

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



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林琪, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 李喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响

袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 国家城市非传统水资源开发利用国际科技合作基地, 陕西省污水处理与资源化工程技术研究中心, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055)

摘要: 采用连续搅拌釜式反应器(CSTR)成功启动了餐厨垃圾与剩余污泥混合发酵平行系统, 重点探究了不同污泥停留时间(SRT)缩减幅度对于餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统的影响。结果表明, 较大幅度地缩减 SRT (> 8.3 d) 提升反应器运行负荷, 不利于反应器的稳定运行; 随着反应器运行负荷的增加, SRT 缩减幅度应逐渐降低(5 ~ 0.9 d), 能够取得餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统的高负荷稳定运行。经过 282 d 的运行, CSTR 混合发酵系统能够在 SRT 为 9.1 d, 进料负荷(以 COD 计)为 $(12.9 \pm 1.5) \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 的条件下稳定运行, 相应的甲烷产量为 $3.94 \sim 4.25 \text{ L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 甲烷产率(以 COD 计)为 $288 \sim 302 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, pH 和挥发性脂肪酸(VFA, 以 COD 计)分别稳定在 7.80 ~ 7.83 和 $0.32 \sim 0.39 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。此外, 还探究了高负荷条件下餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵污泥特性, 结果表明, 餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统甲烷转化途径以乙酸转化途径为主, 具有较高的乙酸、丙酸、丁酸和戊酸的产甲烷活性和辅酶 F₄₂₀ 的质量摩尔浓度。

关键词: 厌氧混合发酵; 甲烷; 餐厨垃圾; 剩余污泥; 污泥停留时间(SRT); 稳定性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0994-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201808114

Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge

YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, WEN Jun-wei, HAN Yu-le, LI Qian, WANG Xiao-chang

(Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, International Science & Technology Cooperation Center for Urban Alternative Water Resources Development, Engineering Technology Research Center for Wastewater Treatment and Reuse, Shaanxi Province, Key Laboratory of Environmental Engineering, Shaanxi Province, School of Environmental & Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Two parallel digestion systems of food waste (FW) and waste-activated sludge (WAS) were successfully initiated using a continuous stirred-tank reactor (CSTR), and the effect of different reduction extents of sludge retention time (SRT) on the co-digestion of FW and WAS was investigated. SRT Reduction extents longer than 8.3 d were not conducive to the stable operation of the co-digestion system when the organic load rate (OLR) was increased. The reduction extent of SRT should be reduced gradually from 5 d to 0.9 d to achieve high load and stable operation of the co-digestion of FW and WAS. After a long-term operation (approximately 282 d), the co-digestion reached stable operation at SRT of 9.1 d and OLR (calculated by COD) of $(12.9 \pm 1.5) \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$. The corresponding methane production, methane yield (calculated by COD), pH, and volatile fatty acid (VFA, calculated by COD) were $3.94 \sim 4.25 \text{ L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, $288 \sim 302 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 7.80 ~ 7.83, and $0.32 \sim 0.39 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Additionally, the sludge characteristics of the co-digestion of FW and WAS under a high loading rate were also investigated. The results showed that the primary pathway of methane conversion was through acetic acid during the co-digestion of FW and WAS. Meanwhile, higher methanogenic activity of acetic acid, propionic acid, butyric acid, valeric acid, and coenzyme F₄₂₀ concentration were also measured.

Key words: anaerobic co-digestion; methane; food waste; waste activated sludge; sludge retention time (SRT); stability

随着世界经济发展和人口增长,餐厨垃圾作为城市固废的重要成分,其产量呈持续增加的趋势^[1~3]。餐厨垃圾任意排放不仅造成环境污染,还造成资源浪费^[4]。在诸多治理措施中,厌氧消化工艺被认为是一种能够有效实现餐厨垃圾资源化利用的方法^[5,6]。餐厨垃圾进行厌氧消化过程中可转化成生物气(50% ~ 70% 甲烷和 25% ~ 50% 二氧化碳)用于发电或加热^[7,8]。然而,目前许多单独厌氧消化处理餐厨垃圾的厌氧消化工艺单元,由于微生物基质来源单一造成营养失衡和餐厨垃圾极易水解

容易导致挥发性脂肪酸(VFA)大量积累等原因,使其厌氧消化降解效率较低^[9]。

与此同时,剩余污泥作为城市污水处理厂的主要副产物之一,其处理成本大约占污水处理厂运营成本的 50%^[10,11]。由于剩余污泥厌氧消化过程中能够释放 NH₄⁺ 形成较强的 pH 缓冲体系,同时能够

收稿日期: 2018-08-14; 修订日期: 2018-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608430); 陕西省教育厅重点实验室项目(17JS077)

作者简介: 袁宏林(1965 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为固体废物资源化处理技术, E-mail: hlyuan@xauat.edu.cn

调节基质 C/N 比, 因此将餐厨垃圾与剩余污泥进行混合发酵逐渐成为国内外学者研究的热点^[9, 12]. 为最大限度地增加餐厨垃圾与剩余污泥产甲烷效率, 国内外学者针对不同的基质混合比^[13~15]、消化温度^[12]和进料频率^[6]等问题进行了大量的研究. 然而, 关于不同污泥停留时间(SRT)对餐厨垃圾与剩余污泥单相混合发酵反应器运行性能影响的研究较少, 同时对于 SRT 缩短幅度对混合发酵反应器性能的影响鲜见报道. SRT 越低, 相应地厌氧消化反应器的体积越小、基建和运营成本越低. 因此, 如何实现最短的 SRT, 同时拥有最大的产甲烷速率, 是其大规模工业化应用亟待解决的重要问题.

本研究构建了两个半连续平行运行的中温餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵连续搅拌釜式反应器(CSTR), 通过缩短 SRT(100 ~ 9.1 d)增加有机负荷[OLR, 以 COD 计, (1.69 ± 0.03) ~ (12.9 ± 1.5) g·(L·d)⁻¹], 考察 SRT 和 OLR 对餐厨垃圾和

剩余污泥混合发酵反应器性能的影响. 同时, 通过平行反应器长时间(282 d)的半连续稳定运行, 探究了小幅度缩短 SRT 对于取得更高负荷混合发酵体系的可行性. 此外, 还考察了低 SRT 高负荷条件下餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统稳定运行后消化污泥的产甲烷活性及其辅酶 F₄₂₀ 的质量摩尔浓度.

1 材料与方法

1.1 实验装置

如图 1 所示, 本研究采用的反应器为 CSTR 反应器, 内径为 90 mm, 柱体高 130 mm, 总体积为 0.83 L, 有效体积为 0.70 L, 底部配有磁力搅拌器, 转速为 120 ~ 130 r·min⁻¹. 反应器水浴温度为 37 ~ 39℃. CSTR 反应器进料模式为先出料后进料, 进料泵和出料泵均配有定时器, 定期校正进料泵和出料泵, 维持 CSTR 反应器内有效体积不变.

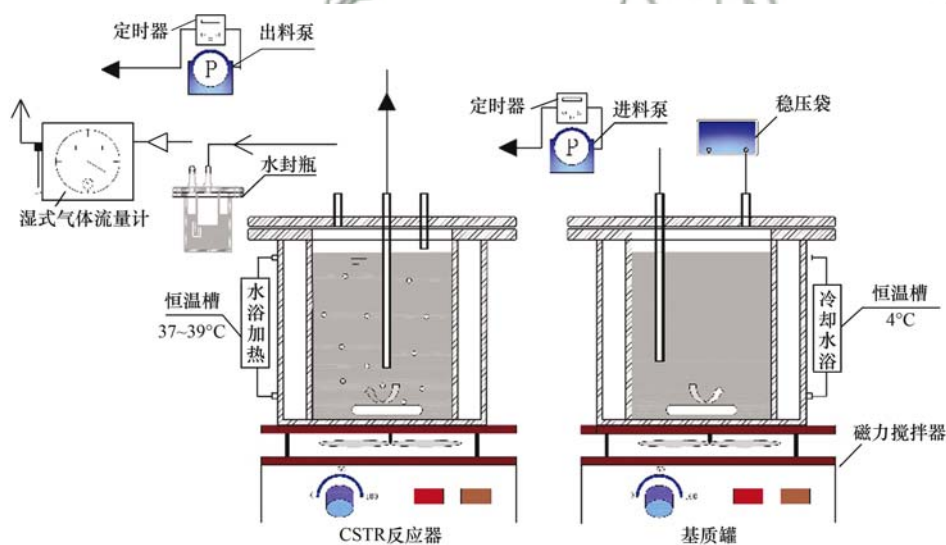


图 1 实验装置流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of continuously stirred-tank reactor setup and operation

1.2 餐厨垃圾、剩余污泥和接种污泥

本研究所使用的餐厨垃圾依据学生食堂餐厨垃圾主成分进行人工模拟配制^[6]. 餐厨垃圾的主要成分及其组成详见表 1. 剩余污泥取自西安市第五污水处理厂. 为实现较高的产甲烷速率, 剩余污泥与餐厨垃圾混合比例设定为 1:4(基于湿重)^[13, 14], 混合物破碎至 1 mm 以下, 然后用自来水将基质总固体(TS)调至 9.0% ~ 9.5%, 储存于 4℃ 的基质罐里. 接种污泥取自西安市汉斯啤酒厂中温消化罐^[16], 接种污泥体积为 0.7 L. 接种污泥和餐厨垃圾与剩余污泥的混合基质的主要理化特性如表 2 所示.

1.3 实验策略

本实验同步平行运行两个 CSTR 反应器(CSTR-

表 1 模拟餐厨垃圾的组成成分(湿重, 质量分数)¹⁾/%

餐厨垃圾		组成
主食	米饭	15
	面条	10
肉和蛋类	猪肉	10
	鸡肉	5
	鸡蛋	5
蔬菜	白菜	20
	土豆	20
	胡萝卜	13.8
油		1
食盐		0.2
总计		100

1) 通过加自来水调整餐厨垃圾的最终水分为 85% 左右

表 2 接种污泥和混合基质的理化特性¹⁾

Table 2 Physicochemical properties of seed sludge and feedstock

项目	接种污泥	厨余与污泥混合基质
总固体浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	29.6	84.2 ± 9.5
挥发性固体浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	12.4	72.6 ± 9.2
TCOD/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	16.7	114 ± 1.3
SCOD/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.81	47 ± 0.14
pH	7.55	4.23 ± 0.95
蛋白质/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.02	4.1 ± 0.05
多糖/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0.32	2.53 ± 0.02
$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	102	712 ± 46
碱度(以 CaCO_3 计)/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	16.5	N. D
乙酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	8.15	0.97
丙酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	N. D	0.05
丁酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	N. D.	N. D
戊酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	N. D.	N. D
异戊酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.90	N. D
C/%	/	41.9 ± 0.14
H/%	/	5.29 ± 0.07
O/%	/	29.4 ± 1.77
N/%	/	5.53 ± 0.02
S/%	/	0.92 ± 0.01

1) “/”表示未测定; N. D 表示未检测出

I 和 CSTR- II), 分为 3 个阶段: 启动阶段、SRT 递减阶段和高负荷运行阶段, 其运行参数详见表 3 和表 4. 其中, 启动阶段: 设定起始负荷(以 COD 计)为 $(1.69 \pm 0.03) \text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ (SRT = 100 d), 测定产气量、气体组分、VFA 和出料 pH, 同时测定基质和出料的 TCOD 和 SCOD; 运行稳定后增加进料和出料频次, 每次进出料体积不变且缩短间隔时间; 运行负荷经 $(2.58 \pm 0.31) \text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ (SRT = 50 d) 增加至 $(5.08 \pm 0.61) \text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ (SRT = 33.3 d), 稳定运行后即认为餐厨垃圾和剩余污泥单相混合发酵系统启动成功. SRT 递减阶段: 调整 SRT 为 50 d, 逐渐缩短 SRT 至 9.1 d, 每个阶段运行稳定后小幅度增加进出料次数 ($7 \text{ mL}\cdot\text{次}^{-1}$), 对应缩短每次进出料间隔时间. 高负荷运行阶段: 缩短 SRT 至 9.1 d, 运行负荷调整为 $(12.9 \pm 1.5) \text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, 稳定运行后持续运行 4 个 SRT, 测定高负荷条件下消化污泥对乙酸、丙酸、丁酸、戊酸和 H_2/CO_2 的降解速率, 同时测定消化污泥中辅酶 F_{420} 的浓度, 进一步判定低 SRT 高负荷条件下餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统高负荷稳定运行的可行性.

表 3 CSTR- I 反应器运行参数

Table 3 Operation parameters of CSTR- I reactor

项目	启动阶段			SRT 递减阶段									高负荷运行阶段
	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 5	阶段 6	阶段 7	阶段 8	阶段 9	
SRT/d	100	50	33.3	50	33.3	25	20	16.7	14.3	12.5	11.1	10	9.1
OLR(以 COD 计)/ $\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	1.40 ± 0.03	2.80 ± 0.31	4.06 ± 0.61	2.49 ± 0.11	3.53 ± 0.56	5.11 ± 0.57	6.36 ± 0.71	8.15 ± 0.34	8.32 ± 0.91	9.69 ± 0.68	10.5 ± 0.79	11.47 ± 1.38	12.9 ± 1.5
运行时间/d	1~10	11~18	19~26	27~54	55~90	91~117	118~130	131~159	160~173	174~193	194~228	229~248	249~282
pH	8.65 ± 0.07	8.54 ± 0.30	8.56 ± 0.17	8.59 ± 0.20	8.23 ± 0.56	8.61 ± 0.19	8.35 ± 0.17	8.49 ± 0.23	8.53 ± 0.13	8.52 ± 0.09	8.48 ± 0.19	8.13 ± 0.09	7.92 ± 0.18
甲烷产量/ $\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	0.22 ± 0.02	0.13 ± 0.04	0.16 ± 0.05	0.14 ± 0.06	0.44 ± 0.31	1.09 ± 0.24	1.69 ± 0.25	2.05 ± 0.45	2.70 ± 0.35	3.21 ± 0.18	3.33 ± 0.29	3.59 ± 0.39	3.83 ± 0.95
甲烷产率(以 COD 计)/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	117 ± 20	47.3 ± 4.7	43.8 ± 13.8	59.1 ± 28.6	120 ± 81	207 ± 47	259 ± 42	252 ± 60	319 ± 31	329 ± 30	315 ± 32	299 ± 47	302 ± 90
乙酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	20.5 ± 9.62	28.5 ± 12.5	23.5 ± 13.0	60.2 ± 101	4279 ± 4797	93.7 ± 79.7	202 ± 134	189 ± 159	254 ± 72.4	238 ± 72.2	456 ± 200	189 ± 97	216 ± 119
丙酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.3 ± 0.6	N. D.	26.2 ± 45.8	168 ± 278	950 ± 962	19.6 ± 15.9	39.4 ± 22.3	42.8 ± 39.4	45.1 ± 20.6	32.0 ± 19.3	77.4 ± 39.6	42.8 ± 39.4	37.7 ± 21.6
丁酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.6 ± 0.8	N. D.	3.8 ± 6.4	1.1 ± 2.0	914 ± 922	20.4 ± 20.6	20.6 ± 23.7	13.8 ± 16.5	38.8 ± 18.6	20.6 ± 9.7	67.9 ± 56.9	13.8 ± 16.5	6.2 ± 6.5
戊酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.0 ± 1.4	N. D.	2.7 ± 3.2	11.64 ± 9.97	29.0 ± 28.8	4.2 ± 6.3	38.6 ± 42.5	20.2 ± 18.0	56.7 ± 30.1	24.1 ± 11.9	99.6 ± 82.0	20.2 ± 18.0	8.3 ± 10.0
TVFA/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	16.0 ± 14.2	28.5 ± 12.5	56.2 ± 60.8	234 ± 283	7307 ± 7064	163 ± 138	301 ± 214	266 ± 229	394 ± 122	318 ± 103	701 ± 360	257 ± 129	268 ± 141

表 4 CSTR- II 反应器运行参数

Table 4 Operation parameters of CSTR- II reactor

运行参数	启动阶段			SRT 递减阶段									高负荷运行阶段
	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 5	阶段 6	阶段 7	阶段 8	阶段 9	
SRT/d	100	50	33.3	50	33.3	25	20	16.7	14.3	12.5	11.1	10	9.1
OLR(以 COD 计)/ $\text{g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	1.40 ± 0.03	2.80 ± 0.31	4.06 ± 0.61	2.49 ± 0.11	3.53 ± 0.56	5.11 ± 0.57	6.36 ± 0.71	8.15 ± 0.34	8.32 ± 0.91	9.69 ± 0.68	10.5 ± 0.79	11.47 ± 1.38	12.9 ± 1.5
运行时间/d	1~10	11~18	19~26	27~54	55~90	91~117	118~130	131~159	160~173	174~193	194~228	229~248	249~282
pH	8.57 ± 0.09	8.42 ± 0.32	8.51 ± 0.15	8.42 ± 0.32	8.51 ± 0.15	8.39 ± 0.19	8.24 ± 0.49	8.50 ± 0.31	8.31 ± 0.20	8.43 ± 0.18	8.52 ± 0.20	8.44 ± 0.18	8.43 ± 0.21
甲烷产量/ $\text{L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$	0.10 ± 0.09	0.12 ± 0.04	0.29 ± 0.14	0.15 ± 0.05	0.41 ± 0.24	1.41 ± 0.23	1.74 ± 0.26	2.07 ± 0.27	2.70 ± 0.25	2.85 ± 0.26	3.40 ± 0.31	3.65 ± 0.33	3.85 ± 0.72
甲烷产率(以 COD 计)/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$	85.6 ± 73.0	45.9 ± 17.0	79.7 ± 37.3	59.4 ± 21.1	116 ± 67	270 ± 38	269 ± 45	257 ± 38	321 ± 34	290 ± 36	325 ± 37	292 ± 49	288 ± 93
乙酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	19.6 ± 12.2	25.8 ± 13.4	58.7 ± 35.2	763 ± 921	4199 ± 4463	277 ± 396	153 ± 94	169 ± 129	264 ± 95	159 ± 86	363 ± 159	177 ± 124	248 ± 313
丙酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.5 ± 2.0	N. D.	171 ± 118	1932 ± 1195	3680 ± 1182	361 ± 1039	19.0 ± 12.0	24.1 ± 25.0	52.1 ± 24.0	17.8 ± 9.6	67.1 ± 31.3	31.1 ± 22.4	29.0 ± 19.0
丁酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.9 ± 1.4	N. D.	5.9 ± 7.1	110 ± 72	1576 ± 1567	86.2 ± 226	16.1 ± 18.1	16.3 ± 22.2	60.0 ± 23.5	20.4 ± 12.2	74.1 ± 57.3	13.2 ± 13.4	8.8 ± 8.6
戊酸/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.9 ± 2.0	N. D.	12.9 ± 12.9	115 ± 128	1507 ± 1087	69.7 ± 125	38.2 ± 41.3	30.7 ± 32.0	72.2 ± 51.0	43.2 ± 63.2	101 ± 64.4	22.4 ± 16.9	18.5 ± 11.7
TVFA/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	19.9 ± 14.9	25.8 ± 13.3	249 ± 149	2919 ± 1017	10962 ± 6446	794 ± 1747	226 ± 164	238 ± 203	449 ± 137	268 ± 110	605 ± 278	244 ± 155	305 ± 338

1.4 测定项目与方法

TS、VS、COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和碱度的测定采用标准方法^[17]; pH 采用便携式 pH 计(Horiba, 日本); 蛋白质和多糖分别采用 Folin-酚试剂法^[18]和硫酸-蒽酮法^[19]. CH_4 、 CO_2 、 N_2 和 H_2 采用气相色谱(GC-PE680, 美国), 填充色谱柱固定相(Porapak Q) 进样口温度为 130°C , 柱温箱温度为 140°C , TCD 温度为 160°C , 载气为氩气, 流速 $4\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; VFA 采用气相色谱(GC-Shimadzu2014, 日本), 色谱柱为 DB-FFAP, FID 检测器温度为 230°C , 进样口温度为 200°C , 程序升温至 100°C 保持 2 min, 以 $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率上升到 120°C 并保持 2 min, 再以 $5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率上升到 200°C 并保持 2 min. 厌氧消化转化速率(水解速率、酸化速率、乙酸化速率和甲烷化速率)、产甲烷活性和辅酶 F_{420} 的测定分别依据 Li 等^[12]和 Reynolds 等^[20]所述的方法进行. C、H、O、N 和 S 元素采用高温裂解有机元素分析仪进行测定(Vario PYRO cube, 德国).

2 结果与讨论

2.1 餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵启动阶段

在 SRT 和 OLR(以 COD 计)分别为 100 d 和 $(1.69 \pm 0.03)\text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 的条件下, 启动餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵反应器 CSTR-I 和 CSTR-II. 两反应器启动过程中 OLR、SRT 和运行时间等参数详见表 3、表 4 和图 2. 运行稳定后通过逐渐缩短 SRT 增加运行负荷, 相应地生物气产量(GP)和甲烷产量(MP)逐渐增加, 甲烷在生物气中占比均稳定在 55%~66%(图 3). pH 和 VFA 的变化趋势能够直观说明反应器运行状况. 在启动过程中, 两反应器内 pH 为 7.91~8.98, 产甲烷菌最适 pH 为 7.0~7.8^[21], 同时 VFA(以 COD 计)最大浓度为 388

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 低于产甲烷菌 VFA 抑制浓度(以 COD 计)为 $5000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[22](图 4). 在启动阶段末期, SRT 和 OLR 分别为 33.3 d 和 $(5.08 \pm 0.61)\text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 的条件下, GP 和 MP 分别为 $0.75\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.50\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ (图 3), 且无 VFA 累积现象, 表明餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统启动成功.

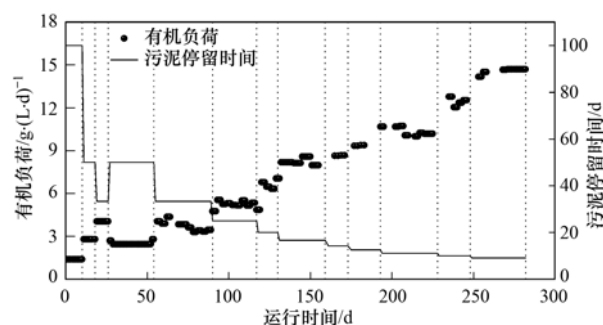


图 2 两平行反应器(CSTR-I 和 CSTR-II)运行过程中有机负荷和污泥停留时间的变化

Fig. 2 Experimental conditions of SRTs and OLRs applied throughout the experiment for the two parallel reactors (CSTR-I and CSTR-II)

2.2 SRT 递减阶段

2.2.1 生物气产量、甲烷产量和甲烷占比

餐厨垃圾和剩余污泥成功启动后, 调整 SRT 为 50 d, 进入 SRT 递减阶段(图 2). 其中, 各个阶段 GP、MP 和生物气中甲烷占比变化如图 3 所示. SRT 由 50 d 逐渐缩短至 9.1 d, CSTR-I 的 GP 和 MP 分别由 $(0.34 \pm 0.06)\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $(0.15 \pm 0.06)\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 逐渐增加至 $(6.16 \pm 1.47)\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $(3.83 \pm 0.95)\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$; 平行运行的 CSTR-II 的 GP 和 MP 与 CSTR-I 变化趋势一致, 相应地 GP 和 MP 分别由 $0.30 \pm 0.07\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $(0.15 \pm 0.05)\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 逐渐增加至 $(6.27 \pm 1.17)\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $(3.85 \pm 0.72)\text{ L}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ (图 3), 显著高于采用相同基质且最大运行负荷 $[(17.0 \pm 0.8)\text{ g}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}]$ 时 CSTR 反应器的生物气产量 $[5.85$

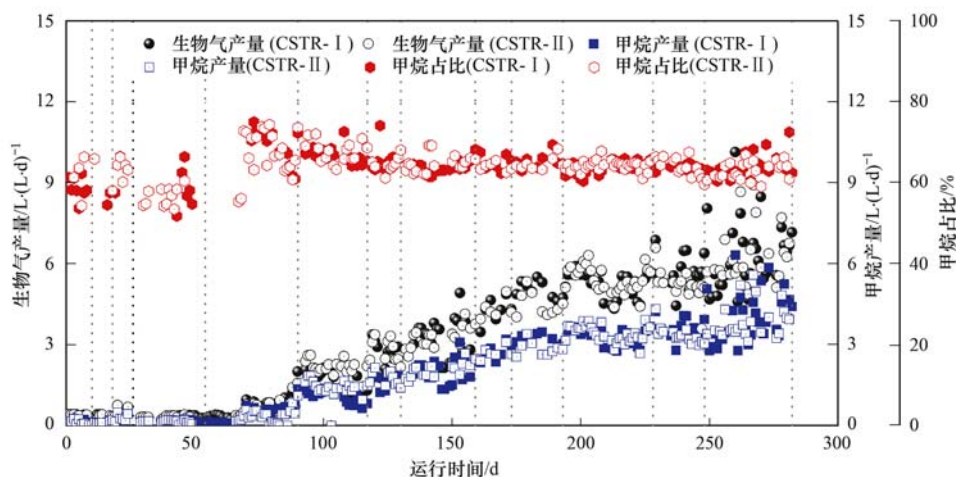


图 3 不同 SRT 条件下生物气产量、甲烷产量和生物气中甲烷占比

Fig. 3 Biogas production, methane production, and CH_4 in biogas at different tested SRTs

$L \cdot (L \cdot d)^{-1}$]^[6]. 甲烷在生物气中的占比在整个 SRT 调整过程中逐渐趋于稳定. 在 SRT 由 50 d 经 33.3 d 调整为 25 d 时, SRT 缩短幅度较大, 相应地甲烷占比由 $(58 \pm 5)\%$ 经 $(69 \pm 4)\%$ 逐渐稳定为 $(67 \pm 2)\%$; 后续 SRT 缩短幅度较小, 经 7 次小幅度调整, 逐渐将 SRT 由 25d 缩短为 9.1d, CSTR-I 和 CSTR-II 生物产气中甲烷占比分别稳定在 $(64 \pm 3)\%$ 和 $(64 \pm 2)\%$. 根据表 1 中餐厨垃圾和剩余污泥混合基质的元素组成和 Buswell 方程^[23], 计算理论生物气中甲烷占比为 60%. Li 等^[6]采用相同的基质组成, 在 CSTR 稳定运行阶段, 相应地生物气中甲烷占比为 58% ~ 70%, 与本研究结果一致.

2.2.2 VFA 和 pH

VFA 和 pH 是判定厌氧消化系统稳定运行的重要指标^[24~26]. 不同 SRT 条件下, CSTR-I 和 CSTR-II 中 pH 和 VFA 变化如图 4 所示. 第 1 阶段, 设定

SRT 为 50 d, 稳定运行 28 d 后缩短 SRT 为 33.3 d 进入第 2 阶段, CSTR-I 和 CSTR-II 中的 pH 显著下降, 同时出现大量乙酸和丙酸等挥发性有机酸累积. 当持续运行 9 d 时, CSTR-I 和 CSTR-II 中的 TVFA 均达到最大值, 分别为 $18.80 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $21.96 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 相应地 VFA/碱度比值分别为 4.20 和 4.62, 均大于消化系统稳定运行 TVFA/碱度文献建议值 0.4^[27, 28]. Kaffle 等^[29]的研究表明当反应器内 TVFA 大于 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 会抑制产甲烷菌活性. 同时 pH 分别降至 7.44 和 7.46, 处于产甲烷菌的最适 pH (7.3 ~ 7.8) 范围内^[24, 30]. 同时, 启动阶段相同负荷条件下 CSRT-I 和 CSTR-II 均能够稳定运行. 因此维持反应器运行条件不变, 持续运行 9 ~ 12 d 后反应器内 TVFA 逐渐降至 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, pH 逐渐增至 8.0 以上.

第 2 阶段与启动阶段相比, 负荷相同且 SRT 幅

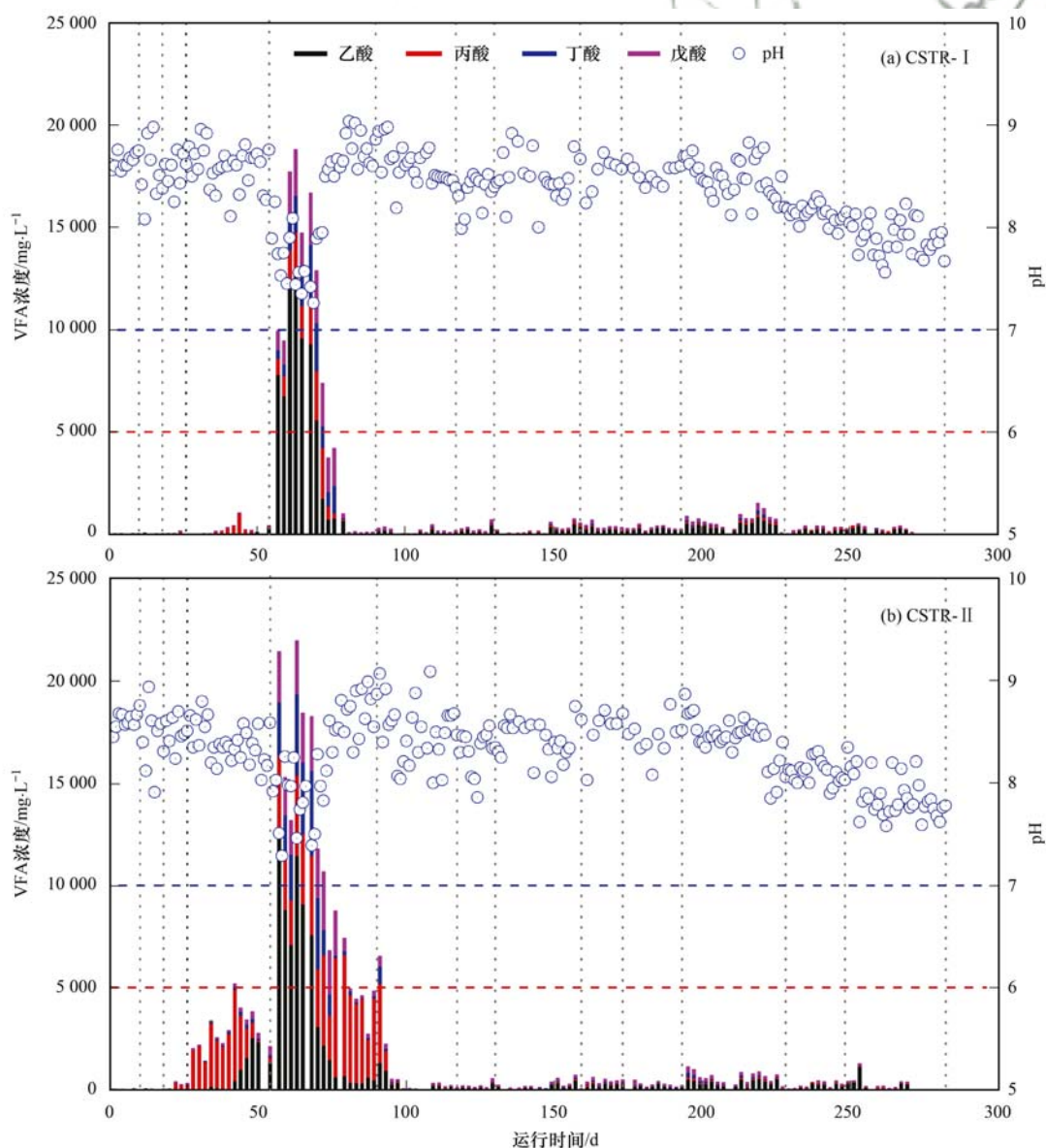


图 4 不同 SRT 条件下 CSTR-I 和 CSTR-II 反应器中 VFA 和 pH 的变化

Fig. 4 VFA concentration and pH temporal profiles throughout the process at different STRs: CSTR-I and CSTR-II

度递减相同, CSRI- I 和 CSTR- II 均同步出现了大量 VFA 累积的现象, 而启动阶段均未出现 VFA 积累现象. 对比分析, 其原因可能在于第 2 阶段 SRT 为 50 d 时稳定运行时间较长, 反应器内菌群较为均衡, 当较大幅度降低 SRT 为 33.3 d 时, 负荷冲击较为明显; 而启动阶段, SRT 为 50 d 时相应地运行时间较短, 反应器内菌群处于持续演变过程, 缩短 SRT 为 33.3 d 时, 负荷冲击不明显. 当 SRT 递减阶段调整 SRT 为 33.3 d 且稳定运行 11~17 d 后, 持续缩短 SRT 为 25 d 时 (SRT 缩短幅度为 8.3 d), CSRI- I 反应器内 pH (8.61 ± 0.19) 无明显波动 (表 3), TVFA 最大为 $0.35 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, CSTR- II 反应器内仅在前 3 d 出现较高的 TVFA 累积 [$(2.24 \sim 6.53) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$], 随后即稳定在 $0.52 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.

第 3~9 阶段, SRT 缩短幅度由 5 d 逐渐降低至 1.1 d, 均未出现 TVFA 累积现象 (图 4), 同时 pH 不低于 8.0 且波动较小, CSTR- I 和 CSTR- II 运行稳定. 因此, 通过缩短 SRT 提高 CSTR 负荷时, 对于长期稳定运行后的反应器, SRT 的缩短幅度最好不超过 8 d. 当 SRT 缩短为 9.1 d 时, CSTR- I 和 CSTR- II 运行负荷为 $(12.9 \pm 1.5) \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 反应器内 pH 不低于 7.5, VFA 平均为 $0.30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 而采用相同基质和反应器构型的研究结果表明, 当 OLR 为 $(12.5 \pm 1.4) \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 反应器内出现了大量的丙酸积累 [$(3.05 \pm 1.11) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$]. 而丙酸通常作为反应器性能恶化的重要指示参数. 因此, 本研究采用 SRT 小幅度且幅度递减的策略能够取得相同负荷条件下更稳定的餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统.

2.2.3 TCOD 去除率和厌氧消化反应速率

不同 SRT 条件下餐厨垃圾和剩余污泥中温混合发酵系统 (CSTR- I 和 CSTR- II) 的 TCOD 去除率如图 5 所示. SRT 缩减第 1 阶段, SRT 为 50 d 时, CSTR- I 和 CSTR- II 的 TCOD 去除率分别为 $(74 \pm 5)\%$ 和 $(70 \pm 2)\%$. SRT 缩减第 2 阶段, CSTR- I 和 CSTR- II 的 TCOD 去除率分别降至 $(68 \pm 8)\%$ 和 $(63 \pm 10)\%$. SRT 缩减第 3 阶段至第 9 阶段, TCOD 去除率逐渐增加且趋于稳定 [$(73 \pm 2)\%$ 和 $(72 \pm 2)\%$]. 由此可知, SRT 为 9.1 d 时, 餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统仍能够稳定运行.

厌氧消化过程主要包括水解、酸化、乙酸化和甲烷化这 4 个步骤^[31], SRT 递减阶段稳定运行条件下各个步骤的反应速率如图 6 所示. SRT 递减第 1 阶段, CSRI- I 的水解速率、酸化速率、乙酸化速率和产甲烷速率分别为 $(75 \pm 2)\%$ 、 $(79 \pm 2)\%$ 、 $(79 \pm 2)\%$ 和 $(79 \pm 2)\%$, 相应地 CSTR- II 中的 4 种

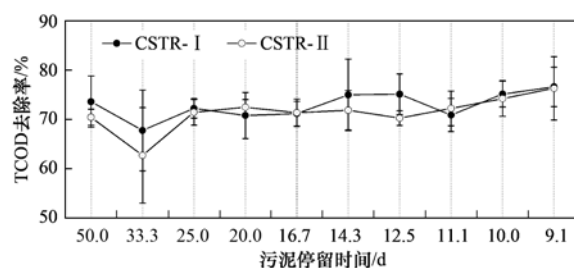


图 5 不同 SRT 条件下 TCOD 的平均去除率变化

Fig. 5 Average median values of organic matter removal of TCOD at different SRTs

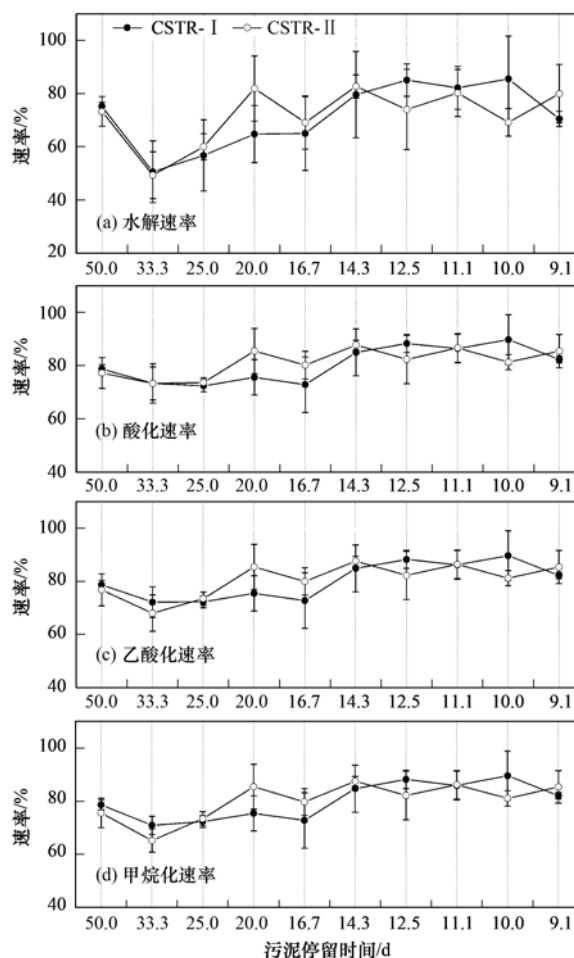


图 6 不同 SRT 条件下运行稳定后厌氧消化 4 个步骤反应速率

Fig. 6 Conversion ratios of the four anaerobic digestion steps during the steady period at different tested SRTs

反应速率分别为 $(73 \pm 6)\%$ 、 $(77 \pm 6)\%$ 、 $(77 \pm 6)\%$ 和 $(76 \pm 6)\%$. 然而, SRT 递减第 2 阶段, CSTR- I 和 CSTR- II 的水解速率波动较大, 且产甲烷速率分别降低为 71% 和 65%, 与 VFA 的大量积累有关. 第 3~9 阶段, 4 种速率均呈现稳步增加的趋势. 相比于酸化速率、乙酸化速率和产甲烷速率, 水解速率的波动较大 (图 6). 当 SRT 为 10 d 时, CSTR- I 中水解速率、酸化速率、乙酸化速率和产甲烷速率最大, 分别为 86%、90%、90% 和 90%; 当 SRT 为 14.3 d 时, CSTR- II 中水解速率、

酸化速率、乙酸化速率和产甲烷速率最大,分别为 83%、88%、88% 和 87% (图 6)。两反应器的水解速率、酸化速率、乙酸化速率和产甲烷速率均高于相同基质类型、反应器构型和 OLR 条件下研究结果^[12]。其原因可能主要与 SRT 小幅度缩减、接种污泥差异和驯化时间等因素有关。由图 6 可知:第 7~9 阶段,两反应器中 4 种反应速率趋于稳定,与 VFA、pH、GP 和 MP 变化趋势一致。由此推测可知:两反应器具有实现更高负荷餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统稳定运行的潜能。

2.2.4 物料平衡

不同 SRT 条件下餐厨垃圾和剩余污泥中温混合发酵系统(CSTR-I 和 CSTR-II)的物料平衡如图 7 所示。可溶性 COD (SCOD) 和颗粒态 COD (PCOD) 之和为总 COD (TCOD)^[31]。在逐渐缩减 SRT 增加反应器运行负荷的过程中,两平行反应器进料的 SCOD 和 PCOD 占比分别为(41 ± 6)% 和(59

± 6)%。不同 SRT 条件下,相应地 CSTR-I 出料中甲烷占比(以 COD 计)分别为 74%、68%、72%、75%、73%、79%、81%、79%、81% 和 78% [图 7(a)]; CSTR-II 出料中甲烷占比(以 COD 计)分别为 70%、63%、71%、73%、71%、72%、70%、72%、74% 和 76% [图 7(b)]。由于水解和酸化作用,使得反应器出料中 SCOD 和 PCOD 与进料基质相比均降低^[32]。当 SRT 为 12.5 d 和 10 d 时, CSTR-I 的甲烷占比(以 COD 计)最大为 81%;当 SRT 为 14.3 d 和 11.1 d 时, CSTR-II 的甲烷占比(以 COD 计)最大为 86%。该结果与图 6(d)中 CSTR-I 和 CSTR-II 的产甲烷速率一致。

2.3 高负荷运行阶段

当 SRT 缩减阶段运行至第 9 阶段后,继续缩小 SRT 至 9.1 d, 进入高负荷运行阶段。由图 3~7 可知,在高负荷条件下以更小的 SRT 缩减幅度增加反应器运行负荷(以 COD 计)至(12.9 ± 1.5)

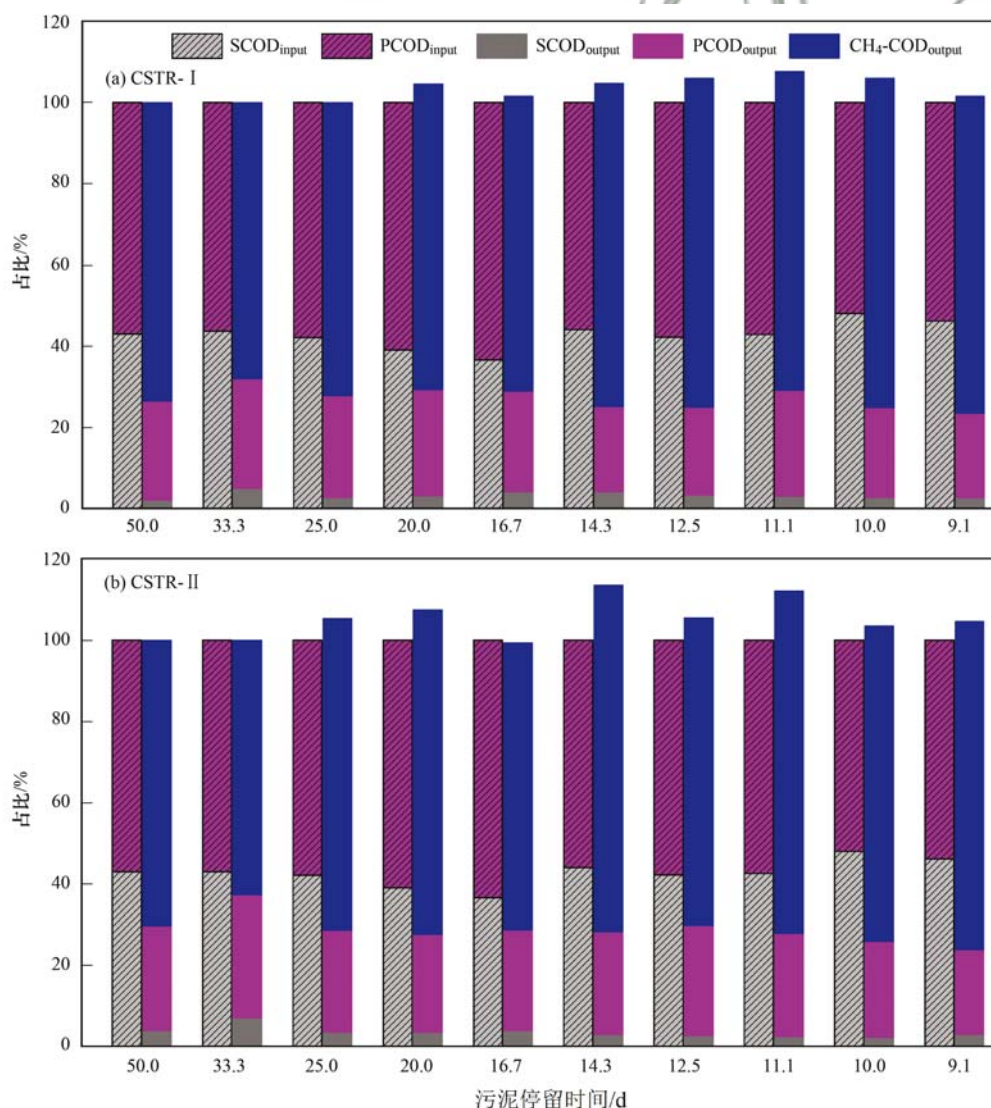


图 7 不同 SRT 条件下 CSTR-I 和 CSTR-II 反应器中 COD 的平衡

Fig. 7 COD mass balances at different tested SRTs: CSTR-I and CSTR-II

$\text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 稳定运行 3 个 SRT 后, CSTR-I 的 GP 和 MP 分别稳定在 $(6.48 \pm 0.71) \text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $(4.25 \pm 0.67) \text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, pH 和 VFA (以 COD 计) 分别稳定在 (7.83 ± 0.09) 和 $(0.39 \pm 0.11) \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; CSTR-II 的 GP、MP、pH 和 VFA 分别稳定在 $(6.31 \pm 0.83) \text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $(3.94 \pm 0.52) \text{L} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 、 (7.80 ± 0.17) 和 $(0.32 \pm 0.19) \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。相应地 CSTR-I 和 CSTR-II 的 TCOD 去除率分别为 $(77 \pm 4)\%$ 和 $(76 \pm 6)\%$, 水解速率、酸化速率、乙酸化速率和甲烷化速率均维持在以往的较高水平, 物料平衡中 CH_4 -COD 占比较 SRT 为 10 d 时略有上升。

在 SRT 和 OLR 分别为 9.1 d 和 $(12.9 \pm 1.5) \text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 的条件下, CSTR-I 和 CSTR-II 稳定运行 4 个 SRT 时, 取样测试污泥的乙酸、丙酸、丁酸和戊酸产甲烷活性和 H_2/CO_2 产甲烷活性及其辅酶 F_{420} 的浓度, 结果如表 5 所示。其中, 乙酸、丙酸、丁酸和戊酸产甲烷活性测定时各种初始酸浓度 (以 COD 计) 均为 $5 \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。各种酸的产甲烷速率显著高于 H_2/CO_2 产甲烷速率, 说明消化污泥产甲烷途径主要是乙酸转化途径, 氢气转化途径较少。消化污泥对相同浓度的各种酸的转化速率大小依次为: 乙酸 > 丁酸 > 戊酸 > 丙酸。其中, 利用乙酸和丁酸产甲烷速率 (以 CH_4 -COD/VSS 计) $[0.52 \sim 0.64 \text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}]$ 和 $[0.63 \sim 0.52 \text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}]$ 是 Li 等^[12] 研究相同基质中温混合发酵系统乙酸和丁酸产甲烷速率 (以 CH_4 -COD/VSS 计) $[0.2 \text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}]$ 和 $[0.1 \sim 0.2 \text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}]$ 的 2.5 ~ 3 和 3 ~ 6 倍, 与高温 (55°C) 混合发酵系统的乙酸产甲烷速率相当。此外, CSTR-I 和 CSTR-II 中消化污泥的辅酶 F_{420} (以 VSS 计) 分别为 $0.78 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.86 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于其他消化污泥的辅酶 F_{420} 质量摩尔浓度 ($0.006 \sim 0.49 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$)^[33]。因此, 通过小幅度缩减 SRT 的策略, 能够有效避免负荷冲击对消化菌群的影响, 进而逐渐驯化获得更高活性的混合发酵菌群。

表 5 CSTR-I 和 CSTR-II 内消化污泥各种酸和氢气产甲烷活性及其辅酶 F_{420}

Table 5 Specific methanogenic activity (SMA) from acetate, propionate, butyrate, valerate and H_2 , and F_{420} content in CSTR-I and CSTR-II

项目	CSTR-I	CSTR-II
乙酸	0.52	0.64
丙酸	0.11	0.14
产甲烷活性 (以 CH_4 -COD/VSS 计) / $\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$		
丁酸	0.63	0.52
戊酸	0.49	0.35
H_2/CO_2	0.03	0.02
辅酶 F_{420} (以 VSS 计) / $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$	0.78	0.86

3 结论

餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统启动成功后, 重点考察了不同 SRT 对于 CSTR 混合发酵系统的影响, 同时探究了小幅度缩减 SRT 的策略对于实现高负荷混合发酵系统的可行性及其稳定运行特性。结果表明: ① 一定负荷条件下运行稳定后, 通过缩减 SRT 增加反应器运行负荷时, SRT 缩减幅度较大 ($> 8.3 \text{d}$) 会导致反应器内 pH、VFA、水解速率、酸化速率、乙酸化速率、产甲烷速率和 TCOD 去除率等出现较大波动, 不利于反应器的稳定运行; ② 经过 9 个阶段逐渐缩短 SRT 的长时间调控和运行, 进料负荷 (以 COD 计) 相对较高时 $[5.11 \sim 12.9 \text{g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}]$, 缩减 SRT 增加负荷的同时逐渐降低 SRT 缩减幅度 (5 d 逐渐降低至 0.9 d), 能够实现餐厨垃圾和剩余污泥混合发酵系统在低 SRT 高负荷条件下的高效稳定运行。

参考文献:

- [1] Zhang C S, Su H J, Baeyens J, *et al.* Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **38**: 383-392.
- [2] Browne J D, Murphy J D. Assessment of the resource associated with biomethane from food waste[J]. *Applied Energy*, 2013, **104**: 170-177.
- [3] Ariunbaatar J, Panico A, Frunzo L, *et al.* Enhanced anaerobic digestion of food waste by thermal and ozonation pretreatment methods[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, **146**: 142-149.
- [4] Zhang C S, Su H J, Tan T W. Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid-liquid system[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **145**: 10-16.
- [5] Whiting A, Azapagic A. Life cycle environmental impacts of generating electricity and heat from biogas produced by anaerobic digestion[J]. *Energy*, 2014, **70**: 181-193.
- [6] Li Q, Yuwen C S, Cheng X R, *et al.* Responses of microbial capacity and community on the performance of mesophilic co-digestion of food waste and waste activated sludge in a high-frequency feeding CSTR[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **260**: 85-94.
- [7] Us E, Perendeci N A. Improvement of methane production from greenhouse residues: optimization of thermal and H_2SO_4 pretreatment process by experimental design[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **181-182**: 120-131.
- [8] Zhang J X, Loh K C, Li W L, *et al.* Three-stage anaerobic digester for food waste[J]. *Applied Energy*, 2017, **194**: 287-295.
- [9] Zhang J X, Li W L, Lee J, *et al.* Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge by biological co-pretreatment[J]. *Energy*, 2017, **137**: 479-486.
- [10] Zahedi S, Icaran P, Yuan Z, *et al.* Assessment of free nitrous acid pre-treatment on a mixture of primary sludge and waste activated sludge: effect of exposure time and concentration[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **216**: 870-875.
- [11] Razaviarani V, Buchanan I D. Anaerobic co-digestion of

- biodiesel waste glycerin with municipal wastewater sludge: microbial community structure dynamics and reactor performance [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **182**: 8-17.
- [12] Li Q, Li H, Wang G J, *et al.* Effects of loading rate and temperature on anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge in a high frequency feeding system, looking in particular at stability and efficiency[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **237**: 231-239.
- [13] 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.
- [14] Jang H M, Ha J H, Kim M S, *et al.* Effect of increased load of high-strength food wastewater in thermophilic and mesophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge on bacterial community structure[J]. *Water Research*, 2016, **99**: 140-148.
- [15] Heo N H, Park S C, Kang P H. Effects of mixture ratio and hydraulic retention time on single-stage anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2004, **39**(7): 1739-1756.
- [16] Wang G J, Li Q, Gao X, *et al.* Synergetic promotion of syntrophic methane production from anaerobic digestion of complex organic wastes by biochar: performance and associated mechanisms[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **250**: 812-820.
- [17] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (21st ed.) [M]. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
- [18] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the Folin phenol reagent [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, **193**(1): 265-275.
- [19] 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.
- [20] Reynolds P J, Collieran E. Evaluation and improvement of methods for coenzyme F420 analysis in anaerobic sludges [J]. *Journal of Microbiological Methods*, 1987, **7**(2-3): 115-130.
- [21] Negi S, Dhar H, Hussain A, *et al.* Biomethanation potential for co-digestion of municipal solid waste and rice straw: a batch study[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **254**: 139-144.
- [22] 许之扬. 餐厨垃圾固态厌氧消化过程内源性抑制效应研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2014.
- [23] Buswell A M, Mueller H F. Mechanism of methane fermentation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1952, **44**(3): 550-552.
- [24] Zahedi S, Solera R, García-Morales J L, *et al.* Evaluation of the effect of glycerol supplementation on the anaerobic digestion of real municipal solid waste in batch mode[J]. *Fuel*, 2017, **193**: 15-21.
- [25] Rincón B, Borja R, González J M, *et al.* Influence of organic loading rate and hydraulic retention time on the performance, stability and microbial communities of one-stage anaerobic digestion of two-phase olive mill solid residue[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2008, **40**(2): 253-261.
- [26] Zahedi S, Rivero M, Solera R, *et al.* Mesophilic anaerobic co-digestion of sewage sludge with glycerine: effect of solids retention time[J]. *Fuel*, 2018, **215**: 285-289.
- [27] Ahring B K, Sandberg M, Angelidaki I. Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, **43**(3): 559-565.
- [28] 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.
- [29] Kifle G K, Kim S H. Sludge exchange process on two serial CSTRs anaerobic digestions: process failure and recovery [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(13): 6815-6822.
- [30] Dahunsi S O, Oranusi S, Owolabi J B, *et al.* Synergy of Siam weed (*Chromolaena odorata*) and poultry manure for energy generation: effects of pretreatment methods, modeling and process optimization [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **225**: 409-417.
- [31] Xiao B Y, Qin Y, Zhang W Z, *et al.* Temperature-phased anaerobic digestion of food waste: a comparison with single-stage digestions based on performance and energy balance [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **249**: 826-834.
- [32] Ge H Q, Jensen P D, Batstone D J. Pre-treatment mechanisms during thermophilic-mesophilic temperature phased anaerobic digestion of primary sludge[J]. *Water Research*, 2010, **44**(1): 123-130.
- [33] 马小云, 万金泉. 苯酚对厌氧颗粒污泥的毒性研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1402-1406.
- Ma X Y, Wan J Q. Study on toxicity of phenol to anaerobic granular sludge [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1402-1406.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading ...	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)