

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邹晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 武媛媛,李如梅,彭林,端允,王海京,李颖慧,白慧玲,牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 董小芳,邓黄月,张杰,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华 (1889)

NO₃⁻-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 李薛晓,程思超,方舟,李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 刘海龙,付晶森,郭雪峰,柴建恬,张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 徐丽梅,张崇森,王晓昌,吉铮,周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 王星星,林建伟,詹艳慧,张志斌,邢云青,姜博汇,储鸣 (1936)

树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 朱培颖,李大鹏,于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 周林军,古文,刘济宁,石利利,徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉 (1982)

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 闰刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 杨波,徐辉,冯修平,李方,田晴,马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 周同,于德爽,李津,吴国栋,王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N₂O 排放的影响 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N₂O 的排放特征 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 李秋言,赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 吴志娟,毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附特性 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐,坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖 (2172)

C₃N₄/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落

曹知平¹, 吴静^{1*}, 左剑恶¹, 王晓璐¹, 王翀¹, 王广启^{1,2}, 王凯军¹, 钱易¹

(1. 清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 西安 710018)

摘要: 污泥高固厌氧消化具有反应器体积小、能耗低、沼渣少等优点, 但其相关机制尤其是微生物机制研究还非常有限. 利用 16S rRNA 克隆文库技术, 本研究考察了一个中试污泥高固厌氧消化系统稳定运行期的微生物群落. 该中试系统采用“超高温酸化(70℃)-高温甲烷化(55℃)”的强化两相厌氧消化工艺, 处理剩余活性污泥的含固率约为 9%. 在总的固体停留时间仅 15.5 d (酸化 3 d + 甲烷化 12.5 d) 时, 系统挥发性固体 (volatile solid, VS) 去除率为 35.7%, 甲烷产率 (以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{去除}}$ 计) 为 $0.648 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. 两相的细菌组成差异较大: 在超高温酸化相存在大量降解蛋白质/氨基酸的细菌; 在高温产甲烷相则主要是降解纤维素等多糖和一些简单糖类的细菌以及长链脂肪酸降解细菌; 两相中都存在降解简单糖类的细菌. 两相的古菌绝大部分都属于 *Methanothermobacter*, 特别是高温产甲烷相检出的古菌 100% 都属于 *Methanothermobacter*, 由于仅在产甲烷相检测到沼气, 这表明系统中的甲烷化过程主要通过氢营养途径进行.

关键词: 剩余活性污泥; 高固厌氧消化; 两相厌氧消化; 微生物群落; 氢营养型产甲烷

中图分类号: X172; X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-2059-06 DOI: 10.13227/j.hjxk.201611057

Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge

CAO Zhi-ping¹, WU Jing^{1*}, ZUO Jian-e¹, WANG Xiao-lu¹, WANG Chong¹, WANG Guang-qi^{1,2}, WANG Kai-jun¹, QIAN Yi¹

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: High-solid anaerobic digestion (HSAD) of sludge has several advantages like smaller reactor, lower energy consumption and less digestate. However, the understanding about the mechanism especially the microbial mechanism is still limited. In this study, microbial communities of a pilot-scale sludge HSAD system at steady state were investigated with 16S rRNA clone library technology. The system employed an enhanced two-phase anaerobic digestion process, i. e. ‘hyperthermophilic acidogenesis (70°C, 3 d) - thermophilic methanogenesis (55°C, 12.5 d)’ to treat waste activated sludge with a solid content of about 9%. The volatile solid (VS) removal rate was 35.7% and methane yield ($\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{removed}}$) was $0.648 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. The bacterial compositions of the two phases were significantly different: there were plenty of proteolytic bacteria in hyperthermophilic acidogenesis phase; and the bacteria degrading polysaccharides like cellulose and the bacteria utilizing long-chain fatty acids were found in thermophilic methanogenesis phase; some bacteria degrading simple saccharides existed in both phases. In both phases, the dominant archaea were *Methanothermobacter*. Especially, 100% of the retrieved archaea in the thermophilic methanogenesis phase belonged to genus *Methanothermobacter*. This indicated that hydrogenotrophic methanogenesis was the predominant methanogenesis pathway in this system since methane was only detected in the methanogenesis phase.

Key words: waste activated sludge; high-solid anaerobic digestion; two-phase anaerobic digestion; microbial community; hydrogenotrophic methanogenesis

随着污水排放量增加、处理率提升且处理程度不断深化, 我国污泥产生量也逐年增加. 截至 2015 年末, 我国城镇污水年处理量达到 $507.7 \times 10^8 \text{ t}$, 处理率达 91.0%^[1]. 相应地, 2015 年污泥 (含水率 80%) 产生量达到 $3500 \times 10^4 \text{ t}$, 据预测, 到 2020 年污泥年产生量将达到 $6000 \times 10^4 \sim 9000 \times 10^4 \text{ t}$ ^[2]. 污泥汇集了污水中约 30% ~ 50% 的 COD、30% ~ 45% 的氮和 90% 左右的磷, 以及一些病原菌及重金属等^[3]. 如果未经有效的处理处置, 随意堆放, 污泥

极易对环境造成严重的二次污染, 同时也造成资源浪费^[4].

厌氧消化是一项应用广泛的污泥处理技术, 它能够实现污泥的稳定化、减量化, 降低污泥的卫生风险, 同时还能将部分有机物转化为沼气实现能量

收稿日期: 2016-11-07; 修订日期: 2016-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91334112, 51611130119, 51678338)

作者简介: 曹知平 (1984 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为污泥厌氧消化, E-mail: caozhiping2011@163.com

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

的有效回收^[5]。欧美国家经过厌氧消化的污泥达到 50% 以上^[4]。然而,污泥厌氧消化在我国的应用还十分有限^[6]。这里面的原因当然是多方面的,单就技术来看,传统污泥厌氧消化的进料含固率一般为 2% ~ 5%,存在产气率低、处理设施体积大、投资高、加热能耗高、沼渣产量大等问题,在一定程度上制约了其推广应用^[7,8]。高固消化可将进料含固率提高到 8% ~ 20%,意味着污泥中有机质浓度增加,待处理污泥体积减少,利于解决上述限制污泥传统厌氧消化推广应用的问题^[7-10]。王广启等^[7]和戴晓虎等^[11]认为高固厌氧消化是解决我国脱水污泥处理处置问题的重要途径,具有较好的应用前景。

污泥高固厌氧消化已经引起关注。多个研究对比了污泥的低固和高固厌氧消化,结果显示,随着含固率(约为 2% ~ 15%)的增加,VS 去除率和甲烷产率等并未明显降低,反应器的处理能力和容积沼气产率将大幅提高^[9,12,13];若延长高固消化的固体停留时间(solid retention time, SRT),则 VS 去除率和产气率还能有所提高^[14]。

在优化污泥高固厌氧消化性能方面,有机含量^[13]、SRT^[13,15,16]、中温/高温消化^[15,17]和分级/分相工艺^[5,6,18]等对 VS 去除率和产气率的影响已有报道。其中的温度和分级/分相关系到工艺类型的实质。按照温度不同,常用的厌氧消化分为中温厌氧消化(35℃)和高温厌氧消化(55℃)。两者相比,高温厌氧消化的反应速率更高,在处理高含固率污泥时可能获得更高的沼气产率^[15],但也可能造成更高的氨氮浓度从而抑制消化过程^[17]。两相工艺则能够使厌氧消化的两大类主力微生物,即产酸菌和产甲烷菌,各自在最佳环境条件下生长,保持较高微生物的活性,从而获得良好的消化性能^[6]。若将酸化相的温度提高到 70℃ 的超高温,则可进一步强化水解效果提高消化性能,且对病原菌和蠕虫卵的杀灭率也较高^[6]。戴晓虎等^[6]研究发现含固率为 10% 的污泥经过 70℃ 酸化 4 d 后,再进行 55℃ 厌氧消化 16 d,与相同污泥直接 55℃ 厌氧消化 20 d 相比,VS 去除率提高 15%,甲烷产率提高约 1/3。Liao 等^[18]研究表明,对于含固率高达 15% 的污泥,70℃ 水解 30 min,能使其厌氧消化的沼气产率提高 11%;要达到水解污泥消化 15 d 的甲烷产率,未水解污泥则需要 22 d。

微生物过程是厌氧消化的核心,但目前对污泥高固厌氧消化的微生物机制尚未深入研究。Liu 等^[19]报道称,在单级中温厌氧消化器中,当进泥含

固率从 10% 增加到 19% 时,细菌群落中厚壁菌门减少,拟杆菌门增多;古菌群落中乙酸营养型产甲烷菌减少,而氢营养型和甲基营养型产甲烷菌增多。戴晓虎等^[11]通过降低 pH 和提高总氨氮浓度两种方法调控游离氨,考察了进料含固率为 15% 的中温污泥高固厌氧消化反应器在这两种情况下的性能表现和微生物群落变化,研究发现一些糖类和蛋白质类发酵细菌会受到影响,而主要的产甲烷菌始终是甲烷八叠球菌。王腾旭等^[20]研究表明,两相高固污泥厌氧消化系统中的微生物群落结构显著不同,微生物结构与 COD、TS 和 VS 显著相关。厌氧消化过程复杂,影响因素众多,包含反应温度、进料组分、相分离、氨氮、SRT、有机负荷等。目前已报道的研究结果尚不足以系统揭示污泥高固厌氧消化的微生物机制。为此,本研究采用“超高温酸化(70℃)-高温甲烷化(55℃)”的强化两相工艺,运行了一个中试污泥高固厌氧消化系统,并利用 16S rRNA 克隆文库技术研究了该系统稳定运行时的微生物群落,以期更多地认识污泥高固厌氧消化的微生物机制。

1 材料与方法

1.1 试验装置

中试试验持续约 9 个月。采用的强化两相厌氧消化工艺为“超高温酸化-高温甲烷化”(图 1)。中试两相的反应器有效容积分别为 0.24 m³ 和 1 m³,反应温度分别为(70 ± 1)℃ 和(55 ± 1)℃,SRT 分别为 3 d 和 12.5 d。两相反应器都用螺带式搅拌器连续搅拌混合。每天监测系统的产气和有机物去除率。待运行时间超过 50 d (2 个总 SRT 为 31 d) 后,产气速率和有机物去除率提升并稳定,系统达到稳定运行阶段,此时才开始采集泥样做相关分析。

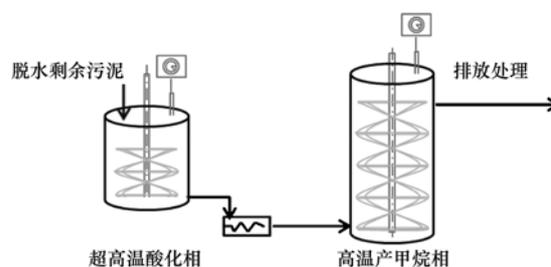


图 1 工艺流程示意图

Fig. 1 Process flow chart

1.2 种泥和原泥

高温产甲烷相的种泥采自一个生产规模的中温污泥厌氧消化器,SS 和 VSS 分别为 29.8 g·L⁻¹ 和 17.0 g·L⁻¹。用作试验进料的原泥为脱水剩余活性

污泥,取自广州的一个污水处理厂. 原泥的含固率为 $8.75\% \pm 0.78\%$, 有机质含量 (VS/总固体) 为 $65.0\% \pm 3.02\%$.

1.3 分析方法

沼气产量和沼气中的甲烷含量每天用湿式防腐气体流量计和红外甲烷检测器测定. 污泥样品的 pH 用 pH 计测量, 含固率和 VS 用重量法测量^[21]. 对于溶解性化学需氧量 (soluble chemical oxygen demand, SCOD)、总氨氮 (total ammonia nitrogen, TAN) 和总碱度 (total alkalinity, TALK) 等参数的测量, 污泥样品首先经 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 然后上清液用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 最后所得的滤液用于进一步分析. SCOD 用快速消解-分光光度法, TALK 采用溴甲酚绿-甲基红指示剂滴定法, TAN 采用纳氏试剂分光光度法^[21]. 游离氨 (free ammonia nitrogen, FAN) 根据 Hansen 等^[22] 的公式计算.

1.4 微生物群落分析

在系统稳定运行期, 从两相反应器中各取泥 500 mL, 混匀后取 $500 \mu\text{L}$, 用磷酸缓冲液洗 3 次, 每次磷酸缓冲液经离心去掉. 清洗后的污泥球保存于 -80°C 直到提取 DNA. 样品的总 DNA 用 Fast DNA SPIN Kit for Soil (MP Bio-medicals, LLC, USA) 提取. 细菌和古菌的 16S rRNA 基因用 Wang 等^[23] 的方法进行 PCR 扩增, 细菌和古菌的引物分别为 63F/1387R 和 109F/915R. PCR 产物用 QIA quick PCR purification kit (Takara Corp., Japan) 纯化, 然后克隆到 pGEM-T-easy 载体. 克隆由上海生工用 3730XL DNA Analyzer (ABI, USA) 测序.

使用 QIIME^[24] 对所得序列进行分析. 首先用 Blast_Fragments 方法扫描识别并去除嵌合体, 余下有效序列; 随后, 依据 97% 的序列相似性, 将有效序列划分为不同的操作分类单元 (operational taxonomic units, OTU), 选取各 OTU 的代表序列与 GreenGen 数据库进行比对注释, 并基于 OTU 分布结果计算覆盖度和 Shannon 多样性指数.

2 结果与讨论

2.1 中试系统的运行情况

运行 50 d 后, 系统的沼气产率、甲烷含量和消化污泥的主要性质已经稳定, 系统达到稳定状态. 稳定运行期, 中试系统平均的总 VS 去除率和甲烷产率 (以 $\text{CH}_4/\text{VS}_{\text{去除}}$ 计) 分别为 35.7% 和 $0.648 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. 仅在高温产甲烷相检测到沼气, 沼气中甲烷含量为 $65.3\% \pm 1.9\%$. 超高温酸化相未检测到

沼气, 但去除 VS 的效果明显, 占系统总的有机物去除率的 44.7%. 同时, 超高温酸化相的 SCOD 和 TAN 分别为 $(16747 \pm 2190) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(1858 \pm 163) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著高于原泥的 $(6899 \pm 585) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(522 \pm 144) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明原泥中的部分固体有机物已转化为更容易被微生物吸收利用的溶解性有机物. 在随后的高温产甲烷相中, 大部分溶解性有机物被降解转化. 稳定运行期, 酸化相和产甲烷相的 pH 分别为 6.5 ± 0.0 和 7.8 ± 0.3 , TALK (以 CaO 计) 分别为 $(1650 \pm 423) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(1903 \pm 300) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, FAN 分别为 $(51.4 \pm 4.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(118.7 \pm 21.8) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.2 微生物群落结构

表 1 列出了各克隆文库的一些重要结构参数. 各文库的覆盖度都较高, 表明后续分析可靠. 两相反应器中基质和环境条件不同, 使得微生物群落的多样性不同. 酸化相的细菌群落多样性低于产甲烷相, 可能是因为随着易降解基质的消耗, 难降解基质的降解越来越重要, 难降解基质种类比较多, 相关的细菌的比重有所上升. 产甲烷相的古菌群落多样性低于酸化相, 可能是因为产甲烷相的 FAN 浓度比酸化相高, 会抑制乙酸营养型产甲烷古菌 *Methanosaeta* 和 *Methanosarcina* 等的生长^[25].

表 1 细菌文库和古菌文库的结构

指标	细菌文库		古菌文库	
	酸化相	产甲烷相	酸化相	产甲烷相
序列总数	101	101	100	74
去除嵌合体序列数	8	6	1	0
有效序列数	93	95	99	74
OUT 数	23	35	9	3
覆盖度	0.83	0.73	0.95	0.97
Shannon 多样性指数	2.73	3.85	0.88	0.21

2.3 微生物群落的组成

2.3.1 细菌群落的组成

酸化相和产甲烷相中最主要细菌门类都是厚壁菌门 (Firmicutes), 相对丰度分别达到 90.3% 和 94.7%. 此外, 酸化相还有 8.6% 和 1.1% 的细菌分别属于变形菌门 (Proteobacteria) 和纤维杆菌门 (Fibrobacteres); 产甲烷相有 2.1% 的细菌属于菌门 OP9, 还有 3.2% 的细菌不属于目前已知的任何细菌门类, 即 unassigned.

酸化相和产甲烷相的数量占优的厚壁菌门细菌全都属于梭菌纲 (Clostridia), 但在目水平上的组成存在较大差异, 优势菌目分别为热厌氧杆菌目

(Thermoanaerobacterales) 和梭菌目 (Clostridiales), 相对丰度分别为 79.8% 和 62.1%。酸化相和产甲烷相在优势菌目及低丰度菌门上的明显差异, 表明在两相中的生物转化过程可能不同。为了更细致地了解具体的转化过程, 在属水平上分析了两相的细菌组成 (图 2)。

(1) 超高温酸化相的细菌群落组成

超高温酸化相的细菌组成见图 2(a)。优势菌纲厚壁菌门梭菌纲细菌 (相对丰度达到 90.3%) 都能确定菌属分类, 分别为热厌氧杆菌目的菌属 *Coprothermobacter*、*Thermosediminibacter* 和 *Moorella* (相对丰度分别为 67.7%、10.8% 和 1.1%), 以及梭菌目的菌属 *Caldicoprobacter* 和 *Tepidimicrobium* (相对丰度分别为 8.6% 和 2.2%)。其余的细菌则不能确定菌属分类。

菌属 *Coprothermobacter* 只有一个菌种, 即 *C. proteolyticus* (解蛋白嗜热粪杆菌), 它的最适温度是 65℃, 能够分解蛋白质产生乙酸、 H_2 和 CO_2 或乙酸和乙醇^[26]。这类菌已经在多个高温污泥厌氧消化器中被发现, 在一个两相厌氧消化系统的热酸化反应器中相对丰度也达到 23%^[27]。蛋白质是本系统进样原泥的主要有机成分, 占 53.6%, 它的分解非常重要。经过超高温酸化相处理, 蛋白质浓度降低约 30%。蛋白质降解产生的氢和氨氮, 也可能对后续的产甲烷相产生重要影响: 一方面, 氢能促进氢营养型产甲烷菌的生长; 另一方面, 氨氮浓度从原泥的 $522 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到酸化相污泥的 $1858 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可能抑制乙酸营养型产甲烷菌的生长^[25]。

Thermosediminibacter、*Caldicoprobacter*、*Tepidimicrobium* 和 *Moorella* 都能有效利用多种单糖和寡糖, 主要产生乙酸或 CO_2 和 H_2 。其中 *Thermosediminibacter* 的一些种还能利用酪蛋白的水

解产物, *Tepidimicrobium* 的一些种能降解纤维素。

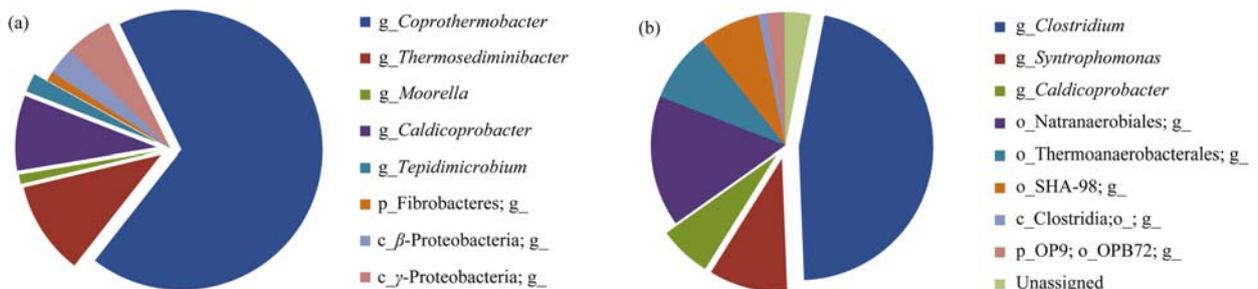
(2) 高温产甲烷相的细菌群落组成

高温产甲烷相的细菌群落组成见图 2(b)。优势菌目厚壁菌门梭菌纲梭菌目细菌 (相对丰度 62.1%) 都能确定菌属分类, 包括 *Clostridium*、*Syntrophomonas* 和 *Caldicoprobacter*, 相对丰度分别为 46.3%、9.5% 和 6.3%。梭菌纲细菌中还有一些不能确定菌属分类, 它们分属于菌目 Natranaerobiales、Thermoanaerobacterales 和 SHA-98, 相对丰度分别为 15.8%、8.4% 和 7.4%, 还有 1.1% 的细菌甚至不能确定菌目分类。低丰度的 OP9 菌门细菌 (2.1%) 都不能确定菌属分类。

本系统中的 *Clostridium* 细菌大多接近于 *C. thermocellum*, 这种菌在 55~60℃ 条件下能够有效利用纤维素、纤维二糖、葡萄糖、果糖和山梨糖等^[28]。此外, *Caldicoprobacter* 菌也能利用简单糖类产生乙酸或 CO_2 和 H_2 。

菌属 *Syntrophomonas* 的一些种与氢营养型产甲烷菌 *Methanospirillum* sp. 共同培养时, 可以利用碳原子数目为 4~18 个的直链饱和脂肪酸, 其中碳原子数为偶数的脂肪酸将被转化为乙酸和甲烷, 碳原子数为奇数的脂肪酸将被转化为丙酸和甲烷^[29]。长链脂肪酸 (LCFAs) 可能会吸附在厌氧微生物的细胞壁/膜上, 抑制微生物活性, 阻碍厌氧消化过程^[30]。LCFAs 的降解不但可以减轻抑制, 还可以提供更多基质给产甲烷菌, 对厌氧消化有利。

本系统中的嗜盐碱厌氧菌目 (Natranaerobiales) 细菌丰度较高, 但与已知的菌种相似度较低。目前已知的嗜盐碱厌氧菌基本都耐盐耐热耐碱, 菌种仅 2 类: *Natranaerobius thermophiles* 和 *Natranaerobaculum magadiense*, 前者能够利用多种糖类、肽类和氨基酸等, 发酵蔗糖主要产生乙酸和甲酸^[31], 后者则只能利



(a) 超高温酸化相和 (b) 高温产甲烷相; 分离出来的扇区代表能够确定菌属分类

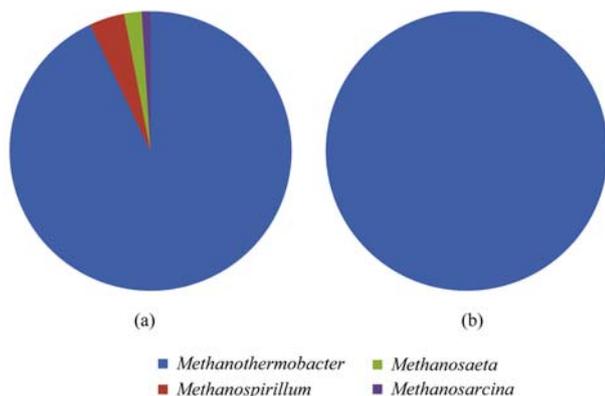
图 2 超高温酸化相和高温产甲烷相的细菌组成 (属水平)

Fig. 2 Bacterial composition of hyperthermophilic acidogenesis phase and thermophilic methanogenesis phase (genus level)

用肽类,不能利用多糖^[32].

2.3.2 古菌群落的组成

系统的古菌组成见图 3, 菌属 *Methanothermobacter* 的优势十分明显, 在超高温酸化相和高温产甲烷相中的相对丰度分别为 93.0% 和 100%, 超高温酸化相中还有少量的 *Methanospirillum*、*Methanosarcina* 和 *Methanosaeta*. 在检出的这 4 个菌属中, 一般被认为 *Methanosaeta* 是严格乙酸营养型产甲烷菌; *Methanosarcina* 一般利用乙酸产甲烷, 但其中一些种类既可利用乙酸也能利用 H_2/CO_2 ; *Methanothermobacter* 和 *Methanospirillum* 是典型的氢营养型产甲烷菌^[33]. 由于本系统中检出的甲烷几乎都在高温产甲烷相, *Methanothermobacter* 在其中的相对丰度为 100%, 可以推断本系统中甲烷化过程都是通过氢营养型产甲烷菌完成的. 在 Tang 等^[34] 的干式高温甲烷化反应器中也有类似的结果, 检出的古菌 90% 为氢营养型产甲烷菌, 其余的为混合营养型的 *Methanosarcina*, 并没有严格乙酸营养型的 *Methanosaeta*. 与本系统中氢营养型产甲烷菌绝对占优不同, 多数污泥传统厌氧消化系统中占优势的是乙酸营养型产甲烷菌^[33]; 甚至在戴晓虎等^[11] 和 Liu 等^[19] 的单机中温污泥高固厌氧消化系统中, 主要的产甲烷菌都是 *Methanosarcina*, 且乙酸裂解产甲烷被认为是主要的甲烷化途径. 不过, 值得注意的是, *Methanosarcina* 的一些种既能利用乙酸又能利用 H_2/CO_2 ^[33].



(a) 超高温酸化相和 (b) 高温产甲烷相

图 3 超高温酸化相和高温产甲烷相的古菌组成 (属水平)

Fig. 3 Archaeal composition of hyperthermophilic acidogenesis phase and thermophilic methanogenesis phase (genus level)

本系统中的古菌组成以及产甲烷代谢途径, 可能是由基质和运行条件导致的. 首先, 高固体原泥中含有大量蛋白质, 再加上超高温酸化相的高温

分相作用, 显著刺激了蛋白质分解菌 *Corprothermobacter* spp. 的生长, 大量蛋白质被降解, 氨氮浓度升高, 可能抑制乙酸营养型产甲烷菌的生长, 而且这种抑制作用在高温产甲烷相中可能会更加严重, 因为其中较高的 pH 和温度, 会使铵离子转化为抑制作用更强的游离氨^[22]. 此外, 高温产甲烷相的 SRT 仅 12.5 d, 较短的 SRT 也有利于氢营养型产甲烷菌成为优势菌^[33].

3 结论

强化两相高固厌氧消化工艺能够有效地处理剩余污泥. 酸化相和产甲烷相都存在降解简单糖类的细菌, 但其他细菌组成不同, 酸化相存在大量降解蛋白质/氨基酸的细菌; 产甲烷相则主要是降解纤维素等多糖的细菌, 也有一定的长链脂肪酸细菌. 两相古菌组成都较为单一, 尤其是在产甲烷相检出的古菌都属于 *Methanothermobacter*, 表明系统中的甲烷化主要通过氢营养途径进行.

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 2015 年城乡建设统计公报 [EB/OL]. http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxxytjgb/tjxxtjgb/201607/t20160713_228085.html, 2016-07-13.
- [2] 北极星节能环保网. 污泥处理行业添新丁 发展壁垒亟待破除 [EB/OL]. <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20161014/780523.shtml>, 2016-10-14.
- [3] 戴晓虎. 污泥处理处置技术现状分析和发展趋势 [J]. 水工业市场, 2015, (4): 14-17.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南 (试行) [S]. 2011.
- [5] 吴静, 王广启, 曹知平, 等. “热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 [J]. 环境科学, 2014, **35** (9): 3461-3465.
Wu J, Wang G Q, Cao Z P, et al. Pilot study of thermal treatment/thermophilic anaerobic digestion process treating waste activated sludge of high solid content [J]. Environmental Science, 2014, **35** (9): 3461-3465.
- [6] 戴晓虎, 叶宁, 董滨. 脱水污泥高温两相与单相厌氧消化工艺比较研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, **14** (33): 132-138.
Dai X H, Ye N, Dong B. Comparison of performance between thermophilic two-phase and single-phase anaerobic digestion of dewatered sludge [J]. Science Technology and Engineering, 2014, **14** (33): 132-138.
- [7] 王广启, 吴静, 左剑恶, 等. 城市污泥高固体浓度厌氧消化的研究进展 [J]. 中国沼气, 2013, **31** (6): 9-12.
Wang G Q, Wu J, Zuo J E, et al. Progress of high-solid-content anaerobic digestion of municipal sludge [J]. China Biogas, 2013, **31** (6): 9-12.
- [8] 廖晓聪, 程英超, 李欢. 污泥高固体厌氧消化研究进展 [J]. 四川环境, 2013, **32** (6): 118-121.
Liao X C, Cheng Y C, Li H. Research progress of high-solids

- sludge anaerobic digestion[J]. *Sichuan Environment*, 2013, **32**(6): 118-121.
- [9] Liao X C, Li H, Cheng Y C, *et al.* Process performance of high-solids batch anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(21): 2652-2659.
- [10] 陈思思, 戴晓虎, 薛勇刚, 等. 影响高含固厌氧消化性能的主要因素研究进展[J]. *化工进展*, 2015, **34**(3): 831-839, 856.
- Chen S S, Dai X H, Xue Y G, *et al.* Research progress of the main factors influencing properties of high-solid anaerobic digestion [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, **34**(3): 831-839, 856.
- [11] 戴晓虎, 何进, 严寒, 等. 游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 679-687.
- Dai X H, He J, Yan H, *et al.* Effects of free ammonia regulation on the performance of high solid anaerobic digesters with dewatered sludge [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 679-687.
- [12] Fujishima S, Miyahara T, Noike T. Effect of moisture content on anaerobic digestion of dewatered sludge; ammonia inhibition to carbohydrate removal and methane production [J]. *Water Science and Technology*, 2000, **41**(3): 119-127.
- [13] Liao X C, Li H. Biogas production from low-organic-content sludge using a high-solids anaerobic digester with improved agitation [J]. *Applied Energy*, 2015, **148**: 252-259.
- [14] Wang F, Hidaka T, Uchida T, *et al.* Thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge with high solids content [J]. *Water Science and Technology*, 2014, **69**(9): 1949-1955.
- [15] Nges I A, Liu J. Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered-sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions [J]. *Renewable Energy*, 2010, **35**(10): 2200-2206.
- [16] Duan N N, Dong B, Wu B, *et al.* High-solid anaerobic digestion of sewage sludge under mesophilic conditions: feasibility study [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **104**: 150-156.
- [17] Hidaka T, Wang F, Togari T, *et al.* Comparative performance of mesophilic and thermophilic anaerobic digestion for high-solid sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **149**: 177-183.
- [18] Liao X C, Li H, Zhang Y Y, *et al.* Accelerated high-solids anaerobic digestion of sewage sludge using low-temperature thermal pretreatment [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, **106**: 141-149.
- [19] Liu C, Li H, Zhang Y Y, *et al.* Evolution of microbial community along with increasing solid concentration during high-solids anaerobic digestion of sewage sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **216**: 87-94.
- [20] 王腾旭, 马星宇, 王萌萌, 等. 中高温污泥厌氧消化系统中微生物群落比较 [J]. *微生物学通报*, 2016, **43**(1): 26-35.
- Wang T X, Ma X Y, Wang M M, *et al.* A comparative study of microbial community compositions in thermophilic and mesophilic sludge anaerobic digestion systems [J]. *Microbiology China*, 2016, **43**(1): 26-35.
- [21] 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.
- [22] Hansen K H, Angelidaki I, Ahring B K. Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia [J]. *Water Research*, 1998, **32**(1): 5-12.
- [23] Wang C, Zuo J E, Chen X J, *et al.* Microbial community structures in an integrated two-phase anaerobic bioreactor fed by fruit vegetable wastes and wheat straw [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(12): 2484-2492.
- [24] Caporaso J G, Kuczynski J, Stombaugh J, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. *Nature Methods*, 2010, **7**(5): 335-336.
- [25] Koster I W, Lettinga G. The influence of ammonium-nitrogen on the specific activity of pelletized methanogenic sludge [J]. *Agricultural Wastes*, 1984, **9**(3): 205-216.
- [26] Tandishabo K, Nakamura K, Umetsu K, *et al.* Distribution and role of *Coprothermobacter* spp. in anaerobic digesters [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2012, **114**(5): 518-520.
- [27] Lee M, Hidaka T, Tsuno H. Two-phased hyperthermophilic anaerobic co-digestion of waste activated sludge with kitchen garbage [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2009, **108**(5): 408-413.
- [28] Koeck D E, Zverlov V V, Liebl W, *et al.* Comparative genotyping of *Clostridium thermocellum* strains isolated from biogas plants: genetic markers and characterization of cellulolytic potential [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2014, **37**(5): 311-319.
- [29] Hatamoto M, Imachi H, Fukayo S, *et al.* *Syntrophomonas palmitatica* sp. nov., an anaerobic, syntrophic, long-chain fatty-acid-oxidizing bacterium isolated from methanogenic sludge [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2007, **57**(9): 2137-2142.
- [30] Chen Y, Cheng J J, Creamer K S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(10): 4044-4064.
- [31] Mesbah N M, Hedrick D B, Peacock A D, *et al.* *Natranaerobius thermophilus* gen. nov., sp. nov., a halophilic, alkalithermophilic bacterium from soda lakes of the Wadi An Natrun, Egypt, and proposal of *Natranaerobiaceae* fam. nov. and *Natranaerobiales* ord. nov. [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2007, **57**(11): 2507-2512.
- [32] Zavarzina D G, Zhilina T N, Kuznetsov B B, *et al.* *Natranaerobaculum magadiense* gen. nov., sp. nov., an anaerobic, alkalithermophilic bacterium from soda lake sediment [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2013, **63**(12): 4456-4461.
- [33] Demirel B, Scherer P. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2008, **7**(2): 173-190.
- [34] Tang Y Q, Ji P, Hayashi J, *et al.* Characteristic microbial community of a dry thermophilic methanogenic digester: its long-term stability and change with feeding [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **91**(5): 1447-1461.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhe, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper (II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)