

苯甲醛对泥炭产生物甲烷的影响研究

郝思雯¹, 马力通^{1,2*}, 成建国^{1,3}

(1. 内蒙古科技大学化学与化工学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 生物煤化工综合利用内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古自治区煤化工与煤炭综合利用重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘要:为改善泥炭生物转化甲烷产率低的现状,探索腐植酸降解产物苯甲醛对泥炭生物甲烷化的影响。以草本泥炭为原料,从其主要成分化学腐植酸的降解产物出发,在泥炭生物甲烷发酵体系中添加不同浓度苯甲醛,解析苯甲醛对日产气量、总产气量、辅酶F₄₂₀、COD、碱度和苯甲醛浓度的影响。结果表明,在50℃发酵温度下厌氧发酵30 d,对照组总产气量为381.8 mL,添加28.27 mmol/L苯甲醛泥炭发酵组总产气量达805.9 mL,与对照组相比增加了111.09%;日产气量最高达到162.8 mL,比同期对照组高152 mL;COD去除率达46.5%,比对照组提高了28.3%。添加腐植酸降解产物苯甲醛有利于促进泥炭甲烷发酵体系有机物降解,促进泥炭生物甲烷转化。

关键词:泥炭;苯甲醛;腐植酸;生物甲烷

中图分类号:TQ536.9

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)06-0119-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.06.025

Effect of benzaldehyde on biomethane production from peat

HAO Si-wen¹, MA Li-tong^{1,2*}, CHENG Jian-guo^{1,3}

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China; 2.Inner Mongolia Engineering Research Center of Comprehensive Utilization of Bio-coal Chemical Industry, Baotou 014010, China; 3.Key Laboratory of Coal Chemical and Coal Comprehensive Utilization, Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014010, China)

Abstract:In order to solve the issue of low methane yield from bio-conversion of peat, the effect of benzaldehyde, which is a product from humic acid degradation, on bio-methanation of peat is explored. Starting from the degradation products of humic acid that is the main chemical components of peat, different concentrations of benzaldehyde are added into the peat bio-methanation fermentation system with meadow peat as raw materials. The effects of benzaldehyde on daily gas production, total gas production, coenzyme F₄₂₀, chemical oxygen demand (COD), alkalinity and benzaldehyde concentration are analyzed. Results show that after anaerobic fermentation has carried out for 30 days at 50℃, the total methane production of blank group is 381.8 mL, while that of the group added with 28.27 mmol·L⁻¹ of benzaldehyde reaches 805.9 mL, representing an increase of 111.09%. Daily methane production of the group added with 28.27 mmol·L⁻¹ of benzaldehyde peaks at 162.8 mL on the 14th day, which is 152 mL higher than the blank group in the same period. COD removal rate reaches 46.5%, an increase of 28.3% than that of the blank group. It proves that the addition of benzaldehyde, the product from humic acid degradation, can promote the degradation of organic matters, which is beneficial to the bio-methanation of peat.

Key words:peat; benzaldehyde; humic acid; biogenic methane

泥炭(Peat)是植物残体在高湿厌氧环境和微生物作用下,未分解部分经过长期积累堆积形成的层状有机矿体^[1],因其含水量高、热值低,主要用作肥料或园艺基质。研究发现,泥炭在厌氧微生物帮助下可直接转化为生物甲烷^[2-3],这是目前泥炭资源转化利用清洁有效的方法之一。

但泥炭甲烷转化存在生物甲烷产量低的问题, SAMBHUNATH^[4]报道这是因为泥炭有机质降解能力差或是泥炭生物甲烷发酵体系内缺少营养物质,或两者兼而有之,结果发现用3% NaOH或8% HCl

处理样品后可以提高泥炭厌氧消化能力。Yavitt等^[5]发现在泥炭甲烷发酵系统中加入H₂和低浓度的乙酸可以增加甲烷产量。Pia K^[6]发现添加甲酸、甲醇、葡萄糖等外源物质可以明显促进泥炭生物甲烷生成。Horn等^[7]报道在原位pH条件下,添加H₂-CO₂、乙醇和1-丙醇均可提高泥炭甲烷发酵甲烷的产率。

直接添加营养物质虽然可以提高甲烷产量,但会增加泥炭生物甲烷化成本,限制泥炭资源的工业转化。泥炭富含腐植酸(Humic Acid, HA),腐植酸

收稿日期:2020-07-27;修回日期:2021-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(21766025);内蒙古自然科学基金项目(2017MS(LH)0210);教育部“春晖计划”合作科研项目(2018042);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY17166);内蒙古科技大学产学研合作培育基金(PY-201507)

作者简介:郝思雯(1993-),女,硕士研究生,研究方向为生物质和低阶煤炭转化,5120140147@bipt.edu.cn;马力通(1979-),男,博士,教授,研究方向为生物质和低阶煤炭转化,通讯联系人,mlt0916@126.com。

是一种具有羰基结构的大分子芳香族聚合物,腐植酸降解产物对甲烷生成过程具有一定影响^[8-9],苯甲醛是其降解产物之一,至今未有腐植酸降解产物苯甲醛对泥炭生物甲烷转化的文献报道。

为提高泥炭甲烷得率,从泥炭化学组成腐植酸降解产物出发,在泥炭生物甲烷发酵体系中添加不同浓度苯甲醛,考察了苯甲醛对日产气量、总产气量、辅酶 F₄₂₀、COD 和碱度的影响以及甲烷发酵过程中苯甲醛浓度变化规律,探讨苯甲醛对泥炭生物甲烷化的影响,为解决泥炭生物甲烷化产量低的难题提供新途径。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

活性污泥购自包头市南郊污水处理厂,经厌氧驯化,储存于 4℃ 冰箱内;草本泥炭购自吉林省敦化市。活性污泥总固体(Total solids, TS)为 12.9%,挥发性固体(Volatile solids, VS)为 7.81%。草本泥炭 TS 和 VS 分别为 92.42% 和 57.48%。

1.2 实验方法

采用全自动甲烷潜力测试系统(AMPTS II),先将 40 g 粉碎至 100 目的草本泥炭和 200 mL 厌氧活性污泥加入发酵瓶中,然后添加不同浓度苯甲醛(0.942、18.85、23.56 mmol/L 和 28.27 mmol/L 苯甲醛分别对应为 Blank、P1、P2、P3、P4 组),调节初始 pH 为 7.0,加蒸馏水至发酵总体积为 400 mL,最后充纯氮气 120 s 驱除氧气提供厌氧环境,发酵温度为 50℃。在反应过程中,搅拌由仪器电机自动控制,搅拌时间为 10 min,时间间隔为 6 h。仪器自动记录日产气量和总产气量,每 3 d 取样测量样品辅酶 F₄₂₀、COD、碱度和苯甲醛浓度,每个苯甲醛浓度进行 3 组平行试验,结果取平均值。

1.3 检测方法

利用 AMPTS II 测定日产气量和总产气量,发酵单元产生的生物甲烷首先通过 NaOH 吸附单元,最后只有 CH₄ 进入气体体积测量单元。利用紫外-可见分光光度计(UV-Vis)测定辅酶 F₄₂₀ 浓度^[10]。利用 ET99731 型 COD/TOC 多参数水质综合测定仪测定 COD 浓度和碱度^[11]。利用 Agilent-1260 infinity 高效液相色谱仪测定苯甲醛浓度^[12]。

2 结果与讨论

2.1 泥炭甲烷发酵体系腐植酸浓度和苯甲醛浓度

在前期实验中发现,在泥炭甲烷发酵体系中添

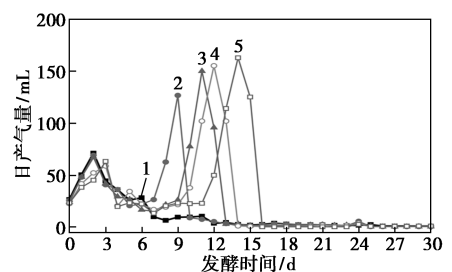
加不同质量泥炭原料进行泥炭生物甲烷发酵,检测发酵过程中腐植酸和苯甲醛浓度峰值变化,如表 1 所示。由表 1 中可以看出,发酵过程中腐植酸浓度峰值随着反应体系中发酵原料泥炭质量增加而上升,达到 17.52~21.12 mmol/L,而苯甲醛峰值随反应体系中发酵原料泥炭质量增加在 66.06~67.57 μmol/L 波动。

表 1 泥炭甲烷发酵体系腐植酸浓度和苯甲醛浓度

泥炭质量/g	苯甲醛浓度/ (μmol·L ⁻¹)	腐植酸浓度/ (μmol·L ⁻¹)
20	17.52	66.06
30	19.98	67.57
40	21.12	67.28

2.2 苯甲醛对泥炭生物甲烷发酵日产气量的影响

苯甲醛对泥炭生物甲烷化日产气量的影响如图 1 所示。由图 1 中可以看出,添加苯甲醛实验组在 7~16 d 陆续进入产气高峰期,且随着苯甲醛浓度的增加,日产气量峰值和产气高峰时间增大。其中 P4 组第 14 d 日产气量最高达 162.9 mL,与同期空白对照组相比增加了 152 mL,高于 P1 组、P2 组和 P3 组日产气量峰值 126.77、150.10 mL 和 155.23 mL,且产气高峰期延长至 4 d,说明添加 28.27 mmol/L 苯甲醛实验组甲烷发酵产气速率加快。因为在泥炭甲烷发酵过程中,苯甲醛大部分转化生成苯甲酸,有利于 CH₄ 生成积累,同时部分苯甲醛被还原为苯甲醇,还原反应促进 CH₄ 转化进程,提升了 CH₄ 生成速率^[13],结果表明,添加苯甲醛有助于提高泥炭甲烷发酵日产气量,促进泥炭生物甲烷转化。



1—Blank; 2—P1; 3—P2; 4—P3; 5—P4

图 1 苯甲醛对泥炭生物甲烷化日产气量的影响

2.3 苯甲醛对泥炭生物甲烷发酵总产气量的影响

苯甲醛对泥炭生物甲烷化总产气量的影响如表 2 所示。添加苯甲醛后,泥炭生物甲烷发酵总产气量随苯甲醛浓度的增加而升高。Blank 组总产气量累计为 381.8 mL,添加苯甲醛后,P4 组总产气量

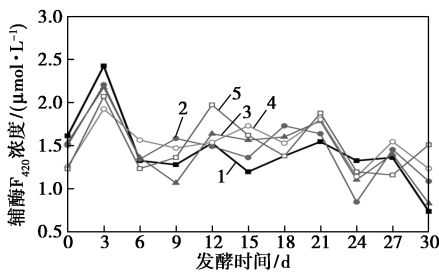
达 805.9 mL, 高于其他发酵组, 比 Blank 组增加了 111.09%, P1、P2 和 P3 组相较于 Blank 组分别提升了 42.6%、78.1% 和 93.2%, 结果表明添加 28.27 mmol/L 苯甲醛可以显著提高甲烷产量。在泥炭生物甲烷化过程中, 苯甲醛逐渐转化为苯甲酸, 苯甲酸通过脱羧 CO_2 生成邻苯二酚, 进一步降解产生丙酮酸和乙酰辅酶 A^[14-15], 丙酮酸和乙酰辅酶 A 可参与 TCA 循环, 有助于增强泥炭生物甲烷发酵体系产甲烷菌活性, 提升总产气量。

表 2 苯甲醛对泥炭生物甲烷化总产气量的影响

组名称	空白	P1	P2	P3	P4
总产气量/mL	381.8	544.3	679.9	737.7	805.9

2.4 苯甲醛对泥炭生物甲烷发酵辅酶 F_{420} 的影响

辅酶 F_{420} 是产甲烷菌特有的酶, 可作为评价产甲烷菌活性的指标^[16]。苯甲醛对泥炭生物甲烷化辅酶 F_{420} 的影响如图 2 所示。由图 2 可以看出, Blank 组辅酶 F_{420} 初始浓度为 1.6 $\mu\text{mol/L}$, 反应初期随着泥炭有机质分解, 泥炭生物甲烷发酵体系产甲烷菌增殖, 辅酶 F_{420} 浓度随之升高, 第 3 d 达到峰值 2.453 $\mu\text{mol/L}$, 随后由于碱度发生波动, 产甲烷菌活性受到抑制, 辅酶 F_{420} 浓度波动下降^[17]。添加苯甲醛后, 辅酶 F_{420} 浓度整体高于 Blank 组, 其中 P4 组辅酶 F_{420} 在 9~21 d 维持在 1.36~1.88 $\mu\text{mol/L}$, 高于其他组, 表明添加 28.27 mmol/L 苯甲醛组产甲烷菌活性最高。实验结果说明添加苯甲醛有利于增强产甲烷菌活性, 从而促进泥炭生物甲烷转化。



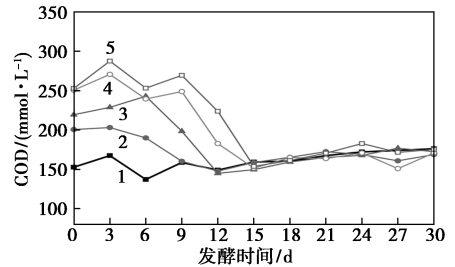
1—Blank; 2—P1; 3—P2; 4—P3; 5—P4

图 2 苯甲醛对泥炭生物甲烷化辅酶 F_{420} 的影响

2.5 苯甲醛对泥炭生物甲烷发酵 COD 的影响

COD 能反映水体中有机物相对含量, 可用作监测泥炭厌氧发酵体系有机物含量的指标^[18-19]。苯甲醛对泥炭生物甲烷化 COD 的影响如图 3 所示。由图 3 中可以看出, COD 均呈先上升后波动下降的趋势, 表明泥炭生物甲烷发酵体系泥炭有机质得到有效降解。Blank 组初始 COD 值为 152.8 mmol/L,

随着泥炭有机质发生分解, 溶解性有机物含量增加, COD 浓度增加, 后期有机物逐渐被消耗转化产生 CH_4 , 导致 COD 浓度下降, Blank 组 COD 去除率为 18.2%。添加苯甲醛后, P4 组 COD 降解程度最高, 第 3 d 到达峰值 269.38 mmol/L, COD 去除率达 46.5%, 比 Blank 组提高了 28.3%, P1、P2 和 P3 组 COD 去除率分别为 27.4%、40.28% 和 44.0%, 添加苯甲醛实验组 COD 去除率均高于 Blank 组, 结果表明添加苯甲醛有助于泥炭甲烷发酵体系中有更多的有机物被降解转化成甲烷, 提高了有机物降解生成甲烷得率, 从而促进泥炭生物甲烷转化。

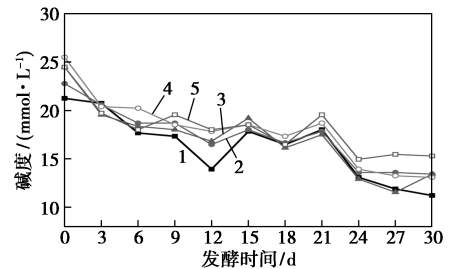


1—Blank; 2—P1; 3—P2; 4—P3; 5—P4

图 3 苯甲醛对泥炭生物甲烷化 COD 的影响

2.6 苯甲醛对泥炭生物甲烷发酵碱度的影响

苯甲醛对泥炭生物甲烷化碱度的影响如图 4 所示。由图 4 中可以看出, 添加苯甲醛实验组碱度整体高于 Blank 组, 且第 12 d Blank 组碱度突然跌至 13.94 mmol/L, 导致日产气量 (见图 1) Blank 组在 12 d 后几乎没有 CH_4 产生, 因为 Blank 组发酵体系的缓冲能力下降, 微生物活性受到抑制, 甲烷发酵产气活动几乎停止, 但在苯甲醛添加组中未出现这种现象, 碱度变化平稳, 其中 P4 组碱度高于其他组, 暗示添加 28.27 mmol/L 苯甲醛组缓冲能力最强。结果表明, 添加苯甲醛有助于增强泥炭甲烷发酵系统的缓冲能力, 降低酸化风险, 保证泥炭生物甲烷化反应的持续进行^[20]。



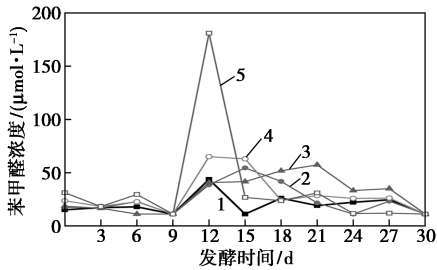
1—Blank; 2—P1; 3—P2; 4—P3; 5—P4

图 4 苯甲醛对泥炭生物甲烷化碱度的影响

2.7 泥炭生物甲烷发酵苯甲醛浓度变化

泥炭生物甲烷发酵过程苯甲醛浓度变化情况如

图 5 所示。由图 5 中可以看出,Blank 组第 12 d 苯甲醛达到最高值 43.80 $\mu\text{mol/L}$ 。添加苯甲醛后,P4 组第 12 d 苯甲醛浓度最高达 181.02 $\mu\text{mol/L}$,明显高于其他组,P4 组添加的高浓度苯甲醛促进了泥炭有机质中腐植酸的降解,使得苯甲醛浓度在发酵中期显著增加,高浓度的苯甲醛转化产生更多的苯甲酸,导致生成更多 CH_4 ^[13],苯甲醛浓度变化趋势与日产气量、总产气量一致。



1—Blank; 2—P1; 3—P2; 4—P3; 5—P4

图 5 泥炭生物甲烷发酵过程苯甲醛浓度变化

2.8 不同添加物对泥炭产生物甲烷影响

不同添加物对泥炭产生物甲烷的作用效果如表 3 所示。由表 3 中可以看出,Amaral 等^[21]发现在泥炭甲烷发酵系统中添加 1 mmol/L MoO_4^{2-} 后甲烷产量比对照组增加了 91.14%,Bridgham 等^[22]报道中加入 2.22 mmol/L 葡萄糖泥炭甲烷发酵产量提高了 47.83%。本文中在泥炭生物甲烷发酵体系中加入 28.27 mmol/L 苯甲醛后,甲烷产量增加了 111.05%,增长幅度高于前述报道。在泥炭甲烷发酵过程中,苯甲醛转化产生苯甲酸,苯甲酸进入 TCA 循环^[15],有助于增强产甲烷菌活性,提高泥炭生物甲烷化的甲烷产量。

表 3 不同添加物对泥炭产生物甲烷的影响

原料	添加物	甲烷产量/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	参考文献
泥炭		0.79	[21]
泥炭	MoO_4^{2-} (1 mmol·L ⁻¹)	1.51	[21]
泥炭		0.23	[22]
泥炭	葡萄糖(2.22 mmol·L ⁻¹)	0.34	[22]
泥炭		1420	本文
泥炭	苯甲醛(28.27 mmol·L ⁻¹)	2997	本文

3 结论

考察了添加不同浓度苯甲醛对泥炭生物甲烷化的影响,结果表明,添加苯甲醛促进泥炭生物甲烷转

化。主要研究结果如下:

(1)添加苯甲醛泥炭甲烷发酵体系产气量显著提高,添加 28.27 mmol/L 苯甲醛后第 14 d 日产气量最高 162.8 mL,总产气量达 805.9 mL,总产气量与空白对照组相比增加了 111.09%。

(2)添加苯甲醛后,辅酶 F_{420} 浓度升高,表明添加苯甲醛有利于增强泥炭甲烷发酵系统产甲烷菌活性,促进泥炭生物甲烷转化。

(3)添加苯甲醛后各组 COD 去除率明显提高,添加 28.27 mmol/L 苯甲醛,COD 去除率达 46.5%,比空白组增加了 28.3%,说明添加苯甲醛有助于泥炭甲烷发酵有机物的降解,提高甲烷产量。

参考文献

- [1] Hayes D J M, Hayes M H B, Leahy J J. Analysis of the lignocellulosic components of peat samples with development of near infrared spectroscopy models for rapid quantitative predictions [J]. Fuel, 2015, 150: 261-268.
- [2] Opara A, Adams D J, Free M L, et al. Microbial production of methane and carbon dioxide from lignite, bituminous coal, and coal waste materials [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 96-97(4): 1-8.
- [3] Alexander T, Sdal T, Tim U, Peter F, et al. Metabolic and trophic interactions modulate methane production by Arctic peat microbiota in response to warming [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(19): 2507-2516.
- [4] Ghosh S, Klass D L. Biomethanation of minnesota reed sedge peat [J]. Resource Recovery and Conservation, 1979, 4(2): 115-139.
- [5] Yavitt J B. Methanogenesis in mclean bog, an acidic peat bog in upstate new york; Stimulation by H_2/CO_2 in the presence of rifampicin, or by low concentrations of acetate [J]. Geomicrobiology Journal, 2004, 21(7): 433-443.
- [6] Pia K W, Marcus A H, Harold L D. Trophic links between fermenters and methanogens in a moderately acidic fen soil [J]. Environmental Microbiology, 2010, 11(6): 1395-1409.
- [7] Horn M A, Matthies C, Kusel K, et al. Hydrogenotrophic methanogenesis by moderately acid-tolerant methanogens of a methane-emitting acidic peat [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(1): 74-83.
- [8] 马力通,刘云颖,董利超,等.苯甲酸对褐煤生物甲烷化的影响 [J]. 煤炭转化, 2019, 42(1): 73-77.
- [9] Al-Faiyz Y S S. CPMAS ^{13}C NMR characterization of humic acids from composted agricultural Saudi waste [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2017, 10(S1): S839-S853.
- [10] 赵阳,李秀芬,堵国成,等.钴及其配合物对产甲烷关键酶的影响 [J]. 水资源保护, 2008, 24(2): 82-85.
- [11] 董利超,马力通,王亚雄.稀土化合物对褐煤产甲烷接种物驯化的影响 [J]. 中国稀土学报, 2020, 38(1): 112-120.

- 338;155-162.
- [11] Ding C, Zhang H, Li X, *et al.* Vanadium flow battery for energy storage: Prospects and challenges [J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2013, 4(8):1281-1294.
- [12] Wei X, Cosimbescu L, Xu W, *et al.* Towards high-performance non-aqueous redox flow electrolyte via ionic modification of active species [J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5:1-7.
- [13] Li L, Kim S, Wang W, *et al.* A Stable vanadium redox-flow battery with high energy density for large-scale energy storage [J]. *Advanced Energy Materials*, 2011, 1(3):1-7.
- [14] Roe S, Menictas C, Skyllas-Kazacos M. A high energy density vanadium redox flow battery with 3M vanadium electrolyte [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2016, 163(1):5023-5028.
- [15] Wei X, Xu W, Vijayakumar M, *et al.* TEMPO-based catholyte for high-energy density nonaqueous redox flow batteries [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(45):7649-7653.
- [16] Wei X, Xu W, Huang J, *et al.* Radical compatibility with nonaqueous electrolytes and its impact on an all-organic redox flow battery [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(30):8684-8687.
- [17] Lin K, Chen Q, Gerhardt M R, *et al.* Alkaline quinone flow battery [J]. *Science*, 2015, 349:1529-1532.
- [18] Janoschka T, Martin N, Martin U, *et al.* An aqueous, polymer-based redox-flow battery using non-corrosive, safe, and low-cost materials [J]. *Nature*, 2015, 527:78-81.
- [19] Wei T S, Fan F Y, Helal A, *et al.* Biphasic electrode suspensions for Li-ion semi-solid flow cells with high energy density, fast charge transport, and low-dissipation flow [J]. *Advanced Energy Materials*, 2015, 5:1500535-1500541.
- [20] Brunini V E, Chiang Y M, Carter W C. Modeling the hydrodynamic and electrochemical efficiency of semi-solid flow batteries [J]. *Electrochim Acta*, 2012, 69:301-307.
- [21] Duduta M, Ho B, Wood V C, *et al.* Semi-solid lithium rechargeable flow battery [J]. *Advanced Energy Materials*, 2011, 1(4):511-516.
- [22] Hamelet S, Larcher D, Dupont L, *et al.* Silicon-based non aqueous anolyte for Li redox-flow batteries [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2013, 160(3):516-520.
- [23] Hamelet S, Tzedakis T, Leriche J B, *et al.* Non-aqueous Li-based redox flow batteries [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2012, 159(8):1360-1367.
- [24] Youssry M, Madec L, Soudan P, *et al.* Non-aqueous carbon black suspensions for lithium-based redox flow batteries: Rheology and simultaneous rheo-electrical behavior [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, 15(34):14476-14486.
- [25] Youssry M, Madec L, Soudan P, *et al.* Formulation of flowable anolyte for redox flow batteries: Rheo-electrical study [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 274:424-431.
- [26] Madec L, Youssry M, Cerbelaud M, *et al.* Surfactant for enhanced rheological, electrical, and electrochemical performance of suspensions for semi-solid redox flow batteries and Supercapacitors [J]. *Chem Plus Chem*, 2015, 80:396-401.
- [27] Xu J, Dou Y, Wei Z, *et al.* Recent progress in graphite intercalation compounds for rechargeable metal (Li, Na, K, Al)-ion batteries [J]. *Advanced Science*, 2017, 4(10):1700146-1700159.
- [28] Moradi B, Botte G G. Recycling of graphite anodes for the next generation of lithium ion batteries [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2016, 46(2):123-148.
- [29] Bonn D, Denn M M. Yield stress fluids slowly yield to analysis [J]. *Science*, 2009, 324(5933):1401-1402. ■

(上接第 122 页)

- [12] 代晓静, 张毓梅, 郑长春, 等. HPLC 法测定苯甲醇注射液中的苯甲醛含量 [J]. *化学分析计量*, 2007, 16(1):70-71.
- [13] Todini O, Pol L H. Anaerobic degradation of benzaldehyde in methanogenic granular sludge: The influence of additional substrates [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1992, 38(3):417-420.
- [14] Lin'kova Y V, Gladchenko M A, Kalyuzhnyi S V, *et al.* Methanogenic degradation of (amino)aromatic compounds by anaerobic microbial communities [J]. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2011, 47(5):507-514.
- [15] Johnson C W, Beckham G T. Aromatic catabolic pathway selection for optimal production of pyruvate and lactate from lignin [J]. *Metabolic Engineering*, 2015, 28:240-247.
- [16] Xi Y, Chang Z, Ye X, *et al.* Methane production from wheat straw with anaerobic sludge by heme supplementation [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 172:91-96.
- [17] 王爱宽, 秦勇. 褐煤本源菌在煤层生物气生成中的微生物学特征 [J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(6):888-893.
- [18] Farno E, Baudez J C, Parthasarathy R, *et al.* Impact of thermal treatment on the rheological properties and composition of waste activated sludge: COD solubilisation as a footprint of rheological changes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 295:39-48.
- [19] 柴阳, 田永兰, 郝和, 等. 磷酸预处理对芦苇秸秆与牛粪混合厌氧发酵的影响 [J]. *现代化工*, 2016, 36(11):86-89.
- [20] Feizi M, Jalali M, Renella G. Available alkalinity and N mineralization are key factors regulating soil pH value of an organically amended Iranian agricultural soil [J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2017, 31(2):140-158.
- [21] Amaral J A, Knowles R. Methane metabolism in a temperate swamp [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, 60(11):3945-3955.
- [22] Bridgman S D, Richardson C J. Mechanisms controlling soil respiration (CO₂ and CH₄) in southern peatlands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(11):1089-1099. ■