

微细砂含量对模型污泥胞外有机质消化特性的影响

孙相娟¹, 王有晴², 杨 早¹, 翟浩景¹, 董 滨³, 戴晓虎³

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 华东建筑集团股份有限公司 上海建筑科创中心, 上海 200011; 3. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 我国南方地区普遍存在污水厂污泥中微细砂含量高的泥质特征,对污泥厌氧消化性能造成一定影响。采用5组序批式活性污泥法反应器,以人工配水的方式,控制进水微细砂(平均粒径为19.9 μm)含量,培养出不同微细砂含量(2.1%、20.7%、38.3%、44.7%、57.5%)的模型污泥(VS/TS值由86.1%逐渐下降至67.8%、54.8%、40.0%、35.8%),探究微细砂含量对模型污泥基本性质、厌氧消化性能、干燥速率及水分分布特征的影响。结果表明,随着进水微细砂含量的增加,污泥中单位有机质产甲烷量由0.32 m^3/kgVS 逐渐降至0.22 m^3/kgVS ,VS降解率由81.4%逐渐降至62.5%;而模型污泥中单位有机质EPS含量与其厌氧产气及降解特性呈显著相关性,消化污泥干燥速率与自由水、间隙水总量随单位有机质EPS含量变化趋势亦呈现同一规律。在高有机质阶段(VS/TS值>54.8%),污泥的厌氧消化性能与水分分布特征随着有机质含量的下降而降低,在低有机质阶段(VS/TS值 \leq 54.8%),污泥的厌氧消化性能与水分分布特征趋于稳定。相关性分析结果表明,EPS含量的变化是微细砂影响污泥有机质厌氧消化性能和水分分布特征的主因。

关键词: 污泥厌氧消化性能; 微细砂; 胞外有机质; 水分分布

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)17-0084-05

Effects of Fine Sand Content on Extracellular Organic Matter Digestion Performance of Model Sludge

SUN Xiang-juan¹, WANG You-qing², YANG Zao¹, ZHAI Hao-jing¹,
DONG Bin³, DAI Xiao-hu³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Building Science and Technology Innovation Center, East China Construction Group Co. Ltd.,
Shanghai 200011, China; 3. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji
University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The common characteristics of high fine sand content in sewage sludge in southern China have a certain impact on the anaerobic digestion performance of sludge. By adjusting the fine sand (average size of 19.9 μm) content of the influent simulated wastewater in the lab, model sludge with different sand content (2.1%, 20.7%, 38.3%, 44.7% and 57.5%) was obtained in five sets of column bio-reactors. VT/TS ratio of the sludge decreased from 86.1% to 67.8%, 54.8%, 40.0% and 35.8%, respectively. Effects of fine sand content on basic properties, anaerobic digestion performance,

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51578397); 上海市优秀技术带头人项目(17XD1420500); 国家重大研发计划项目(2018YFC1900905)

通信作者: 董滨 E-mail: dongbin@tongji.edu.cn

drying rate and water distribution of the model sludge were investigated. The results showed that methane production per unit organic matter in the sludge gradually decreased from $0.32 \text{ m}^3/\text{kg}$ to $0.22 \text{ m}^3/\text{kg}$ and VS degradation rate decreased from 81.4% to 62.5% with the increase of sludge fine sand content (from 2.1% to 57.5%). The methane yield per unit organic matter and the VS degradation rate were closely and linearly correlated with EPS content per unit organic matter. Profiles of the drying rate of digested sludge and the total amount of free water & interstitial water were the same as those of EPS content per unit organic matter. In the high organic matter stage ($\text{VS}/\text{TS} > 54.8\%$), the anaerobic digestion performance and water distribution characteristics of sludge decreased with the decrease of organic matter content, while they tended to be stable at the low organic matter stage ($\text{VS}/\text{TS} \leq 54.8\%$). The results of correlation analysis showed that the change of EPS content was the main reason for the influence of fine sand on the anaerobic digestibility and water distribution characteristics of the sludge.

Key words: sludge anaerobic digestion performance; fine sand; extracellular organic matter; water distribution

活性污泥法工艺广泛应用于各种市政和工业污(废)水的处理^[1],有研究表明微细砂含量对活性污泥的基本性质有一定的影响。近年来,大部分具有脱氮除磷功能的污水厂出现了活性污泥 MLVSS/MLSS 值大幅下降、各构筑物内泥沙淤积等现象,导致污水处理效果显著下降^[2-3]。有学者认为,进水微细砂粒径越小越易悬浮于污泥混合液中,造成活性污泥浓度增加,并导致混合液 MLVSS/MLSS 值降低,单位质量污泥的活性也随之降低^[4-5]。

剩余污泥是污水处理的副产物,因其产量大、环境风险高、处理与处置费用昂贵等特点而备受关注^[6]。在众多的污泥处理方法中,厌氧消化具有污泥减量、破坏病原微生物、产生沼气、能耗低等优点,有很好的发展前景^[7-8]。但在我国厌氧消化的应用一直受限,因为我国泥质大多存在低有机质、高含砂量的特点,大大影响了污泥能源化处理的经济效率和污泥土地利用的可能性^[9]。为了提高厌氧消化的产气及效率,研究者提出了高含固厌氧消化、两相厌氧消化以及热水解、超声波、碱预处理等方法^[10-12]。这些预处理方法的目的是提高液相中有有机物的溶解,从而使污泥更易于降解^[13]。然而, Kim 等^[14]发现碱预处理和超声波预处理后可溶性组分的增加并不能完全使得厌氧效率提高,这与 Passos 等人^[15]的研究结果相似。研究表明,我国多座污水厂脱水污泥中微细砂含量在 15.2% ~ 52.5% 之间、污泥平均粒径均小于 $60 \mu\text{m}$ ^[16]。污泥中的无机颗粒可能会对厌氧消化的水解过程产生限制,从而导致微细砂含量高的污泥厌氧消化产气性能变弱^[12]。

但从目前的研究进展来看,对于不同微细砂含量剩余污泥的厌氧消化特性尚缺乏系统研究,微细砂含量对厌氧消化产气的影响尚未明晰,其机制也有待探讨。基于此,笔者系统分析了微细砂含量对活性污泥基本性质的影响,包括 MLSS、VS/TS 值及单位有机质 EPS 含量的变化,在此基础上进一步探究微细砂含量对污泥后续厌氧消化产气性能、有机物(VS)降解率、干燥速率、水分分布等的影响,揭示微细砂对污泥厌氧消化特性的影响机制。

1 试验材料与方法

1.1 活性污泥培养装置及方法

平行设置 5 组运行条件相同的 SBR 反应器(见图 1),单个有效容积均为 11 L,运行 3 个周期,每周周期 8 h(3 h 厌氧搅拌、5 h 好氧曝气),控制泥龄为 10 d。反应器启动时接种污泥来自于实验室人工配水培养的活性污泥,初始污泥浓度均为 2500 mg/L 。

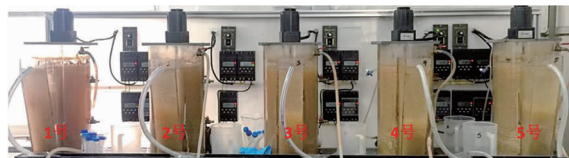


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental device

反应器每日进水为实验室人工配水,进水配方: 0.6 g/L 的葡萄糖、 0.34 g/L 的 NH_4Cl 、 0.04 g/L 的 KH_2PO_4 、 0.4 g/L 的 NaHCO_3 、 0.08 g/L 的 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 0.04 g/L 的 CaCl_2 以及 0.3 mL/L 营养液。营养液配方: 0.45 mg/L 的 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 0.045 mg/L 的 H_3BO_3 、 0.009 mg/L 的 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 0.054 mg/L

的 KI 、 0.036 mg/L 的 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 0.018 mg/L 的 $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 0.036 mg/L 的 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 0.045 mg/L 的 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 3 mg/L 的 EDTA [17]。

在 5 个反应器中随进水投入不同量的二氧化硅颗粒(平均粒径为 $19.9 \mu\text{m}$)以模拟培养出不同微细砂含量的活性污泥系统。为了保证培养的污泥系统的可靠性,反应器均稳定培养超过 3 个泥龄后再开始取样。模型污泥的基本性质如表 1 所示。

表 1 模型污泥的基本性质

Tab. 1 Basic property of model sludge

反应器编号	反应器加砂量/ ($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$)	实测微细砂 含量/%	MLSS/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	VS : TS/ %
1	0	2.1	1 372	86.1
2	1.2	20.7	1 934	67.8
3	2.4	38.3	2 861	54.8
4	3.6	44.7	3 735	40.0
5	4.8	57.5	4 740	35.8

1.2 批次厌氧消化试验装置

批次厌氧消化试验(BMP 试验)采用有效容积为 500 mL 的特质玻璃瓶,在 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$ 下,在摇床中以 150 r/min 的转速进行振荡。厌氧消化产生的沼气(CH_4 和 CO_2)先通过装有 NaOH 溶液及显色剂的集气瓶收集 CO_2 ,再通过气袋收集,收集的 CH_4 气体体积通过 50 mL 的注射器进行测量。

1.3 分析项目及方法

本研究中 TS、VS/TS 值、MLSS 的测定参照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)和美国公共卫生协会(APHA)出版的《水和废水检测方法》(2016 版);污泥总 EPS 的提取采用生物膜透析法 [18-19];污泥中砂的提取方法参考文献 [16];污泥恒温干化速率利用热干燥法分析 [20]。

2 结果与分析

2.1 微细砂含量对污泥厌氧消化性能的影响

不同微细砂含量污泥的 VS/TS 值以及污泥厌氧消化单位有机质产甲烷量、有机物降解率如图 2 所示。可以看出,随着进水微细砂含量的增加,污泥 VS/TS 值呈下降趋势,这说明进水中微细砂已经与活性污泥结合,并培养出不同微细砂含量的模型污泥。污泥厌氧消化单位有机质产甲烷量和 VS 降解率随微细砂含量的变化趋势相似,根据试验结果可将不同微细砂含量的模型污泥分为两个阶段,即高有机质、低含砂量(VS/TS 值 $> 54.8\%$) 为第 1 阶段,低有机质、高含砂量(VS/TS 值 $\leq 54.8\%$) 为第 2

阶段。在第 1 阶段,模型污泥厌氧产气率与 VS 降解率均随微细砂含量的增加而明显降低,2 号污泥较 1 号污泥的单位有机质产甲烷量降低了 18.6% 、VS 降解率降低了 16.8% ;3 号污泥较 2 号污泥的单位有机质产甲烷量降低了 21.8% 、VS 降解率降低了 10.3% 。进入第 2 阶段后模型污泥厌氧产气率与降解率不再随微细砂含量的增加而下降,而是趋于平稳,这表明在低有机质阶段微细砂对于污泥的厌氧消化性能影响减弱。

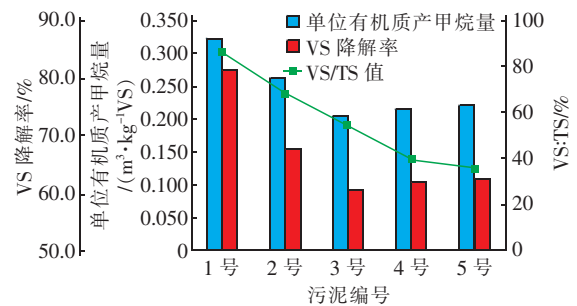


图 2 微细砂含量对污泥厌氧消化性能的影响

Fig. 2 Effect of fine sand content on anaerobic digestion performance of sludge

2.2 微细砂含量对活性污泥中 EPS 含量的影响

微细砂含量对活性污泥中 EPS 含量的影响见图 3。可以看出,模型污泥中单位有机质 EPS 含量随微细砂含量增加的变化趋势与单位有机质产甲烷量和 VS 降解率的变化趋势相类似。分析原因:在第 1 阶段,当模型污泥处于高有机质含量时,微细砂与细胞 EPS 结合生长导致模型污泥的 EPS 含量线性下降。有研究表明,蛋白质是 EPS 的主要成分,可通过静电作用和氢键键合作用与无机颗粒相结合而形成尺寸更大的生物-无机絮体 [12]。少量微细砂与污泥的结合生长导致污泥 EPS 产生包裹效应而更加紧实,从而使得污泥中 EPS 含量下降并且更难以被厌氧生物酶水解利用;在第 2 阶段,污泥微细砂含量较高,进入低有机质泥质状态时,EPS 含量不再随微细砂的增加而下降,主要原因是微细砂含量过高时,EPS 已无法实现包裹生长,主要是将微细砂作为载体而附壁生长,微细砂的增加为相对体积更小的微生物提供了更大的表面积,有利于菌胶团之间的连接,为微生物提供了很好的生长条件,从而导致低有机质、高微细砂含量下模型污泥中 EPS 的含量基本平稳,略有增加。此外,污泥单位有机质产甲烷量、VS 降解率均与单位有机质 EPS 含量呈现明显的正相关, R^2 分别为 $0.922 2$ 和 $0.950 8$ 。随着含

砂量的增加,单位有机质 EPS 含量呈现阶段性变化,在一定程度上导致污泥产甲烷性能也随之改变。这说明 EPS 含量的变化是微细砂影响污泥有机质厌氧消化性能的主要原因。

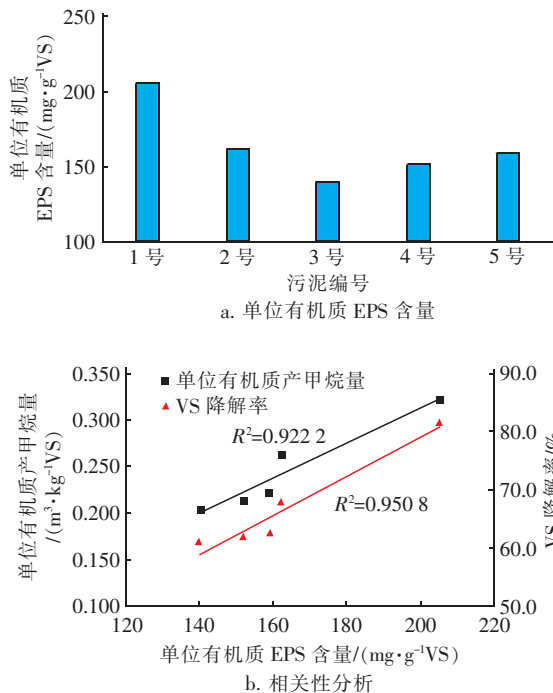


图3 微细砂含量对活性污泥中 EPS 含量的影响

Fig. 3 Effect of fine sand content on EPS content in activated sludge

2.3 微细砂含量对模型污泥水分分布的影响

试验结果还表明,5组污泥经过厌氧消化后干燥速率较厌氧消化前均有所提升,主要差异体现在高含水率(含水率>70%)时,说明厌氧消化可以提高污泥的干燥速率,但提升程度不同,1号~5号污泥厌氧消化前后平均干燥速率差值分别约为850、400、300、200、80 mg/(min·gSS),呈降低的趋势,说明微细砂对厌氧消化提高污泥干燥速率有明显的抑制作用。经厌氧消化后,第1阶段消化污泥(1号和2号)自由水、间隙水总量分别比活性污泥高43.6%和17.3%,进入第2阶段后,3号~5号消化污泥的自由水、间隙水总量分别比活性污泥低8.7%、19.1%、20.3%。说明第1阶段厌氧消化可使表面水向自由水和间隙水转化,但转化的趋势随微细砂含量的增加而减小;第2阶段厌氧消化抑制表面水向自由水、间隙水转化,并随微细砂含量增加而抑制作用趋于平稳。结合图3中单位有机质 EPS 含量变化可以发现,二者随微细砂含量变化趋势类似,说

明污泥中 EPS 含量变化是影响模型污泥水分分布的主要原因。

3 结论

① 随着进水微细砂含量的增加,MLSS 逐渐增加,VS/TS 值逐渐下降,说明进水微细砂的增加导致污泥含砂量的增加。

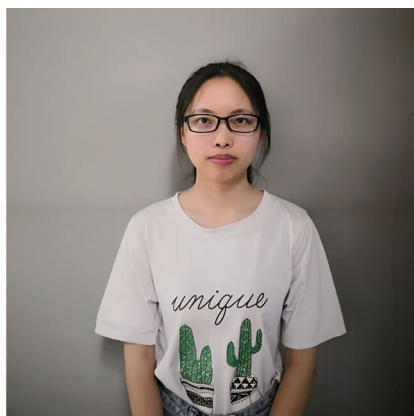
② 单位有机质 EPS 含量、厌氧消化单位有机质产甲烷量、VS 降解率随微细砂含量的增加均呈先减小后趋于平稳的趋势,且单位有机质 EPS 含量与单位有机质产甲烷量、VS 降解率之间线性拟合的 R^2 分别为 0.922 2 和 0.950 8,相关性良好,说明 EPS 含量的变化是微细砂影响污泥有机质厌氧消化性能的主要因素。

③ 消化污泥与活性污泥自由水、间隙水总含量差值随微细砂含量的变化趋势与 EPS 相似,说明 EPS 含量的变化是微细砂影响污泥中水分分布的主要原因。

参考文献:

- [1] Guo W Q, Yang S S, Xiang W S, *et al.* Minimization of excess sludge production by in-situ activated sludge treatment processes—A comprehensive review [J]. *Biotechnology Advances*, 2013, 31(8): 1386–1396.
- [2] 吉芳英, 何小玲, 何莉, 等. 细微泥沙对污水生化处理系统的影响及其归趋特性[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(3): 801–806.
Ji Fangying, He Xiaoling, He Li, *et al.* Effect of fine sediment on wastewater treatment biochemical system and its fate characteristics [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(3): 801–806 (in Chinese).
- [3] He L, Ji F Y, He X L, *et al.* Validation of accumulation models for inorganic suspended solids of different particle size in an activated sludge system [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 149: 51–57.
- [4] 吉芳英, 周卫威, 裴玲, 等. 细微泥沙对活性污泥系统的影响及其恢复特征[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(2): 326–332.
Ji Fangying, Zhou Weiwei, Pei Ling, *et al.* Impacts of fine sediment on activated sludge system and system recovery characteristics [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(2): 326–332 (in Chinese).
- [5] 熊京忠, 来铭笙, 吉芳英, 等. 细微泥沙粒径对 SBR 系统污泥性质的影响[J]. *中国给水排水*, 2015, 31

- (13):37-41.
- Xiong Jingzhong, Lai Mingsheng, Ji Fangying, *et al.* Effect of fine sediment size on sludge properties in SBR system[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(13): 37-41 (in Chinese).
- [6] Zhao Z, Zhang Y, Quan X, *et al.* Evaluation on direct interspecies electron transfer in anaerobic sludge digestion of microbial electrolysis cell [J]. *Bioresour Technol*, 2016, 200:235-244.
- [7] Zhang S, Zhang P, Zhang G, *et al.* Enhancement of anaerobic sludge digestion by high-pressure homogenization [J]. *Bioresour Technol*, 2012, 118:496-501.
- [8] Yang Y, Zhang Y, Li Z, *et al.* Adding granular activated carbon into anaerobic sludge digestion to promote methane production and sludge decomposition [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149:1101-1108.
- [9] 戴晓虎. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J]. *给水排水*, 2012, 38(2):1-5.
- Dai Xiaohu. Current situation and consideration of municipal sludge treatment and disposal in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 38(2):1-5 (in Chinese).
- [10] Xue Y, Liu H, Chen S, *et al.* Effects of thermal hydrolysis on organic matter solubilization and anaerobic digestion of high solid sludge [J]. *Chem Eng J*, 2015, 264:174-180.
- [11] Ruiz-Hernando M, Cabanillas E, Labanda J, *et al.* Ultrasound, thermal and alkali treatments affect extracellular polymeric substances (EPSs) and improve waste activated sludge dewatering [J]. *Process Biochem*, 2015, 50(3):438-446.
- [12] Dai X H, Xu Y, Dong B. Effect of the micron-sized silica particles (MSSP) on biogas conversion of sewage sludge [J]. *Water Res*, 2017, 115:220-228.
- [13] Yang Y, Tsukahara K, Yang R, *et al.* Enhancement on biodegradation and anaerobic digestion efficiency of activated sludge using a dual irradiation process [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(22):10767-10771.
- [14] Kim D H, Cho S K, Lee M K, *et al.* Increased solubilization of excess sludge does not always result in enhanced anaerobic digestion efficiency [J]. *Bioresour Technol*, 2013, 143:660-664.
- [15] Passos F, Carretero J, Ferrer I. Comparing pretreatment methods for improving microalgae anaerobic digestion: Thermal, hydrothermal, microwave and ultrasound [J]. *Chem Eng J*, 2015, 279:667-672.
- [16] 戴晓虎, 赵玉欣, 沙超, 等. 我国污水处理厂污泥含砂特征及成因调研 [J]. *给水排水*, 2014, 40(S1):75-79.
- Dai Xiaohu, Zhao Yuxin, Sha Chao, *et al.* Investigation on the status and causes of sludge sand content of wastewater treatment plants in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2014, 40(S1):75-79 (in Chinese).
- [17] Tsuneda S, Ohno T, Soejima K, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor [J]. *Biochem Eng J*, 2006, 27(3):191-196.
- [18] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *J Biotechnol*, 2002, 95(3):249-256.
- [19] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. *Water Res*, 1996, 30(8):1749-1758.
- [20] 于万. 水处理污泥干燥特性及过程研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- Yu Wan. Research on Drying Characteristics and Process of Sewage Sludge [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011 (in Chinese).



作者简介: 孙相娟 (1998 -), 女, 满族, 黑龙江绥化人, 大学本科, 研究方向为水污染控制。

E-mail: 2578898294@qq.com

收稿日期: 2019-04-12