

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业NO_x排放清单及排放特征 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)

兰州市煨炕污染物排放清单及其对PM_{2.5}浓度贡献 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)

北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)

郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)

菏泽市冬季PM_{2.5}中二元羧酸类SOA的昼夜变化特征 孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)

我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征 温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)

嘉兴市2015年人为源VOCs排放清单 郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)

上海某石化园区周边区域VOCs污染特征及健康风险 盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)

SBR工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征 杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)

太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应 石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)

巢湖2016年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析 胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)

蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响 彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)

三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响 陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)

纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响 白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)

澜沧江流域水体悬浮颗粒物δ¹⁵N空间差异及成因分析 唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)

潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律 耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)

蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素 张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)

典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算 熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)

农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)

城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征 刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)

不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响 葛德, 张守红 (5015)

四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用 王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)

厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用 卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)

光助二茂铁/H₂O₂非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶 张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)

基于同位素技术的短程硝化过程N₂O产生途径 杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)

基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响 安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)

厌氧/好氧SPNDPR系统实现低C/N城市污水同步脱氮除磷的优化运行 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)

污水处理厂SNAD工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)

盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学 唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)

中试ANAMMOX-ASBR处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性 张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)

碳氮比对颗粒污泥CANON反应器脱氮性能和N₂O释放的冲击影响 付昆明, 姜姍, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)

污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析 房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)

重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析 伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)

韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布 刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)

有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源 杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)

纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的α-HCH 姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)

株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征 申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)

生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响 王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)

生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响 俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)

颗粒有机质对水稻稻吸收及转运的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

施肥对向日葵吸收积累Cd的影响 林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄久如 (5198)

不同水稻品种对重金属的积累特性 曹鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)

芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤 罗佳宸, 李思悦 (5217)

三峡库区典型河流水-气界面CO₂通量日变化观测及其影响因素分析 商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)

富营养化湖区CH₄排放特征及其影响因素 申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)

短期放牧对半干旱草地生态系统CO₂和N₂O排放的影响 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)

覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响 冯兆忠, 袁相洋 (5257)

臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物(BVOCs)影响的研究进展 杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)

地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展 张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)

污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素 《环境科学》征订启事(4848) 《环境科学》征稿简则(4990) 信息(5188, 5216, 5236)

污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析

房平¹, 唐安平^{1,2}, 付兴民³, 李伟³, 文洋³, 佟娟^{2*}, 魏源送²

(1. 西安工程大学环境与化学工程学院, 西安 710048; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044)

摘要: 污泥性质对预处理强化厌氧消化工艺的效果有较大影响. 本研究对比了某实际污水厂 A²O 工艺和 A²O-MBR 工艺产生的剩余污泥在微波预处理-厌氧消化过程中污泥性质的变化与产气效果, 并考察了在预处理和厌氧消化过程中污泥的古菌群落结构变化. 结果表明, A²O 工艺剩余污泥有机质含量比 A²O-MBR 污泥高出 16.4% (分别为 66.4% 和 50.0%), SCOD、溶解性蛋白质和多糖分别为后者 1.24、2.02 和 4.84 倍, 具有更好的可生物降解性. 虽然预处理对生物降解性差的 A²O-MBR 污泥有机物释放效果更好, 但 A²O 污泥在微波预处理-厌氧消化后产甲烷量比相应处理后的 A²O-MBR 污泥多 26.1%. 两种剩余污泥的古菌群落结构差异较大, A²O-MBR 污泥中甲烷丝菌属和甲烷八叠球菌属丰度分别比 A²O 污泥多 3.68% 和 19.73%. 预处理对古菌群落的丰富度和均匀度影响相对较小, 但厌氧消化后波动较大. 污泥中有机组分不同是引起古菌群落结构变化的重要影响因素.

关键词: 剩余污泥; 污泥性质; 微波预处理; 厌氧消化; 古菌群落结构

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-5108-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803146

Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis

FANG Ping¹, TANG An-ping^{1,2}, FU Xing-min³, LI Wei³, WEN Yang³, TONG Juan^{2*}, WEI Yuan-song²

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Sludge characteristics is an important factor in sludge pretreatment and anaerobic digestion (AD) efficiency. Therefore, waste sludge of anaerobic-anoxic-aerobic (A²O) and A²O-membrane bioreactor (MBR) wastewater treatment processes from a full-scale wastewater treatment plant were taken, and the variations of sludge characteristics and performance during microwave pretreatment and AD were compared. The succession of archaeal community structure during the sludge treatment was also investigated. A²O waste sludge showed better biodegradability than A²O-MBR waste sludge did, with 16.4% higher organic matter content (66.4% vs. 50.0%), soluble chemical oxygen demand (COD) (1.24 fold), soluble protein (2.02 fold), and polysaccharides (4.84 fold). Although the efficiency of microwave pretreatment for A²O-MBR waste sludge was better than that for A²O waste sludge, the latter sludge produced 26.1% more methane than the former did. The two types of waste sludge showed different archaeal community structures. The abundances of *Methanotherix* and *Methanosarcina* in A²O-MBR waste sludge were 3.68% and 19.73% higher than that in A²O waste sludge. The richness and evenness of archaeal communities slightly changed after pretreatment, but significantly changed after AD. The Chao1 index increased by 54.0% - 68.8% after AD, whereas the Pielou index decreased by 16.2% - 34.6%. Redundancy analysis showed that the organic components of waste sludge contributed to the succession of archaeal community structure.

Key words: waste sludge; sludge characteristics; microwave pretreatment; anaerobic digestion; archaeal community structure

厌氧消化是污水处理厂产生的剩余污泥最常用的末端处理方式之一^[1], 具有减少污泥体积, 削减病原菌微生物, 改善污泥性能, 产生沼气等优点^[2]. 污泥的水解阶段是厌氧消化过程的限速阶段, 污泥微生物细胞中的有机物释放困难则是水解缓慢的主要原因之一^[3]. 预处理可以破坏剩余污泥的细胞结构, 释放细胞内有机物质, 显著增强厌氧消化. 在众多预处理方法中, 微波预处理是一种有效的污泥预处理方法, 加热速率高, 可促使污泥溶

胞破壁释放大量溶解性有机物, 提高污泥的生物可降解性及厌氧产气效果^[4-6]. 近年来人们也对微波与酸、碱、H₂O₂ 等相结合的组合预处理工艺进行了探索^[7]. 本课题组之前的研究表明, 优化后的微波-H₂O₂-碱组合工艺比单独微波预处理对溶解性有机

收稿日期: 2018-03-21; 修订日期: 2018-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578535)

作者简介: 房平(1975~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水与污泥处理理论与技术, E-mail: 469493@qq.com

* 通信作者, E-mail: hitj@163.com

物的释放及厌氧消化的增强具有更好的效果^[8]。

污泥性质对预处理过程释放的溶解性有机物及可生物利用性^[9], 以及厌氧消化产甲烷效果都起到重要影响作用^[10, 11]。实际污水厂的剩余污泥性质差别较大, 但目前人们对不同性质的污泥微波组合预处理-厌氧消化的关注较少。产甲烷菌属于古菌, 是厌氧消化过程的重要功能菌群, 然而不同性质剩余污泥的古菌群落结构差异如何, 古菌群落结构在预处理-厌氧消化过程中的演替尚缺乏研究与探讨。因此本文考察了某实际污水处理厂相同进水的 A²O 工艺、A²O-MBR 工艺所产生的剩余污泥, 在微波组合预处理-厌氧消化过程中污泥性质变化与厌氧消化效果, 并对处理过程中古菌群落结构演替进行对比分析, 以期为进一步了解微波预处理强化厌氧消化工艺提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 污泥来源

北京某大型城市污水处理厂一期、二期均采用 A²O 处理工艺, 总处理水量为 40 万 m³·d⁻¹。三期 A²O-MBR 工艺, 处理水量为 15 万 m³·d⁻¹。一期、二期剩余污泥统一做离心机械脱水, 三期剩余污泥单独做离心机械脱水处理。本研究于 2017 年 7~8 月间取该污水厂的一、二期 A²O 工艺 (SRT = 20 d) 脱水污泥, 以及三期的 A²O-MBR (SRT = 30 d) 工艺脱水污泥放置于 4℃ 冷藏库保存备用。采用某污水处理厂卵形消化池出泥 (TS = 39.2 g·L⁻¹, VS/TS = 43.5%) 做为本研究厌氧消化接种泥。

1.2 实验装置

预处理采用 JWFY-1T 微波反应器 (巨龙微波能设备有限公司, 保定), 磁控管 $P_{\max} = 1$ kW, 频率 $f = 2450$ MHz。微波反应器腔体最大容积 25 L, 反应器具有可升降搅拌装置和热电偶温度传感器, 可实时监测温度。厌氧消化采用生化产甲烷潜势 (biochemical methane potential, BMP) 测试系统 (AMPTS II, bioprocess control, 瑞典) 进行厌氧消化。采用 650 mL 的血清瓶, 有效体积为 400 mL, 将接种污泥和预处理污泥以 VS 比为 1:3 的比例进行混合后加入到血清瓶中作为实验组, 同时以接种污泥加入未经预处理的原泥作为对照组, 每组实验分别设置 3 个平行。

1.3 实验方法

将所取的两种脱水污泥用去离子水稀释到 TS 为 8%~10%, 通过孔径 1 mm 筛网筛除大颗粒物等杂

质后作为原泥, 分别记为 A²O 原泥 (一、二期), MBR 原泥 (三期)。采用课题组前期优化的微波组合工艺 (MW-H₂O₂-OH) 作为预处理工艺^[8], 即在原泥中加入 5 mol·L⁻¹ 的 NaOH 溶液调节 pH 至 10, 采用 600 W 的微波功率辐射污泥样品升温至 80℃, 按 $m(\text{H}_2\text{O}_2)/m(\text{TS}) = 0.2$ 的质量比加入 30% 的过氧化氢, 升温至 100℃ 立即结束, 累积加热持续时间为 5 min, 待污泥温度降至室温, 用 5 mol·L⁻¹ 的 HCl 将预处理后污泥 pH 调至 7~7.5 之间备用, 预处理后污泥样品分别标记为 A²O 微波泥和 MBR 微波泥。将厌氧消化接种泥与有/无预处理污泥 (即原泥/微波泥) 以 VS 比为 1:3 的比例混合后, 采用与接种污泥来源的卵形消化池相同温度进行厌氧消化, 即在 38℃ ± 1℃ 进行 25 d 厌氧消化, 取第 25 d 厌氧消化污泥为厌氧出泥用于各项指标检测。

1.4 理化指标分析方法

TS、VS 按标准方法^[12]测定。碱度采用酸碱滴定法, 结果以 CaCO₃ 计。污泥经 8 000 r·min⁻¹ 离心 30 min 后吸取上清液过 0.45 μm 醋酸纤维膜, 滤液采用 DR2800HACH 分光光度计 (HACH, US) 测定溶解性 COD (SCOD), 溶解性多糖和蛋白质; 溶解性多糖、蛋白质分别采用 Dubois 法和 Lowry 法测定; VFA 由 Agilent 6890N 气相色谱 (Agilent, US) 检测, 检测器为火焰离子化检测器 FID, 色谱柱为 HP-FFAP 毛细管柱 (0.25 mm × 25 m)。

1.5 DNA 提取

采用 FastDNA Spin Kit for Soil (MP Biomedicals, US) 试剂盒, 对 A²O 及 A²O-MBR 实验组的原泥、微波泥、厌氧后泥每个取样点的 3 个平行样品分别提取 DNA, 每个取样点的 3 个平行样品 DNA 混合后作为该样品的总 DNA, 用于后续的 PCR 扩增。提取的 DNA 在 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测, 并采用 Nanodrop 分光光度计 (Nanodrop, US) 确定核酸浓度和质量。

1.6 古菌群落结构

采用巢式 PCR 对污泥样品古菌 16S rRNA 的 V3-V4 区进行扩增, 第一轮使用 340F (CCCTAYGGGGYGCASCAG), 1000R (GGCCATGCACYWCYTCTC) 引物, 采用 2 × Taq master Mix × 15 μL 扩增体系, 上下游引物各 1 μL (10 μmol·L⁻¹), 10~20 ng 的 DNA 模板, 加灭菌 dd H₂O 至 30 μL。第一轮反应条件为: 94℃ 3 min; 5 个循环: 94℃ 30 s, 45℃ 20 s, 65℃ 30 s; 20 个循环: 94℃ 20 s, 55℃ 20 s, 72℃ 30 s; 72℃ 延伸 5 min。第二轮采用引物 349F

(GYGCASCAGKCGMGAAW), 806R(GGACTACVSGGGTATCTAAT), 用第一轮扩增产物适当稀释后作为第二轮的模板. 扩增体系和反应条件同第一轮. 第三轮引入 Illumina 桥式 PCR 兼容引物, 扩增体系同前两轮, 反应条件为 94℃ 3 min; 5 个循环: 94℃ 20 s, 55℃ 20 s, 72℃ 30 s; 72℃ 延伸 5 min. 由上海生工公司 (Sangon, China) 通过 Illumina MiSeq 进行高通量测序, 经过质控后每个样品得到 82 006 ~ 98 217 条序列. 得到的高质量序列以 97% 的序列相似性阈值处理生成 OTUs (操作分类单元), 并利用 RDP (核糖体数据库项目) 分类器进行分类分析样品中群落结构.

1.7 数据处理与分析

采用 Canoco 5.0 (Microcomputer Power, US) 进行冗余分析 (RDA), 考察古菌群落结构演替及其与污泥性质的相关关系. Coverage 指数、Chao1 指数、Pielou 指数、Shannon 指数采用 Mothur 软件 (<http://www.mothur.org>) 进行计算^[13].

2 结果与讨论

2.1 预处理过程污泥性质变化

原泥及微波组合预处理后的污泥性质如图 1 所示. 由图 1(a) 可知, MBR 原泥的 VS/TS 为 50.0%, 低于 A²O 原泥的 66.4%, 这是由于 A²O-MBR 污水处理工艺的污泥龄为 30 d, 大于 A²O 工艺的污泥龄 (20 d), 较长的污泥龄导致污泥矿化, 活性有机部分所占比例降低; 此外, A²O-MBR 工艺的高污泥浓度以及相应的低 F/M 会导致部分微生物长期处于贫营养状态下, 在该阶段微生物的内源呼吸导致易降解的 SMP 被消耗掉, 难降解的部分会持续累积^[14], 导致剩余污泥中的溶解性有机质含量偏低, 可生物降解性差, 这也是相同 VS 条件下 MBR 原泥的 SCOD 低于 A²O 原泥 [图 1(b)] 的重要原因. 两种污泥的有机组分构成有较大差异: A²O 原泥的溶解性蛋白质和多糖分别是 MBR 原泥的 2.02 和 4.85 倍, 但 MBR 原泥的总 VFA 高于 A²O 原泥, 分别为 4 945 mg·L⁻¹ 和 3 415 mg·L⁻¹, 其中 MBR 原泥中丙酸占比最高, 为 28.0%, 而 A²O 原泥中乙酸占比最高, 为 31.9%.

微波辐射过程在常压非密闭状态进行, 水分的挥发导致预处理后 TS 和 VS 均略有上升 [图 1(a)]. 在起始 VS 相似条件下, 预处理对 MBR 组原泥的 SCOD 释放效果更佳, 增长了 2.69 倍, 高于 A²O 组的 2.26 倍, SCOD 中的重要组分溶解性蛋白

质和多糖, 在 MBR 组分别增长了 7.42 倍和 18.33 倍, 高于 A²O 组的增长量 (分别为 3.52 倍和 2.98 倍) [图 1(b)]. Carrère 等^[11] 也发现加热预处理对可生物降解性低的溶解性有机物释放效果更佳. 虽然 MBR 原泥溶解性有机物的释放比例更高, 但由于 A²O 原泥中具有更高的 SCOD, 其预处理后 SCOD 达到 28 650 mg·L⁻¹, 比 MBR 微波泥 (26 150 mg·L⁻¹) 高出 9.6%, 溶解性蛋白质也比 MBR 微波泥高出 8.3%, 达到 9 677.62 mg·L⁻¹. 此外, A²O 和 MBR 原泥总 VFA (以 COD 计) 经过预处理后仅分别增长了 15.6% 和 3.6% [图 1(c)], 且 VFA 中各种组分的比例变化也较小: 不同原泥的乙酸和丙酸在预处理前后变化在 2.9% ~ 5.7% 之间, 正丁酸、异丁酸、正戊酸、异戊酸变化小于 2.4%.

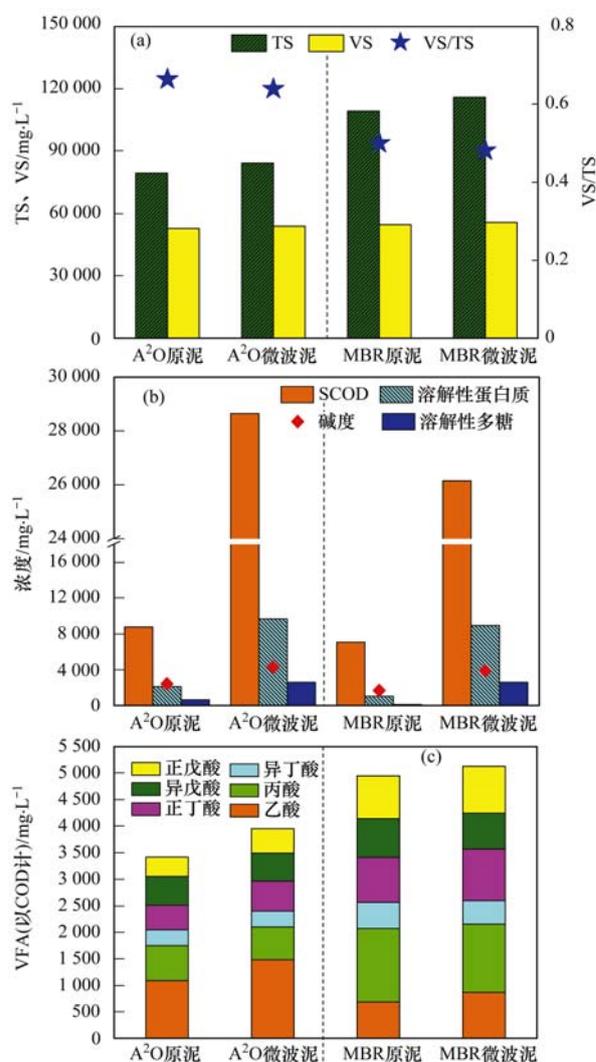


图 1 污泥性质在预处理过程的变化

Fig. 1 Variations in sludge characteristics during pretreatment

预处理过程溶解性有机物的显著增加的原因主要有胞内有机物的释放和胞外聚合物 (extracellular

polymeric substances, EPS) 的溶解性增加. 其中的 EPS 由腐殖酸, 多糖, 蛋白质, 核酸和其他非确定性组分构成^[15]. 本研究预处理工艺为微波、 H_2O_2 和碱共同作用的组合工艺, 微波预处理产生的热效应和非热效应可促使细胞破裂和改变细胞膜的通透性, 导致部分溶解性有机物从细胞中溶出^[16], 并促进 EPS 中有机物得到释放、水解, 进而提高后续污泥厌氧消化性能^[17]. 而 H_2O_2 的加入也通过强氧化作用提高了污泥的破解效果^[18]. 此外, 碱性 pH 条件不但可以提高细胞破壁效果^[19], 另一方面还可导致 EPS 中酸性基团的解离和负电荷 EPS 之间的排斥, 从而增强了蛋白质和碳水化合物的溶解性^[20]. 污泥加热和氧化过程中还会促使部分不饱和和脂类物质氧化产生少量 VFA^[21], 但由于 VFA 主要是大分子有机物在酸化阶段生物代谢的重要终端产物^[22], 微波过程中的生物代谢作用较弱, 所以预处理后 VFA 的释放效果没有溶解性蛋白质和多糖的释放效果显著.

2.2 厌氧消化过程污泥性质变化及产甲烷效果

厌氧消化过程中污泥性质的变化及产甲烷效果分别如图 2 和图 3 所示. 经过与接种污泥混合后, 4 组厌氧消化实验组的进泥 VS 为 $38.89 \sim 40.54 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 在厌氧消化过程中, A^2O 和 MBR 原泥的 VS 削减率分别为 22.9%, 21.2%; A^2O 和 MBR 微波泥厌氧过程的 VS 削减率分别增长到 26.3%, 22.8% [图 2(a)]. 在厌氧起始 VS 近似的条件下, A^2O 和 MBR 预处理污泥的产甲烷量分别提高了 19.9% 和 12.6% [图 2(b)]. 虽然厌氧起始 VS 近似相同, 由于 A^2O 组的生物可降解性高于 MBR 组污泥, A^2O 原泥和 A^2O 微波泥的产甲烷量均高于对应的 MBR 原泥和 MBR 微波泥, 表明污泥可生物降解性影响产甲烷效果^[12, 23].

A^2O 原泥厌氧进泥和 A^2O 微波厌氧进泥的 SCOD 分别比 MBR 组高出 15.6% 和 8.3%, SCOD 经过乙酸化等系列反应后, 可以提供更多的底物, 从而提高产气效果. 另外, 产甲烷菌对底物有很强的特异性, 可利用的底物只有 H_2 、 CO_2 、甲酸、甲醇、甲胺、乙酸等, 乙酸是产甲烷菌利用的重要碳源. A^2O 原泥和 A^2O 微波泥中含有更多的乙酸也对产甲烷效果起到了一定的促进作用: 厌氧进泥中 A^2O 原泥的乙酸浓度 ($742 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和在总 VFA 的占比 (32.8%) 高于 MBR 原泥 (分别为 $522 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 16.8%), A^2O 微波泥的乙酸浓度 ($959 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和占比 (37.6%) 也高于 MBR 微波泥 (分别为 621

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 17.7%) [图 2(c)]. 虽然各组厌氧进泥的总 VFA 差别较大, 在 $2554 \sim 3509 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 但厌氧出泥的总 VFA 差异较小, 均下降到 $56 \sim 62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 且厌氧出泥的 VFA 组分中均以乙酸和丙酸为主, 二者之和占总 VFA 的 85.5% ~ 92.6%. 此外, 厌氧消化后 4 组污泥的碱度增加了 1.79 ~ 2.91 倍. 碱度的增加与污泥蛋白质的降解有关, 蛋白质代谢产生的碱度是厌氧消化阶段产生碱度的主要来源^[24].

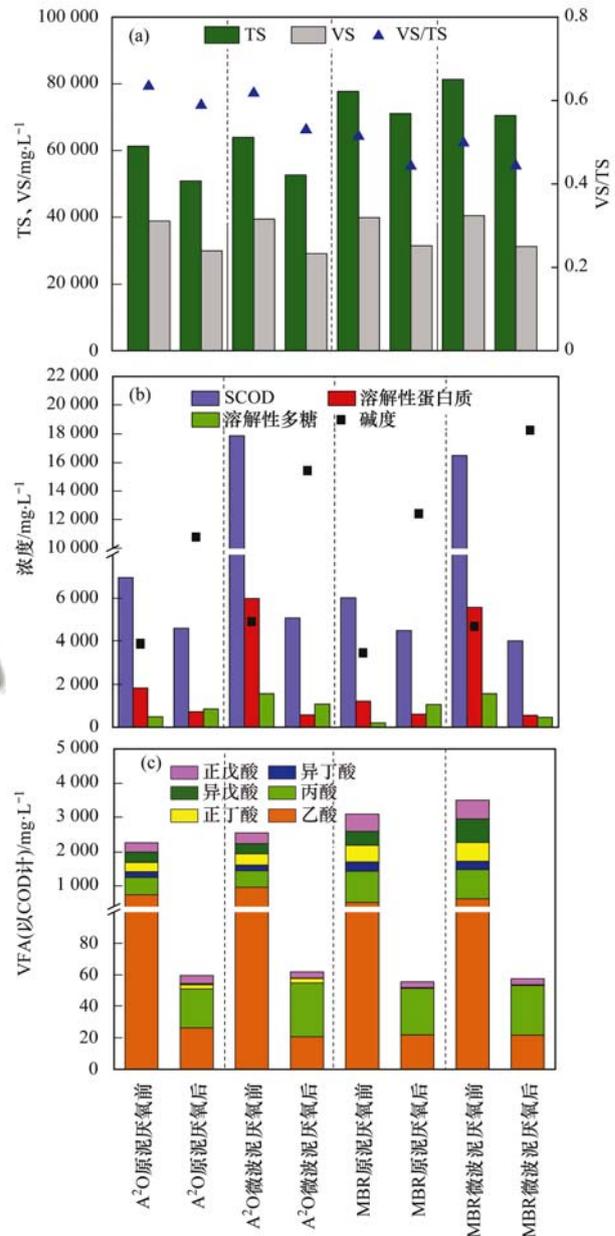


图 2 污泥性质在厌氧消化过程的变化

Fig. 2 Variations in sludge characteristics during anaerobic digestion

2.3 预处理及厌氧消化过程古菌群落结构多样性的变化

对污泥样品进行古菌群落结构多样性分析, 结

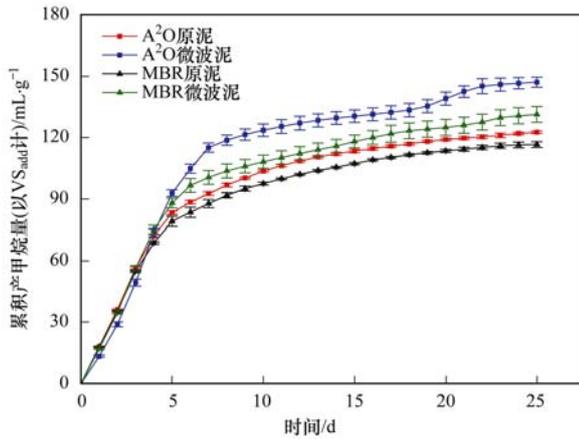


图3 污泥厌氧消化累积产甲烷量

Fig. 3 Cumulative methane production during anaerobic digestion

果如表1所示. Coverage 指数是指各样品文库的覆盖率,其数值越接近于1,代表本次测序结果越接近样本中微生物的实际情况.本研究中各污泥样品的 Coverage 指数均为0.987以上,表明测序结果可良好反映古菌群落结构的实际情况. Chao1 指数显示菌群种类的丰富度 (Richness)^[25], Pielou 指数代

表菌群结构的均匀度 (Evenness)^[23], Shannon 指数则综合考虑菌群结构的均匀度和丰富度. 由表1可知,预处理过程对古菌的丰富度和均匀度影响较小, Chao1 指数和 Pielou 指数变化幅度在1.7%~8.6%之间,但厌氧消化对古菌群落结构的多样性影响较大,在厌氧消化之后, Chao1 指数增长了54.0%~68.8%, Pielou 指数降低了16.2%~34.6%. 以上结果表明,除接种污泥中微生物带来的菌群结构影响之外,厌氧过程有利于多种产甲烷菌的生长,促使古菌种类总量增加,但同时也导致适应反应环境条件的产甲烷菌增加,而其他不适应环境的古菌丰度降低,造成古菌菌群的均匀度降低. 对比 A²O 和 MBR 工艺的原泥、微波泥、有/无预处理的厌氧消化污泥, MBR 工艺的污泥具有更高 Chao1 指数,除微波泥之外的 MBR 工艺污泥的 Pielou 指数也高于 A²O 工艺污泥,并同时具有更高的 Shannon 指数,说明 MBR 工艺污泥在古菌群落结构多样性上优于 A²O 工艺.

表1 古菌多样性分析

Table 1 Archaeal community diversity analysis

指数类型	A ² O 原泥	A ² O 微波泥	A ² O 原泥厌氧后	A ² O 微波泥厌氧后	MBR 原泥	MBR 微波泥	MBR 原泥厌氧后	MBR 微波泥厌氧后
Coverage	0.992	0.991	0.988	0.989	0.992	0.991	0.987	0.987
Chao1	2 173. 669	2 316. 640	3 669. 017	3 568. 059	2 524. 280	2 482. 012	3 972. 080	3 829. 578
Pielou	0.453	0.492	0.339	0.322	0.496	0.481	0.344	0.403
Shannon	3.271	3.571	2.572	2.446	3.706	3.568	2.638	3.076

2.4 污泥预处理及厌氧消化过程古菌群落结构的变化

在菌目级别上 [图4(a)], 所有污泥样品中的古菌均以 Methanomicrobiales (甲烷微菌目)、Methanosarcinales (甲烷八叠球菌目)、Methanomassiliococcales (第七产甲烷古菌目) 和 Methanobacteriales (甲烷杆菌目) 为主, 这4种古菌的总丰度在所有样品中的范围为98.59%~99.96%. 从原泥的古菌分布来看, A²O 原泥以第七产甲烷古菌目为优势菌, 丰度为52.80%, 而 MBR 原泥则以甲烷八叠球菌目和甲烷微菌目为优势菌, 丰度分别为35.55%和33.35%. 自从2012年人们首次从人类粪便中分离出甲基型和氢型混合营养型的第七产甲烷古菌, 在厌氧反应器也发现了高度富集的第七产甲烷古菌^[26, 27]. 微波预处理及厌氧消化过程对污泥中产甲烷古菌的分布具有较大影响. A²O 与 MBR 原泥经过微波预处理后, 甲烷微菌目和甲烷杆菌目的丰度增加3.71%~22.19%, 第七

产甲烷古菌目的丰度却分别下降了33.53%和11.78%. 第七产甲烷古菌生长温度为37℃, 而甲烷微菌目和甲烷杆菌目的生长温度范围较广, 分别为0~60℃和15~97℃^[27]. 微波预处理过程污泥温度加热到100℃, 不利于生长温度范围相对较低的第七产甲烷古菌目生长, 是导致其丰度在预处理后显著下降的重要原因. 在厌氧消化后, 无论有无预处理的污泥中, 甲烷杆菌目丰度均呈下降趋势(降低7.37%~13.44%), 甲烷微菌目丰度则显著增加并成为优势古菌, 其在消化污泥中的丰度高达54.72%~63.36%. 甲烷微菌目是消化污泥中常见的优势菌, Lee 等^[28]也发现污泥厌氧消化后的产甲烷菌以甲烷微菌目为优势菌.

在菌属级别上 [图4(b)], MBR 原泥中的乙酸型产甲烷菌 *Methanotherix* (甲烷丝菌属) 和 *Methanosarcina* (甲烷八叠球菌属) 丰度均高于 A²O 原泥, 前者丰度分别为8.17%和25.23%, 后者丰度分别为4.49%和5.50%. Jang 等^[29]认为厌氧消

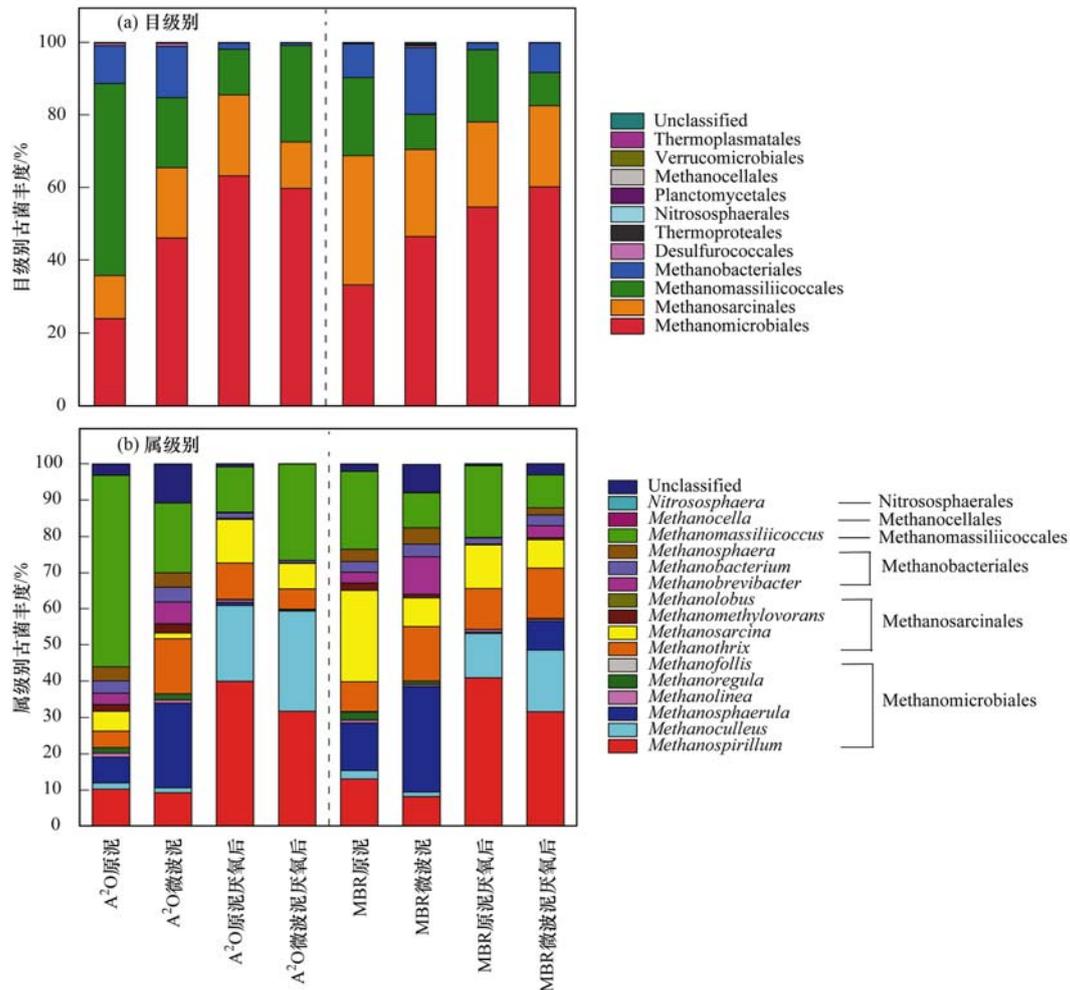


图4 污泥处理过程中古菌丰度变化

Fig. 4 Variations in abundance of archaea during sludge treatment

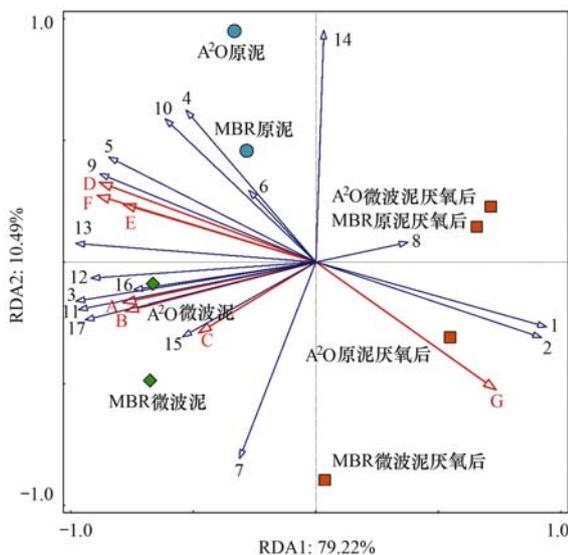
化过程中氢型产甲烷菌与乙酸型产甲烷菌比生长速率不同, HRT 相对较短的工艺更有利于氢型产甲烷菌富集, HRT 相对长的工艺更有利于乙酸型产甲烷菌的生长. 由此, MBR 工艺污泥龄较长可能是导致 MBR 原泥中乙酸型产甲烷菌 *Methanotherix* 和 *Methanosarcina* 丰度相对较高的原因. 在预处理后, A²O 和 MBR 组污泥所有古菌中, *Methanosphaerula* 丰度增长幅度最大, 从原泥的 7.09% 和 13.05% 增长到 23.29% 和 29.13%, 但在厌氧消化后却降低到 0.09% ~ 8.05%. Zhao 等^[30] 在处理脱落酸废水的 UASB 反应器中发现了丰度较高的 *Methanosphaerula*, 认为是残余的脱落酸和有机溶剂影响了产甲烷菌菌群结构. 以上研究结果显示 *Methanosphaerula* 对热辐射和碱性条件等恶劣条件耐受性较好, 但在良好厌氧环境中, 其对底物的竞争能力可能弱于其他产甲烷菌, 从而丰度降低. 此外, 氢型产甲烷菌 *Methanospirillum* (甲烷螺菌属) 和 *Methanoculleus* (甲烷囊菌属) 丰度在预处理后降

低了 0.34% ~ 4.86%, 但在厌氧消化后达到为 12.3% ~ 40.87%, 成为主要优势产甲烷菌. 厌氧消化污泥中优势菌属还有 *Methanotherix* 和 *Methanosarcina*, 丰度为 5.56% ~ 13.88%, 以及 *Methanomassiliicoccus* (第七产甲烷古菌属), 丰度为 9.1% ~ 26.61%. 厌氧消化后 *Methanospirillum* 和 *Methanoculleus* 等显著增加, 而 *Methanosphaerula* 以及其他古菌如氨氧化古菌 *Nitrososphaera* 等丰度降低, 导致古菌菌群多样性的均匀度下降, 即是造成表 1 中 Pielou 指数在厌氧消化后降低的重要原因.

2.5 污泥处理过程中古菌群落结构演替与污泥性质的关系

通过 RDA 分析考察污泥处理过程中古菌群落结构演替与污泥性质的相关关系, 结果如图 5 所示. RDA 分析结果对古菌群落结构变化的解释度为 98.8%, 轴 1 的解释度为 79.22%, 轴 2 的解释度为 10.49%. 原泥、微波泥和厌氧消化污泥分别处于不同象限, 说明预处理及厌氧消化过程古菌群落

结构发生较大变化. 轴 1 与总 VFA、乙酸、丙酸、SCOD、溶解性蛋白、溶解性多糖具有良好的相关性, 表明古菌群落结构与污泥有机组分密切相关. *Methanoregula*、*Methanomethylovorans*、*Methanosphaera* 与 VFA, 以及 VFA 的主要成分乙酸和丙酸正相关, 而与碱度负相关, 表明这 3 种产甲烷菌受总 VFA、乙酸及丙酸的有机酸类物质的影响较大. *Methanobrevibacter*、*Methanobacterium*、*Methanosphaera*、*Nitrososphaera* 则与溶解性蛋白质、SCOD 正相关; *Methanocella* 则与溶解性多糖正相关; 而 *Methanospirillum* 和 *Methanoculleus* 受碱度的影响较大. 以上结果表明, 污泥有机组分是古菌群落结构演替的重要影响因素, 不同的有机组分构成可促使污泥的古菌群落结构不同.



蓝色箭头为物种变量(古菌菌属): 1. *Methanospirillum*; 2. *Methanoculleus*; 3. *Methanosphaerula*; 4. *Methanolinea*; 5. *Methanoregula*; 6. *Methanofollis*; 7. *Methanotrinx*; 8. *Methanosarcina*; 9. *Methanomethylovorans*; 10. *Methanolobus*; 11. *Methanobrevibacter*; 12. *Methanobacterium*; 13. *Methanosphaera*; 14. *Methanomassiliococcus*; 15. *Methanocella*; 16. *Nitrososphaera*; 17. Unclassified; 红色箭头为环境变量: A. SCOD; B. 溶解性蛋白; C. 溶解性多糖; D. 乙酸; E. 丙酸; F. VFA; G. 碱度

图 5 古菌群落结构与污泥性质的 RDA 分析

Fig. 5 RDA of archaeal community and sludge characteristics

3 结论

(1) 相同进水、不同处理工艺的实际污水厂产生的剩余污泥性质差别较大: A²O 污泥比 A²O-MBR 污泥有更高的有机质含量(VS/TS 值分别为 66.4% 与 50.0%), SCOD、溶解性蛋白质和多糖(分别为后者的 1.24、2.02 和 4.85 倍), 以及 VFA 中乙酸占比(31.9% 对比 13.9%), 具有更好的生物降

解性.

(2) 虽然在微波组合预处理对生物降解性差的 A²O-MBR 污泥有机物释放效果更佳, 但 A²O 污泥具有更多的 SCOD 及可生物降解性, 预处理后产气效果高于 A²O-MBR 污泥 26.1%.

(3) A²O 原泥与 A²O-MBR 原泥中古菌群落结构不同, 后者甲烷丝菌属和甲烷八叠球菌属丰度分别高于前者 3.68% 和 19.73%. 预处理过程对古菌群落结构的丰富度和均匀度影响相对较小, 厌氧消化则影响较大: 在厌氧消化之后, 古菌的丰富度显著增加, 而均匀度降低. 污泥中有机组分不同是引起古菌群落结构差异的重要影响因素.

参考文献:

- [1] Campo G, Cerutti A, Zanetti M, *et al.* Enhancement of waste activated sludge (WAS) anaerobic digestion by means of pre- and intermediate treatments. Technical and economic analysis at a full-scale WWTP [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **216**: 372-382.
- [2] 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.
- [3] Bougrier C, Albasi C, Delgenes J P, *et al.* Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2006, **45** (8): 711-718.
- [4] Serrano A, Siles J A, Martín M A, *et al.* Improvement of anaerobic digestion of sewage sludge through microwave pretreatment. *Journal of Environmental Management*, 2016, **177**: 231-239.
- [5] Liu J B, Yang M, Zhang J Y, *et al.* A comprehensive insight into the effects of microwave-H₂O₂ pretreatment on concentrated sewage sludge anaerobic digestion based on semi-continuous operation [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **256**: 118-127.
- [6] Gil A, Siles J A, Martín M A, *et al.* Effect of microwave pretreatment on semi-continuous anaerobic digestion of sewage sludge. *Renewable Energy*, 2018, **115**: 917-925.
- [7] Tyagi V K, Lo S L. Microwave irradiation: A sustainable way for sludge treatment and resource recovery [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **18**: 288-305.
- [8] 刘吉宝, 倪晓棠, 魏源送, 等. 微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3455-3460.
- [9] Liu J B, Ni X T, Wei Y S, *et al.* Enhancement for anaerobic digestion of sewage sludge pretreated by microwave and its combined processes [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3455-3460.
- [10] Mehdizadeh S N, Eskicioglu C, Bobowski J, *et al.* Conductive heating and microwave hydrolysis under identical heating profiles for advanced anaerobic digestion of municipal sludge [J]. *Water Research*, 2013, **47**(14): 5040-5051.
- [10] 刘蕾, 张立国, 尹军, 等. 不同有机质含量剩余污泥的两相

- 厌氧消化研究[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(3): 29-32.
- Liu L, Zhang L G, Yin J, *et al.* Two-phase anaerobic digestion of waste activated sludge with different organic contents [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, **27**(3): 29-32.
- [11] Carrère H, Bougrier C, Castets D, *et al.* Impact of initial biodegradability on sludge anaerobic digestion enhancement by thermal pretreatment[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2008, **43**(13): 1551-1555.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] Schloss P D, Westcott S L, Ryabin T, *et al.* Introducing mothur: open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, **75**(23): 7537-7541.
- [14] 胡以松, 王晓昌, 陈华, 等. 膜生物反应器污泥内源消化及 SMP 变化[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(12): 4625-4630.
- Hu Y S, Wang X C, Chen H, *et al.* SMP variation during endogenous digestion of activated sludge from a MBR process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(12): 4625-4630.
- [15] Monique R, Elisabeth G N, Etienne P, *et al.* A high yield multi-method extraction protocol for protein quantification in activated sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(16): 7464-7471.
- [16] Eskicioglu C, Terzian N, Kennedy K J, *et al.* Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge[J]. *Water Research*, 2007, **41**(11): 2457-2466.
- [17] 池勇志, 刘晓敏, 李玉友, 等. 微波预处理剩余污泥的研究进展[J]. 化工进展, 2013, **32**(9): 2221-2226, 2252.
- Chi Y Z, Liu X M, Li Y Y, *et al.* Research progress on microwave pretreatment of waste activated sludge[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, **32**(9): 2221-2226, 2252.
- [18] Wang Y W, Wei Y S, Liu J X. Effect of H₂O₂ dosing strategy on sludge pretreatment by microwave-H₂O₂ advanced oxidation process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 680-684.
- [19] Tan R, Miyanaga K, Toyama K, *et al.* Changes in composition and microbial communities in excess sludge after heat-alkaline treatment and acclimation[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2010, **52**(2-3): 151-159.
- [20] Wingender J, Neu T R, Flemming H C. Microbial extracellular polymeric substances; characterization, structure and function [M]. Berlin: Springer, 1999. 123.
- [21] Barber W P F. Thermal hydrolysis for sewage treatment: a critical review[J]. *Water Research*, 2016, **104**: 53-71.
- [22] Kim M, Gomec C Y, Ahn Y, *et al.* Hydrolysis and acidogenesis of particulate organic material in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion [J]. *Environmental Technology*, 2003, **24**(9): 1183-1190.
- [23] Wang J M, Lin H, Sun W C, *et al.* Variations in the fate and biological effects of sulfamethoxazole, norfloxacin and doxycycline in different vegetable-soil systems following manure application [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **304**: 49-57.
- [24] 斯皮思 R E. 工业废水的厌氧生物技术[M]. 李亚新, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- Speece R E. Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters [M]. Li Y X, trans. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [25] Huerta B, Marti E, Gros M, *et al.* Exploring the links between antibiotic occurrence, antibiotic resistance, and bacterial communities in water supply reservoirs[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 161-170.
- [26] Iino T, Tamaki H, Tamazawa S, *et al.* *Candidatus Methanogranum caenicola*: a novel methanogen from the anaerobic digested sludge, and proposal of *Methanomassiliicoccales* fam. nov. and *Methanomassiliicoccales* ord. nov., for a methanogenic lineage of the class *Thermoplasmata* [J]. *Microbes and Environments*, 2013, **28**(2): 244-250.
- [27] 张坚超, 徐镜钦, 陆雅海. 陆地生态系统甲烷产生和氧化过程的微生物机理[J]. 生态学报, 2015, **35**(20): 6592-6603.
- Zhang J C, Xu Y Q, Lu Y H. Microbial mechanisms of methane production and oxidation in terrestrial ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(20): 6592-6603.
- [28] Lee C, Kim J, Hwang K, *et al.* Quantitative analysis of methanogenic community dynamics in three anaerobic batch digesters treating different wastewaters [J]. *Water Research*, 2009, **43**(1): 157-165.
- [29] Jang H M, Kim J H, Ha J H, *et al.* Bacterial and methanogenic archaeal communities during the single-stage anaerobic digestion of high-strength food wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **165**: 174-182.
- [30] Zhao X J, Wang P, Yao Y Y, *et al.* Study on microbial community and diversity of an abscisic acid wastewater anaerobic granular sludge system [J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2012, **6**(49): 7550-7555.

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the δ ¹⁵ N of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α-HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshuitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)