

# 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

南京工业区夏冬季节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)

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-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<sup>(0)</sup>-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 N<sub>2</sub>O 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 N<sub>2</sub>O 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 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 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)

C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/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)

# 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<sup>1,2</sup>, 徐辉<sup>1,2</sup>, 冯修平<sup>1,2</sup>, 李方<sup>1,2</sup>, 田晴<sup>1,2</sup>, 马春燕<sup>1,2</sup>

(1. 国家环境保护纺织工业污染防治工程技术中心, 上海 201620; 2. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

**摘要:** 利用强化循环厌氧反应器 (SCAR) 处理模拟城市生活污水, 研究不同负荷条件下的反应器运行特征、污泥特性及微生物种群结构。结果表明, 水力停留时间 (HRT) 为 6 h 可以作为反应器高效运行的关键控制参数, 该条件下污水化学需氧量 (COD) 去除率达到 75% 以上。随着反应器容积负荷的逐渐提高, 颗粒污泥中辅酶 F<sub>420</sub> 和产甲烷活性 (SMA) 逐渐增加, 胞外聚合物 (EPS) 含量也不断提高, 其中紧密黏附 EPS (TB-EPS) 含量的增加尤其明显。厌氧颗粒污泥性状和反应器对污染物的去除效率同时受到污泥负荷和 HRT 的影响, 微生物的群落结构及其在反应器中的空间分布也受到污泥负荷的影响, 不同代谢特征微生物在反应器不同空间位置的相对丰度随着污泥负荷的调整而改变。

**关键词:** 强化循环厌氧反应器 (SCAR); 城市生活污水; 粒径分布; 污泥活性; 胞外聚合物; 微生物群落

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-2021-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201609024

## Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater

YANG Bo<sup>1,2</sup>, XU Hui<sup>1,2</sup>, FENG Xiu-ping<sup>1,2</sup>, LI Fang<sup>1,2</sup>, TIAN Qing<sup>1,2</sup>, MA Chun-yan<sup>1,2</sup>

(1. State Environmental Protection Engineering Center for Pollution Treatment and Control in Textile Industry, Shanghai 201620, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** A strengthened circulation anaerobic reactor (SCAR) treating artificial municipal wastewater was investigated under different volumetric loading rate (VLR) and the reactor performance, characteristics of granular sludge and microbial community structure were also tested in this experiment. The results of the experiment demonstrated that the hydraulic retention time (HRT) of 6h could be regarded as the key parameter dominating the efficient operation of SCAR reactor, in which condition the COD removal efficiency was above 75%. The coenzyme F<sub>420</sub> and the maximum specific methanogenic activity (SMA) of granular sludge increased with increasing VLR, and the EPS contents, especially TB-EPS in the granule sludge also increased obviously. Consistently, the characteristics of anaerobic granular sludge and the removal efficiency of the reactor were influenced by both sludge loading and HRT. The microbial community structure and its spatial distribution in the reactor were also affected by sludge loading, while the relative abundance of the microbial community with different metabolic characteristics in different spatial positions changed with the adjustment of the sludge loading.

**Key words:** strengthened circulation anaerobic reactor (SCAR); municipal wastewater; particle size distribution; activity of sludge; EPS; microbial community

随着我国环境问题的日益凸现, 工业废水和生活污水厌氧生物处理技术受到越来越多关注<sup>[1~3]</sup>。与好氧生物处理技术相比, 厌氧生物处理技术具有占地面积小、污泥产率系数低、运行费用少和可回收能源等优点<sup>[4]</sup>。随着第三代高效厌氧反应器的发展, 厌氧生物处理技术在废水处理领域已经得到了广泛应用, 并取得了良好的应用效果<sup>[5]</sup>。

一般来讲, 厌氧反应器处理高浓度有机废水具有天然优势, 较高的污泥浓度可以保证反应器在高容积负荷条件下稳定运行, 高浓度有机物为微生物提供了充足的代谢基质, 产生的大量甲烷气体同时有利于促进系统内的传质作用<sup>[6~8]</sup>。但对于处理污染物浓度较低的城市生活污水, 厌氧反应器的容积

负荷和污泥负荷均明显降低, 在低负荷条件下, 厌氧反应器的运行特征和微生物代谢特性均可能发生较大改变, 如低基质浓度条件下颗粒污泥由于营养物质的匮乏是否会出现解体和絮状化, 进而反应器对污染物去除效率是否会明显降低等这些不确定性, 意味着实现厌氧反应器高效率处理城市生活污水依然具有较大的挑战性<sup>[9, 10]</sup>。

本实验采用自主研发的强化循环厌氧反应器 (SCAR) 处理模拟城市生活污水, 在稳定的上升流

收稿日期: 2016-09-04; 修订日期: 2016-10-24

基金项目: 上海市自然科学基金项目 (13ZR1401000)

作者简介: 杨波 (1973~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制新技术和污泥处理与处置, E-mail: yangbo@dhu.edu.cn

速( $V_{up}$ )条件下,研究厌氧生物处理城市生活污水的可行性和反应器的运行特性. SCAR 反应器在空间上将反应器分为主体反应区和精细反应区,并通过外循环作用改善反应器的传质作用. 本实验考察了 HRT 对反应器处理效能的影响,探讨反应器运行过程中颗粒污泥的粒径分布、SMA 和辅酶  $F_{420}$  及 EPS 等污泥性状的变化特征,并借助高通量测序技术分析反应器不同时空条件下微生物菌群结构分布特点及其演变过程. 本实验结果可为验证厌氧生物处理城市生活污水的可行性提供依据,有利于拓展厌氧生物处理的应用领域,以期在城市生活污水处理带来高效、低能耗、低占地面积的新途径.

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验用水

本实验使用的模拟城市生活污水, COD 浓度在

$450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,氨氮和总氮浓度分别为  $28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,总磷  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右;配制生活污水的主要成分如下 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[1, 11, 12]</sup>:蔗糖, 200;马铃薯淀粉, 100;奶粉, 30;蛋白胨, 100;豆油, 10;牛肉汁, 30;尿素, 5;  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 100;  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 20;  $\text{CaCl}_2$ , 5;  $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 5.8;  $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 6, 同时加入适量的微量元素. 为了使模拟生活污水具有一定的 pH 缓冲能力,加入适量的  $\text{NaHCO}_3$ .

### 1.2 接种污泥

本实验接种泥取自某造纸厂 IC 反应器中的厌氧颗粒污泥. 污泥的平均粒径为  $2.19 \text{ mm}$ , MLSS 为  $48.45 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , MLVSS/MLSS 为 0.79, 沉降性能良好. 在反应器启动前,接入 28 L 的接种污泥,约占反应器总容积的 2/5.

### 1.3 实验装置与运行程序

本实验装置如图 1 所示.

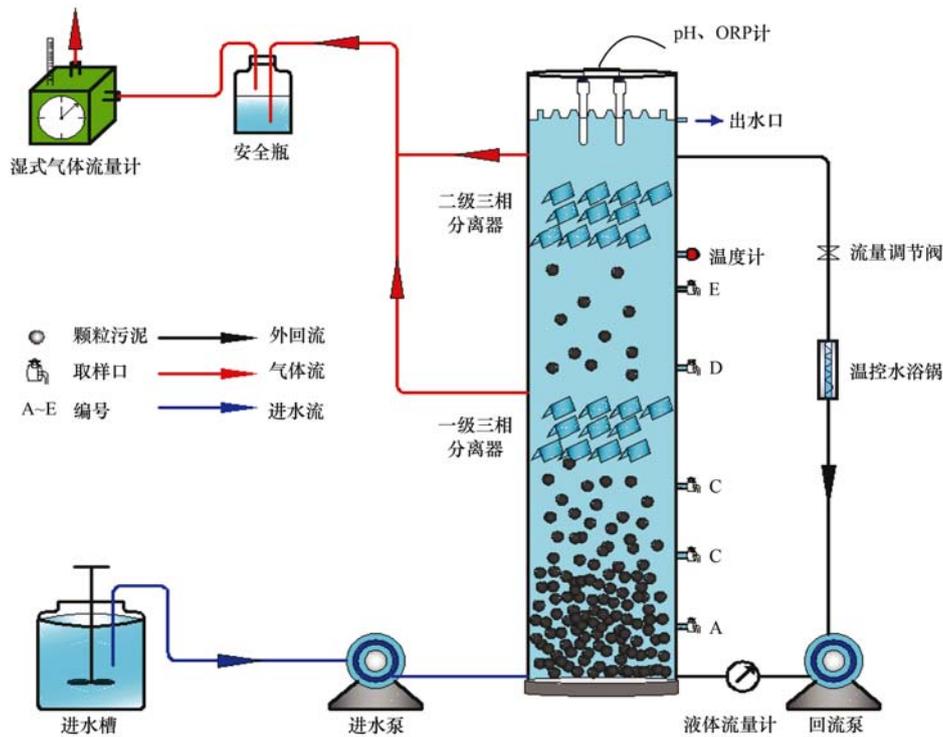


图 1 SCAR 处理生活污水流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the SCAR system treating municipal wastewater

SCAR 由有机玻璃加工而成,直径  $0.2 \text{ m}$ ,高  $2.0 \text{ m}$ ,有效容积  $70 \text{ L}$ . 反应器自下而上设 5 个取样口,各个取样口距离反应器底端距离分别为 25、60、100、140 和  $170 \text{ cm}$ ,分别命名为 A 号、B 号、C 号、D 号、E 号取样口. 生活污水经计量泵从底部进入反应器,通过反应器主体反应区和精细反应区处理后由出口排出;外循环污水通过恒温水浴箱加热,维持反应器内部温度在  $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ;三

相分离器分离排出的气体经湿式气体流量计计量后排放.

反应器共运行 120 d,由 100 d 运行阶段和 20 d 恢复阶段组成. 实验过程中,关闭反应器的内循环,只通过外循环泵控制系统的循环量,维持污水在反应器中的上升流速( $V_{up}$  为空塔速度)为  $4 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$  的条件下运行,并以缩短 HRT 的方式逐步提高反应器容积负荷<sup>[4, 5, 12, 13]</sup>.

## 1.4 分析项目及方法

COD、MLSS、MLVSS 的测定采用标准方法<sup>[14]</sup>; 辅酶 F<sub>420</sub>: 紫外分光光度法<sup>[15]</sup>; 产甲烷活性(SMA) 采用史氏发酵法<sup>[12]</sup>; 颗粒污泥粒径分布采用筛分法<sup>[16]</sup>; 挥发性脂肪酸(VFA<sub>s</sub>) 测定采用气相色谱法测定(气相色谱仪: gc7890, 15 m × 0.53 mm FFAP), 测样前甲酸酸化(pH < 2); 厌氧颗粒污泥的胞外聚合物(EPS) 采用热提法进行提取<sup>[17]</sup>, 多糖含量采用蒽酮-硫酸法测量<sup>[18]</sup>, 蛋白质含量采用 BCA 法测量<sup>[19]</sup>.

采用高通量测序技术进行基因组测序. 首先采用 E. Z. N. ATM Mag-Bind Soil DNA Kit(OMEGA) 提取总 DNA. 利用 Qubit2.0 DNA(Life) 检测试剂盒对基因组 DNA 精确定量, 以确定 PCR 反应应加入的 DNA 量. 扩增对象为 16S rDNA 的 V3-V4 区. 细菌 PCR 扩增所用的引物为通用引物 341F-805R; 古菌通过巢式 PCR 扩增, 第一轮扩增所用引物为 M-349F, GU1ST-1000R, 第二轮 PCR 所用的引物为通用引物 349F-806R. PCR 实验结束后, 其产物进行琼脂糖电泳检测, 然后用磁珠法进行纯化回收. 最后利用 Qubit2.0 DNA 检测试剂盒对回收产物精确定量, 按照 1:1 的等量混合后取样上机测序, 测序由上海生工生物工程公司完成. 对测序结果进行分析处理, 首先通过 Barcode(标签序列) 区分样品序列, 并对各样本序列进行质量控制, 去除非靶区域的序列及嵌合体. 然后基于 97% 相似度下进行 OTU(操作分类单元) 聚类, 获取每一个 OTU 的代表性序列, 通过 RDP 分析进行物种注释, 计算每个样本在不同分类等级下的相对丰度. 最后绘制物种丰度图.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同负荷条件下 SCAR 的处理效能

SCAR 中接种厌氧颗粒污泥, 在 HRT = 15 h、反应器容积负荷为 0.7 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup> 条件下启动反应器. 反应器启动后的前 20 d 内, 反应器对污染物的去除效率随时间基本呈现高低起伏, 但总体上呈逐渐增加趋势, 至 20 d 时污水 COD 去除效率基本稳定在 75% 左右, 另外反应器出水中仅含少量 VFAs, 实现了对 SCAR 的启动运行.

通过改变 HRT, 将 SCAR 的容积负荷分 4 个阶段逐渐由 0.7 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup> 提升至 0.89、1.18、1.77 及 2.7 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup>, 对应 HRT 分别为 12、9、6 和 4 h. 由图 2(a) 可见, 在 HRT 分别为 12、9 和 6 h 时, 每次提高容积负荷后的 1~3 d 内, 由于代谢底

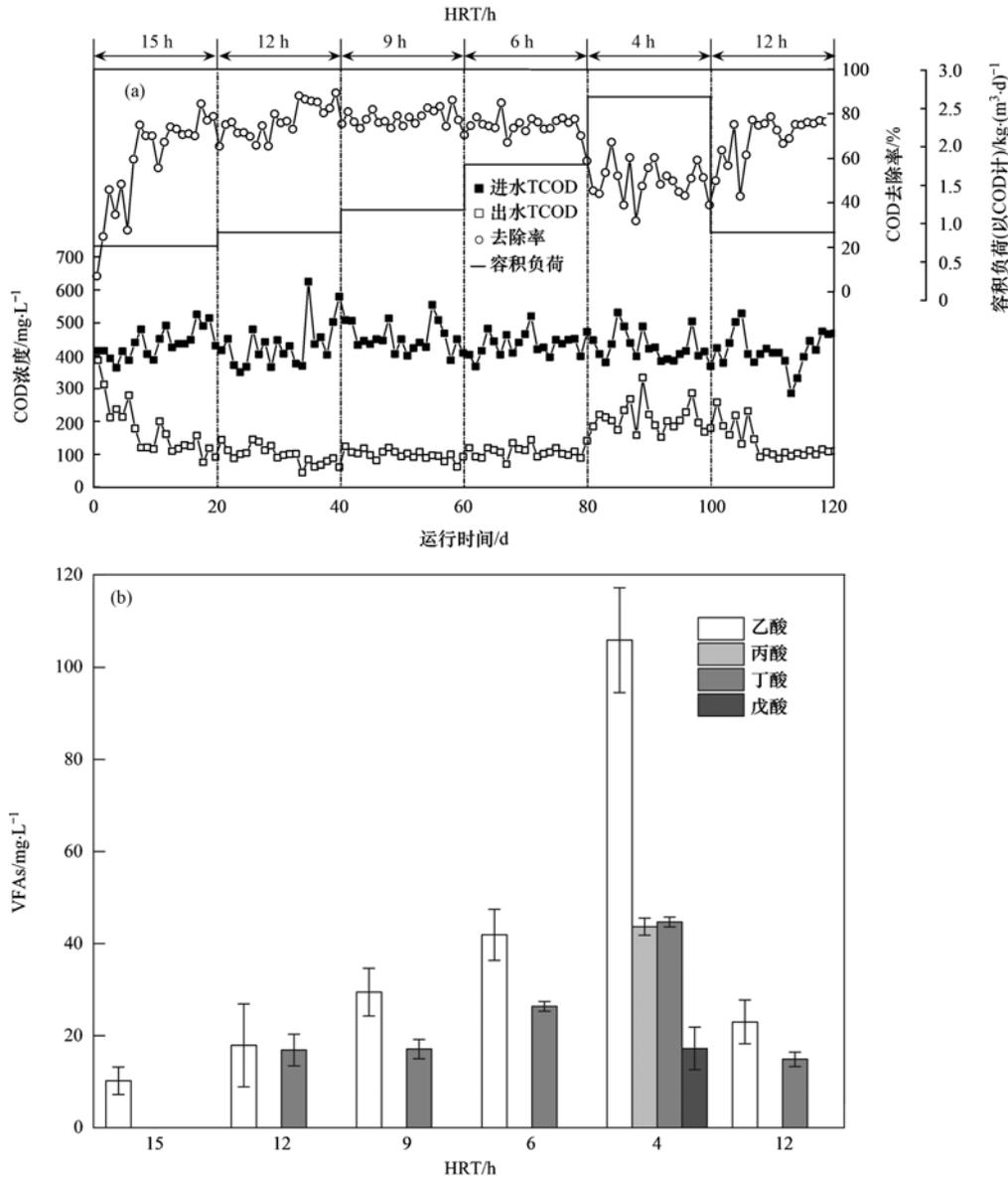
物量的增加和负荷改变对微生物空间相对位置的扰动, 反应器对污水 COD 去除效果变差, 但随着反应器的运行, 微生物逐渐适应了新的负荷条件, 污水 COD 去除率逐渐回升. 而随着 HRT 的缩短, 减少了代谢底物的生化反应时间, 反应器对污水 COD 的平均去除率会有所降低, 但下降幅度较小, 反应器对 COD 平均去除率基本可以维持在 75% 以上. 随着污水 HRT 降低至 4 h, 在此条件下运行的 20 d 内, 反应器出水平均 COD 由 107 mg·L<sup>-1</sup> 提高到 209 mg·L<sup>-1</sup>, COD 去除率由 75.3% 降低到 50.8%, 而且出水中一直含有大量 VFAs, 这说明较短的 HRT 无法满足厌氧酸化作用生成的有机酸类物质进行充分碱性发酵所需的反应时间. 随后将 HRT 调至 12 h, 反应器运行状况迅速好转, COD 去除率很快回升到 75% 左右. 由此可见, 在保证代谢基质充分生物降解时间条件下, SCAR 反应器对一定范围内变化的容积负荷具有良好的适应能力; 本实验条件下, HRT = 6 h 可以保证 SCAR 对生活污水具有良好的处理效率.

在有机物厌氧生物降解过程中, VFAs 的产生主要和进水水质、反应器类型以及 HRT 等有关<sup>[20]</sup>. 由图 2(b) 可见, 随着反应器 HRT 的减小和容积负荷的提高, 反应器出水中的 VFAs 含量也相应增加, 分析其原因有二, 其一是代谢底物量的增加, 其二是碱性发酵时间的缩短; HRT 为 15、12、9 和 6 h 时, 反应器可以实现对生成有机酸的充分代谢, 但 HRT 为 4 h 时, VFAs 开始出现明显积累, 尤其乙酸含量的增加特别明显. 这表明, 较短的 HRT 可以充分完成对生活污水代谢底物的水解酸化过程, 但是实现充分的碱性发酵作用必须要保证一定的代谢反应时间, 产甲烷的碱性发酵过程是厌氧反应的限制阶段<sup>[21]</sup>. 在图 2(b) 还可以看见, 在充足的 HRT 条件下(HRT 不小于 6 h), 反应器出水中均有乙酸或者丁酸出现, 而未检测出丙酸和戊酸. 根据甲烷细菌代谢底物类型的不同, 可以将产甲烷生化代谢分为还原 CO<sub>2</sub> 途径、乙酸途径和甲基营养途径<sup>[22]</sup>; 由此可以推测碱性发酵过程中酸类物质的可能代谢途径: 丙酸通过裂解生成甲基和乙酸, 而戊酸裂解生成甲基和丁酸, 而生成甲基和部分乙酸进入乙酸途径被代谢, 从而造成了系统中乙酸和丁酸的少量累积.

### 2.2 不同负荷条件下 SCAR 反应器颗粒污泥的特性

#### 2.2.1 各阶段污泥的粒径分布和污泥浓度的比较

粒径分布是反映厌氧颗粒污泥特性的重要参数之一, 粒径大小影响着微生物分布状况与有机物的



(a) 进出水 COD、COD 去除率、进水负荷; (b) 挥发性脂肪酸

图 2 SCAR 在不同 HRT 条件下的处理效果和运行状况

Fig. 2 Performance of SCAR under different HRT conditions

传质效果,也可以反映出污泥的营养状况<sup>[3]</sup>;SCAR 运行期间反应器主体反应区颗粒污泥粒径( $\phi$ )分布和污泥浓度随 HRT 的变化情况见图 3。

在接种的颗粒污泥中, $\phi > 1$  mm 的颗粒污泥比例占 90%, $\phi > 2$  mm 的颗粒污泥比例占 60%;在 HRT = 12 h 运行阶段, $\phi > 1$  mm 的比例降至 80%, $\phi > 2$  mm 的比例下降至 47%;HRT = 6 h 时, $\phi > 1$  mm 的比例回升至 81%,粒径在 1 ~ 2 mm 间的颗粒污泥已经由接种时的 30% 提高至 44%;HRT = 4 h 时, $\phi > 1$  mm 的比例已经提高至 86%,其中  $\phi$  1 ~ 2 mm 的污泥已经占了 52%,而且  $\phi < 1$  mm 的比例相比前一个周期也降低了 5%。整个实验期间,颗粒污泥粒径

变化的基本趋势是小颗粒( $\phi < 1$  mm)与大颗粒污泥( $\phi > 2$  mm)逐渐减小,而中间粒径污泥( $\phi$  在 1 ~ 2 mm 之间)的量逐渐增多。反应器运行前期接种污泥粒径较大,低浓度的生活污水提供的营养不足,大颗粒污泥因为得不到充分代谢底物容易在内部形成空腔,进而破碎形成较小粒径污泥;营养物质进入小粒径颗粒污泥时阻力相对较小,小颗粒污泥容易成长,而更加细小污泥在较高上升流速( $V_{up}$ )条件下也容易被洗出,这些综合作用造成了中间粒径颗粒污泥比例的增加。

随着容积负荷提高,反应器污泥浓度变化和  $\phi > 1$  mm 颗粒污泥变化趋势一致。在反应器启动阶

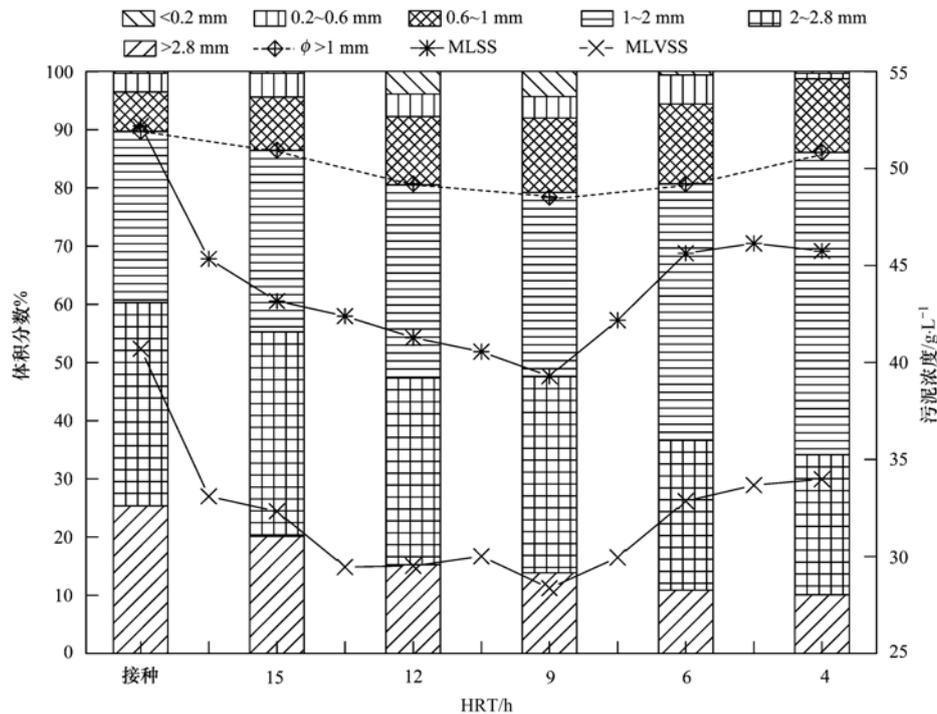


图3 SCAR 运行过程中的粒径分布和污泥浓度的变化情况

Fig. 3 Particles size distribution and sludge concentration of the SCAR system during the operation process

段,主体反应区接种泥浓度为  $52.19 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,在进水负荷较低条件下,微生物负荷较低,内源呼吸作用处于主导地位,反应器运行 10 d 后污泥浓度急剧下降至  $45.34 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,在  $\text{HRT} = 9 \text{ h}$  阶段反应器污泥浓度最低下降到  $39.29 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 但  $\text{HRT} = 6 \text{ h}$  时,随着污泥负荷的增加,系统微生物量呈现增加状态,污泥浓度回升至  $46.15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 在本实验条件下, $\text{HRT} = 6 \text{ h}$  可以确保 SCAR 系统污泥具有良好的稳定性,同时实现对污染物具有较高的去除效率.

### 2.2.2 颗粒污泥 SMA 与辅酶 $F_{420}$ 的比较

辅酶  $F_{420}$  和产甲烷活性(SMA)是衡量产甲烷菌数量和活性的重要指标<sup>[15, 23]</sup>;不同 HRT 条件下反应器主体反应区(A区)和精细反应区(D区)污泥的辅酶  $F_{420}$  和 SMA 变化情况见图 4.

由图 4 可见,反应器启动运行后,在适应期主体反应区(A区)和精细反应区(D区)微生物辅酶  $F_{420}$  和 SMA 均出现降低. 而随着反应器的运行,微生物逐渐适应了新环境,随着 HRT 的减少和容积负荷的增加,辅酶  $F_{420}$  和 SMA 基本是逐渐增加趋势(除 HRT 由 6 h 缩短至 4 h 时,精细反应区的辅酶  $F_{420}$  有所降低;可能是反应时间太短,来不及反应的酸性物质累积对辅酶  $F_{420}$  产生了抑制作用). 一方面,污泥负荷的增加为微生物代谢提供了更多的代谢基质,促进了颗粒污泥活性的提高,另一方面,颗粒污泥粒

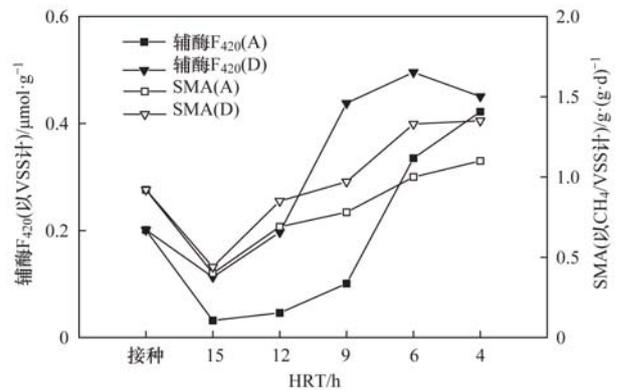


图4 不同停留时间下颗粒污泥的产甲烷活性和辅酶  $F_{420}$  含量

Fig. 4 Variation of specific methanogenic activity and coenzyme  $F_{420}$  of granular sludge with HRT

径的变化也同样影响着污泥活性,适当的粒径分布既可以保证产甲烷细菌的固定化状态,也有利于代谢基质和厌氧代谢产物向颗粒污泥内部和外部的输送. 在图 4 中,反应器上部(D区)的 SMA 和辅酶含量显著高于底部(A区),精细反应区的设置强化了反应器的产甲烷作用.

### 2.2.3 各阶段颗粒污泥的 EPS 比较

胞外聚合物(EPS)是由微生物分泌的一种复杂高分子混合物,主要成分是多糖(PS)、蛋白质(PN)、核酸等大分子物质. 对于厌氧颗粒污泥而言,EPS 在颗粒污泥的形成和维持颗粒污泥结构稳定性方面起着重要作用<sup>[24]</sup>. 实验期间,反应器稳定

运行时不同 HRT 条件下厌氧颗粒污泥 EPS [包括黏液层 EPS (S-EPS)、松散附着 EPS (LB-EPS)、紧密黏附 EPS (TB-EPS)] 含量状况见图 5。

由图 5 可见,反应器启动运行后,颗粒污泥 EPS 含量较接种污泥出现较大幅度降低,随着反应器容积负荷的提高,颗粒污泥 EPS 含量基本呈现增长态势,特别是 TB-EPS 增长明显。在 HRT = 15 h 运行条件下,污泥负荷低,在微生物营养严重不足条件下,3 种 EPS 均可以作为营养源供给微生物的新陈代谢作用,此时反应器中颗粒污泥的 EPS 含量与接种泥相比明显减少,其中 TB-EPS 含量下降到最低的  $4.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;污水较大上升流速形成的水力冲刷也为 EPS 的流失提供了条件。随着反应器污泥负荷逐渐增大,颗粒污泥 S-EPS、LB-EPS、TB-EPS 浓度均不断增加,营养条件的改善是颗粒污泥 EPS 浓度增加的主要原因。

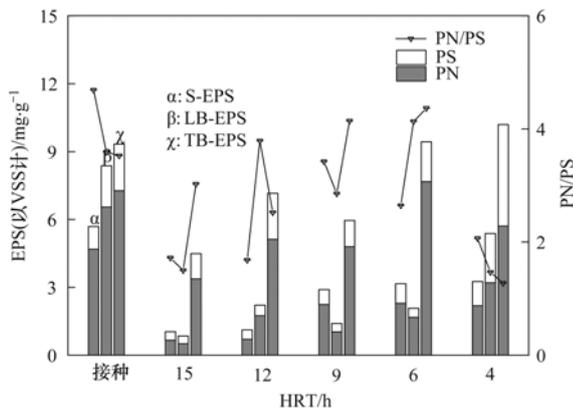


图 5 接种污泥和反应器不同 HRT 条件下污泥 EPS 的含量

Fig. 5 EPS content in the inoculum and granules of SCAR at different HRT

TB-EPS 位于颗粒污泥内部,对于维系细胞间良好黏附能力和保证颗粒污泥稳定性作用明显<sup>[25]</sup>。随着容积负荷的增加,TB-EPS 含量较 HRT = 15 h 时的  $4.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  有明显增长,在 HRT = 4 h 时提高至  $10.19 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。颗粒污泥的稳定性同时也受到 EPS 中 PN 和 PS 比值的影响<sup>[24-26]</sup>,在反应器运行的前 4 个阶段(HRT 为 15、12、9 和 6 h),随着污泥负荷的不断提高,EPS 中蛋白质含量逐渐上升,多糖含量变化并不明显,PN/PS 比值逐渐增高,这 4 个运行阶段中颗粒污泥性状逐渐改善;当 HRT = 4 h 时,EPS 中多糖含量显著增加导致 PN/PS 的比值明显降低,其中 TB-EPS 中 PN/PS 的比值由 HRT = 6 h 时的 4.36 下降到 1.27,此时的反应器运行效果明显变差。在 HRT = 4 h 条件下,LB-EPS 含量增加特别明显,由 HRT = 6 h 时的  $2.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  提高至  $5.38$

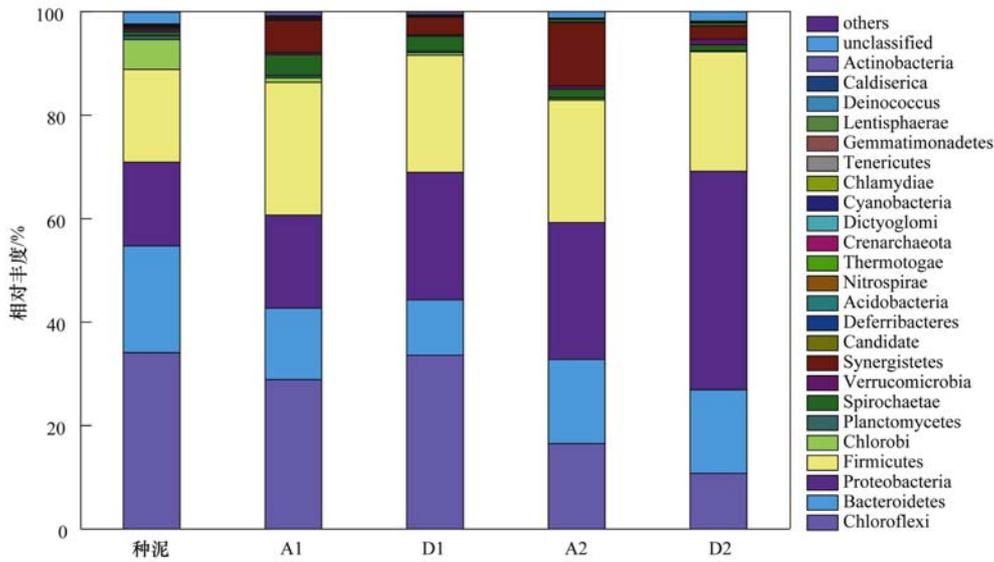
$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,较丰富的营养物质使微生物代谢能力增强,分泌出更多的 EPS,但是 LB-EPS 中多糖含量的增加,多糖的亲水特性不利于颗粒污泥的沉降,使细小污泥易于被水流带出反应器<sup>[25, 26]</sup>。

### 2.3 不同负荷条件下微生物群落的高通量测序分析

为了探究容积负荷对反应器中微生物群落分布的影响,分别对反应器接种污泥 HRT = 12 h 及 HRT = 6 h 条件下反应器的主体反应区和精细反应区污泥样本进行高通量测序分析,结果如图 6、图 7;图 8 为 HRT = 12 h 和 HRT = 6 h 条件下,反应器不同高度处的乙酸浓度。

由图 6 可见,在接种污泥的细菌门水平菌群分布中,主要有绿弯菌 (Chloroflexi)、拟杆菌 (Bacteroidetes)、厚壁菌 (Firmicutes)、变形菌 (Proteobacteria) 等优势菌,随着水力停留时间的改变,这些细菌始终保持优势地位。通常认为优势细菌的相对丰度会随反应器的空间位置及负荷的升高而改变,如 Ambuchi 等<sup>[27]</sup> 研究 EGSB (expanded granular sludge bed) 处理制糖废水时发现在反应器的底部和上部的主要优势菌种分别是绿弯菌 (Chloroflexi) 和厚壁菌 (Firmicutes);而 Liao 等<sup>[28]</sup> 研究 EGSB 处理高氮废水时主要优势菌种为变形菌 (Proteobacteria)。本研究中,当 HRT 由 12 h 缩短至 6 h 时(图 6 中),反应器主体反应区的绿弯菌 (Chloroflexi) 优势在减弱,相对丰度由开始的 28.89% 降低 16.49%,而变形菌 (Proteobacteria) 的优势在增强,相对丰度由开始的 17.96% 提高至 26.43%,反应器精细反应区菌群分布也有相同变化趋势。可能的原因有二,其一是绿弯菌 (Chloroflexi) 是严格厌氧细菌,随着进水流量的增加,进水中少量溶解氧可能对绿弯菌 (Chloroflexi) 产生抑制作用,但对于变形菌门细菌来说,兼性环境对其生长有促进作用<sup>[29]</sup>;其二是实验条件下变形菌 (Proteobacteria) 较绿弯菌 (Chloroflexi) 世代时间短,在较充分营养条件下实现了更多增殖。

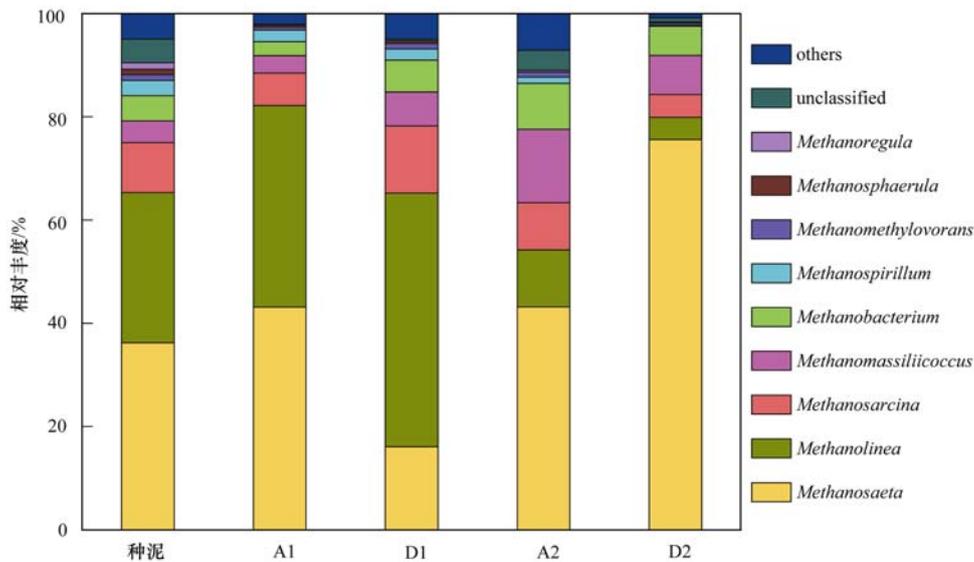
反应器接种污泥中古菌的优势菌分布较广,在古菌的属水平分布中,主要有甲烷鬃菌属 (*Methanosaeta* sp., 相对丰度为 36.2%)、甲烷绳菌属 (*Methanolinea* sp., 相对丰度为 29.1%)、甲烷八叠球菌属 (*Methanosarcina* sp., 相对丰度为 9.7%)、第七产甲烷古菌属 (*Methanomassiliicoccus*, 相对丰度为 4.2%)、甲烷杆菌属 (*Methanobacterium*, 相对丰度为 4.9%) 以及其它一些菌属。实验期间,甲烷鬃菌属 (*Methanosaeta* sp.) 和甲烷绳菌属 (*Methanolinea*



A1: HRT = 12 h, A 区; D1: HRT = 12 h, D 区; A2: HRT = 6 h, A 区; D2: HRT = 6 h, D 区

图 6 细菌门的相对丰度

Fig. 6 Relative abundance of bacterial phyla



A1: HRT = 12 h, A 区; D1: HRT = 12 h, D 区; A2: HRT = 6 h, A 区; D2: HRT = 6 h, D 区

图 7 古菌属的相对丰度

Fig. 7 Relative abundance of archaeal genera

sp.) 一直为主要优势菌种,二者相对丰度之和大于 50%,甚至超过 80%。Chelliapan 等<sup>[21]</sup>的研究也显示厌氧反应器的容积负荷范围为 0.86 ~ 1.86  $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  时甲烷鬃菌是反应器运行过程中的主导微生物。甲烷鬃菌 (*Methanosaeta*) 是一种典型的乙酸营养型细菌,对厌氧反应器的稳定运行起着重要作用<sup>[1, 30~33]</sup>。当 HRT = 12 h, 进水容积负荷较低, 营养不足, 反应器上部乙酸含量较少, 甲烷鬃菌属 (*Methanosaeta*) 很难利用到乙酸底物, 相对丰度降至 16.08%, 优势逐渐减弱, 当 HRT = 6 h, 容积负荷提

高, 反应器上部的乙酸含量明显增加, 甲烷鬃菌属 (*Methanosaeta*) 又恢复成为绝对的优势菌种 (相对丰度为 75.58%)。Siggins 等<sup>[34]</sup>研究 EGSB 反应器处理三氯乙烯废水发现, VFA (主要是乙酸) 出现积累时甲烷鬃菌 (*Methanosaeta*) 是主导微生物。在图 8 中, 两种负荷条件下 SCAR 反应器主体反应区的乙酸含量均较高 (均超过  $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 主体反应区内甲烷鬃菌属 (*Methanosaeta*) 相对丰度在两种负荷条件下几乎相同, 而精细反应区的乙酸含量差别较大, 在 2 m 高度处、HRT = 12 h 条件下乙酸仅为约 15

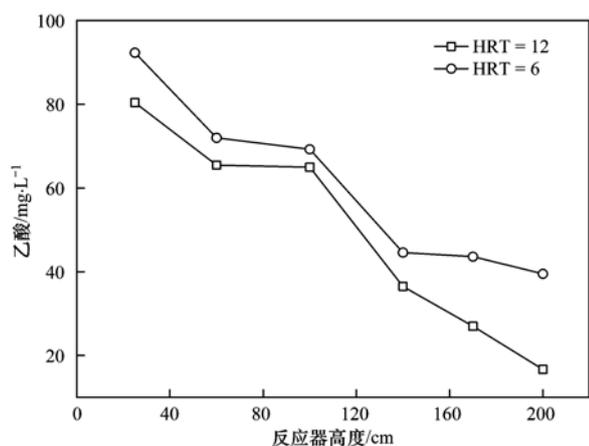


图8 SCAR 不同高度下的乙酸含量

Fig. 8 Variations of acetic acid along the height of SCAR

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而  $\text{HRT} = 6$  h 条件下乙酸浓度约为  $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 对应着后者条件下精细反应区内甲烷鬃菌属 (*Methanosaeta*) 相对丰度远高于前者, 由此可见, 当乙酸浓度小于某一浓度时 (本实验为  $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 甲烷鬃菌属 (*Methanosaeta*) 相对丰度会产生巨大变化. Wang 等<sup>[35]</sup> 研究 EGSB 处理养猪废水时容积负荷提高到  $10 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ , 乙酸营养型产甲烷菌才能转化成氢营养型产甲烷菌. 但本研究中, 甲烷绳菌属 (*Methanolinea*) 属于氢营养型产甲烷菌<sup>[30]</sup>, 较低负荷条件下反应器产生的乙酸量较少, 乙酸营养型产甲烷鬃菌 (*Methanosaeta*) 很难占据主导地位, 氢营养型甲烷绳菌优势地位明显.

不同负荷条件下、反应器不同反应区菌群分布的差异, 说明反应器在空间上实现了微生物功能分区, 即微生物相分离<sup>[36]</sup>; 结合图 4 中反应器主反应区产甲烷活性 (SMA) 和辅酶  $\text{F}_{420}$  低于上部精处理区的现象, 证明了厌氧反应器设置精处理区的重要性和必要性.

### 3 结论

(1) SCAR 处理生活污水, 污水在反应器中的上升流速为  $4 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ , 在  $30^\circ\text{C}$  条件下连续运行. 随着反应器容积负荷的提高, 颗粒污泥产甲烷活性 (SMA) 和辅酶  $\text{F}_{420}$  活性均增加, 而且反应器上部厌氧污泥活性明显高于底部. 在  $\text{HRT} = 6$  h、容积负荷为  $1.77 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$  条件下, COD 去除率能达到 75% 以上, 颗粒污泥性状良好; 当 HRT 缩短至 4 h, 反应器出水中 VFAs 出现积累, 水质恶化.

(2) 随着容积负荷的提高, 颗粒污泥的平均粒径有逐渐变小趋势, 但  $\phi 1 \sim 2 \text{ mm}$  的污泥比例逐渐增多, 粒径分布最终趋于稳定. 颗粒污泥胞外聚合

物 (EPS) 含量不断增加, 尤其是 TB-EPS 增加明显, 较充分的营养条件和对污染物良好的去除效率, 使 EPS 中的蛋白质 (PN) 含量显著增加.

(3) 污泥样品的高通量测序分析表明, 容积负荷的改变不仅影响着微生物菌落的结构分布, 而且也改变着不同微生物在反应器的空间分布. 随着污泥负荷的增加, 细菌门水平菌群分布中绿弯菌 (*Chloroflexi*) 的优势地位在减弱, 变形菌 (*Proteobacteria*) 的优势地位在增强, 而古菌的菌群分布中甲烷绳菌属 (*Methanolinea* sp.) 优势位置逐渐减弱, 甲烷鬃菌属 (*Methanosaeta* sp.) 优势地位逐渐增强.

### 参考文献:

- [1] Ozgun H, Gimenez J B, Ersahin M E, et al. Impact of membrane addition for effluent extraction on the performance and sludge characteristics of upflow anaerobic sludge blanket reactors treating municipal wastewater[J]. Journal of Membrane Science, 2015, **479**: 95-104.
- [2] Hahn M J, Figueroa L A. Pilot scale application of anaerobic baffled reactor for biologically enhanced primary treatment of raw municipal wastewater[J]. Water Research, 2015, **87**: 494-502.
- [3] Álvarez J A, Armstrong E, Gómez M, et al. Anaerobic treatment of low-strength municipal wastewater by a two-stage pilot plant under psychrophilic conditions [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(15): 7051-7062.
- [4] Aiyuk S, Forrez I, Lieven D K, et al. Anaerobic and complementary treatment of domestic sewage in regions with hot climates—a review [J]. Bioresource Technology, 2006, **97**(17): 2225-2241.
- [5] Seghezzi L, Zeeman G, van Lier J B, et al. A review: the anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors[J]. Bioresource Technology, 1998, **65**(3): 175-190.
- [6] Zhang Y J, Yan L, Chi L, et al. Startup and operation of anaerobic EGSB reactor treating palm oil mill effluent [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(6): 658-663.
- [7] 王凯军. 厌氧工艺的发展和新型厌氧反应器[J]. 环境科学, 1998, **19**(1): 94-96.  
Wang K J. Development of anaerobic processes and new type anaerobic reactors[J]. Environmental Science, 1998, **19**(1): 94-96.
- [8] 张振家, 周伟丽, 林荣忱. 膨胀颗粒污泥床处理玉米酒精糟液的生产性试验[J]. 环境科学, 2001, **22**(4): 114-116.  
Zhang Z J, Zhou W L, Lin R C. Full-scale experiment on corn-ethanol production wastewater treatment with the thermophilic EGSB reactor[J]. Environmental Science, 2001, **22**(4): 114-116.
- [9] Lettinga G, Field J, van Lier J, et al. Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future[J]. Water Science and Technology, 1997, **35**(10): 5-12.
- [10] Jin L Y, Zhang G M, Tian H F. Current state of sewage treatment in China[J]. Water Research, 2014, **66**: 85-98.
- [11] Boeije G, Corstjanje R, Rottiers A, et al. Adaptation of the CAS test system and synthetic sewage for biological nutrient removal:

- Part I: development of a new synthetic sewage [J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(4): 699-709.
- [12] Chu L B, Yang F L, Zhang X W. Anaerobic treatment of domestic wastewater in a membrane-coupled expanded granular sludge bed (EGSB) reactor under moderate to low temperature [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(3-4): 1063-1070.
- [13] Kato M T, Field J A, Lettinga G. The anaerobic treatment of low strength wastewaters in UASB and EGSB reactors [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(6-7): 375-382.
- [14] 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. 121-124.
- [15] 唐一, 胡纪萃. 辅酶 F<sub>420</sub> 作为厌氧污泥活性指标的研究 [J]. *中国沼气*, 1990, **8**(1): 11-15.
- Tang Y, Hu J C. Studies on the use of coenzyme F<sub>420</sub> as a parameter for anaerobic sludge activity [J]. *China Biogas*, 1990, **8**(1): 11-15.
- [16] Laguna A, Ouattara A, Gonzalez R O, *et al.* A simple and low cost technique for determining the granulometry of upflow anaerobic sludge blanket reactor sludge [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(8): 1-8.
- [17] Zhen G Y, Lu X Q, Li Y Y, *et al.* Innovative combination of electrolysis and Fe(II)-activated persulfate oxidation for improving the dewaterability of waste activated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **136**: 654-663.
- [18] DuBois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. *Analytical Chemistry*, 1958, **28**(3): 350-356.
- [19] Walker J M. *The protein protocols handbook* (3th ed.) [M]. New York: Humana Press Inc., 2009.
- [20] Şentürk E, İnce M, Engin G O. Treatment efficiency and VFA composition of a thermophilic anaerobic contact reactor treating food industry wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **176**(1-3): 843-848.
- [21] Chelliapan S, Wilby T, Yuzir A, *et al.* Influence of organic loading on the performance and microbial community structure of an anaerobic stage reactor treating pharmaceutical wastewater [J]. *Desalination*, 2011, **271**(1-3): 257-264.
- [22] 方晓瑜, 李家宝, 芮俊鹏, 等. 产甲烷生化代谢途径研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2015, **21**(1): 1-9.
- Fang X Y, Li J B, Rui J P, *et al.* Research progress in biochemical pathways of methanogenesis [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2015, **21**(1): 1-9.
- [23] 吴唯民, 蒋青. 辅酶 F<sub>420</sub> 及其在厌氧处理中的作用 [J]. *中国沼气*, 1984, (2): 3-11.
- [24] Lu X Q, Zhen G Y, Estrada A L, *et al.* Operation performance and granule characterization of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor treating wastewater with starch as the sole carbon source [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **180**: 264-273.
- [25] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 882-894.
- [26] Yang S F, Li X Y. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions [J]. *Process Biochemistry*, 2009, **44**(1): 91-96.
- [27] Ambuchi J J, Liu J F, Wang H M, *et al.* Microbial community structural analysis of an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor for beet sugar industrial wastewater (BSIW) treatment [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(10): 4651-4661.
- [28] Liao R H, Shen K, Li A M, *et al.* High-nitrate wastewater treatment in an expanded granular sludge bed reactor and microbial diversity using 454 pyrosequencing analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **134**(4): 190-197.
- [29] Shu D T, He Y L, Yue H, *et al.* Microbial structures and community functions of anaerobic sludge in six full-scale wastewater treatment plants as revealed by 454 high-throughput pyrosequencing [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **186**: 163-172.
- [30] 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, *et al.* Microbial mechanisms of methane production and oxidation in terrestrial ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(20): 6592-6603.
- [31] 朱文秀, 黄振兴, 任洪艳 等. IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2715-2722.
- Zhu W X, Huang Z X, Ren H Y, *et al.* Performance and microbial community dynamic characteristics of an internal circulation reactor treating brewery wastewater [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(8): 2715-2722.
- [32] 李津, 左剑恶, 邢薇. EGSB 反应器在 20℃ 下处理啤酒废水的工艺及微生物学研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 990-995.
- Li J, Zuo J E, Xing W. Performance and microbial characteristics of an EGSB reactor treating brewery wastewater under 20°C [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 990-995.
- [33] Bandara W M K R T W, Kindaichi T, Satoh H, *et al.* Anaerobic treatment of municipal wastewater at ambient temperature: analysis of archaeal community structure and recovery of dissolved methane [J]. *Water Research*, 2012, **46**(17): 5756-5764.
- [34] Siggins A, Enright A M, O'Flaherty V, *et al.* Low-temperature (7°C) anaerobic treatment of a trichloroethylene-contaminated wastewater: microbial community development [J]. *Water Research*, 2011, **45**(13): 4035-4046.
- [35] Wang H Y, Tao Y, Gao D W, *et al.* Microbial population dynamics in response to increasing loadings of pre-hydrolyzed pig manure in an expanded granular sludge bed [J]. *Water Research*, 2015, **87**: 29-37.
- [36] 鲍立新, 李建政, 昌盛 等. ABR 处理大豆蛋白废水的效能及微生物群落动态分析 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2206-2213.
- Bao L X, Li J Z, Chang S, *et al.* Capability and bacteria community analysis of an anaerobic baffled reactor treating soybean wastewater [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(8): 2206-2213.

## 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 <sub>3</sub> <sup>-</sup> -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 <sup>(0)</sup> -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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sup>2+</sup> and Cd <sup>2+</sup> 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 <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr Composite Photocatalyst .....	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)