

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐迦, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -NO ₃ ⁻) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤固态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能

戴金金¹, 牛承鑫¹, 潘阳¹, 陆雪琴^{1,2}, 甄广印^{1,3*}, 郑朝婷¹, 张瑞良¹, 何欣昱¹

(1. 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; 2. 崇明生态研究院, 上海 200062; 3. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘要: 采用厌氧膜生物反应器(anaerobic membrane bioreactor, AnMBR)进行剩余污泥与餐厨垃圾的共消化, 研究其有机物的去除特性、产气性能和微生物群落组成等运行性能。结果表明, 反应器运行过程中有机负荷(organic loading rate, OLR, 以 VS 计)稳定在 $0.59 \sim 0.64 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 挥发性固体(volatile solids, VS)降解率由单消化 17.5% 上升至共消化 40%, COD 截留率为 95.3%。消化液含固率提高了 3.9 倍, 最终 CH_4 体积分数稳定在 60%, CH_4 产量(以 $\text{COD}_{\text{added}}$ 计)为 $78.7 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。跨膜压差(transmembrane pressure, TMP)和平均 Flux 分别维持在 $-3.1 \sim -2.7 \text{ kPa}$ 和 $0.106 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 膜污染较轻。16S rRNA 微生物多样性分析表明, AnMBR 内部厌氧消化细菌主要是 Proteobacteria(变形菌门)、Bacteroidetes(拟杆菌门)和 Cloacimonetes(阴沟单胞菌门), 产甲烷菌中的优势菌科为 Methanobacterium(甲烷杆菌科), 优势菌属为 Methanosaeta(甲烷鬃毛菌属)和 Methanolinea(甲烷绳菌属)。这将为 AnMBR 处理污泥及其它高含固率废物流的稳定性和运行性能研究提供有力的理论参考依据, 进而为生物质资源化和能源危机提供有效解决途径。

关键词: 厌氧膜生物反应器(AnMBR); 剩余污泥; 餐厨垃圾; 厌氧消化; 运行性能

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3740-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001036

Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste

DAI Jin-jin¹, NIU Cheng-xin¹, PAN Yang¹, LU Xue-qin^{1,2}, ZHEN Guang-yin^{1,3*}, ZHENG Chao-ting¹, ZHANG Rui-liang¹, HE Xin-yu¹

(1. Shanghai Key Laboratory for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Institute of Eco-Chongming, Shanghai 200062, China; 3. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China)

Abstract: A laboratory-scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) was used for the co-digestion of sewage sludge and food waste to investigate its organic matter removal characteristics, biogas production performance, and microbial community composition. The results showed that the degradation rate of volatile solids (VS) increased from 17.5% for a single digestion to 40% for the total digestion, and that the COD removal was 95.3% when the organic loading rate (OLR) was stabilized at $0.59 \sim 0.64 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. The solids content of the digested sludge increased by a factor of 3.9. The final CH_4 content was 60% and the CH_4 yield was $78.7 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ of $\text{COD}_{\text{added}}$. The transmembrane pressure (TMP) and average flux were maintained at between -3.1 and -2.7 kPa and $0.106 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively, and membrane fouling was not serious. According to an analysis of the microbial diversity using 16S rRNA, the anaerobic bacterium in the AnMBR were mainly phylum Proteobacteria, Bacteroidetes, and Cloacimonetes, and the dominant methanogens included the Methanobacterium family, Methanosaeta genus, and Methanolinea genus. This study provides a strong theoretical basis for research into the stability and performance of AnMBRs for the co-treatment of sludge and other high-solid waste streams, and provided an effective solution for biomass resource utilization and the energy crisis.

Key words: anaerobic membrane bioreactor (AnMBR); sewage sludge; food waste; anaerobic digestion; performance

随着污水处理率的提高, 我国的污泥产量逐年增加, 据估计, 到 2025 年, 将有 6 000 多万 t 的湿污泥产生^[1]。污泥结构呈复杂的絮状体型, 由胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)、二价阳离子和微生物细胞聚合而成, 还含有大量的有机污染物和病原体等, 给生态系统平衡带来巨大的威胁^[2]。污泥的厌氧消化已普遍应用于剩余污泥的处理处置, 能在减量化、稳定化污泥的同时, 去除大量病原体, 利用有机物产生可再生能源甲烷^[3]。但由

于营养不充足、有机负荷低、生物降解能力低和污染物毒性高等原因, 污泥单消化过程缓慢且不稳定^[4]。餐厨垃圾是一种典型的具有高生物降解能力

收稿日期: 2020-01-04; 修订日期: 2020-02-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51808226); 中央高校基本科研业务费专项; 上海市“科技创新行动计划”“一带一路”青年科学家交流国际合作项目(17230741100); 上海高校特聘教授(东方学者)计划项目(TP2017041); 上海市扬帆计划项目(19YF1414000)

作者简介: 戴金金(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物处理处置与资源化, E-mail: 13120652086@163.com

* 通信作者, E-mail: gyzen@des.ecnu.edu.cn

的生物质,其在中国城市固废中占比达到 40% ~ 50%^[5]. 剩余污泥与餐厨垃圾共消化已被一些研究者证实可解决剩余污泥单消化的弊端^[4-6]. 例如, Dai 等^[5] 比较高含固率脱水污泥与餐厨垃圾共消化、脱水污泥单消化的降解特性和动态性能,结果显示,餐厨垃圾的添加不仅改善了系统的稳定性,且随着餐厨垃圾混合比例的提高,甲烷产率和挥发性固体(volatile solids, VS)去除率均呈上升趋势.

但由于传统的厌氧发酵方式是完全混合式(conventional continuous stirred tank reactor, CSTR),会造成水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)、固体停留时间(solids retention time, SRT)和微生物滞留时间(microorganisms retention time, MCRT)无法完全分离. 考虑到经济和能源效益, HRT 不能过长,而较短的 SRT 以及微生物的内源呼吸作用会导致生物量流失、厌氧微生物生长缓慢、能源转化效率低以及生物稳定化过程漫长,致使厌氧发酵效果不佳^[7,8]. 厌氧膜生物反应器(anaerobic membrane bioreactor, AnMBR)是将膜对微生物及固体的截留作用与厌氧稳定化耦合在一起,使 HRT 和 SRT 完全分离,保证反应器内的生物量,维持 AnMBR 中厌氧消化高反应性能的一项新兴技术^[9]. AnMBR 的优势是生物质保留量高、占地面积小和消化液产量低,还会带来更高的有机质生物降解效率、更少的污泥产量、更好的出水质量及生物能恢复效率^[2,10],尤其是净能源的增加. 据 Zhen 等^[7] 统计研究显示, AnMBR 处理污泥所得的净能源(28 425.6 MJ·d⁻¹)比任何其它一种厌氧消化方式都十分具有优势,其增加量超过 70%.

基于此,本研究利用 AnMBR 进行剩余污泥和餐厨垃圾共消化,对厌氧消化过程中有机负荷(organic loading rate, OLR)与消化液固体浓度、有机物的去除特性、内部消化液的物理化学性质、膜污染性状和影响因素、产气性能以及厌氧消化微生物等方面的变化进行分析,以期为保证 AnMBR 处理污泥及其它高含固率废物流的稳定性和运行性能提供有力的操作条件理论依据,以及消化效能评估依据.

1 材料与方法

1.1 实验进料

本实验所用剩余污泥来自上海某污水处理厂的二沉池,餐厨垃圾来自华东师范大学学生食堂,均保存在 4℃ 以下,剩余污泥和餐厨垃圾的初始物化性质如表 1 所示.

1.2 实验装置及运行参数

AnMBR 的有效容积为 4 L,膜组件是平板膜

表 1 剩余污泥和餐厨垃圾的物化性质
Table 1 Physical and chemical characteristics of sewage sludge and food waste

实验参数 ¹⁾	剩余污泥	餐厨垃圾
pH	6.67 ± 0.02	3.72 ± 0.01
ORP/mV	-148.00	—
黏度/mPa·s	2 673.00	—
碱度/mg·L ⁻¹	1 354.40 ± 15.90	—
TS/g·L ⁻¹	21.88 ± 0.03	73.10 ± 0.09
VS/g·L ⁻¹	16.20 ± 0.03	69.10 ± 0.10
TCOD/mg·L ⁻¹	24 000 ± 1131	67 744.88 ± 6 303.00
SCOD/mg·L ⁻¹	1 525.50 ± 50.00	33 121.60 ± 576.00
TPN/mg·L ⁻¹	19 250 ± 176	14 484.93 ± 1 575.00
SPN/mg·L ⁻¹	737.50 ± 8.80	2 709.88 ± 86.44
TPS/mg·L ⁻¹	2 447.40 ± 158.00	23 239.55 ± 521.00
SPS/mg·L ⁻¹	124.00 ± 1.86	9 531.21 ± 224.00
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	53.03 ± 0.61	112.30 ± 7.80

1) ORP: oxidation-reduction potential, 氧化还原电位; TS: total solids, 总固体; VS: volatile solids, 挥发性固体; TCOD: total chemical oxygen demand, 总化学需氧量; SCOD: soluble chemical oxygen demand, 溶解性化学需氧量; TPN: total protein, 总蛋白; SPN: soluble protein, 溶解性蛋白; TPS: total polysaccharose, 总多糖; SPS: soluble polysaccharose, 溶解性多糖; 碱度: 以 CaCO₃ 计

(Kubota Membrane Cartridge, Japan), 材质是聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF), 其膜面积和膜孔径分别是 0.116 m² 和 0.45 μm. AnMBR 的运行过程, 首先向反应器内曝高纯 N₂ 10 min, 以确保厌氧环境, 操作温度维持在 36℃, 剩余污泥投入反应器后, 污泥絮状体进行厌氧发酵, 难溶的可降解有机物会被膜截留在反应器内, 充分降解, 即 SRT 和 HRT 会完全分离, 运行时间在 1 ~ 28 d, HRT = 20 d; 29 ~ 45 d, HRT = 15 d; 46 ~ 90 d, HRT = 10 d. 第 71 d, 将剩余污泥与餐厨垃圾以 0.5:0.5 的比例混合作为进料基质, 反应器共运行 90 d. 此外, 循环气泵(Zhourui, JH12-65, China) 会在运行时间内曝气, 气泡从底部向上冲刷膜表面, 以此减轻膜污染. pH、跨膜压差(transmembrane pressure, TMP)、氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP) 在整个运行过程中会被持续监测, 实验装置原理如图 1 所示.

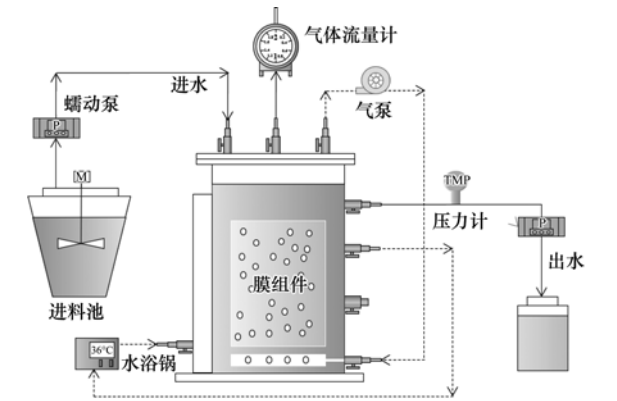


图 1 厌氧膜生物反应器的原理
Fig. 1 Schematic diagram of the anaerobic membrane bioreactor (AnMBR)

1.3 分析测定方法

TS、VS、TCOD、SCOD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和碱度根据标准方法^[11,12]测定; TPN 和 SPN 根据 Lowry 程序测定^[13]; TPS 和 SPS 根据苯酚硫酸法测定^[14]; pH 使用 pH 计测定(Leizi, SX712, China); ORP 使用便携式 ORP 计(Sanxin, PHS-25, China)测定; 沼气的组分(CH_4 、 CO_2)体积分数由装有 TCD 检测器的气相色谱仪(Shimadzu, GC-2014C, Japan)测定。

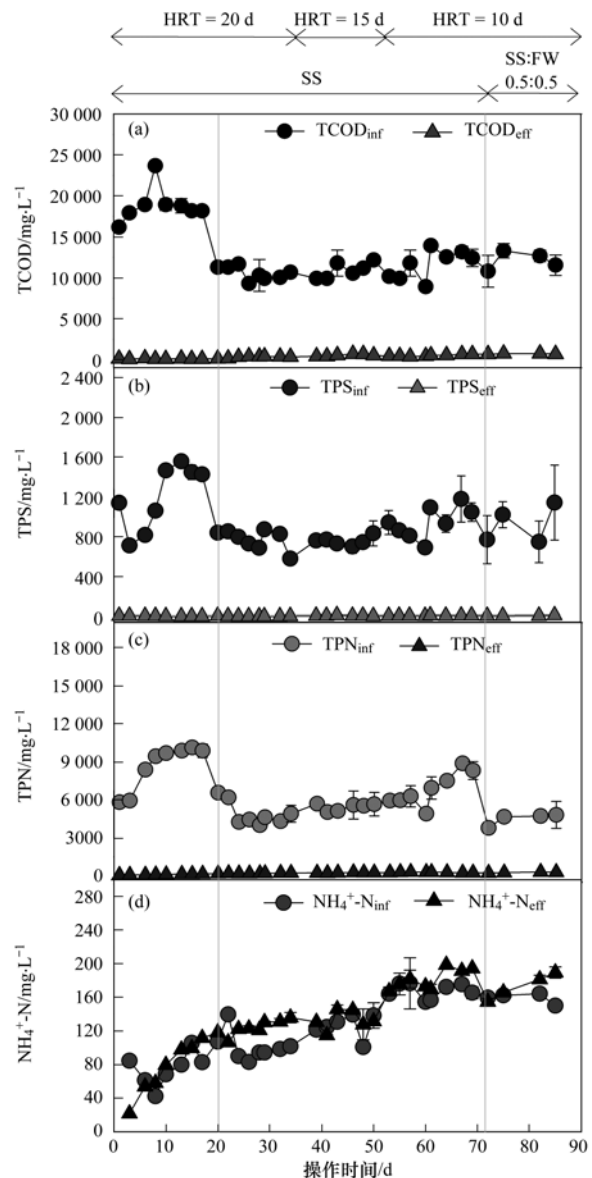
2 结果与讨论

2.1 有机负荷和消化液固体浓度分析

OLR 是厌氧消化中十分重要的操作参数, OLR 冲击会造成水解、酸化和甲烷化失衡^[3]. 超负荷情况下, 反应系统内氢营养型产甲烷菌主导代谢过程, 但是会导致挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFA)积累, pH 下降, 且微生物群落的物种及功能更复杂, 群落反应也难以预测^[4,15]. 根据进料基质的不同, 本研究共分为两个阶段, 一是剩余污泥在 AnMBR 中的单消化过程; 二是剩余污泥和餐厨垃圾在 AnMBR 中的共消化过程. 第一阶段, OLR(以 VS 计, 下同)维持在 $0.59 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, VS 降解率为 17.5%; 第二阶段, OLR 维持在 $0.64 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, VS 降解率增加到 40%. 由此可见, AnMBR 的 OLR 范围维持在 $0.59 \sim 0.64 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时并未造成酸化, 运行过程稳定. 这与 Alfaro 等^[16]的研究结果一致, 其通过曝 H_2 对 AnMBR 的污泥厌氧消化进行沼气原位改造, OLR 分别设置为 (1.3 ± 0.2) 、 (1.5 ± 0.2) 和 $(1.8 \pm 0.2) \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 这 3 个阶段, 对应的 VS 降解率分别达到了 $(48.4 \pm 7.7)\%$ 、 $(48.5 \pm 15)\%$ 和 $(55.8 \pm 9.3)\%$, 其随 OLR 的增加呈上升趋势. 但一些研究人员得到了不同的结果, Wandera 等^[17]采用 AnMBR 处理热水解后的污泥, 在 HRT 为 30、20、10 和 5 d 时发现对应的 OLR 分别是 1.96、2.66、4.04 和 $9.50 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, VS 去除率呈下降趋势. 此外, 综上, OLR 的提高意味着更高的进料消化能力, 通过增强产甲烷菌活性, 使有机质降解率得到提高^[3,17], 但在超负荷情况下, 会造成厌氧消化系统失衡, 即 OLR 的设置应以反应器的设计、进料基质是否预处理或者其他操作条件的改变做出相应的调整, 保证消化系统稳定运行。

2.2 有机物的去除特性

图 2 分别展示了进料和出水的 TCOD、TPS、TPN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度变化. 启动阶段(1~20 d), 进料中 TCOD、TPS 和 TPN 的浓度较高, 最高浓度分别达到 23 675、1 559 和 $10\,125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 之后, 进料中 TCOD、TPS 和 TPN 的浓度分别在 $8\,925 \sim 13\,925$ 、



SS: sewage sludge, 剩余污泥; FW: food waste, 餐厨垃圾, 下同

图 2 进料和出水的物化性质 TCOD、TPS、TPN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 随操作时间的变化

Fig. 2 Physical and chemical characteristics of influent and effluent TCOD, TPS, TPN, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ versus operation time

$582 \sim 1\,180$ 和 $4\,000 \sim 8\,875 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内浮动. 反应器运行第 71 d, 虽然对进料进行了调整, 由剩余污泥单消化调整为剩余污泥和餐厨垃圾共消化, 但是各有机质的浓度依然在上述浓度范围内浮动. 这表明反应器启动阶段的进料有机质浓度较高, 而后期相对稳定, 在一定的浓度范围内浮动. 稳定运行期间, COD 截留率维持在 95.3% 左右, 稍低于一些之前的 AnMBR 污泥处理或餐厨垃圾处理研究结果^[18~20]. 例如, Hafuka 等^[18]在研究 AnMBR 处理剩余污泥的消化性能时, 对聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)中空纤维膜的性能进行分析, 得出 99% 的 COD 截留率. 分析原因可能是研究所用的膜材料、膜孔径和膜

构造的不同^[18,19]. 如图 2(d) 所示, 启动阶段, 由于蛋白质或其它含氮有机物的分解^[4,20], 进料和出水的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 均呈上升趋势, 分别是 84.4 上升到 100.7 和 21.7 上升到 127.7. 运行稳定后, 反应器内没有 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 积累, 这可能是由于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可穿过膜孔^[3].

2.3 AnMBR 内部的物理化学性质分析

对于酸化细菌和产甲烷菌的微生物活动, pH 和碱度是十分重要的指标, 可反映厌氧反应器的稳定性^[3]. 碱度具有中和酸的能力, 其缓冲能力可保护厌氧消化系统. 产甲烷菌的 pH 适应范围是 6.6 ~ 7.6^[3], 其碱度的合适浓度 (以 CaCO_3 计, 下同) 应维持在 $3\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上^[3,4]. 本研究反应器内 pH 稳定在 7.5 左右 [图 3(a)], 碱度从实验开始的 $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐增加到 $3\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并保持稳定 [图 3(c)]. 氧化还原电位 (oxidation-reduction potential, ORP) 代表了合适的厌氧微生物新陈代谢环境, 维持在 -187 mV 左右 [图 3(b)], 这表明反应器内部厌氧消化系统稳定, 适合厌氧发酵. 图 3(d) 显示了反

应器内部总固体浓度 (total solids, TS) 和 VS 的变化. 从实验开始到结束, 由于未进行排泥, TS 和 VS 均逐渐累积, TS 浓度从 $10.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $47.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, VS 浓度从 $6.9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $29.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别提高了 74.6% 和 75.5%, VS/TS 从 60.1% 增加到 62.3%, 提高了 1.04 倍. 这些结果表明消化液积累了 3.9 倍, 膜通过浓缩生物质, 将消化液保留在了反应器内部, 此结果较之前的一些研究 ($20 \sim 30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 实现了更高的固体浓度维持^[10,18].

2.4 AnMBR 的膜污染性状及影响因素分析

运行时和未运行 TMP、运行时和平均 Flux 的变化情况如图 4(a) 所示. 在整个实验过程中, TMP 相对稳定, 运行时 TMP 和未运行 TMP 分别维持在 -3 kPa 和 -2.7 kPa 左右. 此外, 反应器运行过程中, 测定了内部消化污泥的 TCOD、SPN 和 SPS, 其浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 变化均呈上升趋势 [图 3(e)、3(f) 和 3(g)], 分别从 9 835 到 36 320、91 到 355 以及 10 到 31. 如图 5 所示, 根据 TMP 与 TCOD、SPN、SPS、pH、碱度、TS、VS 和 VS/TS 的皮尔逊相关性分析,

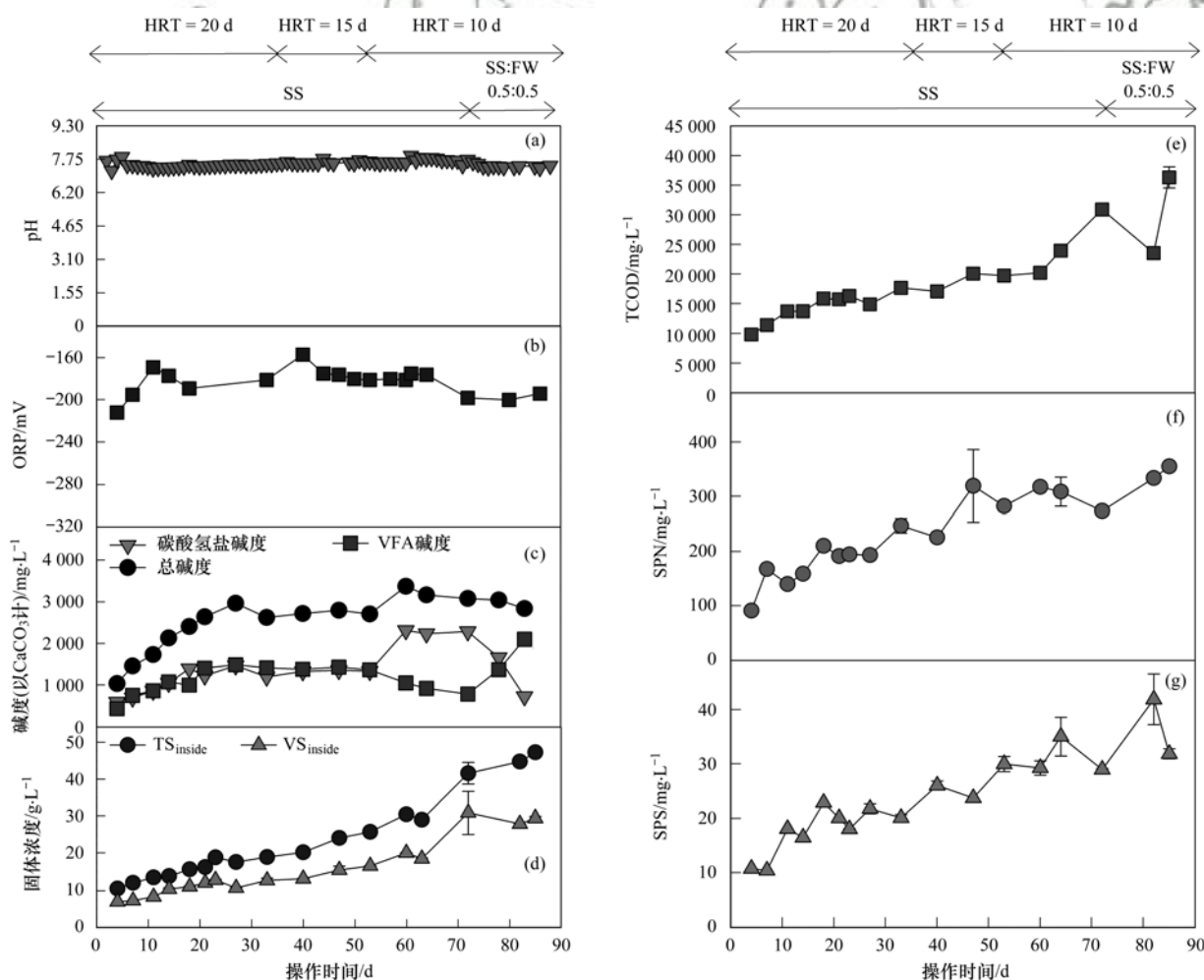


图3 AnMBR 内部的物化性质 pH、ORP、碱度、固体浓度、TCOD、SPN 和 SPS 随操作时间的变化

Fig. 3 Physical and chemical characteristics in the AnMBR, pH, ORP, alkalinity, sludge concentration, TCOD, SPN and SPS versus operation time

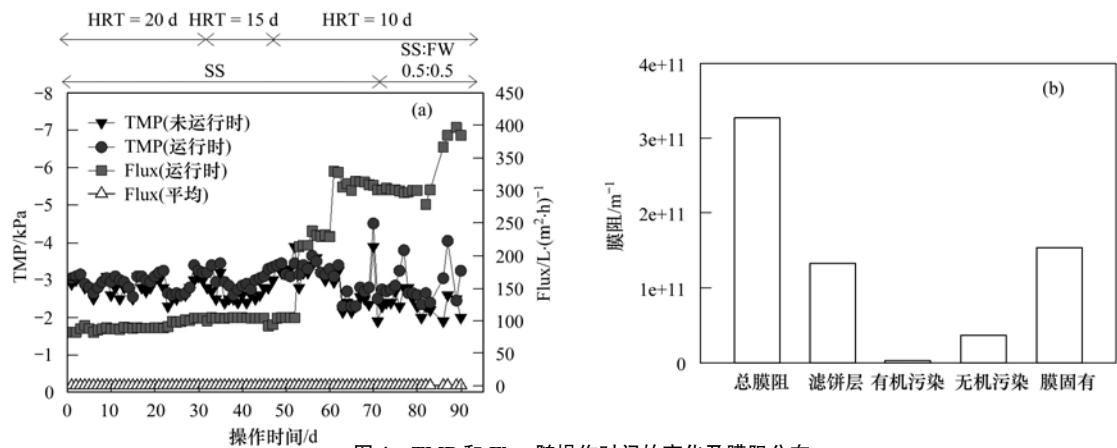


图 4 TMP 和 Flux 随操作时间的变化及膜阻分布

Fig. 4 Variations of TMP and Flux with operation time and the distribution of membrane resistances in the AnMBR

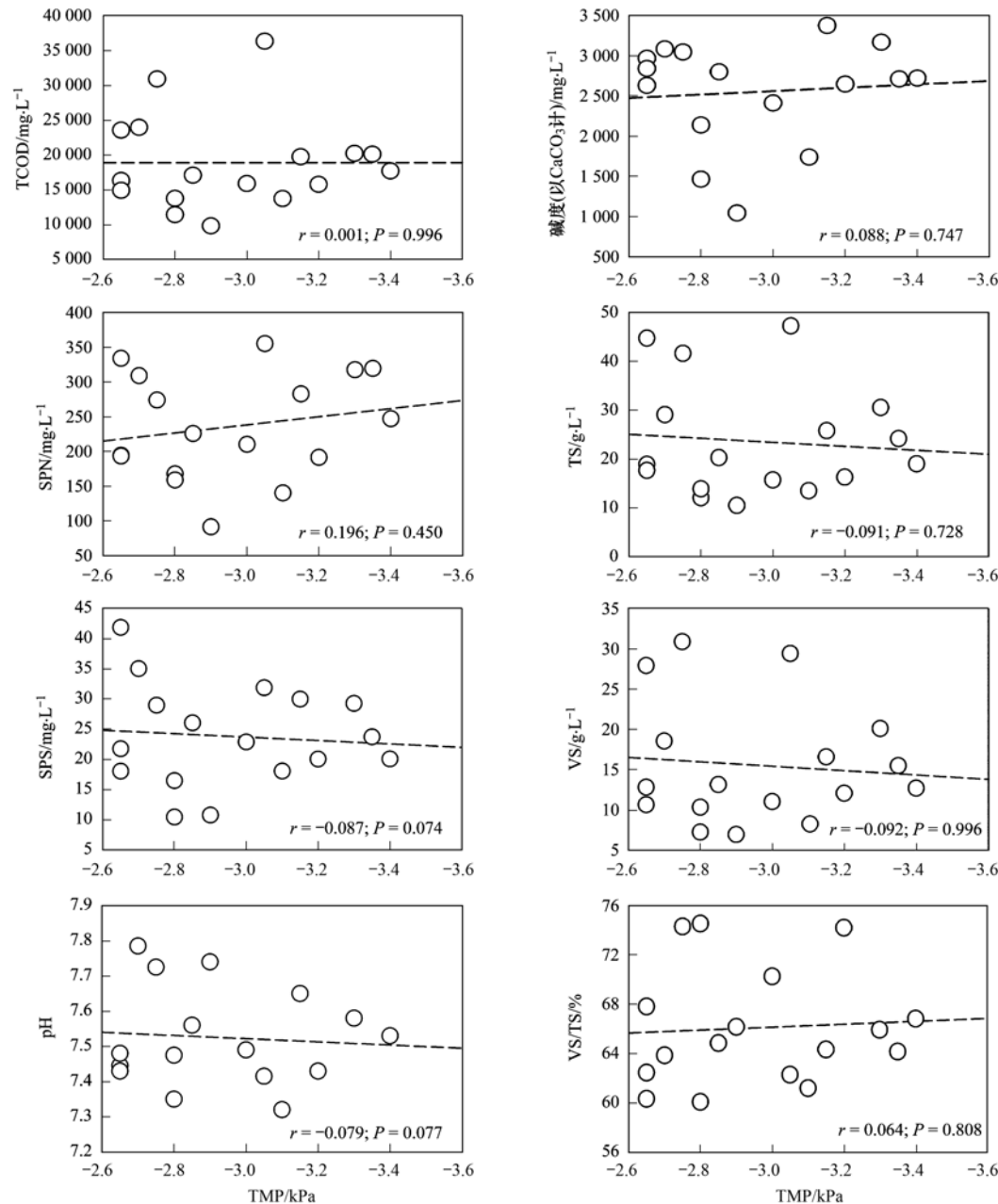


图 5 TMP 与 AnMBR 中 TCOD、SPN、SPS、pH、碱度、TS、VS 和 VS/TS 的皮尔逊相关性分析

Fig. 5 Pearson's correlation between TMP and TCOD, SPN, SPS, pH, alkalinity, TS, VS, and VS/TS in the AnMBR

反应器内部的 TCOD 和 SPN 等 8 个 TMP 的影响因素的最高值所对应的 TMP 均在 $-3.1 \sim -2.7$ kPa 范围内,这说明 AnMBR 运行过程中的内部有机质含量、含固率和酸碱平衡的变化均没有加重膜污染. 平均 Flux 维持在 $0.106 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,由于实验过程中调整了泵速,故运行时 Flux 呈阶段性上升趋势,但总体上高于平均 Flux. 这表明本研究的 AnMBR 在较低的膜通量下, TMP 较小,膜污染较轻. 此结论与膜污染测定结果一致,反应器运行的第 60 d,将平板膜从反应器中取出进行了膜清洗. 膜阻分布如图 4(b) 所示,总膜阻为 $3 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$. 滤饼层膜阻与膜固有阻力相当,分别占总阻力的 41.0% 和 47.1%. 一般而言,滤饼层被认为是 AnMBR 膜结垢的主要原因. 多糖的胶凝作用可以通过污泥中存在大量二价或多价阳离子被大大增强,从而增加滤饼的结垢行为. 因此,较低的滤饼层膜阻表明实验中膜污染程度较轻.

2.5 AnMBR 的产气性能

在 HRT 为 20、15 和 10 d 的条件下,AnMBR 的进料基质主要是剩余污泥. 根据 CH_4 含量的变化,后期改为剩余污泥 + 餐厨垃圾,其具体的产气性能包括沼气产率、沼气组成、甲烷产率及产量,如图 6 所示. 反应器启动后, CH_4 体积分数逐渐上升至 40%,稳定运行了 60 d,第 61 ~ 70 d,反应器出现故障, CH_4 体积分数不稳定,低于传统 CSTR^[21,22]. 第二阶段,对反应器进料进行了调整,投加基于 VS 的 0.5:0.5 比例的剩余污泥和餐厨垃圾, CH_4 体积分数逐渐上升至 60% 并保持稳定,反应器总共运行了 90 d. 剩余污泥与餐厨垃圾共消化时的 CH_4 体积分数相对于剩余污泥单消化提高了 20%, CH_4 产量提高了 39.6%,最终 CH_4 产量(以 $\text{COD}_{\text{added}}$ 重量计)是 78.7 mL,沼气产率(以沼气池体积计)一直维持在 $0.11 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右. 产气性能高于 Hafuka 等^[18] 的研究结果,其研究内容是外置式 AnMBR 浓缩及消化好氧膜生物反应器的剩余污泥时的反应性能,结果显示 CH_4 产量为 50 mL. 污泥的 C/N 一般较低(6.0 ~ 9.0),而餐厨垃圾的 C/N 较高(11.1 ~ 36.4),有机固废厌氧消化的最佳 C/N 范围为 20 ~ 30. 因此,剩余污泥单消化可能会出现 C/N 比不合适的问题. 由于进料的调整,AnMBR 的产气性能提高,分析原因是剩余污泥与餐厨垃圾的共消化可克服剩余污泥单消化时的基质营养组分不平衡,加速水解速率,提高系统稳定性和产气性能^[4].

2.6 AnMBR 厌氧消化微生物群落分析

图 7 分别显示了进料基质调整前后的 AnMBR 内部厌氧消化微生物的物种群落分析. 在界水平上,

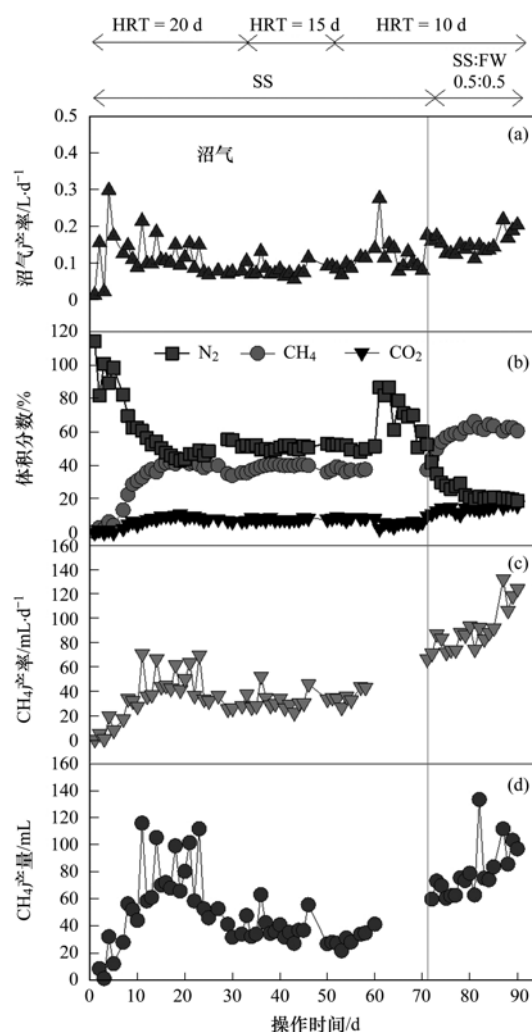


图 6 AnMBR 的产气性能随操作时间的变化: 沼气产率, 沼气组成, 甲烷产率和甲烷产量

Fig. 6 Performance of biogas production in the AnMBR with operation time: biogas production rate, biogas composition, CH_4 production rate, and CH_4 yield

两次的厌氧消化微生物均含有细菌和古菌,进料基质为剩余污泥时,古菌相对丰度为 2%,进料基质为剩余污泥和餐厨垃圾时,古菌相对丰度为 4%. 基于细菌的 16S rRNA 分析,在门水平上,两次的厌氧消化细菌中主要的细菌均是 Proteobacteria (变形菌门)、Bacteroidetes (拟杆菌门) 和 Cloacimonetes (阴沟单胞菌门),相对丰度分别是 36%、21%、21% 和 26%、28%、17%. Proteobacteria (变形菌门) 在细胞质降解和生物膜形成过程中占据十分重要的地位,是一种兼性厌氧菌, Bacteroidetes (拟杆菌门) 能够分解高分子量化合物^[23]. 进料基质调整后的 Proteobacteria (变形菌门) 的相对丰度比进料基质调整前降低了 10%,原因可能是 Proteobacteria (变形菌门) 还在更换基质的适应期. 此外,两次的厌氧消化细菌中相对丰度最高的分别是 Proteobacteria (变形菌门)、Bacteroidetes (拟杆菌门),原因可能是餐厨垃

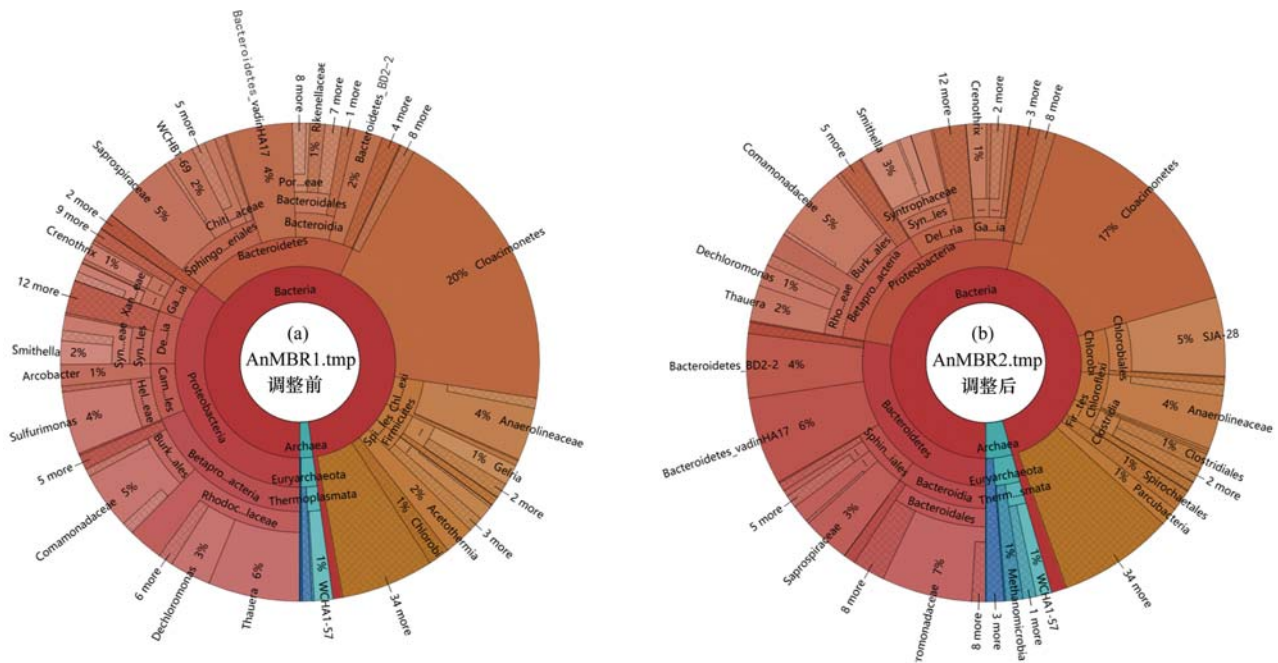


图7 AnMBR 中进料基质调整前和进料基质调整后的群落组成

Fig. 7 Community composition in the AnMBR before and after adjusting the feed matrix

圾增加了基质中的可生物降解高分子有机物^[4]. 基于古菌科水平, 进料基质调整前后, 产甲烷菌中优势菌科均是 *Methanobacterium* (甲烷杆菌科), 相对丰度为 0.01%, 属于氢营养型产甲烷菌, 利用 H_2 和 CO_2 产生 CH_4 . 基于古菌属水平, 进料基质调整前后, 产甲烷菌中优势菌属均是 *Methanosaeta* (甲烷鬃毛菌属) 和 *Methanolinea* (甲烷绳菌属), 相对丰度分别是 0.4%、0.5% 和 0.1%、0.4%, 两种产甲烷菌均由于餐厨垃圾的加入而丰度上升, 这可能是由于餐厨垃圾与剩余污泥的共消化具有更高的可生物降解能力^[4]. *Methanosaeta* (甲烷鬃毛菌属) 属于乙酸营养型产甲烷菌, 能够利用乙酸产生 CH_4 、 CO_2 , 所产 CH_4 占 CH_4 总体产量的 70%^[24], 而 *Methanolinea* (甲烷绳菌属) 属于丙酸型产甲烷菌, 通过降解丙酸盐产 CH_4 ^[25]. 氢型产甲烷菌在古菌中所占的比例虽然不高, 但可起到降低氢分压的作用^[25]. 这些微生物共同推动有机物的增溶与降解、电子传递和甲烷生成.

3 结论

AnMBR 处理剩余污泥和餐厨垃圾的运行过程相对稳定, 其 OLR 范围维持在 $0.59 \sim 0.64 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 剩余污泥和餐厨垃圾的共消化使 CH_4 体积分数增加了 20%, CH_4 产量提高了 39.6%, 最终 CH_4 产量达到了 78.7 mL, COD 截留率为 95.3% 左右. 进料基质调整前后的厌氧消化微生物中相对丰度最高的分别是 Proteobacteria (变形菌门, 36%) 和 Bacteroidetes (拟杆菌门, 28%), 产甲烷菌

中的优势菌科均为 *Methanobacterium* (甲烷杆菌科, 0.01%), 优势菌属为 *Methanosaeta* (甲烷鬃毛菌属) (0.4%、0.5%) 和 *Methanolinea* (甲烷绳菌属) (0.1%、0.4%). 此外, 通过长期监测 TMP、Flux 以及膜阻分析, 可以得出, 剩余污泥和餐厨垃圾的共消化可减轻膜污染, 所以该研究可作为 SS 和 FW 的 AnMBR 共消化运行性能分析的依据, 是非常有前景的一种剩余污泥和餐厨垃圾共消化的高效经济处理途径.

参考文献:

- [1] 戴晓虎. 城镇污水处理厂污泥稳定化处理的必要性和迫切性的思考[J]. 给水排水, 2017, **43**(12): 1-5.
- [2] Xu M L, Wen X H, Yu Z Y, et al. A hybrid anaerobic membrane bioreactor coupled with online ultrasonic equipment for digestion of waste activated sludge[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(10): 5617-5625.
- [3] Liu X, Wang W, Shi Y C, et al. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste and waste activated sludge in China: effect of organic loading rate[J]. Waste Management, 2012, **32**(11): 2056-2060.
- [4] Pan Y, Zhi Z X, Zhen G Y, et al. Synergistic effect and biodegradation kinetics of sewage sludge and food waste mesophilic anaerobic co-digestion and the underlying stimulation mechanisms[J]. Fuel, 2019, **253**: 40-49.
- [5] Dai X H, Duan N N, Dong B, et al. High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: stability and performance [J]. Waste Management, 2013, **33**(2): 308-316.
- [6] Tong H H, Tong Y W, Peng Y H. A comparative life cycle assessment on mono- and co-digestion of food waste and sewage sludge[J]. Energy Procedia, 2019, **158**: 4166-4171.
- [7] Zhen G Y, Pan Y, Lu X Q, et al. Anaerobic membrane bioreactor towards biowaste biorefinery and chemical energy

- harvest: recent progress, membrane fouling and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, **115**: 109392.
- [8] Huang Z, Ong S L, Ng H Y. Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment; effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling[J]. *Water Research*, 2011, **45**(2): 705-713.
- [9] 闫欢汐, 许振钰, 金春姬, 等. 厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2793-2799.
- Yan H X, Xu Z Y, Jin C J, *et al.* Performance and membrane fouling properties in an anaerobic membrane bioreactor for salty wastewater[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2793-2799.
- [10] Dagnew M, Parker W, Seto P. Anaerobic membrane bioreactors for treating waste activated sludge: short term membrane fouling characterization and control tests[J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, **421-422**: 103-110.
- [11] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (20th ed.)[M]. Washington, DC, USA: American Public Health Association, 1998.
- [12] Zhen G, Lu X Q, Li Y Y, *et al.* Innovative combination of electrolysis and Fe(II)-activated persulfate oxidation for improving the dewaterability of waste activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **136**: 664-663.
- [13] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin[J]. *Water Research*, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [14] DuBois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. *Analytical Chemistry*, 1956, **28**(3): 350-356.
- [15] Braz G H R, Fernandez-Gonzalez N, Lema J M, *et al.* Organic overloading affects the microbial interactions during anaerobic digestion in sewage sludge reactors[J]. *Chemosphere*, 2019, **222**: 323-332.
- [16] Alfaro N, Fdz-polanco M, Fdz-Polanco F, *et al.* H₂ addition through a submerged membrane for in-situ biogas upgrading in the anaerobic digestion of sewage sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2019, **280**: 1-8.
- [17] Wandera S M, Qiao W, Jiang M M, *et al.* AnMBR as alternative to conventional CSTR to achieve efficient methane production from thermal hydrolyzed sludge at short HRTs[J]. *Energy*, 2018, **159**: 588-598.
- [18] Hafuka A, Mimura K, Ding Q, *et al.* Performance of anaerobic membrane bioreactor during digestion and thickening of aerobic membrane bioreactor excess sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**: 476-479.
- [19] Gao D W, Zhang T, Tang C Y Y, *et al.* Membrane fouling in an anaerobic membrane bioreactor: differences in relative abundance of bacterial species in the membrane foulant layer and in suspension[J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, **364**(1-2): 331-338.
- [20] 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 等. 高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2778-2785.
- Zhan Y, Shi W S, Zhao M X, *et al.* Transformation of protein in sludge during high solids anaerobic digestion[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2778-2785.
- [21] Ennouri H, Miladi B, Diaz S Z, *et al.* Effect of thermal pretreatment on the biogas production and microbial communities balance during anaerobic digestion of urban and industrial waste activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 184-191.
- [22] Ni B J, Zeng S T, Wei W, *et al.* Impact of roxithromycin on waste activated sludge anaerobic digestion: methane production, carbon transformation and antibiotic resistance genes[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**: 134899.
- [23] Zhi Z X, Pan Y, Lu X Q, *et al.* Electrically regulating co-fermentation of sewage sludge and food waste towards promoting biomethane production and mass reduction[J]. *Bioresource Technology*, 2019, **279**: 218-227.
- [24] 李玥, 胡奇, 高大文. 温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1731-1738.
- Li Y, Hu Q, Gao D W. Effect of temperature on the performance and microbial community structure in an integrated anaerobic fluidized-bed membrane bioreactor treating benzothiazole wastewater[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1731-1738.
- [25] Cayetano R D A, Park J H, Kim S H. Effect of shear velocity and feed concentration on the treatment of food waste in an anaerobic dynamic membrane bioreactor: performance monitoring and microbial community analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2020, **296**: 122301.

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)