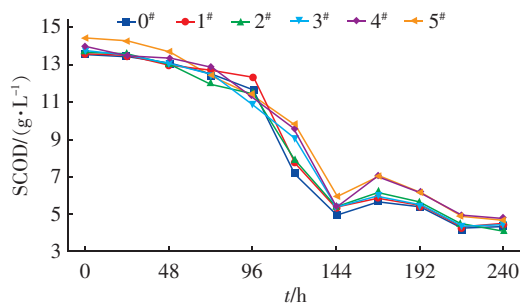


图2 厌氧共消化过程中SCOD浓度的变化

Fig.2 Change of SCOD concentration during anaerobic co-digestion

从图2可知,EO含量对SCOD浓度的影响虽有

差别但总体趋势基本一致。各实验组中,SCOD 浓度总体呈下降并趋于稳定的趋势。由于实验采用半连续式,因此各实验组中 SCOD 的消耗量差异较大。

厌氧共消化过程中 SCOD 的总消耗量($m_{\text{总}}$)为 SCOD 日消耗量之和,按式(3)计算。

$$m_{\text{总}} = \frac{V}{1\,000}(\rho_0 - \rho_1) + \sum_{n=2}^{10} \left(\frac{V'}{1\,000}\rho_{n-1} + \frac{V''}{1\,000}\rho_0 - \frac{V}{1\,000}\rho_n \right) \quad (3)$$

式中, $m_{\text{总}}$ 为 SCOD 总消耗量,mg; ρ_0 为原混合底物初始 SCOD 的浓度,mg/L; ρ_1 为厌氧共消化第1日混合底物的 SCOD 浓度,mg/L; ρ_n 为第 n 日混合底物的 SCOD 浓度,mg/L; ρ_{n-1} 为第 $n-1$ 日混合底物 SCOD 的浓度,mg/L; V 为反应器中发酵物初始体积,mL; V' 为第 $n-1$ 日取样后,厌氧瓶中剩余发酵物体积,mL; V'' 为续加的原混合发酵物体积,mL; n 为厌氧共消化天数,d。

根据式(3),对照组的 SCOD 总消耗量为 4 839.29 mg; $1^{\#}$ ~ $5^{\#}$ 实验组的 SCOD 消耗量依次为 4 612.62、4 655.95、4 562.62、3 273.91 和 3 020.56 mg。EO 含量高的两组($4^{\#}$ 和 $5^{\#}$)SCOD 消耗量较少,表明其对厌氧发酵体系中的微生物产生了一定的抑制作用。Di Pasqua 等^[16]研究表明,在亚致死浓度下,柠檬烯使嗜热甲烷八联球菌细胞膜发生明显变化,进而显现柠檬烯的抗菌作用。柠檬烯易在微生物表面积累,改变或破坏细胞膜的组分构成,达到一定的抑菌效果,进而使其降解基质的能力减弱。

2.1.2 EO 对甲烷产量及厌氧体系活性的影响

图3为厌氧共消化过程中 CH_4 累积产量的变化。可知,除 $5^{\#}$ 外,其他实验组的 CH_4 累积产量在实验初期缓慢上升,至 84 h 左右快速升高,约在 144 h 时 CH_4 累积产量达到最大,最后逐渐趋于稳定。

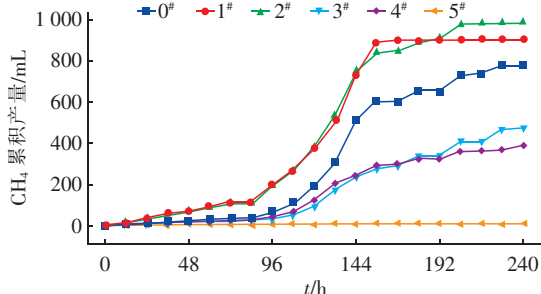


图3 厌氧共消化过程中 CH_4 累积产量的变化

Fig. 3 Change of cumulative CH_4 yield during anaerobic co-digestion

$0^{\#}$ ~ $5^{\#}$ 最大甲烷产率时的比产甲烷活性 λ 值依次为 43.67、69.77、63.93、20.10、19.52 和 0.70 mL/(gVSS · d)。 $1^{\#}$ 和 $2^{\#}$ 实验组的累积产气量高于对照组,在实验终点时分别比对照组高 16.8% 和 21.1%;其最大甲烷产率时的比产甲烷活性 λ 值也相对较高,表明这两组中的混合底物具有较高的产气量。 $3^{\#}$ 和 $4^{\#}$ 实验组的累积产气量低于对照组,在实验终点时分别比对照组降低了 39.1% 和 49.9%;其比产甲烷活性 λ 值分别较对照组降低了 50% 左右。 $5^{\#}$ 实验组的产气量较少。由此可知,低含量 EO 可以促进厌氧发酵过程,产生更多的甲烷,而高含量 EO 对产甲烷过程具有较强的抑制作用,以致其活性完全丧失。本研究与体外瘤胃发酵过程中添加植物精油的研究结果相似^[17-18],即当精油含量适中时,可以改善厌氧发酵过程,提高甲烷产量;当精油含量较高时,产甲烷过程受到抑制。

图4为产甲烷相对活性 RA 值的变化。可以看出,厌氧反应结束时, $1^{\#}$ 、 $2^{\#}$ 实验组 RA 值均高于对照组。在厌氧消化 144 h 时(CH_4 累积产量达到最大), $3^{\#}$ 实验组的 RA 值为 -31.61%,表明厌氧共消化系统受到轻度抑制; $4^{\#}$ 和 $5^{\#}$ 实验组的 RA 值分别为 -52.64% 和 -98.43%,表明厌氧共消化系统分别受到中度抑制和重度抑制。 $4^{\#}$ 实验组中厌氧发酵系统的累积产气量为 387.90 mL,其与对照组的累积产气比约为 0.50,表明在本实验条件下,EO 含量对脐橙废渣与剩余污泥共消化系统具有较强的抑制作用,其半抑制浓度 IC_{50} 为 1 150 mg/kg。

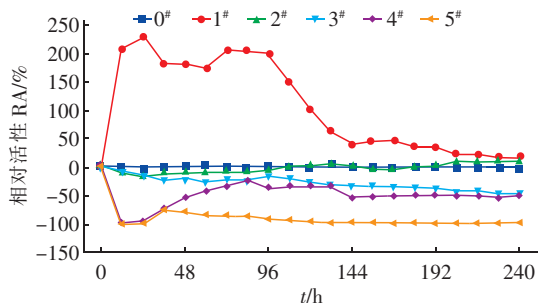


图4 产甲烷相对活性的变化

Fig. 4 Change of relative activity of methane production

2.1.3 EO 的降解性能

图5为橙皮精油含量的变化。可以看出,橙皮精油具有较好的降解性。厌氧消化 48 h 时,EO 快速降解,平均降解率为 94.1%;144 h 时,平均降解率达到 98.2%;反应结束时 EO 基本完全降解。该

结果与 Ruiz 等^[10] 研究结果一致,其采用柑桔皮废渣厌氧消化 72 h 后,EO 降解率达到 95.9%,至 120 h 时 EO 基本完全去除。虽然 EO 在 144 h 时基本降解完全,但对于毒性抑制实验组(3[#]、4[#]、5[#]),其对厌氧混合底物的抑制作用并未减弱,原因可能是初始高含量 EO 改变或破坏了厌氧共消化体系中微生物细胞膜的组分构成,即使 EO 完全降解以后,微生物的活性也并未得到完全恢复。

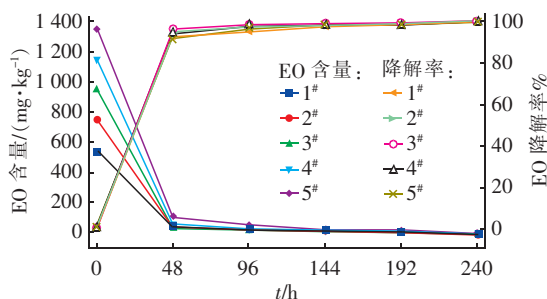


图5 橙皮精油含量的变化

Fig. 5 Change of orange peel essential oil content

2.2 厌氧毒性恢复实验

图6为厌氧毒性恢复过程中CH₄累积产量的变化。可以看出,毒性恢复过程中,1[#]、2[#]、3[#]实验组CH₄累积产量于204 h时趋于稳定,其最终CH₄累积产量分别为405.80、403.11和378.98 mL,与对照组(最终CH₄累积产量为432.19 mL)相差不大,表明这三个实验组的厌氧体系活性基本恢复;4[#]和5[#]实验组中,其最终CH₄累积产量较空白组分别降低了56.3%和61.1%,表明这两个实验组的厌氧体系仅部分恢复活性。Ruiz 等^[10] 研究表明,柑橘皮渣厌氧毒性恢复过程中,柠檬烯为600~2000 mg/kg等实验组的厌氧体系活性均有不同程度的恢复。

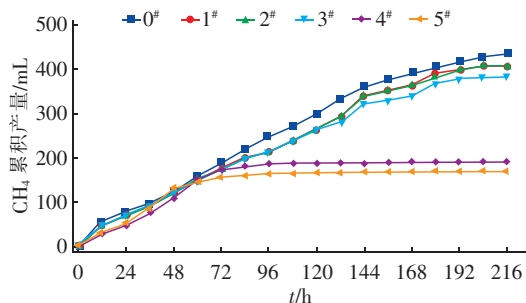


图6 厌氧毒性恢复过程中CH₄累积产量的变化

Fig. 6 Change of cumulative CH₄ yield during anaerobic toxicity recovery

辅酶F₄₂₀含量的高低可以反映厌氧共消化系统

中产甲烷菌活性的强弱,辅酶F₄₂₀含量越高,产甲烷菌活性越强。本研究中,0[#]~5[#]辅酶F₄₂₀的含量分别为0.078、0.077、0.069、0.067、0.061和0.060 μmol/gVSS。可知,厌氧毒性恢复过程中,1[#]、2[#]、3[#]实验组中辅酶F₄₂₀含量与对照组的接近,表明其混合底物中产甲烷菌活性受EO的影响不大;4[#]和5[#]实验组中辅酶F₄₂₀含量分别为对照组的78.2%和76.9%,表明EO对厌氧体系微生物产生了一定的生理毒素^[15],破坏了细胞膜的组分构成,同时降低了酶活性。

3 结论

① 橙皮精油对脐橙废渣与剩余污泥厌氧共消化系统具有明显的影响。低含量EO(550和750 mg/kg)对厌氧发酵系统具有一定的促进作用,其比产甲烷活性分别比对照组提高了60%和46%;高含量EO对厌氧产甲烷过程具有明显的抑制作用,当EO含量为1150和1350 mg/kg时,其比产甲烷活性分别比对照组降低了55.3%和98.4%,厌氧共消化系统分别受到中度抑制和重度抑制。

② 橙皮精油具有良好的降解性,在厌氧消化144 h时降解率达到98.2%。虽然橙皮精油在144 h时基本降解完全,但其对厌氧混合底物的抑制作用并未减弱。当EO含量为1150和1350 mg/kg时,厌氧系统中辅酶F₄₂₀分别比对照组降低了21.8%和23.1%,表明高含量EO对厌氧体系微生物产生了一定的生理毒素,破坏了细胞膜的组分构成,同时降低了酶活性。

参考文献:

- [1] SU H F, TAN F R, XU Y J. Enhancement of biogas and methanization of citrus waste via biodegradation pretreatment and subsequent optimized fermentation[J]. Fuel, 2016, 181: 843–851.
- [2] 王强, 陈金印, 沈勇根, 等. 四个品种赣南脐橙果皮精油提取及挥发性成分分析[J]. 食品工业科技, 2018, 39(15): 228–233.
WANG Qiang, CHEN Jinyin, SHEN Yonggen, et al. Extraction and volatile components analysis of peel oil from four varieties of Gannan navel oranges[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(15): 228–233 (in Chinese).
- [3] BEGONA R, XAVIER F. Effect of limonene on batch anaerobic digestion of citrus peel waste[J]. Biochemical

- Engineering Journal, 2016, 109: 9 – 18.
- [4] 李淑兰, 刘萍, 宋立. 柑橘皮的基本特性及沼气化处理可行性研究[J]. 中国沼气, 2018, 36(3): 64 – 66.
LI Shulan, LIU Ping, SONG Li. The basic characteristics of orange peel and its feasibility for biogas production treatment[J]. China Biogas, 2018, 36(3): 64 – 66 (in Chinese).
- [5] HUANG X D, ZHAO J W, XU Q X, *et al.* Enhanced volatile fatty acids production from waste activated sludge anaerobic fermentation by adding tofu residue [J]. Bioresource Technology, 2019, 274: 430 – 438.
- [6] FELIPPE M D, MAICO C, JUAN C P S R, *et al.* Anaerobic co-digestion of sludge cake from poultry slaughtering wastewater treatment and sweet potato: energy and nutrient recovery [J]. Renewable Energy, 2019, 133: 489 – 499.
- [7] ANTONIO S, JOSER A S L, ARTURO F C, *et al.* Mesophilic anaerobic co-digestion of sewage sludge and orange peel waste [J]. Environmental Technology, 2014, 35(5/8): 898 – 906.
- [8] MIZUKI E, AKAO T, SARUWATARI T. Inhibitory effect of *Citrus unshu* peel on anaerobic digestion [J]. Biological Wastes, 1990, 33(3): 161 – 168.
- [9] SRILATHA H R, NAND K, BABU K S, *et al.* Fungal pretreatment of orange processing waste by solid-state fermentation for improved production of methane [J]. Process Biochemistry, 1995, 30(4): 327 – 331.
- [10] RUIZ B, FLOTATS X. Effect of limonene on batch anaerobic digestion of citrus peel waste [J]. Biochemical Engineering Journal, 2016, 109: 9 – 18.
- [11] DEMETRIO A Z, ADELE F, GIOVANNI Z, *et al.* Anaerobic digestion of orange peel in a semi-continuous pilot plant: an environmentally sound way of citrus waste management in agro-ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2018, 630: 401 – 408.
- [12] RUIZ B, ARMAS A D B, RIVERA J D, *et al.* Assessment of different pre-treatment methods for the removal of limonene in citrus waste and their effect on methane potential and methane production rate [J]. Waste Management and Research, 2016, 34(12): 1249 – 1257.
- [13] 赵其阳, 焦必宁, 付陈梅, 等. 柑桔皮及其果汁中香油含量的蒸馏滴定方法研究 [J]. 中国南方果树, 2006, 35(5): 9 – 11.
- ZHAO Qiyang, JIAO Bining, FU Chenmei, *et al.* Rapid determination of the essential oil content in peel and juices of citrus [J]. South China Fruits, 2006, 35(5): 9 – 11 (in Chinese).
- [14] 赵建伟. 盐度和油脂对餐厨垃圾和剩余污泥厌氧发酵产短链脂肪酸的影响与机理 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
ZHAO Jianwei. Effects and Mechanisms of Salinity, Fat, Oil and Grease (FOG) on Short Chain Fatty Acids Production from Food Waste and Waste Activated Sludge Anaerobic Fermentation [D]. Changsha: Hunan University, 2018 (in Chinese).
- [15] 宋广清, 席宏波, 孙秀梅, 等. 2-丁烯醛生产废水对厌氧生物处理的毒性 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(7): 2021 – 2026.
SONG Guangqing, XI Hongbo, SUN Xiumei, *et al.* Toxicity of crotonaldehyde wastewater to anaerobic biological treatment [J]. China Environmental Science, 2015, 35(7): 2021 – 2026 (in Chinese).
- [16] DI PASQUA R, HOSKIN N, BETTS G, *et al.* Changes in membrane fatty acids composition of microbial cells by addition of thymol, carvacrol, limonene, cinnamaldehyde and eugenol in the growing media [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(7): 2745 – 2749.
- [17] 米热古丽·伊马木, 王恬, 刘敏, 等. 高精料条件下薰衣草精油对体外瘤胃发酵和甲烷产量的影响 [J]. 新疆农业科学, 2012, 49(4): 743 – 747.
MIREGULI Yimamu, WANG Tian, LIU Min, *et al.* Effects of lavender essential oil on the in vitro rumen fermentation and methane emission substrate with high concentrate [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49(4): 743 – 747 (in Chinese).
- [18] PATRA A K, YU Z T. Effects of essential oils on methane production and fermentation by, and abundance and diversity of, rumen microbial populations [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(12): 4271 – 4280.

作者简介: 陈刚 (1994 –), 男, 河南平舆人, 硕士, 主要研究方向为污水生物处理技术。

E-mail: 2642273450@qq.com

收稿日期: 2020-01-28

修回日期: 2020-02-20

(编辑: 任莹莹)