

温度对生物强化粪便污泥厌氧消化减量及产气特性的影响

宋珍霞^{1,2}, 王里奥^{2*}, 唐海¹, 徐建平¹, 蔡昌凤¹

(1.安徽工程大学生物与化学工程学院, 安徽 芜湖 241000; 2.重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400030)

摘要:以化粪池粪便污泥为对象,研究温度在 25~45 ℃条件下,分别投加 0.01%的有效微生物(EM)和多功能复合微生物制剂(MCMP)对粪便污泥厌氧消化减量及产气特性的影响。结果表明,温度对 EM 和 MCMP 强化粪便污泥厌氧消化挥发性固体(VS)的减量有重要影响,分别投加 0.01%的 EM 和 MCMP 的两试验组的 VS 的去除率均表现为 35 ℃时最好,45 ℃时次之,25 ℃时最差,且各处理间的差异均达到极显著水平($P<0.01$)。经过 20 d 反应,35 ℃时,投加 0.01% EM 的处理(E-T35)的 VS 去除率为 39.04%,分别比 25 ℃(E-T25)和 45 ℃(E-T45)时高 21.57%和 6.90%;投加 0.01% MCMP 的处理(M-T35)的 VS 去除率为 42.04%,分别比 25 ℃(M-T25)和 45 ℃(M-T45)时高 20.16%和 8.59%。至 20 d 反应结束,两试验组各处理累积产气量大小分别表现为 E-T35(14 220 mL·L⁻¹)> E-T45(11 819 mL·L⁻¹)> E-T25(7 607 mL·L⁻¹)、M-T35(17 695 mL·L⁻¹)> M-T45(9 065 mL·L⁻¹)> M-T25(7 430 mL·L⁻¹)。由此可见,EM 和 MCMP 强化粪便垃圾厌氧消化减量并同时提高沼气产量的较佳温度为 35 ℃。

关键词:EM; MCMP; 温度; 粪便污泥; 厌氧消化; 产气特性

中图分类号:S216.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)01-0200-06

Effect of Temperature on Anaerobic Digestion Reduction and Biogas Yield of Septic Tank Nightsoil Sludge by Bioaugmentation

SONG Zhen-xia^{1,2}, WANG Li-ao^{2*}, TANG Hai¹, XU Jian-ping¹, CAI Chang-feng¹

(1. College of Biological and Chemical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The effect of temperature on anaerobic digestion reduction and biogas production of septic tank nightsoil sludge was studied by adding effective microorganisms(EM) or multifunctional compound microorganisms preparation(MCMP). Anaerobic digestion was augmented with the addition of 0.01% dosing of EM and MCMP respectively. Our experimental results indicated that temperature had apparent effect on the removal rate of volatile solid (VS) and biogas production. At 35 ℃, by adding 0.01% EM or 0.01% MCMP, VS had the highest removal rate. At 45 ℃ or 25 ℃, the removal rates of VS were relatively lower compared with that at 35 ℃. The differences among them were statistically significant ($P<0.01$). After 20 days of anaerobic digestion, the removal rate of VS, augmented by adding 0.01% EM at 35 ℃(E-T35) was 39.04%. It was 21.57% and 6.90% higher compared with that at 45 ℃(E-T45) and 25 ℃(E-T25) respectively. For another group of experiments with adding of 0.01% MCMP for augmentation, the removal rate of VS at 35 ℃(M-T35) was 42.04%, which was 20.16% and 8.59% higher compared with that at 45 ℃(M-T45) and 25 ℃(M-T25), respectively. The biogas production of the two experimental groups decreases gradually as following: E-T35(14 220 mL·L⁻¹)> E-T45(11 819 mL·L⁻¹)> E-T25(7 607 mL·L⁻¹) and M-T35(17 695 mL·L⁻¹)> M-T45(9 065 mL·L⁻¹)> M-T25(7 430 mL·L⁻¹), respectively. Our experimental results indicated that the optimum temperature for night soil sludge anaerobic digestion as well as the increasing of biogas production is 35 ℃.

Keywords: EM; MCMP; temperature; septic tank nightsoil; anaerobic digestion; biogas production character.

收稿日期:2011-05-18

基金项目:安徽省高校省级科学研究项目(KJ2011B009);中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(SKLCRSM10KFA05)

作者简介:宋珍霞(1981—),女,博士,主要从事固体废物废弃物处理处置与资源化利用方面的研究。E-mail:songzhenxia211@yahoo.com.cn

* 通讯作者:王里奥 E-mail:wang65111477@yahoo.com.cn

温度是影响厌氧消化的重要因素之一,其主要通过对厌氧微生物细胞内某些酶的活性的影响来影响微生物的生长速率和微生物对基质的代谢速率,从而影响厌氧生物处理工艺中污泥的产量、有机物的去除速率以及反应器所能达到的处理负荷^[1-2];温度还会影响有机物在生化反应中的流向和某些中间产物的形成以及各种物质在水中的溶解度,从而影响到沼气的产量和成分等^[3]。

近年来,国内外学者就温度对厌氧消化的影响进行了大量的研究:吴满昌^[4-5]等研究了温度对城市生活垃圾厌氧消化的影响;赵杰红等^[6]研究了温度对餐厨垃圾厌氧发酵启动时间、甲烷含量及水解和酸化的影响;庞云芝等^[7]研究了温度对玉米秸秆厌氧消化产气量的影响;于晓章等^[8]研究了温度对厌氧嗜热菌群产甲烷能力的影响;Ahning B K 等^[9]研究了高温对厌氧消化反应器的影响。笔者前期研究工作表明,一定量的 EM 和 MCMP 有利于强化粪便污泥的厌氧消化减量^[10]。迄今为止,有关温度对粪便污泥厌氧消化减量的研究在国内外报道尚不多见,尤其是温度对生物强化粪便污泥厌氧消化减量和产气特性的研究更是鲜有报道。本文系统研究了消化温度对 EM 和 MCMP 强化粪便污泥厌氧消化减量和产气特性的影响,以期为实现不同季节化粪池粪便污泥微生物原位减量技术提供一定的理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 化粪池粪便污泥的采集

试验所用化粪池粪便污泥采集于某公厕化粪池。粪便污泥的采集和制备方法参见文献[10],试验所用粪便污泥的基本性状见文献[10]。

1.1.2 EM 和 MCMP 的来源及活化

EM 和 MCMP 的来源及其活化后的基本特性见文献[10]。

1.2 试验方法

采用厌氧消化,比较不同温度条件下投加一定量的 EM 和 MCMP 对粪便污泥减量的影响。所设计的试验温度水平分别为 25、35 ℃和 45 ℃。根据前期研究结果^[10],EM 和 MCMP 的投加量确定为 0.01%(V/V)。试验设定反应周期为 20 d,每 4 d 取样 1 次分析 VS 的变化情况,每 24 h 测量各处理的产气量。为了使取样更具代表性,采样前先摇动发酵瓶使发酵物混合均匀。所有试验均设 3 次平行,取其平均值作为试

验结果。试验温度水平和各处理编号见表 1,装置见文献[10]。

表 1 试验温度水平及处理编号

Table 1 Table of temperature levels and numbering of each treatment

复合微生物制剂	温度条件及处理编号					
	水平 1		水平 2		水平 3	
EM	25 ℃	E-25	35 ℃	E-35	45 ℃	E-45
MCMP	25 ℃	M-25	35 ℃	M-35	45 ℃	M-45

1.3 指标测定方法

VS 采用重量法^[13],气体产量采用排水法测定。各处理数据用 Excel2003 进行统计分析,各处理间 VS 去除率间的差异用 DPS 软件进行方差分析。

2 结果与分析

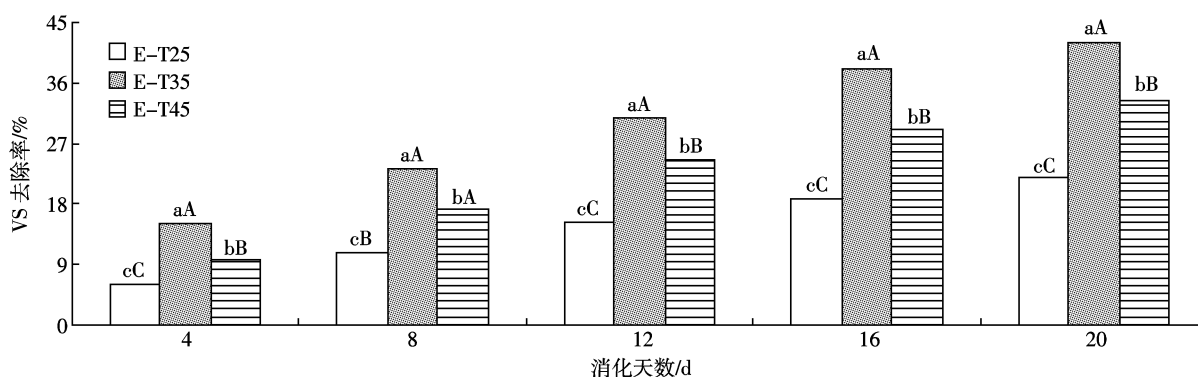
2.1 温度对 EM 和 MCMP 强化粪便污泥厌氧消化减量的影响

微生物生长需要合适的温度,在最优温度范围内其生长活性随温度的升高而提高,超出最优温度范围后,其活性随着温度的升高会降低^[9,14]。温度主要影响厌氧微生物的生长速率以及微生物对有机质的降解速率^[8],而微生物降解的实质是酶促反应。因此,合适的微生物生存和降解温度是保证厌氧消化效率的必要条件。

图 1 反映了在 25、35 ℃和 45 ℃温度条件下,投加 0.01%的 EM 对粪便污泥厌氧消化 VS 减量效果的影响。可以看出,温度对 EM 强化粪便污泥厌氧消化 VS 减量有很大影响。在 20 d 反应过程中,各处理按对 VS 去除率大小排序为 E-T35>E-T45>E-T25。

方差分析及 LSD 法多重比较结果表明,除第 8 d 外,E-T35 的 VS 去除率均极显著高于 E-T25 和 E-T45;在整个反应过程中,E-T45 的 VS 去除率均极显著高于 E-T25。由此说明,EM 菌成为粪便污泥厌氧消化体系优势菌后,在温度为 35 ℃时对 VS 的去除效果最佳;当温度低于 25 ℃或者超过 45 ℃时,EM 菌的酶活力受到抑制,对 VS 的去除效果较差。投加 EM 菌剂厌氧处理粪便污泥的最佳温度为 35 ℃。在实际应用中需要根据环境温度的不同调节 EM 的投加频率,在寒冷的冬季需要适当增加 EM 的投加频次。至 20 d 反应结束,E-T35 的 VS 去除率为 39.04%,分别比 E-T25 和 E-T45 的高 21.57%和 6.90%。

图 2 反映了在 25、35 和 45 ℃温度条件下,投加 0.01%的 MCMP 对粪便污泥厌氧消化 VS 减量随时间



不同大、小写字母分别表示同一时间不同处理间差异达 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平。下同

图 1 不同温度条件下 EM 对粪便污泥厌氧消化 VS 减量效果的影响

Figure 1 Effect of EM on VS reduction of nightsoil sludge anaerobic digestion under different temperatures

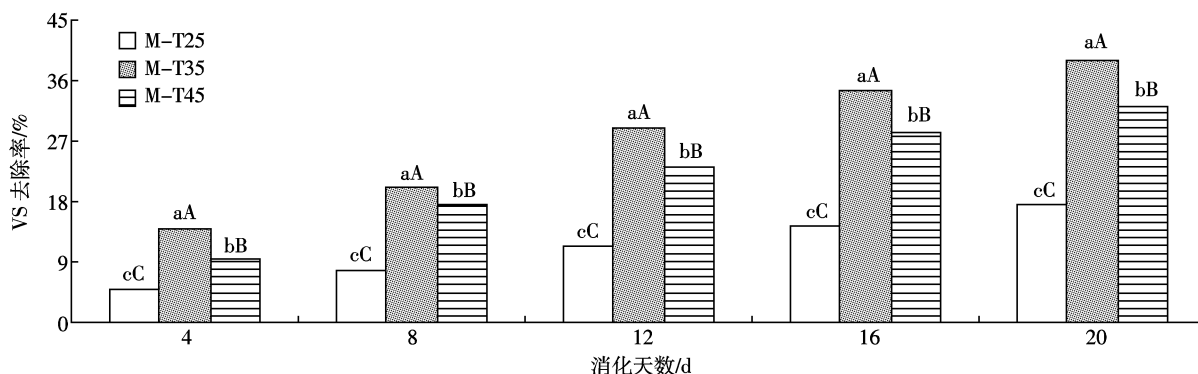


图 2 不同温度条件下 MCMP 对粪便污泥厌氧消化 VS 减量效果的影响

Figure 2 Effect of MCMP on VS reduction of nightsoil sludge anaerobic digestion under different temperatures

变化的影响。可以看出,温度对 MCMP 厌氧处理化粪池粪便污泥 VS 减量效果有重要影响。在 20 d 反应过程中,各处理按对 VS 去除率大小排序为 M-T35>M-T45>M-T25。方差分析结果表明,各处理 VS 去除率间的差异均达到极显著水平。由此可见,在 35 °C 时 MCMP 对粪便污泥厌氧消化 VS 去除效果最好,45 °C 时次之,25 °C 时最差。35 °C 是 MCMP 强化粪便污泥厌氧消化减量最适宜的环境温度,在此温度下 MCMP 能很快得到大量繁殖从而加速粪便污泥中有机质的分解;温度过高或过低均在一定程度上抑制 MCMP 以及粪便污泥中原土著微生物的生长。至 20 d 反应结束,M-T35 的 VS 去除率为 42.04%,分别比 M-T25 和 M-T45 的高 20.16% 和 8.59%。

2.2 温度对 EM 和 MCMP 强化粪便污泥厌氧消化产气规律的影响

一般认为,温度主要影响厌氧微生物的生长速率以及微生物对有机质的代谢速率,从而影响厌氧发酵的产气量^[5,8]。不同原料的厌氧发酵在其最优发酵温度范围内的产气量随着温度的升高而增加,超出最优温

度范围后,其产气量随着温度的升高反而下降。一般来说,甲烷菌适宜的 3 个生长温度范围分别为:高温(50~60 °C)、中温(30~40 °C)和常温(10~30 °C)^[15]。本试验中,在 25 °C 左右是常温甲烷菌起主要作用,而 35 °C 左右是中温甲烷菌起主要作用,25 °C 下各类甲烷菌的活性都较低。

产气速率($\text{mL} \cdot \text{d}^{-1}$)是衡量厌氧反应是否正常最直接的依据^[16]。因为本试验分 5 次取样的缘故,反应器内的理论粪便污泥量不断减少。为了保证产气量计算的准确性,将每日记录的产气量换算为单位体积粪便污泥的日产气速率,以 $\text{mL}(\text{气体}) \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}(\text{粪便污泥})$ 记,简称为 $\text{mL} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$ 。累积产气量以 $\text{mL}(\text{气体}) \cdot \text{L}^{-1}(\text{粪便污泥})$ 记,简称为 $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

不同温度条件下,投加 0.01% 的 EM 的各处理粪便污泥厌氧消化日产气速率和累积产气量变化情况见图 3。从图 3a 可以看出,随着反应的推进,E-T25 和 E-T35 的产气速率表现出先增后减最终趋于稳定的趋势;在反应前期,E-T45 的产气速率一直降低。E-T25、E-T35 和 E-T45 的日产气速率最大值分别出

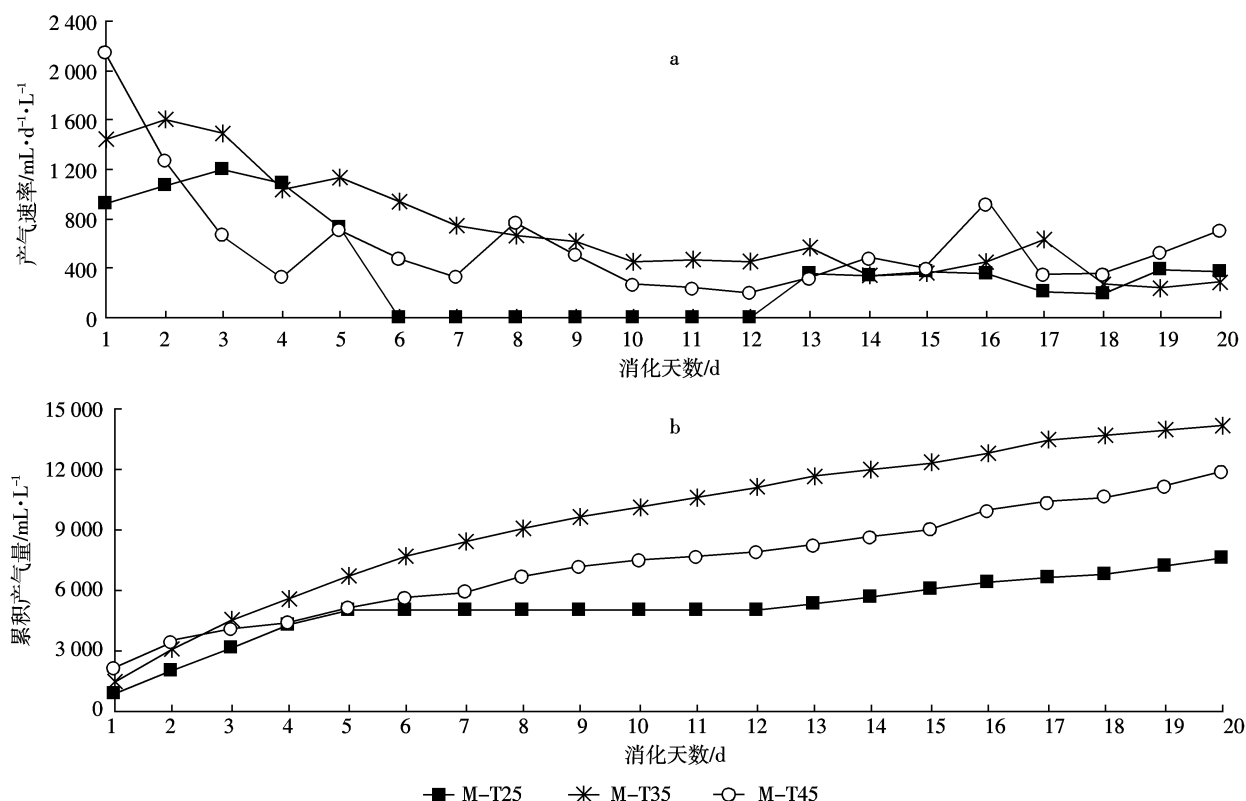


图3 不同温度条件下EM对粪便污泥厌氧消化产气速率和累积产气量的影响

Figure 3 Effect of EM on biogas production rate and cumulative biogas yield of nightsoil sludge anaerobic digestion at different temperatures

现在第3 d、第2 d和第1 d,分别达到1 200、1 603 $\text{mL}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}$ 和2 134 $\text{mL}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在第6~12 d,E-T25基本没有气体产生;从第13 d开始,E-T25又继续产气。究其原因可能是在第6~12 d,E-T25反应器内具有活性的兼性厌氧菌、酸化菌等对温度的变化不像甲烷菌那样敏感^[7];同时,在25℃下甲烷菌的活性较低,产酸速度和产气速度会在一段时间内失去平衡,反应器内出现暂时的产酸速率大于酸转化速率,从而导致一定程度的有机酸抑制,抑制甲烷菌的降解和转化能力^[18],造成短暂的停止产气现象。从图3b可以看出,至20 d反应结束,各处理累积产气量大小表现为:E-T35(14 220 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$)>E-T45(11 819 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$)>E-T25(7 607 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$)。

厌氧发酵周期的长短直接反映了厌氧消化的效率,在实际生产中具有重要的经济意义。一般在实际生产中,以产气量达到总产气量的90%即可认为发酵基本完成,为一个发酵周期^[5,19]。E-T25、E-T35和E-T45的累积产气量达到20 d总产气量90%的时间分别为反应的第18、16 d和第18 d。可见,在35℃条件下,投加0.01%的EM强化粪便污泥的厌氧消化所需的时间相对较短。

不同温度条件下,投加0.01%的MCMP的各处理粪便污泥厌氧消化产气速率和累积产气量变化情况见图4。从图4a可以看出,在前4 d,M-T25的产气速率日变化明显,呈现先增后减的趋势;其产气速率最大值1 472 $\text{mL}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}$ 出现在第3 d。在第5~12 d,M-T25没有气体产生。从第13 d开始,M-T25逐渐恢复产气;其第13~20 d的产气速率日变化不明显,在27~490 $\text{mL}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动。在整个20 d反应时间内,M-T35和M-T45的产气速率均表现为波动中降低的趋势;其产气速率的最大值2 149、1 979 $\text{mL}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}$ 均出现在第1 d。

从图4b可以看出,至20 d反应结束,M-T25、M-T35和M-T45的累积产气量大小表现为M-T35(17 695 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$)>M-T45(9 065 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$)>M-T25(7 430 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$)。M-T25、M-T35和M-T45的累积产气量达到20 d总产气量90%的时间分别为反应的第17、15 d和第19 d。可见,在35℃温度条件下,投加0.01%的MCMP强化粪便污泥厌氧消化所需的时间相对最短25℃时次之,45℃时所需时间最长。

由图3、图4可以看出,在不同发酵温度下,分别投加0.01%的EM和MCMP的两组配比产气速率均

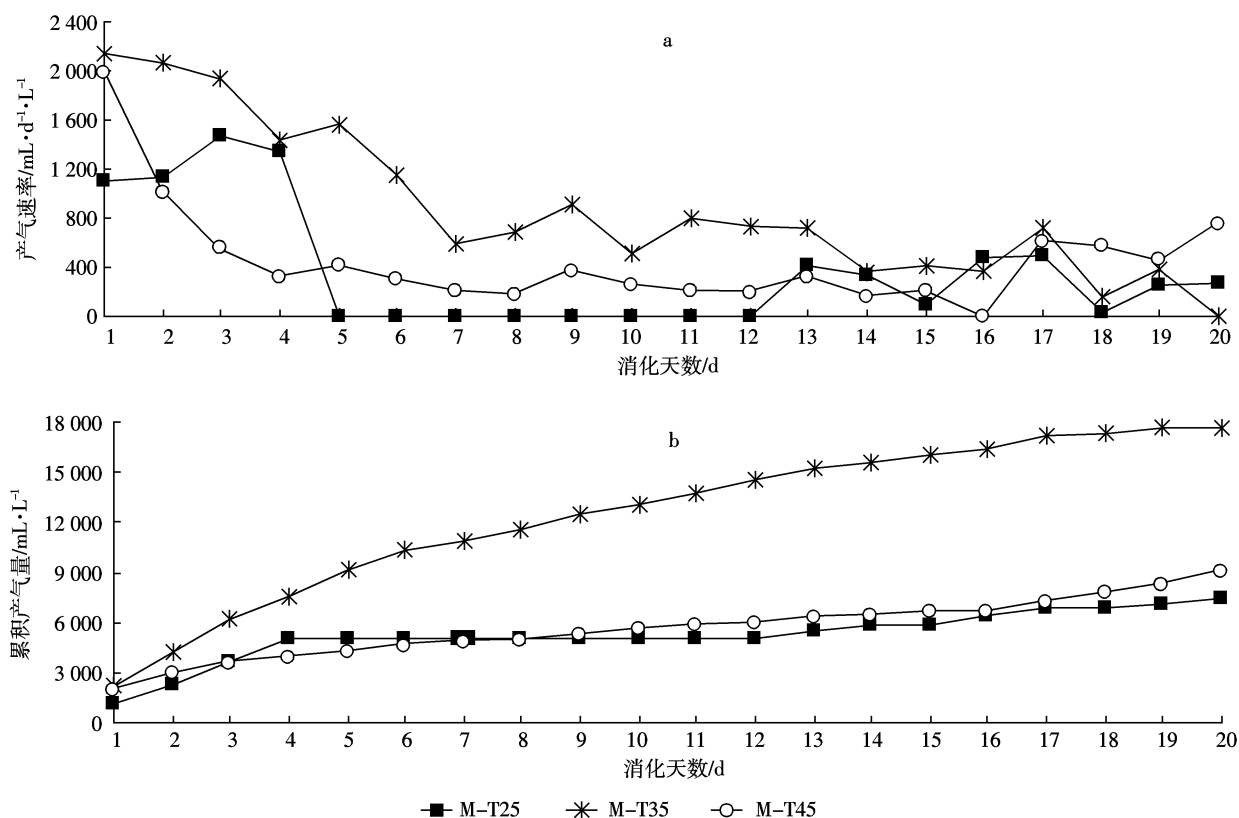


图4 不同温度条件下MCMP对粪便污泥厌氧消化产气速率和累积产气量的影响

Figure 4 Effect of MCMP on biogas production rate and cumulative biogas yield of nightsoil sludge anaerobic digestion at different temperatures

经历了多个波峰;且温度不同,各波峰出现的时间和峰值的大小均有差异。这主要是由于影响厌氧发酵的因素很多,每个因素都可能对发酵过程有影响,由此影响厌氧消化的时间长短,因而单以温度来断定厌氧消化时间的长短是不切合实际的。

3 结论

(1)温度对EM和MCMP强化粪便污泥厌氧消化对VS的减量均有重要影响。分别投加EM和MCMP的两试验组的VS的减量均表现为35℃时最好,45℃时次之,25℃时最差,且各处理间的差异均达到极显著水平。经过20d反应,E-T35的VS去除率为39.04%,分别比E-T25和E-T45的高21.57%和6.90%;M-T35的VS去除率为42.04%,分别比M-T25和M-T45的高20.16%和8.59%。

(2)至20d反应结束,两试验组各处理累积产气量大小表现为E-T35(14220 mL·L⁻¹)>E-T45(11819 mL·L⁻¹)>E-T25(7607 mL·L⁻¹)和M-T35(17695 mL·L⁻¹)>M-T45(9065 mL·L⁻¹)>M-T25(7430 mL·L⁻¹)。在35℃条件下,两试验组的累积产气量表现为MCMP(0.01%)>EM(0.01%)。

参考文献:

- [1] 胡纪萃,周孟津,左剑恶. 废水厌氧生物处理理论与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
HU Ji-cui, ZHOU Meng-jin, ZUO Jian-e. Anaerobic biotreatment theory and technology of wastewater[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [2] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1998.
HE Yan-ling. Anaerobic biological treatment of waste water[M]. Beijing: Chinese Light Industry Press, 1998.
- [3] 任南琪,王爱杰. 厌氧生物处理原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
REN Nan-qi, WANG Ai-jie. Principle and technology of anaerobic biotreatment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [4] 吴满昌. 城市有机生活垃圾高温厌氧消化工艺及沼渣综合利用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
WU Man-chang. Technique of organic fractions thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste and comprehensive utilization of biogas residues[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.
- [5] 吴满昌,孙可伟,李如燕,等. 温度对城市生活垃圾厌氧消化的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(5): 683-685.
WU Man-chang, SUN Ke-wei, LI Ru-yan, et al. Influence of temperature on performance of anaerobic digestion for treating municipal solid

- waste[J]. *Ecology & Environment*, 2005, 14(5):683-685.
- [6] 赵杰红, 张波, 蔡伟民. 温度对厨余垃圾两相厌氧消化中水解和酸化过程的影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(8):1682-1686.
- ZHAO Jie-hong, ZHANG Bo, CAI Wei-min. Influence of temperature on hydrolysis and acidogenesis of kitchen wastes in two-phase anaerobic digestion[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(8):1682-1686.
- [7] 庞云芝, 李秀金, 罗庆明. 温度和化学预处理对玉米秸厌氧消化产气量的影响[J]. *生物工程*, 2005, 3(1):37-40.
- PANG Yun-zhi, LI Xiu-jin, LUO Qing-ming. Effect of temperature and chemical pretreatment on anaerobic biogasification of corn stalk[J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2005, 3(1):37-40.
- [8] 于晓章, 彭晓英, 周朴华. 温度对厌氧嗜热菌群产甲烷能力的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2005, 13(4):422-426.
- YU Xiao-zhang, PENG Xiao-ying, ZHOU Pu-hua. Temperature dependency of anaerobic conversion of acetate and propionate by thermophilic inoculum[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science)*, 2005, 13(4):422-426.
- [9] Ahring B K, Ibrahim A A, Mladenovska Z. Effect of temperature increase from 55 °C to 65 °C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure[J]. *Water Research*, 2001(35):2446-2452.
- [10] 黄川, 王里奥, 宋珍霞, 等. 有效微生物和多功能复合微生物制剂生物强化提高化粪池粪便污泥减量效率研究[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(7):1636-1642.
- HUANG Chuan, WANG Li-ao, SONG Zhen-xia, et al. Study on septic tank nightsoil sludge reduction by bioaugmentation of EM and MCMP[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(7):1636-1642.
- [11] 赵嘉平, 唐明, 李堆淑, 等. 有效微生物群(EM)的研究进展[J]. *西北林学院学报*, 2003, 18(3):50-53.
- ZHANG Jia-ping, TANG Ming, LI Dui-shu, et al. Advances on the effective microorganisms[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2003, 18(3):50-53.
- [12] 王敏, 王里奥, 包亮, 等. 多功能微生物制剂用于污泥减量的研究[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(7):16-19.
- WANG Min, WANG Li-ao, BAO Liang, et al. Study on application of Multifunctional Compound Microorganism product for sludge reduction[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(7):16-19.
- [13] 马溪平. 厌氧微生物学与污水处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- MA Xi-ping. *Anaerobic microbiology and wastewater treatment* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [14] 张翠丽, 李铁冰, 卜东升, 等. 牲畜粪便与麦秆混合厌氧发酵的产气量、发酵时间及最优温度[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(8):1817-1822.
- ZHANG Cui-li, LI Yi-bing, BU Dong-sheng, et al. Biogas yield and its relations with the duration and temperature of mixed anaerobic fermentation of livestock dungs and wheat straw[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8):1817-1822.
- [15] 王绍文, 罗志腾, 钱雷. 高浓度有机废水处理技术与工程应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- WANG Shao-wen, LUO Zhi-teng, QIAN Lei, et al. *Treatment technology and engineering application of highly concentrated organic wastewater* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
- [16] 李志东, 李娜, 张勇, 等. 城市污水处理厂剩余污泥厌氧消化试验研究[J]. *水处理技术*, 2007, 33(9):78-83.
- LI Zhi-dong, LI Na, ZHANG Yong, et al. Anaerobic digestion of residual sludge in municipal sewage treatment plant[J]. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(9):78-83.
- [17] 汪德生, 付蕾. 城市污水处理厂剩余污泥中温厌氧消化处理研究[J]. *新疆环境保护*, 2006, 28(4):6-9.
- WANG De-sheng, FU Lei. Study on anaerobic digestion treatment of waste activated sludge[J]. *Environmental Protection of Xinjiang*, 2006, 28(4):6-9.
- [18] 王丽丽, 王忠江, 梁俊爽, 等. 20~30 °C牛粪厌氧发酵产气特性的试验[J]. *东北农业大学学报*, 2006, 37(6):791-795.
- WANG Li-li, WANG Zhong-jiang, LIANG Jun-shuang, et al. Study on anaerobic fermentation of dairy cattle manure at 20~30 °C[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2006, 37(6):791-795.
- [19] 张翠丽, 杨改河, 卜东升, 等. 温度对秸秆厌氧消化产气量及发酵周期影响的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5):2069-2074.
- ZHANG Cui-li, YANG Gai-he, BU Dong-sheng, et al. Effect of temperature on biogas production and fermentation period length from the anaerobic digestion of crop residue[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5):2069-2074.