

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究 颜金培,陈立奇,林奇,赵淑惠,李磊,朱大勇(2629)

利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 赵仕伟,高晓清(2637)

秋冬季节华北背景地区 PM₁ 污染特征及来源 张周祥,张养梅,张小曳,王亚强,沈小静,孙俊英,周怀刚(2647)

杭州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 吴丹,蔺少龙,杨焕强,杜荣光,夏俊荣,齐冰,刘刚,李凤英,杨孟,盖鑫磊(2656)

青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布 谢丹丹,祁建华,张瑞峰(2667)

西安市重污染与清洁天 PM_{2.5} 组分及其活性氧物质对比 王莹,韩永明,何世恒,张婷,刘随心,曹军骥(2679)

黄山 PM₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源 孟静静,侯战方,张二勋,董杰,刘晓迪,邢继钊,刘加珍(2688)

泉州市大气 PM_{2.5} 镧系元素组成特征及来源解析 张云峰,于瑞莲,胡恭任,孙境蔚,许文质,张棕巍(2698)

西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价 许亚宣,李小敏,于华通,董林艳,赵玉婷,姚懿函,邹广迅,张新民(2707)

G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析 张磷,张祥志,秦玮,茅晶晶,秦艳红,谢卫平,史文科,陈文泰(2718)

四川省 2005~2014 年农业源氨排放清单及分布特征 冯小琼,陈军辉,姜涛,钱骏,叶宏(2728)

长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 鲁君,黄成,胡馨遥,杨强,井宝莉,夏阳,卢滨,唐伟,楼晟荣,陶士康,李莉(2738)

我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定 张秋秋,潘申龄,张昱,杨敏,安伟(2747)

地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析 赵鹏,何江涛,王曼丽,崔亚丰(2754)

胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 张倩,宋金明,彭全材,李学刚,袁华茂,李宁,段雨琴,曲宝晓,王启栋(2763)

桂江流域夏季水-气界面 CO₂ 脱气的空间变化及其影响因素 张陶,李建鸿,蒲俊兵,吴飞红,李丽,袁道先(2773)

都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险 宁增平,肖青相,蓝小龙,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(2784)

太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险 陈政宏,郭敏,徐怀洲,刘丹,程杰,李江,张圣虎,石利利(2793)

洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异 李文章,张莉,王圣瑞,肖尚斌,钱伟斌,席银,许可宸,史玲珑(2801)

阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征 孙清清,陈敬安,王敬富,杨海全,计永雷,兰晨,王箫(2810)

北京市水环境中精神活性物质污染特征 张艳,张婷婷,陈卫平,郭昌胜,花镇东,张远,徐建(2819)

降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响 陈莹,王昭,吴亚刚,赵剑强,杨文娟(2828)

CaO₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用 徐焱,李大鹏,韩菲尔,宋小君,李鑫,周婧,黄勇(2836)

坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征 鲜青松,唐翔宇,朱波(2843)

微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果 陈友媛,吴亚东,孙萍,吴丹(2850)

氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性 王彬斌,林景东,万顺利,何锋(2859)

Pd/Fe⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺 张环,傅敏,魏俊富,王一冰,安慧颖,沈书怡(2868)

针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响 孔殿超,周跃飞,陈天虎,王进,李碧(2875)

污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律 韩慧慧,缪恒峰,张雅晶,陆敏峰,黄振兴,阮文权(2883)

微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水 孙靖云,范梦婕,陈英文,祝社民,沈树宝(2893)

水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用 苏文,陈洁,张胜鹏,孔繁翔(2901)

沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻 蔡小波,郁强强,刘锐,赵远,陈吕军(2910)

K⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能 吴国栋,于德爽,李津,周同,王晓静(2917)

包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 于濛雨,刘毅,田玉斌,石欢,徐富,杨宏(2925)

ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布 李惠娟,彭党聪,陈国燕,姚倩,卓杨,王彬斌(2931)

厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体 李祥,林兴,王凡,袁砚,黄勇,袁怡,毕贞,刘忻,杨朋兵(2941)

基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理 林兴,王凡,袁砚,李祥,黄勇,袁澄伟(2947)

基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 沈庆然,李田,曹熠,潘舆(2953)

罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响 高景峰,孙丽欣,樊晓燕,潘凯玲,李定昌(2961)

不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水 周贵忠,许硕,姚倩,银钗(2972)

CO₂-咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征 王博强,李晨阳,卢伟,樊昊,张冬至,汪治,吕聪,沈福东(2978)

油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应 田冬,高明,黄容,吕盛,徐畅(2988)

模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响 腾昌运,沈建国,王忠,王行,李鸿毅,张志剑(3000)

秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素 杜璨,许晨阳,王强,张帆,马武功,和文祥,侯琳,耿增超(3010)

微生物对汞矿区农田土壤甲基化的影响 贾钦,朱雪梅,王琪,傅海辉,郝亚琼,何洁,杨子良(3020)

施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响 方至萍,廖敏,张楠,吕婷,黄小辉(3028)

BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用 刘伟,孟昭福,任爽,李文斌(3036)

1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 李芬,王训,罗辑,袁巍,喻子恒,商立海(3045)

铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征 朱光旭,肖化云,郭庆军,张忠义,杨曦,孔静(3054)

膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用 周莉娜,蔡函臻,李荣华,王美净,赵军超,王权,张增强(3061)

餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 郭香麟,左剑恶,史绪川,王凯军,李静(3070)

我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 晏卓逸,岳波,高红,李志龙,黄启飞,聂小琴,汪群慧(3078)

甲烷催化还原 NO_x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化 潘华,建艳飞,陈宁娜,刘红霞,何焯,贺亚飞(3085)

《环境科学》征稿简则(2737) 《环境科学》征订启事(2809) 信息(2867, 2971, 3027)

餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比

郭香麟, 左剑恶*, 史绪川, 王凯军, 吴静

(清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 餐厨垃圾与秸秆混合厌氧消化可有效改善两者单独厌氧消化易出现的挥发性脂肪酸积累和木质纤维素难以降解等问题, 并回收生物质能。在中温(35℃)和高温(55℃)条件下, 对餐厨垃圾与秸秆混合厌氧消化进行了序批式试验研究。结果表明, 进料的挥发性固体(VS)浓度为 $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 中温条件下, 物料进料比(VS/VS)为 9:1 时, 单位有机负荷累积甲烷产量达到最高, 为 $272.0 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$; 高温条件下, 进料比为 5:5 时, 单位有机负荷累积甲烷产量达到最高, 为 $402.3 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 分别显著高于两温度条件下餐厨垃圾单独厌氧消化的结果(中温 $218.6 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 高温 $322.0 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$)。高温条件下物料中的碳流向甲烷的比例高于中温, 且两物料混合消化促进碳流向甲烷。高温下木质纤维素总降解率为 34.7%~45.8%, 高于中温的 12.6%~42.2%。利用高通量测序技术检测细菌与古菌的 16S rRNA 基因序列信息和真菌的内转录间隔(ITS)序列信息, 结果表明, 高温下木质纤维素降解细菌和放线菌数量明显高于中温条件, 可解释高温下木质纤维素总降解率更高的原因。

关键词: 餐厨垃圾; 秸秆; 厌氧共消化; 中温; 高温; 碳流向; 纤维素

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-3070-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201612267

Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw

GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e*, SHI Xu-chuan, WANG Kai-jun, WU Jing

(State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The anaerobic co-digestion of food waste and straw is more efficient in avoiding the accumulation of volatile fatty acids and promoting the degradation of lignocellulose in comparison with their individual digestions. The co-digestion of food waste and straw was investigated under mesophilic(35℃) and thermophilic(55℃) condition, respectively. The results indicated that when feeding volatile solid concentration was $3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, the accumulated methane production yield of the mesophilic reactor reached the peak of $272.0 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ at a food waste-to-straw ratio of 9:1, while it reached the peak of $402.3 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ at a food waste-to-straw ratio of 5:5 for thermophilic reactor. These amounts were significantly higher than those of food waste digestion alone ($218.6 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ for mesophilic reactor and $322.0 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ for thermophilic reactor). Co-digestion promoted the rate of carbon transfer to methane, and further, the rate of the thermophilic reactor was higher than that of the mesophilic reactor. Degradation rate for lignocellulose of thermophilic reactor was 34.7%~45.8%, higher than that of mesophilic reactor, 12.6%~42.2%. It was confirmed by 16S rRNA gene sequences of bacteria and archaea, ITS sequences of fungi based on high-throughput sequencing techniques, which showed the amounts of lignocellulose degrading bacteria and actinomycetes in the thermophilic reactor were both higher than those in the mesophilic reactor.

Key words: food waste; straw; anaerobic co-digestion; mesophilic; thermophilic; carbon flow; cellulose

城市生活垃圾和农业垃圾是我国固体废弃物的主要组成部分。据统计,餐厨垃圾约占城市生活垃圾的 37%~62%,年产量超过 6 000 万 t^[1,2];农作物秸秆作为最主要的农业垃圾,年产量达 8 亿 t 以上^[3]。两种垃圾均含有较高有机质成分,其资源化回收利用逐渐受到重视。采用厌氧消化技术处理固体废物可以实现餐厨垃圾与农作物秸秆的资源化利用,减少污染的同时生产沼气作为能源,已被证明是绿色有效的处理手段。

目前,已有较多的研究者对餐厨垃圾与农作物秸秆单独厌氧消化过程进行研究,结果表明,餐厨垃圾单独厌氧消化易导致挥发性脂肪酸(VFA)与氨氮(TAN)的积累,产甲烷菌活性受抑制,系统难以稳定高效运行^[4,5];农作物秸秆含有大量木质纤维

素,结构复杂,不易在厌氧条件下被酶和微生物降解^[6],秸秆直接进行厌氧消化的结果不理想。如果将餐厨垃圾与秸秆以一定比例混合,进行混合厌氧消化,将有利于反应体系的营养均衡,调节物料碳氮比(C/N)达到适宜厌氧消化的范围 20~30,从而提高系统稳定性,实现较高的产甲烷潜力与物料降解率^[7,8]。Yong 等^[5]、周祺等^[9]、蒋滔等^[10]利用餐厨垃圾与小麦秸秆或玉米秸秆进行 35℃ 序批式混合厌氧消化试验,结果表明两种物料混合厌氧消化可明显提高甲烷产量。

收稿日期: 2016-12-30; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC27B01)

作者简介: 郭香麟(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为餐厨垃圾厌氧消化,E-mail: gxl14@mails.tsinghua.edu.cn

* 通信作者,E-mail: jiane.zuo@mail.tsinghua.edu.cn

温度是影响厌氧消化过程的重要因素之一,通常厌氧微生物的最适温度在中温 35 ~ 38℃,高温 55 ~ 60℃ 两个范围内^[11]. 有研究表明^[12, 13],高温厌氧消化有利于提升产甲烷能力,杀灭病原微生物^[14],但同时高温厌氧消化比中温需要更多的能量输入来维持运行条件,高温厌氧微生物对环境变化更敏感,反应体系难以稳定运行^[15, 16].

现有的研究^[17, 18]通常集中于多种物料的中温混合消化,主要关注了混合比例对甲烷(沼气)产率、容积产气率、VFA、氨氮等^[19]运行参数的影响,而对中温与高温条件下餐厨垃圾与秸秆混合厌氧消化过程的碳流向以及木质纤维素降解情况的对比研究关注较少.

本文利用中温和高温序批式厌氧消化反应器处理不同比例的餐厨垃圾-秸秆混合物料,分析了两种温度条件下不同比例餐厨垃圾-秸秆混合厌氧消化过程的碳流向、木质纤维素降解情况以及微生物群

落结构特征.

1 材料与方法

1.1 物料和接种污泥

试验所用餐厨垃圾取自北京某大学食堂,其主要成分为米饭、肉类、豆腐、蔬菜、油脂等,人工除去其中的骨头、塑料、纸张等杂质后用破碎机(JYS-A800)将其破碎至浆状. 餐厨垃圾总固体(TS)含量为(25.94 ± 1.12)%,挥发性固体含量为(24.59 ± 0.84)%. 小麦秸秆取自北方某农田,预处理采用粉碎机(久品中药粉碎机,JP-500C-8)粉碎后过 20 目筛,TS 为(95.94 ± 0.89)%,VS 为(94.91 ± 0.12)%. 两种物料的主要性质见表 1.

中温接种污泥取自某淀粉废水厌氧消化罐,高温接种污泥取自某市政污泥处理厂高温厌氧罐,接种污泥的主要性质见表 2.

表 1 两种物料的主要性质

Table 1 Main properties of materials

物料	C/N	C/%	H/%	O/%	N/%	蛋白质/%	脂肪/%	纤维素/%	半纤维素/%	木质素/%
餐厨垃圾	17.2 ± 1.5	51.1 ± 1.4	7.4 ± 0.7	37.0 ± 1.6	3.4 ± 0.3	15.1 ± 0.8	10.6 ± 0.8	17.7 ± 0.8	21.3 ± 1.2	9.0 ± 0.9
小麦秸秆	42.2 ± 0.9	42.7 ± 1.0	5.7 ± 0.3	36.8 ± 0.9	1.0 ± 0.1	2.7 ± 0.3	1.9 ± 0.1	45.0 ± 2.3	24.6 ± 1.1	23.7 ± 1.8

表 2 接种污泥的主要性质

Table 2 Main properties of sludge

污泥	TS/%	VS/%	纤维素/%	半纤维素/%	木质素/%
中温接种污泥	5.7 ± 0.4	2.6 ± 0.7	3.4 ± 0.5	16.1 ± 1.1	7.9 ± 0.8
高温接种污泥	5.2 ± 0.5	2.4 ± 1.1	2.3 ± 0.9	10.4 ± 0.5	6.8 ± 0.3

1.2 试验设计与反应器运行过程

采用 AMPTS II 全自动甲烷潜力测试系统进行试验研究. 两种温度条件下分别设有 6 组序批式厌氧反应器 M1 ~ M6,每组设 2 个平行. 反应器总容积为 500 mL,接种后体积为 400 mL,反应温度通过恒温水浴锅分别控制在(35 ± 1)℃和(55 ± 1)℃. 系统进行自动搅拌,转速为 60 r·min⁻¹,以转动/停止为 5 min/5 min 的方式交替运行. 系统采用排水法自动记录每日产甲烷量与产甲烷速率.

各反应器以 3 kg·m⁻³为进料 VS 浓度,根据进料浓度确定餐厨垃圾和秸秆进料质量,加水定容至 20 mL 形成进料混合液,以保证进料混合液 TS 基本一致. M1 ~ M5 基于餐厨垃圾与秸秆混合质量比(VS_{FW}: VS_{WS})分别为 10:0、9:1、8:2、5:5 和 0:10, M6 为空白对照(仅加入接种污泥),反应器连续运行 30 d.

1.3 分析测试方法

TS 采用烘干法(105℃)测定;VS 使用马弗炉(600℃)测定;pH 值采用 pH 计测量(PHS-3C);C、H、O、N 元素质量分数采用元素分析仪(SENSE, EDX-1050)测量;纤维素、半纤维素、木质素采用纤维素测定仪(济南盛泰仪器有限公司,ST116)测量;蛋白质和脂肪按照国标方法 GB/T 5009(北京慧龙环科环境仪器有限公司,SZF-068;上海旦鼎国际贸易有限公司,GDYN-200S)测量;化学需氧量(COD)采用快速消解分光光度法(兰州连华环保科技有限公司,5B-1B)测量;餐厨垃圾、秸秆及消化液(干基)的总有机碳(TOC)采用总有机碳分析仪(岛津,TOC-L)测量.

微生物测序试验通过 Illumina MiSeq 测序平台完成,16S rRNA 基因测序针对细菌所用引物为平台的 V3-V4 通用引物 341F 和 806R,针对古菌所用的

引物为平台 V3-V4 通用引物 349F 和 806R, 针对真菌的 ITS 测序所用引物为平台的 ITS1-2 通用引物。

反应器木质纤维素降解率的计算公式如下(以纤维素为例,半纤维素、木质素以及总木质纤维素的计算与此类同):

纤维素降解率 = (进料餐厨干重 × 餐厨纤维素质量分数 + 进料秸秆干重 × 秸秆纤维素质量分数 + 接种污泥干重 × 污泥纤维素质量分数 - 消化液干重 × 消化液纤维素质量分数) / (进料餐厨干重 × 餐厨纤维素质量分数 + 进料秸秆干重 × 秸秆纤维素质量分数 + 接种污泥干重 × 污泥纤维素质量分数) × 100%

2 结果与讨论

2.1 温度及物料混合比例对产气性能的影响

接种污泥经过充足时间的饥饿处理,空白对照组(仅有接种污泥)反应器在 30 d 的试验过程中,中温试验组累积甲烷产量为 1.0 mL,高温试验组累积甲烷产量为 1.6 mL。将每组两个平行反应的产气平均值扣除空白对照组产气作为该组的实际单位 VS 甲烷产量(MPY),结果如图 1(a)和 1(b)所示。采用修正的冈珀茨(Gompertz)模型[式(1)]^[10]预测厌氧消化累积产气,使用 Origin 9.0 进行模型模拟,模拟曲线如图 1(c), 1(d)。

$$M_t = M_{\max} \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{\max} e}{M_{\max}} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (1)$$

式中, M_t 为 t 时刻 MPY 预测值, $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$; M_{\max} 为最终累积 MPY 预测值, $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$; R_{\max} 为单位 VS 最大产甲烷速率, $\text{mL} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$; λ 为延滞期; t 为试验持续时间, d。

中温条件下,物料比为 9:1 时,最大累积 MPY 为 272.0 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$,明显高于其他组的结果;高温条件下,随秸秆添加量增加,累积 MPY 不断提高,物料比为 5:5 时达到峰值 402.3 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

将两物料单独厌氧消化 MPY 按混合比例加权平均,并与混合物料的实际 MPY 相比较,可得出混合消化是否可以提升产甲烷能力。如中温条件下,两物料单独厌氧消化最大累积 MPY 按 9:1 加权平均值为 187.3 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$,仅为两物料 9:1 混合消化最大累积 MPY 的 68.9%。高温条件下情况相同。这说明餐厨垃圾与小麦秸秆共消化过程存在协同作用,提升了物料的产甲烷能力。

模型模拟参数见表 3。中温条件下,两物料的混合厌氧消化与单独厌氧消化相比,可有效缩短延滞期,随秸秆的增加而明显下降。高温条件下,两种物料混合厌氧消化对延滞期无明显影响。秸秆单独消化的反应延滞期在高温条件下更短,说明高温可有

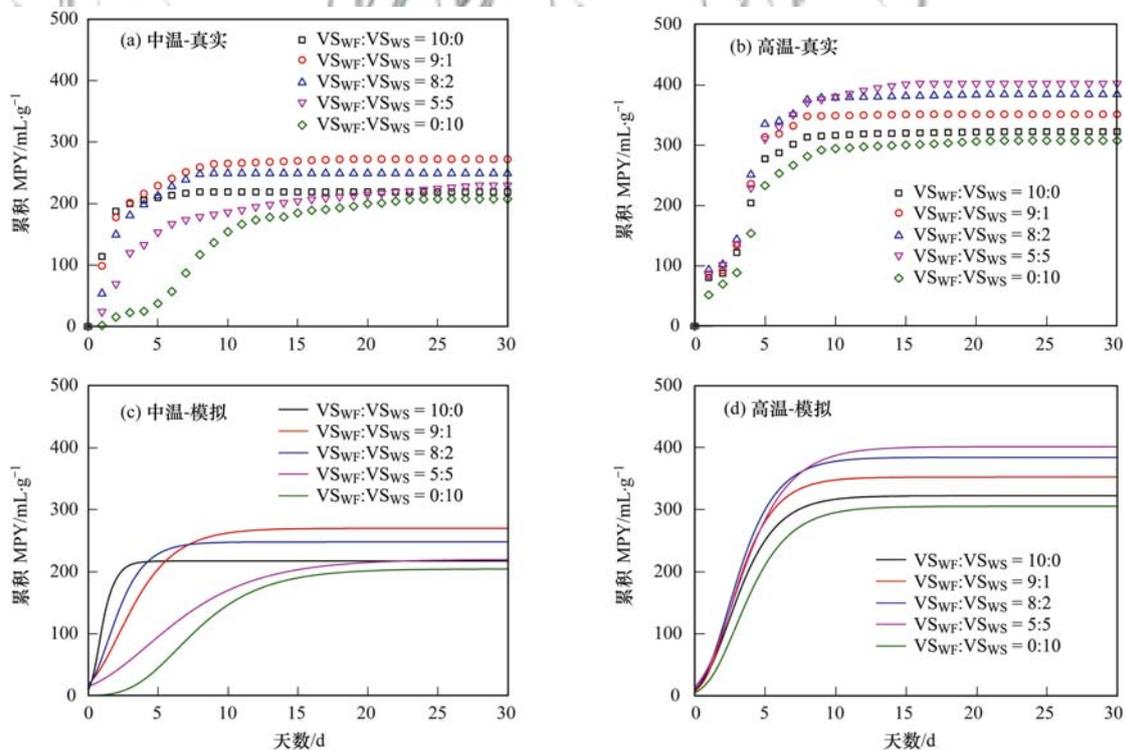


图 1 MPY 累积曲线

Fig. 1 Cumulative curves of MPY

表 3 Gompertz 模型模拟结果

Table 3 Simulation results by Gompertz model

VS _{FW} :VS _{WS}	单位 VS 最大产甲烷速率 R_{\max}		延滞期 λ/d		拟合指数 R^2	
	/mL·(g·d) ⁻¹					
	35℃	55℃	35℃	55℃	35℃	55℃
10:0	125.51	62.70	0.12	0.49	0.9916	0.9813
9:1	45.26	73.68	0	0.62	0.8179	0.9792
8:2	64.80	75.86	0.05	0.53	0.9849	0.9811
5:5	19.05	66.78	0	0.44	0.8047	0.9893
0:10	22.78	53.95	3.07	0.85	0.9946	0.9883

效促进秸秆水解。

2.2 餐厨垃圾与秸秆混合厌氧消化碳流向分析

中温和高温条件下餐厨垃圾与秸秆混合厌氧消化,可能会对物料中碳的流向产生影响。本节重点关注物料中的碳流向甲烷所占比例 η_{CH_4} ,按式(2)计算:

$$\eta_{\text{CH}_4} = \frac{m_{\text{CH}_4\text{-C}}}{m_{\text{TOC,反应前}} - m_{\text{TOC,消化液}}} \quad (2)$$

式中, $m_{\text{CH}_4\text{-C}}$ 表示反应器产生的甲烷中所含碳的质量; $m_{\text{TOC,反应前}}$ 表示反应前体系有机碳质量, $m_{\text{TOC,消化液}}$ 表示反应后体系有机碳质量,二者差值表示反应器

所降解的有机碳质量。由此,可计算得两种温度下各组反应器的 η_{CH_4} ,结果如图 2 所示。可知,高温厌氧消化 η_{CH_4} 明显高于中温厌氧消化,以餐厨垃圾-秸秆 5:5 试验组为例, η_{CH_4} 在高温条件下超过 50%,而在中温条件下不足 35%。

同时还发现,两种物料的混合厌氧消化可提高 η_{CH_4} 。图 2 中空心圆为两种物料单独消化的 η_{CH_4} 按混合比加权平均计算值,实心圆表示的是两种物料在不同混合比例下的实际 η_{CH_4} 。可见,在两种温度条件下,混合厌氧消化的各组试验的实际 η_{CH_4} 较计算值均有提高,而且高温下 η_{CH_4} 的提高更为明显。

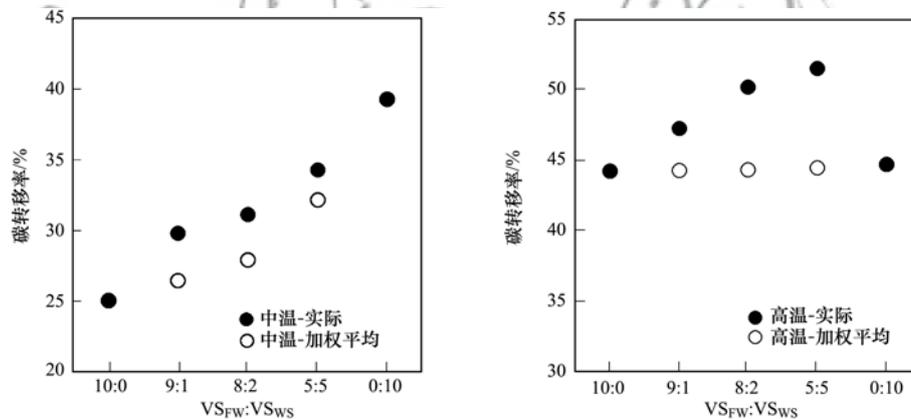
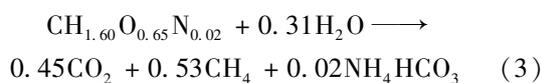


图 2 中温和高温条件下各组反应流向甲烷碳占比

Fig. 2 Rate of carbon transfer to methane in mesophilic and thermophilic reactors

根据餐厨垃圾和秸秆的 C、H、O、N 质量分数(见表 1),可计算得出本文中餐厨垃圾与秸秆的分子式分别为 $\text{CH}_{1.74}\text{O}_{0.54}\text{N}_{0.06}$ 和 $\text{CH}_{1.60}\text{O}_{0.65}\text{N}_{0.02}$ 。以中温及高温秸秆单独厌氧消化(0:10)为例,如果忽略微生物合成所消耗的碳,可列出秸秆产甲烷的化学方程式如下:



由式(3)计算出的秸秆厌氧消化的理论 η_{CH_4} 为 53.0%,而中温及高温条件下实际 η_{CH_4} 分别为 39.3% 和 44.8%,与理论值存在偏差。导致实际与

理论 η_{CH_4} 出现偏差的原因主要有:

(1) 用于微生物合成消耗的有机碳对甲烷产量的影响

1 mol $\text{CH}_{1.60}\text{O}_{0.65}\text{N}_{0.02}$ 的 COD 为 $\left(1 + \frac{1.6}{4} - \frac{0.65}{2} - \frac{0.02 \times 3}{4}\right) \times 32 = 33.9 \text{ g O}_2$, 分解单位 COD 理论产甲烷量(标态)为:

$$\frac{\left(\frac{1}{2} + \frac{1.6}{8} - \frac{0.65}{4} - \frac{0.02 \times 3}{8}\right) \times 22.4}{33.9} = 350.2 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \quad (4)$$

考虑到厌氧菌(试验分子式 $C_5H_9NO_3$ ^[20])合成的实际甲烷产量为:

$$G_1 = 350.2 \times \Delta COD - 1.22 \times 350.2 \times \Delta X \quad (5)$$

1.22 是以厌氧菌($C_5H_9NO_3$)计算的 1 g 有机质折算系数, ΔCOD 是 COD 去除量, ΔX 是厌氧菌增量, $\Delta X = Y \times \Delta COD$, Y 为反应体系内所有微生物增值速率, 假设中温及高温条件下 Y 相等, 均为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ (以 $VSS/\Delta COD$ 计)^[21]. 计算得, 中温及高温考虑微生物合成的甲烷产量分别为 282.2 mL 和 386.2 mL. 即考虑厌氧微生物的合成后, 秸秆的中温及高温厌氧消化的 η_{CH_4} 均为 46.6%.

(2) 甲烷气体在水中溶解度对甲烷产量的影响

在气体分压为 101.325 kPa 时, 35℃ 及 55℃ 下甲烷气体在水中的吸收系数 α (以 CH_4/H_2O 计) 分别为 $2.57 \text{ mL} \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$ 和 $2.04 \text{ mL} \cdot (100 \text{ mL})^{-1}$. 则实际产甲烷量 G_2 可按 [式(6)] 计算:

$$G_2 = G_1 - \alpha V_{H_2O} \quad (6)$$

式中 V_{H_2O} 为反应器基质中水的体积, 近似为 400 mL.

经计算, 中温及高温实际产气分别为 271.91 mL 和 378.07 mL. 即考虑甲烷溶解度影响因素后, 中温及高温处理单位秸秆的 η_{CH_4} 分别为 44.8% 和 45.6%.

此外, 影响实际气体收集体积的其他误差包括气体收集过程中的泄漏、排水法计数过程中的甲烷溶解及仪器误差等. 通过以上计算数据与实际甲烷收集数据推算得出, 中温反应器其他误差约 23 mL, 高温反应器其他误差约 10 mL.

由以上计算, 得出中温和高温下秸秆单独厌氧消化的碳流向如图 3 所示. 从中可见, 中温与高温下, 秸秆中分别有 26.4% 和 35.2% 的有机碳流向甲烷并被收集, 高温下物料降解率和流向甲烷的碳比例明显大于中温. 对其他混合比例试验组做相同计算, 均能得到类似结论. 同时, 碳流向情况随两物料的混合比例变化而发生变化, 有机碳流向甲烷并被收集的比例最大的是中温餐厨垃圾-秸秆 9:1 试验组和高温餐厨垃圾-秸秆 5:5 试验组, 与 2.1 节中的产气结果一致.

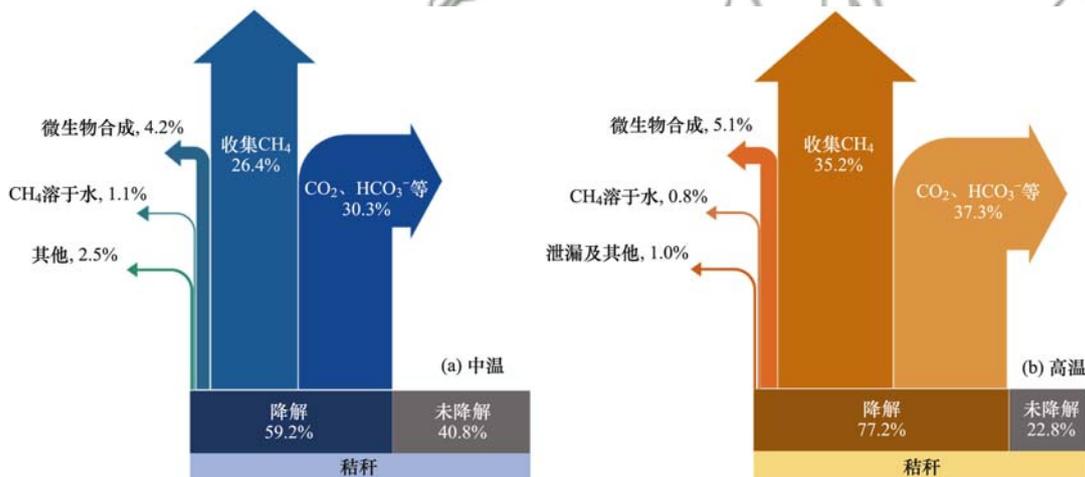


图 3 中温和高温下秸秆单独厌氧消化的碳流向

Fig. 3 Carbon flow of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of straw

2.3 温度及物料混合比例对木质纤维素降解的影响

中、高温各组木质纤维素降解情况如图 4 和图 5 所示, 木质纤维素总降解率随秸秆增加呈先升后降趋势, 浮动范围分别为 12.6% ~ 42.2% 和 34.7% ~ 45.8%. 中温条件下, 物料混合比例为 9:1 时, 木质纤维素降解率达到最大, 为 42.2%; 高温条件下, 物料混合比例为 8:2 及 5:5 时, 木质纤维素降解率达到最大, 为 45.8%.

高温下木质纤维素的总降解率均高于中温, 其中纤维素和半纤维素降解率在秸秆添加量较大时优势明显. 高温下木质素的降解率高于中温, 最大降解率达 25.1%.

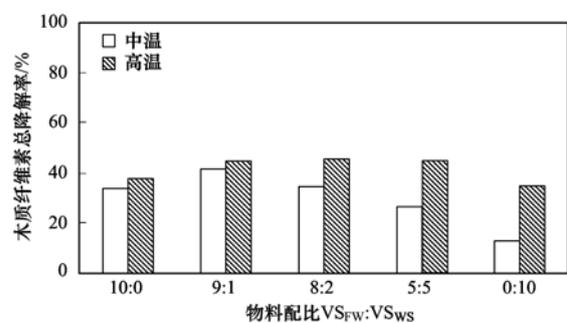


图 4 中温和高温下木质纤维素总降解率

Fig. 4 Degradation of lignocellulose in mesophilic and thermophilic reactors

物理粉碎预处理可在一定程度上破坏天然纤维

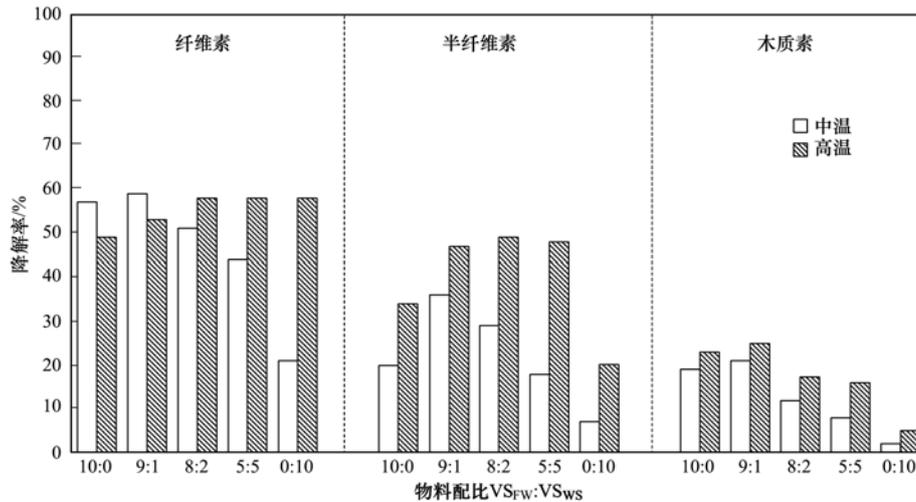


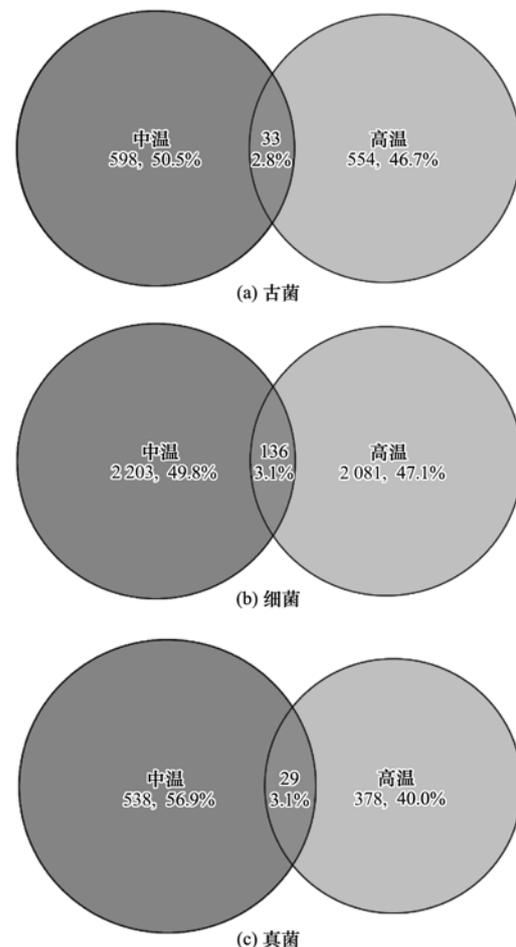
图5 中温和高温下纤维素、半纤维素及木质素降解情况

Fig. 5 Degradation of cellulose, hemicellulose and lignin in mesophilic and thermophilic reactors

素的结构,降低其结晶度,使木质素更易于被微生物降解^[22, 23]. 高温条件下木质纤维素降解率更高的可能原因有:①高温促进氢氧根与秸秆发生碱解和氨解反应,破坏联结木质素与多糖之间的酯键,提高秸秆的消化率^[3];②木质素是由苯丙烷结构单元构成的具有三维空间结构的天然高分子化合物^[24],结构单元有一小部分以游离酚羟基形式存在. 中温条件下乙酸积累量也较高,乙酸可与部分游离酚羟基发生反应生成酯,降低了其亲水性和生物可降解性. 此外,可能的原因是中、高温下的微生物的种群结构的不同.

2.4 温度对厌氧消化系统微生物菌群的影响

为从微生物角度探究两种温度下木质纤维素降解率产生差异的原因,选取中温和高温秸秆单独降解(0:10)试验组为研究对象,利用高通量测序技术检测细菌与古菌的16S rRNA基因序列信息和真菌的内转录间隔(ITS)序列信息. 共检测到了56个门类的细菌(40)、古菌(10)和真菌(6). 其中相对丰度较大的细菌和古菌门类主要有:厚壁菌门 Firmicutes、变形菌门 Proteobacteria、绿弯菌门 Chloroflexi、放线菌门 Actinobacteria、互养菌门 Synergistetes、拟杆菌门 Bacteroidetes 及广古菌门 Euryarchaeota. 两种温度的厌氧体系中真菌主要有子囊菌门 Ascomycota 和担子菌门 Basidiomycota 等. 中温及高温下未确定分类的真菌分别占10.3%和87.9%,说明高温厌氧消化体系中还有相当一部分分类和功能未知的真菌有待研究. 中温和高温条件下细菌、古菌和真菌的物种重合度情况见图6. 中温和高温条件的细菌、古菌和真菌的重合度均很低.



非重叠区域数字表示特有序列集合(OTU)数量及占比,重叠区域数字表示共有 OUT 数量及占比

图6 中温和高温条件下微生物物种重合度

Fig. 6 Coincidence degree of microbial species in mesophilic and thermophilic reactors

中温和高温条件下细菌分类组成热图(门水平)如图7所示. 两种温度下厚壁门菌 Firmicutes 和

绿弯门菌 *Chloroflexi* 丰度差别显著,高温下厚壁菌丰度达到 68.2%,是体系中主要优势菌种,而中温下厚壁菌仅占 11.9%。中温下绿弯菌占比 22.6%,明显超过高温。

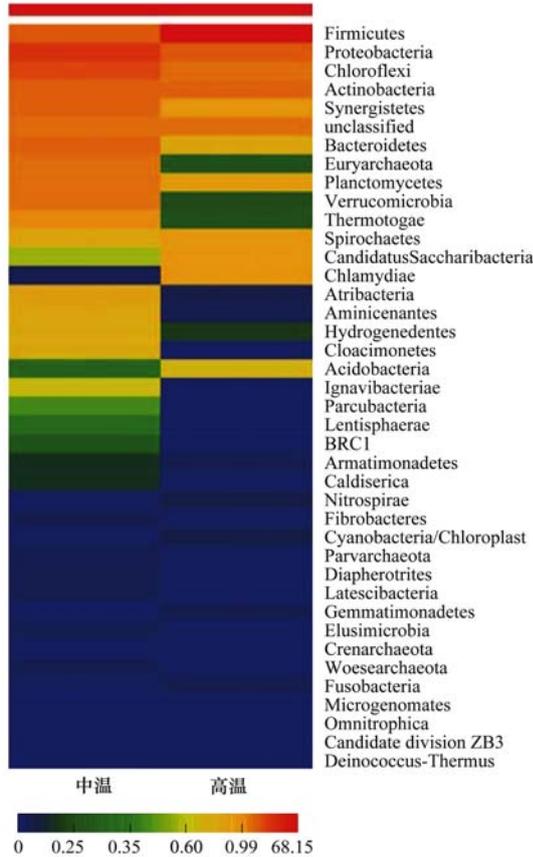


图 7 中温和高温厌氧消化体系细菌分类(门水平)热图
Fig. 7 Heatmap of bacteria(phylum) in mesophilic and thermophilic reactors

中温及高温厌氧消化体系中检出的降解木质纤维素的细菌主要有^[25] *Clostridium thermocellum*、*Clostridium stercorarium*、*Cellulosibacter*、*Pseudomonas*、*Cellulosilyticum*;放线菌主要有 *Acidothermus*。降解木质纤维素的真菌主要有 *Penicillium*、*Trichoderma*、*Chaetomium*、*Rhizopogon*、*Acremonium*。图 8 展示了中温和高温体系中木质纤维素降解微生物分布和丰度。高温体系中具有木质纤维素降解功能的细菌和放线菌数量明显高于中温,中温体系中纤维素降解真菌数量占优势,但总体丰度低。检出的几种霉菌耐热性差,高温下易死亡,且水生性差,在厌氧污水处理体系中繁殖速度低于细菌^[26]。由于木质纤维素降解细菌和放线菌的明显优势,高温体系的木质纤维素总降解率高于中温。

对其他试验组进行微生物测序,微生物分类组成随物料混合比例的变化而变化,但基本结果相同,

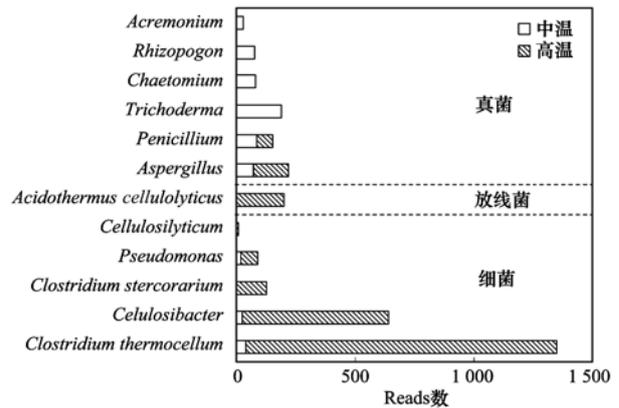


图 8 中温和高温厌氧消化体系木质纤维素降解微生物分类组成

Fig. 8 Classification and composition of lignocelluloses degradation microorganisms in mesophilic and thermophilic reactors

高温下各混合比例试验组的木质纤维素降解细菌和放线菌丰度远高于中温。这从微生物的层面上解释了高温下木质纤维素总降解率更高的原因。

3 结论

(1) 中温和高温条件下,餐厨垃圾与秸秆混合厌氧消化提升物料产甲烷能力,单位 VS 累积产甲烷峰值分别为 272.0 mL·g⁻¹和 402.3 mL·g⁻¹,分别出现在物料 VS 比 9:1 (C/N = 20.03) 和 5:5 (C/N = 28.99)。

(2) 与中温厌氧消化相比,高温条件下物料降解率以及物料中碳流向甲烷的比例均显著提高;且餐厨与秸秆两种物料的混合厌氧消化对 η_{CH_4} 具有提升作用,高温下的提升更明显。

(3) 高温下木质纤维素总降解率在 34.7% ~ 45.8%,高于中温下的 12.6% ~ 42.2%。高温和物料混合厌氧消化均能提高物料中木质纤维素总降解率,主要体现在半纤维素和木质素的降解上,纤维素降解在秸秆添加量较大时差异明显。

(4) 中温和高温厌氧体系微生物组成差别明显,重合度极低;高温体系中具有纤维素降解功能的细菌和放线菌数量明显高于中温,中温体系中纤维素降解真菌数量占优势,但总体丰度较低。

参考文献:

[1] 黄燕冰. 餐厨垃圾高温干式厌氧消化工艺研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2015.
[2] 张存胜. 厌氧发酵技术处理餐厨垃圾产沼气的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
Zhang C S. Biogas production from anaerobic digestion of food waste[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
[3] 马慧娟, 陈广银, 杜静, 等. 预处理对打捆麦秸贮存和厌氧

- 生物产沼气的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3280-3285.
- Ma H J, Chen G Y, Du J, *et al.* Effect of pretreatment on storage and biogas production of baling wheat straw [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3280-3285.
- [4] Shi X C, Lin J, Zuo J E, *et al.* Effects of free ammonia on volatile fatty acid accumulation and process performance in the anaerobic digestion of two typical bio-wastes [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, doi: 10.1016/j.jes.2016.07.006. (in Press)
- [5] Yong Z H, Dong Y L, Zhang X, *et al.* Anaerobic co-digestion of food waste and straw for biogas production [J]. *Renewable Energy*, 2015, **78**: 527-530.
- [6] 吴昊, 张盼月, 郭建斌, 等. 动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 810-816.
- Wu H, Zhang P Y, Guo J B, *et al.* Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass with animal digestion mechanisms [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 810-816.
- [7] 王巧玲. 餐厨垃圾厌氧发酵过程的影响因素研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [8] Lin J, Zuo J E, Gan L L, *et al.* Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(8): 1403-1408.
- [9] 周祺, 刘研萍, 邹德勋, 等. 餐厨垃圾与玉米秸秆联合厌氧消化产甲烷性能的试验研究[J]. 中国沼气, 2014, **32**(1): 27-31, 48.
- Zhou Q, Liu Y P, Zou D X, *et al.* Methane production performance of anaerobic co-digestion of food waste and corn stalk [J]. *China Biogas*, 2014, **32**(1): 27-31, 48.
- [10] 蒋滔, 李平, 任桂英, 等. 餐厨垃圾与玉米秸秆混合中温发酵产气效果模拟[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(1): 124-130.
- Jiang T, Li P, Ren G Y, *et al.* Simulation on mesophilic gassy fermentation by food waste mixed with corn straw [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(1): 124-130.
- [11] Giuliano A, Bolzonella D, Pavan P, *et al.* Co-digestion of livestock effluents, energy crops and agro-waste: feeding and process optimization in mesophilic and thermophilic conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **128**: 612-618.
- [12] Li D, Liu S C, Li M, *et al.* Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and cow manure[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **189**: 319-326.
- [13] 陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 等. 温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 629-634.
- Chen H L, Yan Y Y, He Q B, *et al.* Effects of mild thermal pretreatment on anaerobic digestibility of sludge with low organic content[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 629-634.
- [14] 胡玉瑛, 吴静, 王士峰, 等. 热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 3094-3098.
- Hu Y Y, Wu J, Wang S F, *et al.* Impact of thermal treatment on biogas production by anaerobic digestion of high-solid-content swine manure[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 3094-3098.
- [15] Peces M, Astals S, Mata-Alvarez J. Response of a sewage sludge mesophilic anaerobic digester to short and long-term thermophilic temperature fluctuations [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **233**: 109-116.
- [16] Komemoto K, Lim Y G, Nagao N, *et al.* Effect of temperature on VFA's and biogas production in anaerobic solubilization of food waste[J]. *Waste Management*, 2009, **29**(12): 2950-2955.
- [17] Adelard L, Poulsen T G, Rakotoniaina V. Biogas and methane yield in response to co- and separate digestion of biomass wastes [J]. *Waste Management & Research*, 2015, **33**(1): 55-62.
- [18] 操宏庆, 章菲菲, 李健, 等. 高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1016-1020.
- Cao H Q, Zhang F F, Li J, *et al.* Effect of substrate concentration on pathogen indicators inactivation during thermophilic anaerobic digestion [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1016-1020.
- [19] 段妮娜, 董滨, 李江华, 等. 污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 321-327.
- Duan N N, Dong B, Li J H, *et al.* High-solids anaerobic co-digestion of sludge and kitchen garbage under mesophilic conditions [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 321-327.
- [20] 赵剑强. 含氮有机物厌氧消化化学方程式的研究[J]. 中国沼气, 1996, **14**(1): 10-11.
- Zhao J Q. A discussion on the chemical. Equation of anaerobic fermentation of organic compound containing nitrogen[J]. *China Biogas*, 1996, **14**(1): 10-11.
- [21] 胡纪萃. 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.
- [22] 宋永民. 汽爆玉米秸秆高温固态阶梯厌氧消化的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2008.
- [23] 蒋建国, 赵振振, 杜雪娟, 等. 秸秆高固体厌氧消化预处理实验研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 886-890.
- Jiang J G, Zhao Z Z, Du X J, *et al.* Experimental investigation of the straw pre-treatment to enhance its high solid anaerobic digestion [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(4): 886-890.
- [24] 何晶晶, 方文娟, 吕凡, 等. 乙酸常温预处理对木质纤维素厌氧消化的影响[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(12): 1116-1121.
- He P J, Fang W J, Lü F, *et al.* Impact of acetic acid pretreatment at normal temperature on the anaerobic digestion of lignocelluloses [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(12): 1116-1121.
- [25] 黄慰情. 高温纤维素降解菌的筛选、鉴定及产酶条件研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Huang W Q. Study on screening, identification of cellulose-decomposing bacteria under high temperature and the conditions of cellulose production [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [26] 王腾旭, 马星宇, 王萌萌, 等. 中高温污泥厌氧消化系统中微生物群落比较[J]. 微生物学通报, 2016, **43**(1): 26-35.
- Wang X T, Ma X Y, Wang M M, *et al.* A comparative study of microbial community compositions in thermophilic and mesophilic sludge anaerobic digestion systems [J]. *Microbiology China*, 2016, **43**(1): 26-35.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China: A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)