

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.9
第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)

郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)

济南市背景区域大气 PM_{2.5} 污染特征及其对能见度的影响 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)

2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势 刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)

长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征 赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)

燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征 杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)

高速公路沿线 PM_{2.5} 中重金属污染特征 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)

北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险 胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)

风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用 秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)

京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)

成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱 周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)

工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估 孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)

典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析 王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)

不同方法制备 Co₃O₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制 仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)

全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征 崔文杰, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)

江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笄文怡, 季鹏飞 (4000)

城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素:以宁波市小浞江为例 高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)

水华对沉积物中氮的转化和去除的影响 肖琳, 杨佳怡 (4018)

沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性 刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)

汾河下游雨季硝酸盐污染源解析 汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)

新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)

基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性 张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)

FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较:以贵州三座水库为例 陈倩, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)

天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制 邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)

镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb²⁺ 的去除 何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)

2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb²⁺ 晋圣珧, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华 (4091)

钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验 白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)

大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (4105)

A²/O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)

上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能 杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)

微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析 张若晨, 陈川, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)

基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验 张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)

聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比 易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)

厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学 唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)

Ca²⁺ 对污泥硝化活性和絮体沉降性能的影响 张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)

从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷 畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)

信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响 徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏漪旋 (4177)

海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响 胡越航, 宣丽霞, 袁琼芬 (4185)

耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)

稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响 保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)

地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响 陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)

氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N₂O 排放的影响 吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)

三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N₂O) 分布和释放 程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)

沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响 朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)

新建铅蓄电集聚区对周边土壤环境的影响:基于重金属空间特征 丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)

不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)

基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法 张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)

缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征 罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)

西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响 田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)

调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)

海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源 陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)

《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)

上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能

杨忠启, 刘秀红*, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆

(北京工业大学环境与能源工程学院, 城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124)

摘要: 采用上向流厌氧滤池(UAF)处理实际生活污水, 研究中温条件下水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)对系统运行效果及优势产甲烷菌群的影响. 结果表明, 在 35℃, HRT 为 24 h 条件下, 系统启动 28 d 后化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)去除率可达 75% 以上. HRT 由 24 h 降至 2.5 h 的过程中, COD 去除率呈现先上升后下降的趋势, 在 HRT 为 5 h 时最高, 平均去除率为 81.71%, 最高可达 87.18%, 当降至 2.5 h 后, COD 去除率降至 75.12%. 甲烷产率(每消耗单位质量底物产生的甲烷的量, 以 $\text{CH}_4/\text{COD}_{\text{re}}$ 计)及甲烷体积分数随 HRT 的降低而增高, HRT 为 2.5 h 时为 $0.30 \text{ L}\cdot\text{g}^{-1}$, 甲烷体积分数维持在 73% 左右, 经能耗核算后可得系统产能可满足蠕动泵能耗需求. 对系统内主要的产甲烷菌进行定量分析表明, 乙酸营养型产甲烷菌 *Methanosarcinales* 丰度最高, 为优势菌群, 随着 HRT 的逐渐降低, 乙酸营养型和氢营养型产甲烷菌的丰度都有大幅度提高.

关键词: 上向流厌氧滤池(UAF); 生活污水; 水力停留时间(HRT); 甲烷; 产甲烷菌

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4121-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201901148

Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment

YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong*, LI Hai-xin, LIU Zhi-bin, LIU Run-yu, YANG Qing

(National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Upflow anaerobic filter (UAF) with actual domestic wastewater were examined in this study. The Impacts of hydraulic retention time (HRT) on the performance of a UAF and a primary methanogen group were investigated at mesophilic conditions. The chemical oxygen demand (COD) removal rate was more than 75% after 28 days acclimation at 35℃ and HRT of 24 h. With a gradual decrease in the HRT, the COD removal rate first increased and then decreased. When the HRT was 5 h, the COD removal rate was the highest, with an average 81.71% and a maximum of 87.18%. When the HRT decreased to 2.5 h, the average COD removal rate decreased to 75.12%. The methane produced per unit mass of substrate consumed ($\text{CH}_4/\text{COD}_{\text{re}}$) and volume fraction increased with a decrease in HRT. When the HRT was 2.5 h, it reached $0.30 \text{ L}\cdot\text{g}^{-1}$, and the volume fraction of methane was maintained at about 73%. The energy generated by the system met the energy demands of the peristaltic pump. Quantitative analysis of the primary methanogen group in the system indicates that *Methanosarcinales* is the dominant in the system. With a decrease in HRT, the abundances of acetoclastic and hydrogenotrophic methanogens increased significantly.

Key words: upflow anaerobic filter(UAF); domestic wastewater; hydraulic retention time(HRT); methane; methanogen group

目前, 污水处理的普及率越来越高, 而污水处理的能耗问题也愈发突出, 在典型的污水好氧生物处理系统中, COD 的去除是通过曝气实现的, 通常需要高于 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶解氧来降低污水中的 COD, 而曝气是污水处理系统中能源消耗最多的部分, 据统计, 约占总电量消耗的 50% ~ 60%. 在曝气阶段, 污水中的 COD 被转化为 CO_2 排放到大气中^[1], 常规活性污泥法中, 二氧化碳的总排放量为 $0.544 \sim 0.616 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 有机质没有被有效利用^[2].

与好氧生物处理技术相比, 厌氧生物处理技术无需曝气, 可通过厌氧微生物将污水中的 COD 转化为甲烷和二氧化碳等, 节省能耗的同时可产生清洁能源甲烷, 甲烷是一种非常有价值的碳氢化合物生物燃料, 其热值高达 $36.5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[3]. 传统的厌氧生物处理技术主要集中于高浓度废水, 如食品废

水^[4, 5]、养殖废水^[6]和酒精废水^[7]等, 对于低浓度的城市生活污水研究较少, 其原因是在常温和低浓度条件下厌氧微生物生长缓慢, 而随着能源的日益紧缺及厌氧生物处理技术的不断发展和完善, 越来越多的研究者把目光转向低浓度污水的厌氧生物处理^[2, 8~12], 通过分离水力停留时间(HRT)和污泥停留时间(sludge retention time, SRT)维持系统内的微生物数量^[13]来克服厌氧微生物生长缓慢, 反应速率低的缺点.

厌氧滤池(AF)是一种内部填充固体滤料的反应器, 微生物在滤料表面附着生长, 形成厌氧生物

收稿日期: 2019-01-17; 修订日期: 2019-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878011); 北京市自然科学基金项目(8182012)

作者简介: 杨忠启(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市生活污水资源化利用, E-mail: yangzq20@126.com

* 通信作者, E-mail: lxhfei@163.com

膜,通过生物膜内微生物的生化反应及滤料层的吸附截留作用降解转化污染物.厌氧生物滤池微生物量高、抗冲击负荷能力强,可以有效地分离水力停留时间(HRT)与污泥停留时间(SRT),运维成本较低^[14],是一种理想的厌氧反应器形式.

本研究以实际生活污水配加葡萄糖为研究对象,采用火山岩为滤料,对上向流厌氧滤池(UAF)处理低浓度城市生活污水的可行性进行了研究,利用小试反应器探究了在不同水力停留时间(HRT)下,反应器的处理效果以及主要的产甲烷菌群的变化,以期为上向流厌氧滤池工艺(UAF)在城市生活污水厌氧处理中的应用与推广提供指导.

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 实验装置

本研究采用上流式厌氧滤池(UAF),反应装置如图1所示.反应器主体由有机玻璃制成,滤柱内径18 cm,总高195.4 cm,其中滤料层高110 cm,有效容积为28 L.本实验所用滤料为火山岩滤料,直径为3~5 mm.滤柱每隔20 cm设1个取样口,共6个取样口.反应器主体缠绕加热带并包裹保温棉,维持反应器内温度为 $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

表1 实验废水水质

Table 1 Characteristics of experimental wastewater

项目	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	pH
范围	110.7~488.7	45~90	0.00~1.51	0.00~2.41	6.83~7.68
平均值	298.57	65	0.43	0.65	7.15

接种污泥取自北京某流域管道底泥及北京工业大学生活污水储水箱底泥,二者按1:2投加,投加污泥浓度(mixed liquid suspended solids, MLSS)为 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.2 反应器的启动与运行控制

反应器在HRT=24 h的条件下启动,进水COD浓度为 $110.7\sim 404\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 $244.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,运行28 d后,COD去除率可稳定达到75%以上,此后进入HRT优化期,共分为5个不同阶段,分别为24 h(第29~49 d)、18 h(第50~70 d)、12 h(第71~97 d)、5 h(第98~136 d)和2.5 h(第137~178 d),以达到低HRT条件下城市生活污水厌氧生物处理.每次HRT的改变均在前一阶段运行稳定后进行.

1.3 常规分析方法

水质分析方法:COD采用快速消解分光光度法[北京连华永兴科技发展有限公司,5B-3(C)]测定.

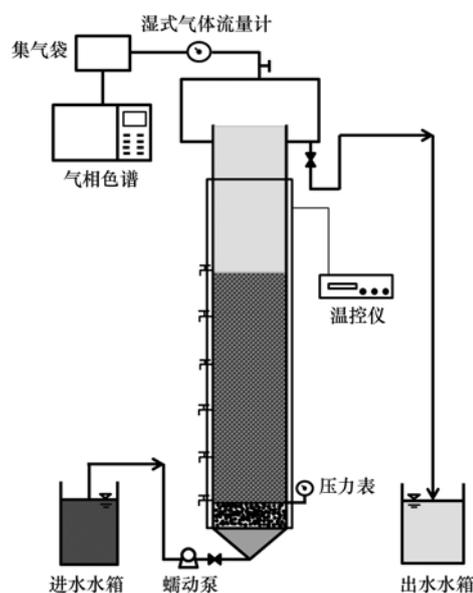


图1 上向流厌氧滤池装置示意

Fig. 1 Schematic of upflow anaerobic filter

1.1.2 实验用水和接种污泥

本实验采用北京工业大学家属区实际生活污水并外加葡萄糖配制成实验进水,进水COD保持在 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,进水水质与实际城市污水处理厂污水水质类似.

实验废水水质如表1所示.

扫描电镜方法:首先将滤料样品置于2.5%戊二醛中,于 4°C 冰箱中固定1.5 h,用磷酸缓冲液冲洗3次后分别用50%、70%、80%、90%和100%乙醇进行脱水,每次10~15 min.然后分别用100%乙醇/乙酸异戊酯(1:1)、纯乙酸异戊酯各置换一次,每次15 min.干燥喷金后采用扫描电镜(Hoskin Scientific, Tokyo, Japan)对样品进行观察.

挥发性脂肪酸(volatile fatty acid, VFA)和气态甲烷(gCH_4)用装有氢火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)的Agilent 7890A系列气相色谱(Agilent Technologies, USA)进行分析,挥发性脂肪酸(VFA)分析测定前水样经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤.

1.4 分子生物学分析方法

为了表征反应器中菌群结构变化,对接种污泥以及不同HRT条件下稳定期的生物膜样品进行DNA提取和实时荧光定量PCR(quantitative real-time PCR, QPCR)分析.为了考察不同高度滤料层

菌群结构的特征, 在第Ⅳ阶段(HRT = 5 h), 从反应器上(80 cm)、中(40 cm)和下(0 cm)这 3 个位置取生物膜样品进行 DNA 提取和 QPCR 分析。

通过振荡将生物膜与滤料分离, 并在冻干机 (Labconco, USA) 中冷冻干燥. 使用用于土壤的快速 DNA 提取试剂盒 (MP Biomedicals, Solon, OH, USA) 从冻干样品中提取 DNA. 提取后用 NanoDrop One (Thermo Fisher Scientific, Wilmington, DE, USA) 测量 DNA 浓度和纯度。

对反应器中 4 种关键的产甲烷菌进行 QPCR 分析, 所用特异性引物^[15] 如表 2 所示, QPCR 反应体系为 20 μL , 包括 10 μL SYBR Premix Ex *Taq*TM II (Takara, Japan) 试剂, 1.6 μL 引物, 6.4 μL 无菌水, 2 μL 模板 DNA. 采用 Stratagene MX3005p thermocycler (Agilent Technologies, USA) 仪器进行定量。

表 2 QPCR 分析的特异性引物序列

Table 2 Specific primer sequences for quantitative real-time PCR analysis

引物名称	目标菌群	引物序列
MCC495F	<i>Methanococcales</i>	TAAGG GCTGG GCAAG T
MCC832R		CACCT AGTYC GCARA GTT A
MBT857F	<i>Methanobacteriales</i>	CGWAG GGAAG CTGTT AAGT
MBT1196R		TACCG TCGTC CACTC CTT
MMB282F	<i>Methanomicrobiales</i>	ATCGR TACGG GTTGT GGG
MMB832R		CACCT AACGC RCATH GTT A C
MSL812F	<i>Methanosarcinales</i>	GTA AA CGATR YTCGC TAGGT
MSL1159R		GGTCC CCACA GWGTA CC

2 结果与讨论

2.1 UAF 系统的运行与水力条件优化

2.1.1 不同 HRT 条件下 COD 处理效果

反应器在经过 28 d 的启动期后, COD 的去除

效率逐渐趋于稳定, 在不同的 HRT 条件下, 平均进水 COD 浓度分别为 264.85 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (24 h)、275.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (18 h)、352.42 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (12 h)、317.57 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (5 h) 和 321.04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (2.5 h), 平均 COD 去除率分别为 75.54%、76.78%、77.65%、77.05% 和 75.98%, 进出水 COD 浓度及去除率如图 2 所示。

COD 去除率基本稳定在 75% 以上, 这表明反应器内微生物菌群已经逐渐适应低浓度生活污水的条件. 每次 HRT 改变后的一段时间内, 反应器会出现“不稳定期”, COD 的去除率比前一阶段有明显下降, 然后 COD 去除率开始逐渐回升, 进入“稳定期”. HRT 发生变化时, 会诱导反应器内微生物种群的变化, 导致系统处于不稳定状态, 需要一段时间的适应过程^[5], 这在本研究 HRT 由 12 h 降至 5 h 的过程中表现的尤为明显: HRT 降至 5 h 后, COD 的去除率明显下降, 一周后开始逐渐回升, 在第 17 d 基本进入“稳定期”, “稳定期” COD 去除率为 77.14% ~ 87.18%, 平均去除率为 82.44%, 出水 COD 浓度为 35.48 ~ 79.03 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均浓度为 55.88 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 本研究中, 每阶段“稳定期”的平均 COD 去除率分别为 73.43%、78.81%、78.51%、82.44% 和 75.12%. HRT 由 24 h 逐步缩短至 5 h 的过程中, COD 去除率逐渐升高, 在厌氧反应器中, 污水和微生物之间的物质传递在有机物降解过程中发挥极其重要的作用^[16], 随着反应器 HRT 的降低, 一方面有机负荷有较大的提升; 另一方面较大的上升流速增强了微生物与污水之间的物质传递, 提高了反应器的处理效果. 微生物与底物的接触程度对于底物的充分转化有重要的影响, 以中等混合程度为最佳^[17]. 当 HRT

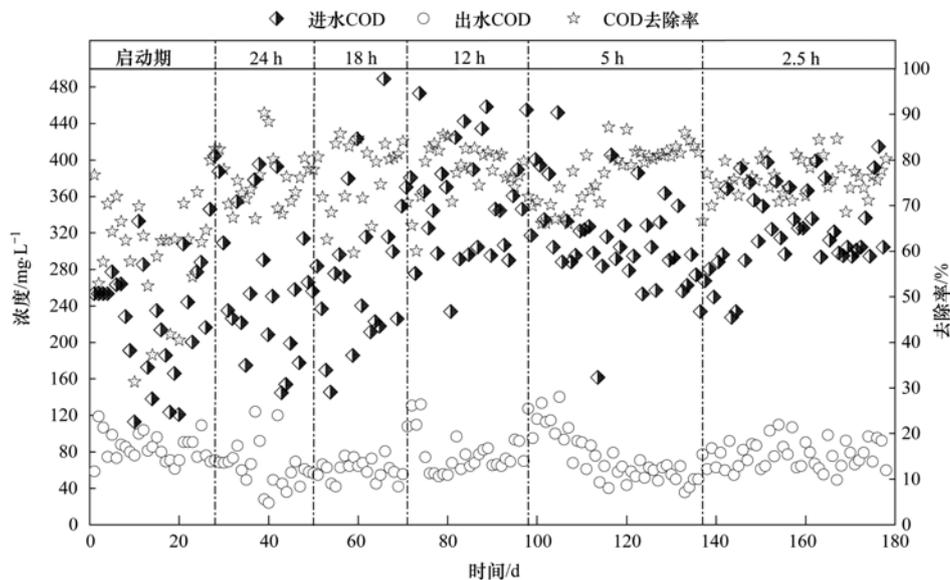


图 2 不同 HRT 条件下 COD 浓度及去除率变化

Fig. 2 Variations of COD concentration and removal rate under different HRT conditions

由 5 h 缩短至 2.5 h 时,微生物与底物之间的接触时间过短,最终导致了处理效果的下降。

2.1.2 沿程 COD 降解转化规律

同时检测了启动期及 HRT = 2.5 h 条件下的沿程 COD 及 VFAs 浓度变化,结果如图 3 所示。在启动期,投加的种泥有相当一部分沉降堆积在进水混

合区以及承托层处,导致 COD 的去除主要集中在进水混合区、承托层及 0~20 cm 滤料层处,在 20~100 cm 滤料层 COD 的去除量很少,原水中的 VFAs 以及发生水解酸化反应产生的 VFAs 在反应器底部即被产甲烷菌所利用,并没有发生 VFAs 积累的现象,出水 VFA 浓度 $< 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

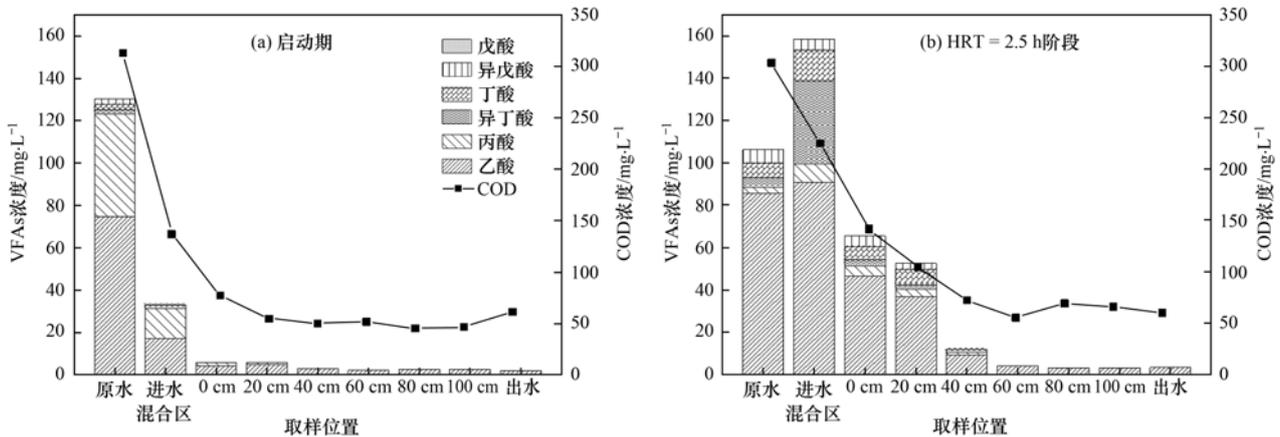


图 3 不同 HRT 条件下沿程 COD 及 VFAs 浓度变化情况

Fig. 3 Variations of COD and VFAs concentration under different HRT conditions

HRT = 2.5 h 时, COD 在滤料层 0~60 cm 处都有降解,滤料层得到了较为充分的利用,但平均出水 COD 浓度较前阶段“稳定期”提升了近 $21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。主要的原因可能是:①HRT 过短导致微生物与底物接触时间不足;②滤料层上部生物膜数量较少,微生物数量低,因此对 COD 的降解能力不足,导致出水 COD 浓度偏高。在反应器运行的第 175 d (HRT = 2.5 h),分别对滤料层 0、40 和 80 cm 处滤料生物膜表观形态进行扫描电镜观察,结果如图 4 所示

由图 4 可以看出,滤料层底部生物膜较为丰富致密,微生物由胞外聚合物粘连呈丝状包裹在滤料表面,随着高度的增加,滤料表面的生物膜量逐渐减少,在 80 cm 处生物膜已非常稀薄,滤料的大部分没有生物膜的包被。在生物膜形成过程中,水力剪切^[18]与底物浓度对生物膜结构有显著影响,由于滤池采用上向流运行方式,滤料层不同高度处接触 COD 浓度不相同,导致各层生物膜生长状态不

同,底部微生物富集生长速度较快,顶部生物量增长速率较低^[19]。

2.2 UAF 系统产甲烷能力及能耗分析

2.2.1 甲烷体积分数与甲烷产率变化

测定了不同 HRT 条件下甲烷体积分数及甲烷产率的变化情况,结果如图 5 所示。甲烷所占的气体体积分数随着 HRT 的降低呈现逐渐增高的趋势,分别为 49%、49.5%、47.9%、60.9% 和 65.76%。前 3 个阶段甲烷体积分数并没有明显变化,而将 HRT 降低到 5 h 之后,水力剪切作用极大促进了生物膜的形成和微生物与底物之间的传质效率^[20, 21],使得甲烷体积分数有明显的上升。HRT = 2.5 h 初期,由于前一阶段结束后将反应器内水排空进行生物学样品取样,因此反应器上部空间为空气,测得甲烷体积分数偏低,随着反应器的运行,原有气体不断被排出,甲烷体积分数不断增大,稳定后维持在 73% 左右。

在反应器运行的不同阶段内,甲烷产率(每消

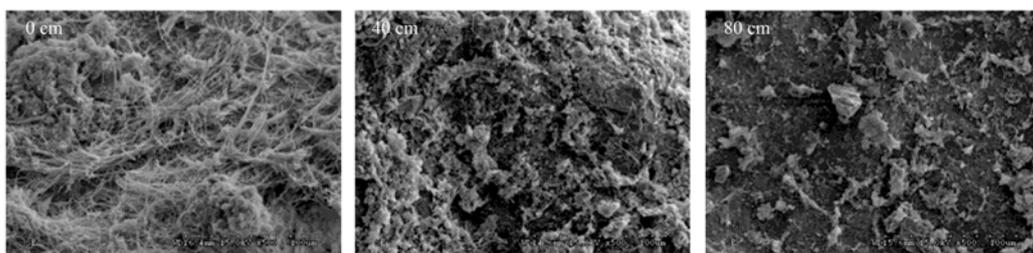


图 4 滤池运行第 175 d 不同高度滤料层滤料生物膜表观形态

Fig. 4 Biofilm apparent morphology on the surface of filter media at different heights of the AF on the 175th day

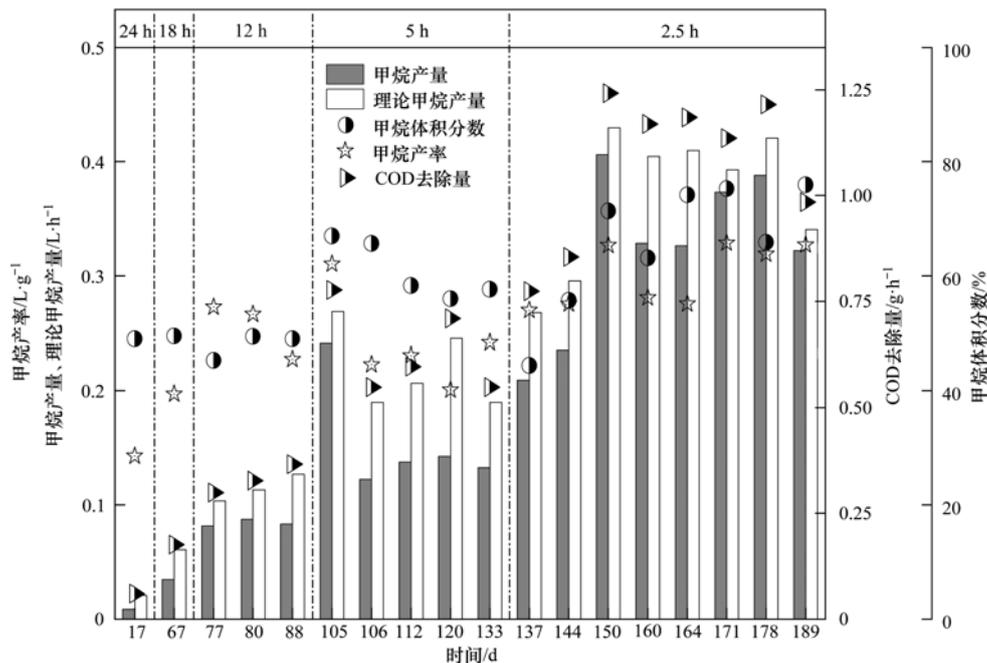


图5 不同 HRT 条件下甲烷体积分数及甲烷产率的变化

Fig. 5 Variations of methane volume fraction and yield under different HRT conditions

耗单位质量底物产生的甲烷的量, 以 $\text{CH}_4/\text{COD}_{\text{re}}$ (计) 分别为 0.14、0.20、0.26、0.24 和 0.30 $\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$, 总体随 HRT 的降低而升高. 在之前的研究中, 甲烷产率一般在 0.14 ~ 0.32 $\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间^[10, 22~24], Manariotis 等^[25] 利用 AF 处理低浓度废水的研究中, 甲烷产率随着 HRT 的降低而逐渐增大, 当甲烷产率达到顶峰后再缩短 HRT 会使其下降, 这与本研究结果类似. 甲烷与 COD 的理论转化率为 0.35 $\text{L}\cdot\text{g}^{-1}$ (0°C , $1.01 \times 10^5 \text{Pa}$)^[26], 由于一部分甲烷溶解在水中随出水排放掉, 因此反应器的实际甲烷产率要略低于理论甲烷产率, 如何回收利用出水中溶解态甲烷是后续研究中要关注的问题.

2.2.2 系统能耗分析

每摩尔甲烷燃烧所产生的能量为 800 kJ (0.222 $\text{kW}\cdot\text{h}$), 考虑到能源转换率, 甲烷燃烧所产生的能量大约有 33% 能够转化为电能^[27], 在本研究中, 不同 HRT 条件下系统产能分别为 0.053、0.166、0.270、0.200 和 0.210 $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$. 系统的能耗主要是进水蠕动泵的能耗, 可由公式^[26]算出:

$$P = \frac{Q\gamma E}{1000}$$

式中, P 为能耗需求 (kW), Q 为流量 ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), γ 为 $9800 \text{N}\cdot\text{m}^{-3}$, E 为水头损失 (m).

计算得到各阶段反应器运行的泵能耗分别为 0.002 18、0.002 18、0.004 08、0.004 08 和 0.005 44 $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$, 约占产能的 4.15%、1.31%、1.51%、2.04% 和 2.59%, 产能可完全满足泵能耗需求, 净

产能为 0.050 33、0.163 45、0.266 08、0.195 59 和 0.204 53 $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$.

2.3 UAF 系统内优势产甲烷菌群的富集

为了解析城市生活污水厌氧生物处理过程中的微生物群落结构, 对反应器内主要的产甲烷菌群进行了定量分析, 结果如图 6 所示.

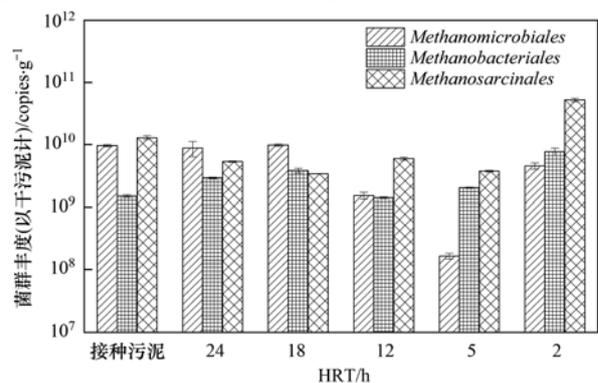


图6 不同 HRT 条件下系统内产甲烷菌群丰度

Fig. 6 Abundance of methanogen groups in the system under different HRT conditions

利用 QPCR 技术检测出反应器中存在 3 组产甲烷古菌: *Methanobacteriales*, *Methanomicrobiales* 和 *Methanosarcinales*. 其中 *Methanosarcinales* 属于乙酸营养型产甲烷菌, 而 *Methanobacteriales* 和 *Methanomicrobiales* 则属于氢营养型产甲烷菌. *Methanococcales* 在本研究中未被检测到. 由 3 种产甲烷菌的测定结果可以得到, 乙酸营养型产甲烷菌 *Methanosarcinales* 的丰度 (以干污泥计) 一直保持较高水平, 在 HRT = 2.5 h 条件下, 其丰度为 5.22 ×

10^{10} copies·g⁻¹, 分别为 *Methanobacteriales* 和 *Methanomicrobiales* 的 6.78 倍和 11.51 倍, 在反应器内占主导地位. Díaz 等^[28] 利用 UASB 反应器处理啤酒废水, 其系统内乙酸营养型产甲烷菌 *Methanosaeta* 是主要的菌种, 占总古细菌数的 75%~95%. Guo 等^[3] 的研究指出, 在一般的污泥消化系统中, 普遍都是乙酸营养型产甲烷菌占主导地位. 氢营养型产甲烷菌 *Methanobacteriales* 的丰度(以干污泥计)在前 5 个阶段保持相对稳定, 在 HRT=2.5h 条件下由 2.03×10^9 copies·g⁻¹ 提高至 7.71×10^9 copies·g⁻¹, 增长 3.8 倍; 而 *Methanomicrobiales* 在前 5 个阶段一直保持减少的趋势, 当反应器在 HRT=2.5 h 条件下运行时, 该菌丰度(以干污泥计)较前一阶段有了显著地提高, 其从 1.64×10^8 copies·g⁻¹ 上升至 4.54×10^9 copies·g⁻¹, 增长了 27.6 倍. 在低 HRT 条件下, 系统内容易发生 VFA 的积累, 而氢营养型产甲烷菌对酸的耐受性要高于乙酸营养型产甲烷菌^[29], 因此在低 HRT 条件下氢营养型产甲烷菌得到大量增殖. Li 等^[30] 的研究认为, 在系统中富集氢营养型产甲烷菌更有利于系统在短 HRT 条件下稳定运行.

对反应器运行的第Ⅳ阶段(HRT=5 h)滤料层不同位置(0、40 和 80 cm)微生物进行了定量分析, 结果如图 7 所示. 由图可知, 滤料层不同高度都存在较高丰度的产甲烷菌, 这种微生物分布状态有利于滤池不同高度滤料层进行产甲烷反应. 同时, 滤料层最底端(0 cm)产甲烷菌丰度最高, 中部(40 cm)次之, 上部(80 cm)最低, 这与图 4 生物膜表面形态观测结果相吻合, 其原因可能是:①接种污泥后部分种泥在重力作用下向下移动, 导致滤池内污泥呈现不均匀分布状态, 底部微生物丰度高于上部;②滤池沿程底物浓度呈现下高上低的状态, 底部微生物生长速率高于上部, 使微生物丰度由下向上逐渐降低.

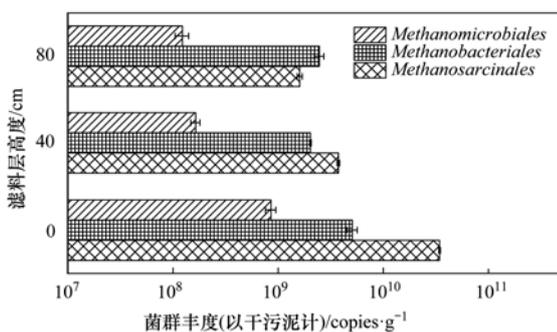


图 7 滤料层不同高度产甲烷菌群丰度

Fig. 7 Abundances of methanogen groups at different heights of the filter layer

2.4 问题与展望

UAF 在去除 COD 的同时可进行资源的回收利用, 可满足污水处理厂节能降耗的需求, 但是该工艺对于氮、磷等污染后的去除能力较差, 需要后续耦合其他工艺进一步处理, 如硝化反硝化工艺、短程硝化反硝化工艺、厌氧氨氧化工艺和一体化脱氮工艺等. 通过 UAF 去除 COD 不但可以节省曝气回收能源, 还有利于厌氧氨氧化工艺的启动与运行, 马艳红等^[31] 的研究发现, COD 浓度越高, 厌氧氨氧化活性的增长越缓慢, 导致启动时间延迟. 因此, 利用 UAF 处理生活污水具有非常高的应用潜力.

3 结论

(1) 上向流厌氧滤池反应器接种储水箱污泥和管道底泥, 35℃、HRT=24 h 条件下运行 28 d 后 COD 去除率可稳定达到 75% 以上.

(2) 随着 HRT 的降低, 反应器 COD 去除率逐渐提高, 在 HRT=5 h 时 COD 去除率最高可达 85% 以上, 出水 COD 浓度低于 50 mg·L⁻¹, 进一步缩短 HRT 至 2.5 h 后 COD 去除率降低至 75.98%.

(3) 甲烷体积分数和甲烷产率都随 HRT 的减少而增高, 在 HRT=2.5 h 的情况下分别为 73% 和 0.30 L·g⁻¹, 系统产能可满足泵能耗需求. 同时, 有部分甲烷溶解在出水中, 导致甲烷产率低于理论产率.

(4) 反应器内乙酸营养型产甲烷菌 *Methanosarcinales* 占主导地位, 在 HRT=2.5 h 条件下其丰度分别为 *Methanobacteriales* 和 *Methanomicrobiales* 的 6.78 倍和 11.51 倍. 在 HRT=2.5 h 条件下, 3 种主要的产甲烷菌群丰度都得到了不同程度的增长. 同时, 滤料层底部产甲烷菌丰度最高, 中部次之, 上部最低.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Lei Z, Yang S M, Li Y Y, et al. Application of anaerobic membrane bioreactors to municipal wastewater treatment at ambient temperature: a review of achievements, challenges, and perspectives[J]. *Bioresour Technol*, 2018, **267**: 756-768.
- [3] Guo J H, Peng Y Z, Ni B J, et al. Dissecting microbial community structure and methane-producing pathways of a full-scale anaerobic reactor digesting activated sludge from wastewater treatment by metagenomic sequencing [J]. *Microbial Cell Factories*, 2015, **14**: 33.
- [4] Shin S G, Han G, Lim J, et al. A comprehensive microbial insight into two-stage anaerobic digestion of food waste-recycling wastewater[J]. *Water Research*, 2010, **44**(17): 4838-4849.
- [5] He Y L, Xu P, Li C J, et al. High-concentration food wastewater

- treatment by an anaerobic membrane bioreactor [J]. *Water Research*, 2005, **39**(17): 4110-4118.
- [6] Zhang L, Lee Y W, Jahng D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater; focusing on the role of trace elements[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(8): 5048-5059.
- [7] Intanoo P, Suttikul T, Leethochawalit M, *et al.* Hydrogen production from alcohol wastewater with added fermentation residue by an anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) under thermophilic operation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, **39**(18): 9611-9620.
- [8] Yang B, Wang M, Wang J F, *et al.* Mechanism of high contaminant removal performance in the expanded granular sludge blanket (EGSB) reactor involved with granular activated carbon for low-strength wastewater treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **334**: 1176-1185.
- [9] Bae J, Shin C, Lee E, *et al.* Anaerobic treatment of low-strength wastewater; a comparison between single and staged anaerobic fluidized bed membrane bioreactors[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **165**: 75-80.
- [10] Li N, He L, Lu Y Z, *et al.* Robust performance of a novel anaerobic biofilm membrane bioreactor with mesh filter and carbon fiber (ABMBR) for low to high strength wastewater treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **313**: 56-64.
- [11] Bandara W M K R T W, Satoh H, Sasakawa M, *et al.* Removal of residual dissolved methane gas in an upflow anaerobic sludge blanket reactor treating low-strength wastewater at low temperature with degassing membrane[J]. *Water Research*, 2011, **45**(11): 3533-3540.
- [12] 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.
- [13] Jo Y, Kim J, Hwang S, *et al.* Anaerobic treatment of rice winery wastewater in an upflow filter packed with steel slag under different hydraulic loading conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **193**: 53-61.
- [14] Martín M A, De La Rubia M A, Martín A, *et al.* Kinetic evaluation of the psychrophilic anaerobic digestion of synthetic domestic sewage using an upflow filter [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 131-137.
- [15] Yu Y, Lee C, Kim J, *et al.* Group-specific primer and probe sets to detect methanogenic communities using quantitative real-time polymerase chain reaction [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, **89**(6): 670-679.
- [16] Liu Y Y, Huang L H, Dong G F, *et al.* Enhanced granulation and methane recovery at low load by downflow sludge circulation in anaerobic treatment of domestic wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **249**: 851-857.
- [17] Smith L C, Elliot D J, James A. Mixing in upflow anaerobic filters and its influence on performance and scale-up[J]. *Water Research*, 1996, **30**(12): 3061-3073.
- [18] Cui B, Liu X H, Yang Q, *et al.* Achieving partial denitrification through control of biofilm structure during biofilm growth in denitrifying biofilter[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **238**: 223-231.
- [19] 崔斌. 反硝化滤池中短程反硝化的实现及其作用机理[D]. 北京: 北京工业大学, 2017. 48-52.
- Cui B. Achieving partial denitrification in denitrifying biofilter and mechanism analysis [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017. 48-52.
- [20] 董峰, 张捍民, 杨凤林. 数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 181-190.
- Dong F, Zhang H M, Yang F L. Modeling formation of aerobic granule and influence of hydrodynamic shear forces on granule diameter[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(1): 181-190.
- [21] 吴静, 周红明, 姜洁. 水力剪切力对厌氧反应器启动的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 368-372.
- Wu J, Zhou H M, Jiang J. Effects of hydrodynamic force on start-up of anaerobic reactor[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(2): 368-372.
- [22] Wu P H, Ng K K, Hong P K A, *et al.* Treatment of low-strength wastewater at mesophilic and psychrophilic conditions using immobilized anaerobic biomass [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **311**: 46-54.
- [23] Ratanatamskul C, Siritiewsi T. A compact on-site UASB-EGSB system for organic and suspended solid digestion and biogas recovery from department store wastewater [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, **102**: 24-30.
- [24] Renuka R, Mohan S M, Sowmiya B, *et al.* Performance evaluation of panelled anaerobic baffle-cum-filter reactor in treating municipal wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **97**: 1-12.
- [25] Manariotis I D, Grigoropoulos S G. Anaerobic treatment of low-strength wastewater in a biofilm reactor [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2003, **38**(10): 2057-2068.
- [26] Oleszkiewicz J A, Mavinic D S. Wastewater biosolids: an overview of processing, treatment, and management[J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2002, **1**(2): 75-88.
- [27] Kim J, Kim K, Ye H, *et al.* Anaerobic fluidized bed membrane bioreactor for wastewater treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(2): 576-581.
- [28] Díaz E E, Stams A J M, Amils R, *et al.* Phenotypic properties and microbial diversity of methanogenic granules from a full-scale upflow anaerobic sludge bed reactor treating brewery wastewater [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**(7): 4942-4949.
- [29] Zhang J X, Zhang Y B, Quan X, *et al.* Enhancement of anaerobic acidogenesis by integrating an electrochemical system into an acidogenic reactor; effect of hydraulic retention times (HRT) and role of bacteria and acidophilic methanogenic *Archaea*[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **179**: 43-49.
- [30] Li Y, Zhang Y B, Liu Y W, *et al.* Enhancement of anaerobic methanogenesis at a short hydraulic retention time via bioelectrochemical enrichment of hydrogenotrophic methanogens [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**: 505-511.
- [31] 马艳红, 赵智超, 安芳娇, 等. 不同 COD 浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2317-2325.
- Ma Y H, Zhao Z C, An F J, *et al.* Start-up performance of low-substrate anaerobic ammonium oxidation under different COD concentrations[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2317-2325.

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, CAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns in Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)