

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

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(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 、中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCAAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验

徐婷^{1,2}, 金艳青^{1,2}, 李勇^{1,2*}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技大学环境生物技术研究所, 苏州 215009)

摘要: 研究了加装脱硫装置的沼气循环厌氧膜生物反应器对含高硫酸盐有机废水的处理效能. 在 26 ~ 34℃ 的室温下, 历时 63 d 成功地启动了加装脱硫装置的 MCAnMBR 反应器. 调试初期, 通过调节气路平衡和采用甲醇驯化的方法有效解决了 MCAnMBR 反应器在处理高硫酸盐有机废水时存在的跑泥和 pH 上升问题. 结果表明, 当控制 HRT 为 120 h, 有机负荷 (以 COD 计) 为 3.61 ~ 4.36 kg·(m³·d)⁻¹, pH 为 7.18 ~ 7.61 时, 在 23.3 ~ 25.4℃ 的室温下, 对含 SO₄²⁻ 浓度为 650 ~ 5 800 mg·L⁻¹ 的有机废水处理效果极佳, 出水 COD 浓度最低可至 23 mg·L⁻¹, COD 总去除率稳定在 96.23% ~ 99.77%, SO₄²⁻ 还原率可达 83.83% ~ 95.51%. 说明加装脱硫装置可有效解决硫化物的次级抑制作用问题, 且通过梯度试验发现本反应器处理高硫酸盐有机废水的上限为: COD 浓度 18 000 ~ 21 000 mg·L⁻¹、SO₄²⁻ 浓度 9 082 ~ 9 600 mg·L⁻¹, COD/SO₄²⁻ 为 2.

关键词: 沼气循环; 厌氧膜生物反应器; 高硫酸盐有机废水; H₂S 抑制; 碳硫比

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5132-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705013

Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature

XU Ting^{1,2}, JIN Yan-qing^{1,2}, LI Yong^{1,2*}

(1. School of Environment Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The operational performance of a methane cycle anaerobic membrane bioreactor (MCAnMBR) with desulfurization for the treatment of high sulfate organic wastewater was investigated. Within 63 days, the MCAnMBR with desulfurization was started successfully at a normal temperature of 26–34℃. The two main problems at the beginning of debugging, sludge loss and increased pH, were effectively solved by adjusting the gas path system and adding methanol to the inflow for acclimation. The results show that the inflow concentration of SO₄²⁻ from 650 mg·L⁻¹ to 5 800 mg·L⁻¹ can be treated well with the conditions of hydraulic retention time (HRT) = 120 h, a volume loading of 3.61–4.36 kg·(m³·d)⁻¹, pH of 7.18–7.61, and temperature of 23.3–25.4℃. The effluent chemical oxygen demand (COD) concentration could be lowered to 23 mg·L⁻¹. The total removal rate of COD could remain stable at 96.23%–99.77%, and the SO₄²⁻ conversion rate was about 83.83%–95.51%. These results indicated that the MCAnMBR reactor with desulfurization could effectively solve the problem of secondary sulfide inhibition. A gradient experiment revealed that the high Na₂SO₄ inflow could be treated when the influent COD ranged from 18 000 mg·L⁻¹ to 21 000 mg·L⁻¹, the concentration of SO₄²⁻ ranged between 9 082 mg·L⁻¹ and 9 600 mg·L⁻¹, and the COD/SO₄²⁻ = 2.

Key words: methane cycle; anaerobic membrane bioreactor; organic wastewater with high concentration of sulfate; secondary sulfide inhibition; carbon-sulfur ratio

硫酸盐废水来源广泛, 医药废水、食品生产废水、工业废水等都含有大量的硫酸盐. 硫酸盐废水排入水体会使受纳水体酸化, 存在较高的环境风险性, 因此必须对硫酸盐废水进行处理^[1,2]. 目前应用较为广泛的处理方法是生物法, 其处理工艺包括 UASB、IC、EGSB、ABR 等^[3~8]. 生物法有着能耗低、耐冲击负荷、剩余污泥少、运行管理方便等优点, 但是硫酸盐还原产生的硫化物, 主要是 H₂S 对产甲烷菌的次级抑制作用往往导致厌氧反应器因酸化而运行失败^[9~11]. 故如何解决这一问题且经济有效地处理含高硫酸盐的有机废水是目前废水处理领

域的研究热点之一.

金艳青等^[12]利用苏州思源环保公司研发的沼气循环厌氧膜生物反应器 (methane cycle anaerobic membrane bioreactor, MCAnMBR) 以甲醇、丙酮、异丙醇混合液为碳源处理高氯化钠废水时发现在温度为 15.8 ~ 18.0℃, 有机负荷 (以 COD 计, 下同) 为 3.92 kg·(m³·d)⁻¹, 进水 NaCl 为 18 ~ 19 g·L⁻¹ 时, 经短期驯化, COD 平均去除率为 83.37%. 说明本反

收稿日期: 2017-05-02; 修订日期: 2017-06-05

作者简介: 徐婷 (1992 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: 444357010@qq.com

* 通信作者, E-mail: yongli69@163.com

应器处理高盐有机废水行之有效. 故本试验以 MCA_nMBR 为基础, 加装脱硫装置, 研究其处理含高硫酸盐有机废水的效能, 以期 MCA_nMBR 的实际应用提供支持.

1 材料与方法

1.1 试验装置及试验流程

本试验装置主要由厌氧反应罐、脱硫装置(包括脱硫罐和脱水罐)和膜分离器组成, 其主体材料均为 Q235 钢板, 厚度为 6 mm, 如图 1 所示. 厌氧反应器的尺寸为 $\Phi 700\text{ mm} \times 2\,700\text{ mm}$. 膜分离器的尺寸为 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 1\,200\text{ mm}$, 内有 2 帘(膜面积为每帘 1 m^2) 天津膜天膜的 FP-T0008 型中空纤维帘式膜组件, 材质为聚偏氟乙烯(PVDF). 整个反应器有效容积为 $1\,000\text{ L}$. 由于本试验在夏天进行, 环境温度较高, 故本试验装置无相应保温措施, 试验在常温下进行.

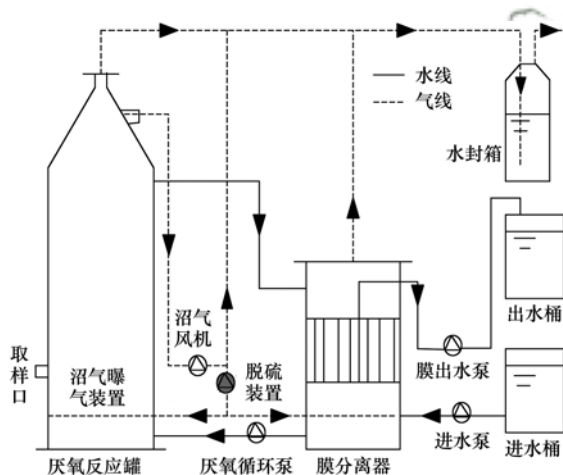


图1 加装脱硫装置的 MCA_nMBR 工艺流程示意

Fig. 1 Schematic of the MCA_nMBR with desulfurization

试验流程: 水相方面进水泵将进水箱中的废水抽吸至膜分离器内后与其泥水混合液一同打入厌氧反应器的底部, 由布水管路进行均匀布水. 运行过程中, 当厌氧反应罐内的液位高于 1.8 m 时, 其泥水混合液将通过回流管进入膜分离器的顶部, 由膜分离器中的膜组件通过负压出水方式完成泥水分离. 出水将进入出水桶中以实现连续进出水的运行方式; 气相方面在沼气风机内循环装置的作用下, 厌氧反应罐和膜分离器中被抽吸出的沼气将分成两条气路, 一条进入厌氧反应罐, 在底部布气管的作用下对泥水进行彻底混合, 另一条进入膜分离器, 同样在底部布气管的作用下, 利用气流产生的剪切作用带来更高的错流速度以减缓膜污染.

此反应器设计的优点在于在风机的循环管道上加装了脱硫装置, 以脱除 H_2S . 气体通过风机被抽吸至循环管路, 随即将先后进入脱水罐和脱硫罐. 脱水罐的作用是避免脱硫罐中的脱硫药剂(氧化铁类固状物质)受潮, 因为产生的气体中含有一定量的液态水, 另外当反应器运行不稳定时, 部分泥水混合溶液也会因风机的抽吸作用进入沼气循环管路.

1.2 接种污泥和试验用水

本反应器内的污泥来源于苏州市新区污水厂的污泥浓缩池, pH 为 7.13 , MLVSS/MLSS 为 $0.529\,4$, MLSS 为 $13.12\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 经粗筛和细筛两道工序后投入厌氧反应罐内. 试验采用人工配水的方式, 以甲醇、异丙醇混合液为碳源, 通过进水投加 Na_2SO_4 来考察反应器对高硫酸盐有机废水的处理效能.

1.3 试验方法

反应器启动前期采用甲醇驯化的方式使系统具有较高的自我维持相应酸碱环境的能力. 随后在进水中逐步添加异丙醇, 以提高反应器内的微生物对难降解有机物的处理能力, 直至甲醇与异丙醇的体积比为 $1:1$. 污泥驯化结束后, 维持有机负荷 $2.4\sim 3\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 通过向进水中逐步投加硫酸钠的方式 ($650\sim 2\,550\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 以驯化硫酸盐还原菌, 使反应器具有处理高硫酸盐废水的能力. 反应器启动成功后, 维持有机负荷 $3.6\sim 4.2\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 通过 50% 的浓度梯度来考察 MCA_nMBR 能承受的耐硫酸盐限值及其在高盐环境下对有机污染物去除的效能.

1.4 分析项目与方法

COD: 重铬酸钾法^[12], 采用硫酸汞掩蔽 Cl^- ; Cl^- : 硝酸银滴定^[12]; VFA: 分光光度法^[12]; pH: PHS-3E 型酸度计^[12]; 碱度: 酸碱指示剂滴定法^[12]; DO 和温度: 便携式溶解仪^[12]; MLVSS/MLSS: 重量法^[12]; MLSS: 重量法^[12]; 浊度: 浊度仪 2100N^[12]; 气体组分: 气相色谱法^[12]; SO_4^{2-} : 分光光度法^[13].

2 结果与讨论

2.1 反应器的启动

本课题组前期在研究 MCA_nMBR 处理有机废水时发现, 控制反应器内温度在 20°C 以上、pH $6.5\sim 7.2$ 、有机负荷 $2\sim 3\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 有助于反应器的成功启动, 此外 VFA 和碱度也是影响反应器成功启动的关键因素^[13,14]. 由于本试验在夏天进行, 温度始终维持在较高水平, 故可在常温下启动. 有机负荷从初始时的 $0.84\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 提高至 3.38

$\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 调试初期发现本反应器存在 pH 上升和跑泥的问题,分别通过甲醇驯化和调节气路平衡来解决.

2.1.1 pH 对 MCAnMBR 启动的影响

罗丹^[15]在研究高浓度硫酸盐废水的厌氧处理时指出,针对含高浓度硫酸盐的有机废水,反应器的 pH 通常应控制在 6.5 ~ 7.5. 加装脱硫装置的 MCAnMBR,在反应器初次启动时,直接以异丙醇为有机碳源,进水不投加任何碱性物质,运行 2 d 后, pH 从 7.13 升高至 8.4,而多数研究者^[16,17]认为 pH 高于 8 对厌氧反应不利. 13 d 后,反应器内碱度从 $101.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $1274.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 酸碱环境严重不平衡,致使反应器首次启动以失败告终. 究其原因,脱硫罐中的脱硫药剂为氧化铁, pH 在 9 左右,属于偏碱性物质. 反应器运行过程中,风机产生风压过大,将脱硫罐中的一些粉末和细小颗粒类的脱硫药剂吹进厌氧反应罐内,使 pH 迅速上升. 而异丙醇是难降解有机物,其完成产氢产乙酸所需的时间较长,系统很难依靠微生物的自我调节作用来平衡酸碱环境. 但在进水中投加酸性物质会加大处理成本,并不是长久之计. 仇海波^[14]在研究 MCAnMBR 处理啤酒废水时采用向进水中投加甲醇溶剂的方式,可在 10 d 迅速完成反应器的启动. 于是本研究采用分阶段驯化污泥的方式来启动反应器. 如图 2 所示,采用甲醇驯化的方法可在短时间内使反应器内 pH 从初始的 8.47 降至 7.56. 即便后来在进水中增加了异丙醇溶剂,反应器内 pH 也能在 6.89 ~ 7.55 的正常范围内波动.

本课题组前期在研究 MCAnMBR 处理其他有机废水时发现,为维持反应器内的酸碱环境^[13,14],必须在进水中添加适量的 NaHCO_3 . 而本试验处理的是含硫酸盐有机废水,硫酸盐的还原会产生一定量的碱度^[18],故考虑在进水中不添加任何碱性物质,经实践证明该方法行之有效. 从图 3 可以看出,后期反应器内 pH 在 7.04 ~ 7.56 的正常范围内波动,且相对稳定. 此阶段 COD 的去除率稳定在 90% 以上,硫酸盐的还原率稳定在 85% 以上,都保持在较高的水平,说明反应器已成功启动.

2.1.2 VFA/碱度对 MCAnMBR 启动的影响

有研究认为对于厌氧消化反应器而言^[19,20],当 VFA/碱度小于 0.4 时,说明反应器具有足够的缓冲能力. 而当 VFA/碱度介于 0.4 ~ 0.8 时,说明反应器有一定的缓冲能力. 从图 4 看,在本反应器的整个启动阶段,除启动第一天 VFA/碱度为 1.66 (大于

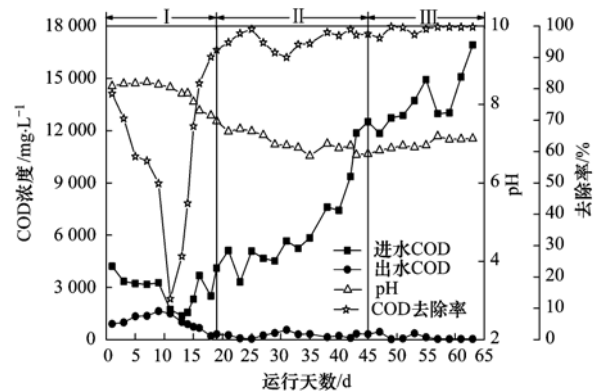


图2 pH 对 COD 去除效果的影响

Fig. 2 Effect of pH on COD removal

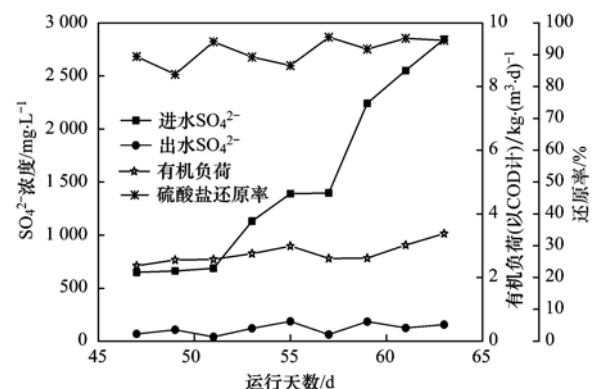


图3 反应器启动阶段硫酸盐还原率的情况

Fig. 3 Rate of sulfate reduction during start up

0.8), 往后反应器内该值均低于 0.8, 说明本反应器的缓冲能力良好. 这就是本反应器在进水 COD 波动较大时也能维持高去除率的原因之一.

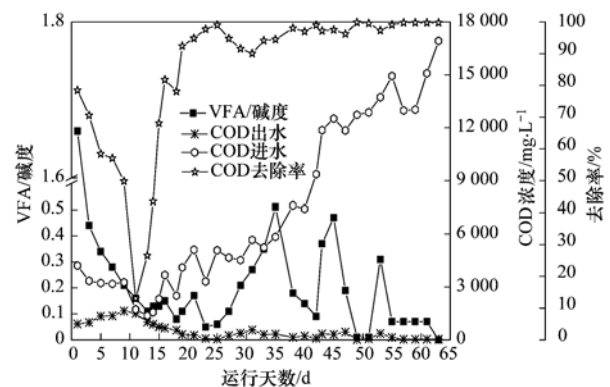


图4 VFA/碱度对 COD 去除效果的影响

Fig. 4 Effect of VFA/alkalinity on COD removal

2.2 进水 SO_4^{2-} 浓度对处理效果的影响

本试验在系统平均有机负荷为 $3.6 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的基础上,通过逐步提高进水 SO_4^{2-} 浓度来考察反应器的处理效能. 试验期间在进水添加硫酸盐的第 3 d,系统对 COD 的去除率从 96.23% 提高到 99.82%. 之后随着硫酸盐浓度的逐步增加,系

统对 COD 的去除率基本保持在 99% 以上, 对 SO_4^{2-} 的还原率总体呈上升趋势, 最高可达 95.13%。这说明低浓度的 SO_4^{2-} 能提高反应器的处理效能。李清雪等^[21] 在研究 ABR 处理高浓度硫酸盐废水的性能时也发现低浓度的硫酸盐 ($300 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 有利于有机物的去除。一方面这是因为硫酸盐的还原需要有机物作为电子供体, 所以对系统 COD 的去除有一定的贡献作用; 另一方面, 低浓度水平下的硫酸盐还原可以提高 MPB 的活性。VFA 是厌氧反应器运行过程中的一项重要参数, 可用以判断产甲烷菌的活性是否受到抑制。刘欢贞等^[22] 采用 UASB 人工模拟挥发性脂肪酸 (VFA) 积累时发现, 向 UASB 中添加适量的硫酸盐有助于硫酸盐还原菌对可挥发性脂肪酸的利用, 降低反应器内 VFA 的积累。宋倩等^[23] 认为 VFA 低于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是反应器最好的运行状态。从图 5 可以看出, 在平均有机负荷为 $3.6 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 基础上, 适量硫酸盐的加入确实使本反应器内 VFA 的浓度从 $278 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降至 $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时表征 COD 去除率的曲线呈上升趋势。纵观该阶段除了刚加硫酸盐前几天反应器运行还未稳定时因硫酸盐浓度突跃使得反应器内 VFA 浓度大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 导致 COD 去除率出现明显拐点外, 其余均保持在较高水平。这说明对 MCAnMBR 而言, 中低浓度的硫酸盐可以促进 MPB 的活性, 提高反应器的处理能力。

之后随着进水 SO_4^{2-} 浓度的逐步增加 (SO_4^{2-} 浓度: $5\,800 \sim 9\,600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 系统对 COD 的去除率稳定在 99% 以上, 对 SO_4^{2-} 的还原率有所下降 ($81.03\% \sim 87.68\%$ 之间波动), 但对 SO_4^{2-} 的还原量, 以及 SO_4^{2-} 还原过程中消耗 COD 的量占 COD 总去除量的比例均在增加。说明硫酸盐还原菌与产甲烷菌对底物的竞争激烈^[24], 但反应器内的 VFA 始终保持在较低的水平, 说明产甲烷菌的活性还未受到抑制。继续增加进水 SO_4^{2-} 的浓度, 发现图 5 和图 6 中均出现了两个明显的突跃点。一个是在试验第 85 d, 由于进水 SO_4^{2-} 浓度突升至 $12\,900 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 的去除率从 99.37% 下降至 97.90%。相应地, VFA 在 4 d 内升至 $862.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 另一个是在试验第 93 d, 进水 SO_4^{2-} 浓度再次突跃至 $11\,135 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 的去除率从 96.07% 下降至 89.23%。相应地, VFA 也在 2 d 内升至 $824.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。之后随着进水 SO_4^{2-} 浓度的降低, 反应器内 VFA 值开始回落。这说明过高的 SO_4^{2-} 浓度会导致反应器内 VFA 的积累, 抑制 MPB 的活性, 使反应器以酸败告终^[22,23]。综合

所述, 为保证 MCAnMBR 的处理效能, 对本反应器而言, 应将进水 SO_4^{2-} 浓度控制在 $9\,600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。

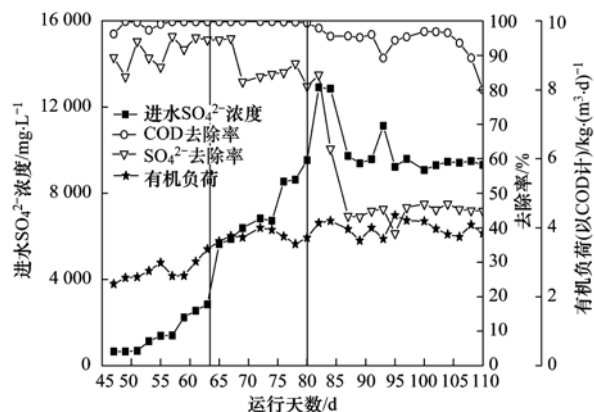


图 5 进水 SO_4^{2-} 浓度对 COD 去除效果的影响

Fig. 5 Effect of sulfate concentration in flow on COD removal

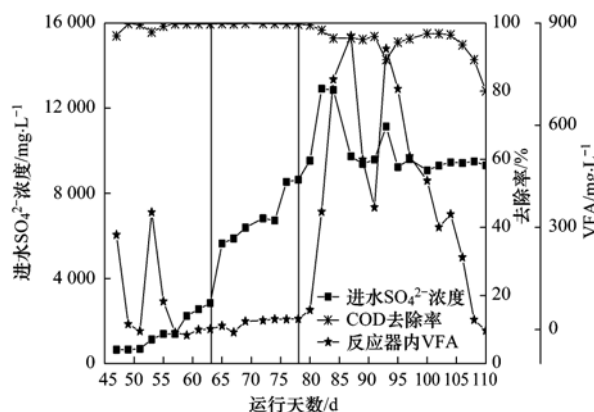


图 6 进水 SO_4^{2-} 浓度对反应器内 VFA 的影响

Fig. 6 Effect of sulfate concentration in flow on VFA

2.3 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 对处理效果的影响

氢气和乙酸是产甲烷菌产甲烷的前提, 同时也是硫酸盐还原过程中的电子供体, 所以 MPB 和 SRB 必然会对氢和乙酸产生竞争。因此碳硫比是处理含硫酸盐废水时需要控制的一项重要指标^[25]。从图 7 中可以发现, 本试验中当 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 大于 3 时, 系统对 COD 的去除率稳定在 95% 以上, 最高可达 99.86%, 对 SO_4^{2-} 的去除率也保持在较高的水平 (平均去除率为 91%, 最高可达 95.13%)。说明碳硫比在该水平时, 对本系统内的 MPB 和 SRB 而言底物充足, 竞争关系不明显; 当 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 在 $2.5 \sim 3$ 之间时, 系统对 COD 的去除率稳定在 99% 以上, 对 SO_4^{2-} 的去除率有所下降 ($81.03\% \sim 87.68\%$)。说明碳硫比在该水平时, MPB 与 SRB 之间有明显竞争, 且 MPB 占优势; 当 $\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$ 小于 2 时, 系统对 COD 的去除率仍然保持较高的水平, 而系统对 SO_4^{2-} 的还原率大幅下降。说明碳硫比在该水平时,

SRB 完全处于竞争劣势地位. 也就是说本反应器能承受的最小碳硫比为 2. 综上所述, 本反应器在本试验条件下控制碳硫比在 3 以上, 可使系统对 COD 和 SO_4^{2-} 的去除率均保持在 90% 以上. 这与文献 [26, 27] 的研究结果一致. 而苏彩丽等 [28] 的研究结果表明碳硫比在 3.5 以上时系统对 COD 和 SO_4^{2-} 的去除率才能保持较高的水平. 研究结果的差异一方面是由于实际处理硫酸盐废水时, 不同条件下最佳碳硫比不同. 另一方面与本反应器独有的气体回流装置有关. Roel 等 [29] 经研究发现回流甲烷气体会降低最佳处理效果时的碳硫比.

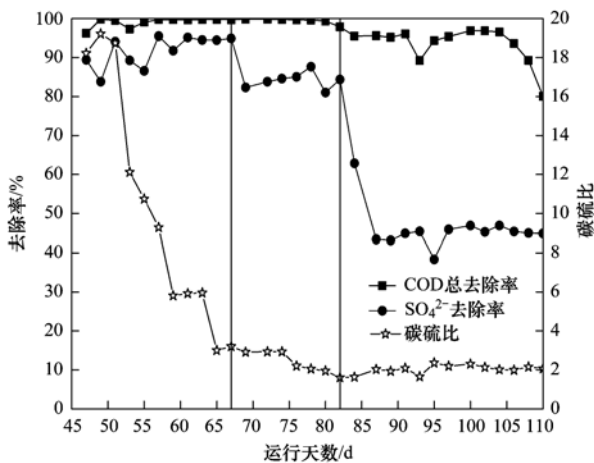


图7 碳硫比对处理效果的影响

Fig. 7 Effect of COD/ SO_4^{2-} on the treatment effect

2.4 脱硫装置对 H_2S 的去除效果

根据 SRB 的还原理论, 1 mol 硫酸盐还原会产生 1 mol 硫化物. 假设本反应器中被消耗的硫酸盐全部还原为硫化物, 通过计算可得硫化物的理论值, 将此值与硫化物的实测值相比较即可判断脱硫装置的脱硫效果. 理论上, 本反应器内硫化物浓度最高可达 $773.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 系统运行平稳时, 反应器内硫化物的浓度也应大于 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而如此高的硫化物浓度必将导致反应器因硫化物的次级抑制作用而运转失败. 事实上, 从图 8 可以看出, 整个试验过程中, 反应器内硫化物浓度始终处于较低水平, 维持在 $13.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 硫化物的实测值远低于其理论值. 本反应器之所以能够在比一般反应器高的硫酸盐水平下稳定运行, 无疑是因为反应器加装的脱硫装置达到了预期的效果, 使硫化物的去除率始终保持在较高的水平 (平均去除率为 98%). 从图 9 可以看出产气中 H_2S 的含量始终稳定在 1.52% ~ 3.36%, 比 MCAnMBR 处理不含硫酸盐的有机废水时低 (< 4.1%). 此外, 本反应器对 SO_4^{2-} 耐受浓度

为 $9600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 Arnaldo 等 [30] 在研究中发现当进水 SO_4^{2-} 浓度达 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统中 MPB 的活性就受到抑制. 这说明加装脱硫装置的 MCAnMBR 可以克服处理高硫酸盐有机废水时 H_2S 的次级抑制作用问题. 同时也说明加装脱硫装置的 MCAnMBR 可以适应更高的硫酸盐浓度, 更具推广应用的价值.

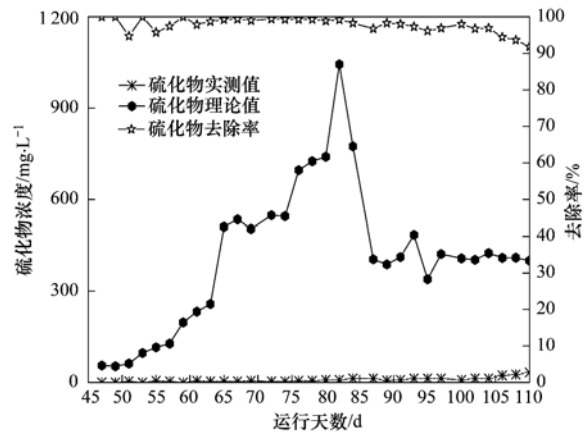


图8 脱硫装置对硫化物的脱除情况

Fig. 8 Removal of sulfide by the desulfurization process

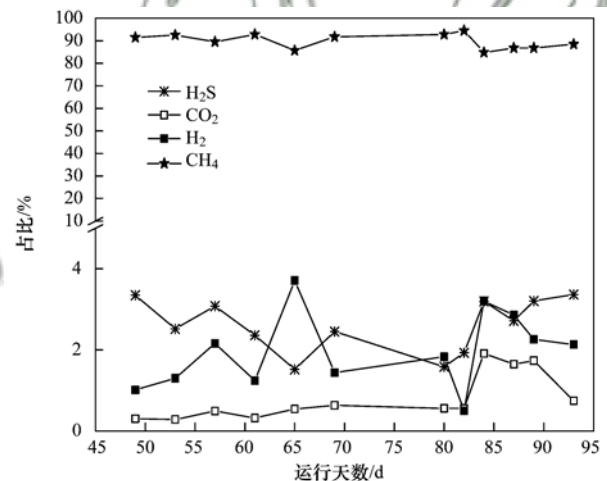


图9 产气中各项气体占比情况

Fig. 9 Proportion of the gas in gas production

3 结论

(1) 调试初期, 通过调节气路平衡和采用甲醇驯化的方法可有效解决 MCAnMBR 反应器在处理高硫酸盐有机废水时存在的跑泥和 pH 上升问题.

(2) 当控制 HRT 为 120 h, 有机负荷为 $3.61 \sim 4.36 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, pH 为 7.18 ~ 7.61 时, 在 $23.3 \sim 25.4^\circ\text{C}$ 的室温下, 对含 SO_4^{2-} 浓度为 $650 \sim 5800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的有机废水处理效果极佳, 出水 COD 浓度最低可至 $23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 总去除率稳定在 96.23% ~ 99.77%, SO_4^{2-} 还原率可达 83.83% ~ 95.51%.

(3) 通过 50% 的硫酸盐浓度梯度试验发现, 本反应器的最高处理限度为: COD 浓度 18 000 ~ 21 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 SO_4^{2-} 浓度 9082 ~ 9 600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、COD/ SO_4^{2-} 为 2。

(4) 脱硫装置对硫化物的去除效果显著, 平均脱硫率在 97% 以上。反应器内硫化物浓度可维持在 13.04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下的较低水平, 对厌氧微生物基本不产生抑制作用; 此外, 产气中 H_2S 的含量稳定在 1.52% ~ 3.36%, 低于一般水平。

参考文献:

- [1] Huang J A, Wen Y, Ding N, *et al.* Effect of sulfate on anaerobic reduction of nitrobenzene with acetate or propionate as an electron donor[J]. *Water Research*, 2012, **46**(14): 4361-4370.
- [2] Blázquez E, Gabriel D, Baeza J A, *et al.* Treatment of high-strength sulfate wastewater using an autotrophic biocathode in view of elemental sulfur recovery[J]. *Water Research*, 2016, **105**: 395-405.
- [3] 王白杨, 王正辉, 张卓, 等. UASB/曝气沉淀/IC 反应器处理高浓度硫酸盐有机废水[J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(20): 54-57.
- Wang B Y, Wang Z H, Zhang Z, *et al.* Treatment of organic wastewater with high concentration sulfate by UASB/aeration sedimentation/IC reactor[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, **24**(20): 54-57.
- [4] Subtil E L, Cassini S T A, Gonçalves R F. Sulfate and dissolved sulfide variation under low COD/sulfate ratio in up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) treating domestic wastewater[J]. *Revista Ambiente & água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 2012, **7**(1): 130-139.
- [5] 高靖伟, 程翔, 封莉, 等. EGSB 反应器处理发酵废水效能影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(9): 141-146, 161.
- Gao J W, Cheng X, Feng L, *et al.* Performance of the combined EGSB reactor treating fermentation wastewater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(9): 141-146, 161.
- [6] Wu S J, Dang Y, Qiu B, *et al.* Effective treatment of fermentation wastewater containing high concentration of sulfate by two-stage expanded granular sludge bed reactors [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, **104**: 15-20.
- [7] Sinbuathong N, Sirirote P, Liengcharernsit W, *et al.* Kinetic comparison of microbial assemblages for the anaerobic treatment of wastewater with high sulfate and heavy metal contents[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2009, **30**(1): 11-15.
- [8] 欧阳二明, 王乐乐, 宋甜甜, 等. 多级厌氧 + AO 处理高硫酸根有机废水启动研究[J]. *工业水处理*, 2016, **36**(10): 100-103.
- Ouyang E M, Wang L L, Song T T, *et al.* Study on the start-up of multi-stage anaerobic reactor + AO for treating organic wastewater with high-concentration sulfate[J]. *Industrial Water Treatment*, 2016, **36**(10): 100-103.
- [9] Sangcharoen A, Niyom W, Suwannasilp B B. A microbial fuel cell treating organic wastewater containing high sulfate under continuous operation; performance and microbial community[J]. *Process Biochemistry*, 2015, **50**(10): 1648-1655.
- [10] Zhang J X, Zhang Y B, Quan X, *et al.* Bioaugmentation and functional partitioning in a zero valent iron-anaerobic reactor for sulfate-containing wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **174**(1): 159-165.
- [11] Wang K, Sheng Y X, Cao H B, *et al.* Impact of applied current on sulfate-rich wastewater treatment and microbial biodiversity in the cathode chamber of microbial electrolysis cell (MEC) reactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **307**: 150-158.
- [12] 金艳青, 祁高月, 李勇, 等. 常温下沼气循环 AnMBR 处理丙酮和异丙醇混合废水[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(10): 5617-5623.
- Jin Y Q, Qi G Y, Li Y, *et al.* Methane cycle anaerobic membrane bioreactor for treating mixed wastewater of acetone and isopropyl alcohol at normal temperature[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(10): 5617-5623.
- [13] 祁高月, 李勇, 仇海波, 等. 常温下 AnMBR 处理丙酮、异丙醇混合废水中试启动研究[J]. *水处理技术*, 2015, **41**(7): 83-86, 90.
- Qi G Y, Li Y, Qiu H B, *et al.* Pilot start-up of anaerobic membrane bioreactor for treating acetone and isopropyl alcohol mixed wastewater at normal temperature[J]. *Technology of Water Treatment*, 2015, **41**(7): 83-86, 90.
- [14] 仇海波. 沼气循环分散式污泥厌氧膜生物反应器处理高浓度工业废水的中试研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2014.
- Qiu H B. Study on the anaerobic membrane bioreactor with methane cycle and distributed sludge to treat high concentration of industrial wastewater in pilot scale [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2014.
- [15] 罗丹. 对高浓度硫酸盐废水厌氧处理条件控制的研究[J]. *环境保护与循环经济*, 2010, **30**(7): 52-54, 57.
- [16] Kattel E, Dulova N, Viisimaa M, *et al.* Treatment of high-strength wastewater by Fe^{2+} -activated persulphate and hydrogen peroxide[J]. *Environmental Technology*, 2016, **37**(3): 352-359.
- [17] Zhai N, Zhang T, Yin D, *et al.* Effect of initial pH on anaerobic co-digestion of kitchen waste and cow manure [J]. *Waste Management*, 2015, **38**(1): 126-131.
- [18] 穆军, 章非娟, 黄翔峰, 等. 含硫酸盐高浓度有机废水酸化规律研究[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(2): 241-244.
- Mu J, Zhang F J, Huang X F, *et al.* Studies on the acidification rules of containing high concentration of organic wastewater sulfate[J]. *China Environmental Science*, 2005, **25**(2): 241-244.
- [19] 饶坤, 谭小红, 黄安娜, 等. 二级串联 UASB 反应器处理餐厨垃圾废水研究[J]. *中国给水排水*, 2014, **30**(21): 23-26.
- Rao K, Tan X H, Huang A N, *et al.* Research on food wastewater treatment by two-stage UASB reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, **30**(21): 23-26.
- [20] Liu Y W, Zhang Y B, Ni B J. Evaluating enhanced sulfate reduction and optimized volatile fatty acids (VFA) composition in anaerobic reactor by $\text{Fe}(\text{III})$ addition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(4): 2123-2131.
- [21] 李清雪, 范超, 李龙和, 等. ABR 处理高浓度硫酸盐有机废水的性能[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(15): 47-50.
- Li Q X, Fan C, Li L H, *et al.* Performance of anaerobic baffled reactor for treatment of high-strength sulfate wastewater [J].

- China Water & Wastewater, 2007, **23**(15): 47-50.
- [22] 刘欢贞, 王罕, 顾礼伟, 等. 硫酸盐还原菌对 UASB 中 VFA 的转化的促进研究[J]. 水处理技术, 2014, **40**(4): 38-42.
Liu H Z, Wang H, Gu L W, *et al.* THE effect of volatile fatty acid transformation by sulfate reducing bacteria in UASB[J]. Technology of Water Treatment, 2014, **40**(4): 38-42.
- [23] 宋倩, 马邕文. 常温下内循环厌氧反应器的启动研究[J]. 环境工程, 2010, **28**(1): 14-16.
Song Q, Ma Y W. Study on the start-up of the internal circulation anaerobic reactor under normal temperature [J]. Environmental Engineering, 2010, **28**(1): 14-16.
- [24] Archilha N C, Canto C S A, Ratusznei S M, *et al.* Effect of feeding strategy and COD/sulfate ratio on the removal of sulfate in an AnSBBR with recirculation of the liquid phase[J]. Journal of Environmental Management, 2010, **91**(8): 1756-1765.
- [25] 王婷, 周俊, 徐为中, 等. 生长因子对 SRB 处理硫酸盐废水的影响研究[J]. 工业水处理, 2016, **36**(6): 38-42.
Wang T, Zhou J, Xu W Z, *et al.* Research on the effect of growth factors on the treatment of wastewater containing sulfate by SRB[J]. Industrial Water Treatment, 2016, **36**(6): 38-42.
- [26] Wei C H, Wang W X, Deng Z Y, *et al.* Characteristics of high-sulfate wastewater treatment by two-phase anaerobic digestion process with Jet-loop anaerobic fluidized bed [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(3): 264-270.
- [27] 李玲, 贺延龄, 顾昕. 两相 UASB 反应器处理含高浓度硫酸盐废水[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(2): 136-138.
Li L, He Y L, Gu X. Two-phase UASB anaerobic process for treating wastewater with high sulfate concentration [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **34**(2): 136-138.
- [28] 苏彩丽, 余泳昌, 韩伟红. IC 反应器处理高浓度硫酸盐废水的启动研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(3): 593-596.
Su C L, Yu Y C, Han W H. Start-up of IC reactor for treatment of high-strength sulfate wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(3): 593-596.
- [29] Meulepas R J W, Stams A J M, Lens P N L. Biotechnological aspects of sulfate reduction with methane as electron donor[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2010, **9**(1): 59-78.
- [30] Sarti A, Silva A J, Zaiat M, *et al.* The treatment of sulfate-rich wastewater using an anaerobic sequencing batch biofilm pilot-scale reactor[J]. Desalination, 2009, **249**(1): 241-246.



CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)