

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.6

第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思	(2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清	(2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹	(2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文	(2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰	(2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲	(2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾	(2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚	(2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛蒲萱, 黄韬, 高宏, 马建民	(2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹	(2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄	(2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊	(2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮	(2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水	(2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富	(2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林	(2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民	(2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹	(2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮	(2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容	(2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江	(2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯	(2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽	(2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓	(2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛	(2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜	(2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静	(2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源磷的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧	(2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡	(2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋	(2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏	(2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平	(2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷	(2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然	(2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国	(2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激	(2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun	(2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳	(2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔	(2821)
快速城市化区河流温室气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽	(2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ -N 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚	(2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳	(2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉	(2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌	(2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕	(2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞	(2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰	(2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑	(2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳	(2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇	(2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军	(2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌	(2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩	(2948)
污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳	(2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	《环境科学》征稿简则 (2947)	信息 (2646, 2656, 2857)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性

闫欢汐¹, 许振钰¹, 金春姬^{1,2*}, 邵梦雨¹, 郭亮^{1,2}, 赵阳国^{1,2}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 采用厌氧膜生物反应器(anaerobic membrane bioreactor, AnMBR)处理模拟含盐有机废水, 研究盐度变化对反应器运行效能及膜污染特性的影响。结果表明, 当进水盐度逐渐增加但低于 $9.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应器运行稳定, 出水效果良好; 当盐度增加至 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应器 COD 去除率、产气量及甲烷含量都明显下降; 污泥浓度、污泥体积指数(SVI)、溶解性微生物产物(SMP)和胞外聚合物(EPS)均随盐度增加而先升后降, 污泥絮体紧密, 沉降性良好。中空纤维膜组件在 118 d 内运行了 3 个周期, 随着盐度增加膜运行周期由 31 d 延长为 48 d, 膜污染有所减缓。用 SEM-EDX 分析发现膜面污染物中有类似结晶状物质, Na、Mg、Al、Si、Cl、K、Ca 和 Fe 为主要无机元素。三维荧光光谱(EEM)分析表明, 蛋白质与腐殖酸是膜面有机污染物的主要成分。

关键词: 厌氧膜生物反应器(AnMBR); 盐度; 膜污染; 污泥性质; 污水处理

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2793-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201811191

Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater

YAN Huan-xi¹, XU Zhen-yu¹, JIN Chun-ji^{1,2*}, SHAO Meng-yu¹, GUO Liang^{1,2}, ZHAO Yang-guo^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In the research, an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) was used to treat simulated salty organic wastewater, and the effect of salinity on reactor performance and membrane fouling properties was investigated. The results indicated that when the influent salinity increased gradually but was lower than $9.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, the reactor ran stably and the effluent performance was good. When the salinity increased to $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, the COD removal-efficiency, gas production, and methane content decreased significantly; meanwhile, the sludge concentration, sludge volume index (SVI), soluble microbial products (SMP), and extracellular polymeric substance (EPS) levels became elevated at first and then declined with the rising salinity. The system developed compact flocs and a high settling ability. The hollow fiber membrane module was run for three cycles in 118 d. The membrane operating cycle was extended from 31 d to 48 d with the increasing salinity, which favored the control of membrane fouling. SEM-EDX analysis results revealed that there were similar crystalline substances in the film membrane foulants, and Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, and Fe were the main inorganic elements. Excitation emission matrix (EEM) analysis results demonstrated that proteins and humic acids were the main components of the organic membrane foulants.

Key words: anaerobic membrane bioreactor(AnMBR); salinity; membrane fouling; sludge properties; wastewater treatment

近年来,石油、印染、化工、皮革等行业快速发展,随之而来的含盐废水量急剧增长^[1]。这类废水通常采用传统生物法进行处理,但由于其含有的高浓度无机盐物质会造成细胞溶解、生物呼吸速率降低、沉降性变差,使得传统生物法处理效率低下^[2]。针对此类废水处理难度大、流程复杂、成本过高等问题,寻找一种经济高效、简单实用的处理技术才能满足日趋严格的行业污水排放标准。

厌氧膜生物反应器(anaerobic membrane bioreactor, AnMBR)是厌氧生物处理与膜分离技术相结合的污水处理技术,该技术通过膜过滤截留作用,增加污泥浓度和污泥停留时间,有利于积累对盐度耐受的微生物^[3]。Yurtsever 等^[4]采用 AnMBR 处理含有不同质量浓度($0 \sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) NaCl 的纺织合成废水,发现尽管生物物质浓度明显降低,但 COD 去除率仍高达 90% 以上;Jeison 等^[5]分别用传

统和装有膜的上流式厌氧污泥床反应器处理含盐废水,在 Na 质量浓度由 $24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,传统污泥床反应器内挥发性脂肪酸(VFA)浓度骤增,反应器内严重酸化,装有膜的反应器则运行稳定。这说明 AnMBR 在处理高盐高有机物废水时,不仅稳定性良好,而且表现出较高的耐冲击负荷能力,拥有广阔的发展前景^[6]。

厌氧膜生物反应器在实际工程中的应用受到局限的主要原因是膜污染^[7]。Huang 等^[8]利用浸没式 AnMBR 处理生活污水,发现膜污染在 SRT 为 60d 时得到最佳控制,延长或缩短 SRT 都会导致更多的颗粒物积累在膜表面,增加膜污染。原晓玉等^[9]在

收稿日期: 2018-11-25; 修订日期: 2018-12-25

作者简介: 闫欢汐(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制, E-mail: yanhuanxi@stu.ouc.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jinhou@ouc.edu.cn

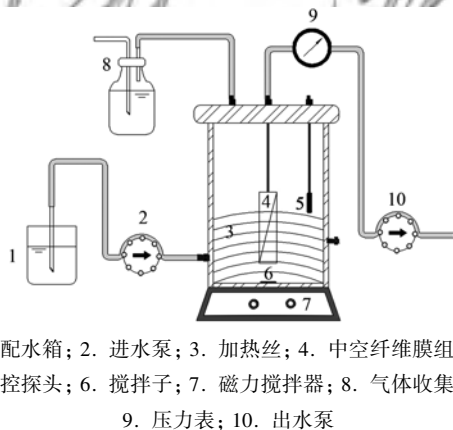
25℃和 35℃ 下分别运行 AnMBR, 观察到温度为 35℃ 系统膜污染速率更低, 膜运行周期更长. Huang 等^[10]的研究表明较短的 HRT 会促进生物量和可溶性微生物产物 (soluble microbial products, SMP) 中蛋白质类物质的增长从而加速膜污染. 目前对 AnMBR 在处理含盐废水条件下引起的膜污染特性研究还较少见.

本实验采用 AnMBR 处理模拟含盐有机废水, 重点考察提升盐度对反应器运行效能、产气能力、污泥性质、膜污染特性的影响, 以期为厌氧膜生物反应器在实际处理含盐废水工程中的应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验装置如图 1 所示, AnMBR 反应器主体是有机玻璃材料构成的圆柱体, 高 25 cm, 直径 22 cm, 有效容积为 8 L. AnMBR 设置温控装置, 通过电热丝将温度控制在 $(35 \pm 0.5)^\circ\text{C}$. 由聚偏氟乙烯 (polyvinylidene fluoride, PVDF) 制成的中空纤维膜组件, 膜表面积 0.235 m^2 , 平均孔径 $0.22\text{ }\mu\text{m}$, 以悬挂方式置于污泥混合悬浮液中.



1. 配水箱; 2. 进水泵; 3. 加热丝; 4. 中空纤维膜组件;
5. 温控探头; 6. 搅拌子; 7. 磁力搅拌器; 8. 气体收集装置;
9. 压力表; 10. 出水泵

图 1 AnMBR 反应器装置及示意

Fig. 1 Schematic diagram of the AnMBR

本实验进水通过蠕动泵流入反应器, 利用磁力搅拌使之与污泥悬浮液混合均匀, 水力停留时间设置为 6 d. 反应器外部设有气体收集装置, 采用排水法收集厌氧反应产生的沼气. 膜组件与出水泵间设置真空表监测跨膜压差 (transmembrane pressure, TMP), 当 TMP 超过 35 kPa 时, 对膜组件进行物理化学清洗.

1.2 污泥与进水水质

本实验所用接种污泥取自青岛市麦岛污水处理厂, 接种污泥的混合液悬浮固体浓度 (mixed liquid suspended solids, MLSS) 为 $31.9\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 接种体积

1 L. 反应器进水采用配制的模拟含盐有机废水, 其组成为: $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_6$ 、 CH_3COONa 、 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 , 按 COD:N:P $\approx$ 55:5:1 比例配制成模拟含盐有机废水. 盐度采用投加海水晶控制, 由于海水晶含有 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Co^{2+} 等离子, 因此进水不额外添加微量元素.

1.3 出水水质与污泥性质分析方法

COD 采用重铬酸钾法测定; pH 采用雷兹 PHS-3DpH 计测定; VFA 和气体采用气相色谱法测定; 混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 和混合液挥发性悬浮固体 (mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS) 采用重量法测定; 蛋白质采用 Folin-酚试剂法^[11]; 多糖采用苯酚-硫酸法测定^[12].

1.4 膜污染特性分析方法

出水时启动蠕动泵, 待真空压力表读数稳定后, 将该读数记为当天跨膜压差 (TMP) 值, 同时收集一定体积水量并记录耗时, 即可计算当天膜通量和膜总阻力. 膜总阻力根据 Darcy 公式 [式 (1)]^[13] 计算:

$$R = \frac{\Delta P}{\mu J} \quad (1)$$

式中, R 为膜总阻力, m^{-1} ; ΔP 为跨膜压差 (TMP), Pa; μ 为渗滤液动力黏度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; J 为膜通量, $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.

膜面污染物特征及其元素组成采用扫描电子显微镜 (SEM) 和能量散射 X 射线能谱仪 (EDX) 分析, 膜面污染物有机成分采用三维荧光光谱 (EEM) 分析.

2 结果与讨论

2.1 AnMBR 运行特性

2.1.1 盐度对 COD 去除效果的影响

AnMBR 运行分为两阶段, 包括 54 d 启动阶段和 64 d 盐度提升阶段. 启动阶段进水 COD 从 $900\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐步上升并稳定在 $2100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 如图 2 所示, 反应器对 COD 的去除率在初期因为水力停留时间 (HRT) 过短而出现剧烈波动, 调整 HRT 后, COD 去除率提高至 97% 以上. 盐度提升阶段, 在一定盐度范围内 COD 去除率随进水含盐量增加略有上升, 说明适当的盐度通过调节微生物渗透压和酶活性, 提高了微生物利用有机物的能力^[14]; COD 去除率在盐度增加到 $9.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时急速下降, 此后虽然延长了每个盐度适应期, 但出水 COD 浓度仍在增加, COD 去除率最终在盐度为 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时降至 80% 以下, 这可能是因为较高的盐浓度使微生物胞外渗透压过高, 导致细胞脱水产生质壁分离、细胞

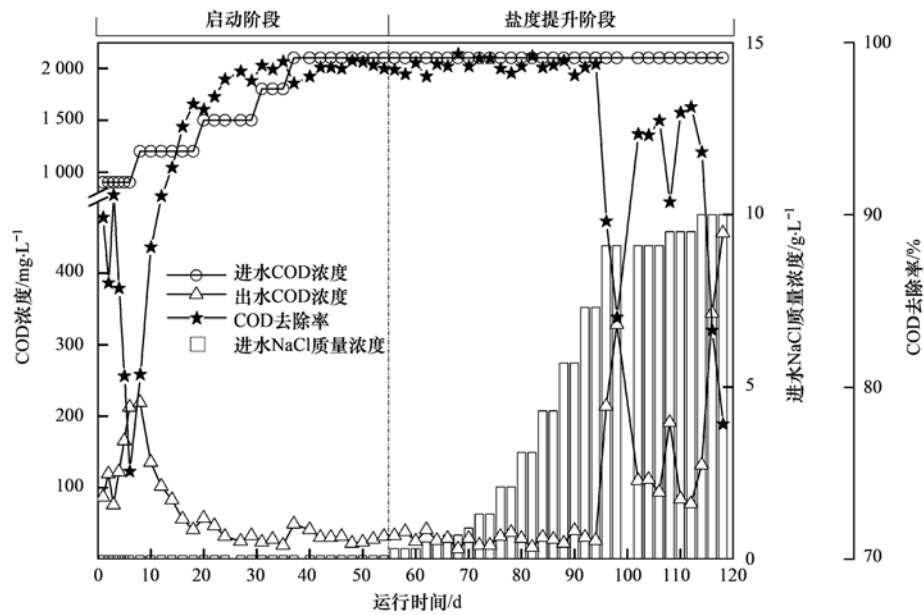


图2 AnMBR对COD去除效果
Fig. 2 COD removal in the AnMBR

质溶解并最终裂解死亡^[15].

2.1.2 盐度对pH、VFA的影响

在厌氧处理过程中,产甲烷菌的最适pH范围在6.8~7.2之间,当进水pH在上述范围内时,分析图3(a)发现反应器运行过程中出水pH除在启动初期出现波动外,平均值在8.0~8.5之间,表明反应器内无酸化现象发生.

挥发性脂肪酸(VFA)浓度是判断厌氧反应器性能特别是产酸菌和产甲烷菌活性的重要指标^[16].如图3(b)所示,VFA含量随有机负荷增加而降低并稳定在150 mg·L⁻¹左右,这与Jeison等^[17]提高有机负荷产生更多量VFA的研究结果不同,分析原因可能是其反应器酸化随有机负荷增加升高达65%,而本实验中AnMBR运行良好未发生酸化现象,大量的有机酸被分解转化成为甲烷、二氧化碳

等物质.盐度提升阶段,短期盐度增加使产甲烷菌利用VFA的能力下降,VFA最高增加到342 mg·L⁻¹;当盐度在0.9~9.1 g·L⁻¹范围内增加时,VFA总量下降且乙酸在VFA总量中的占比明显提高,而在所有VFA中,乙酸和丁酸最有利于甲烷形成,其中乙酸的贡献超过70%^[16],这说明盐度在这一范围内变化时能促进产甲烷菌将挥发性有机酸转化为甲烷和二氧化碳的效率提升,有利于反应器产甲烷性能提高.

2.1.3 盐度对气体产量与组成的影响

从图4观察到气体产量和甲烷百分比在盐度为1.3~2.1 g·L⁻¹时都达到了最大值,甲烷百分比稳定在46%~65%范围内,这与Song等^[18]的研究结果相似;当盐度高于2.1 g·L⁻¹后,气体产量和甲烷占比整体呈下降趋势,在110 d后,与图3(a)和图

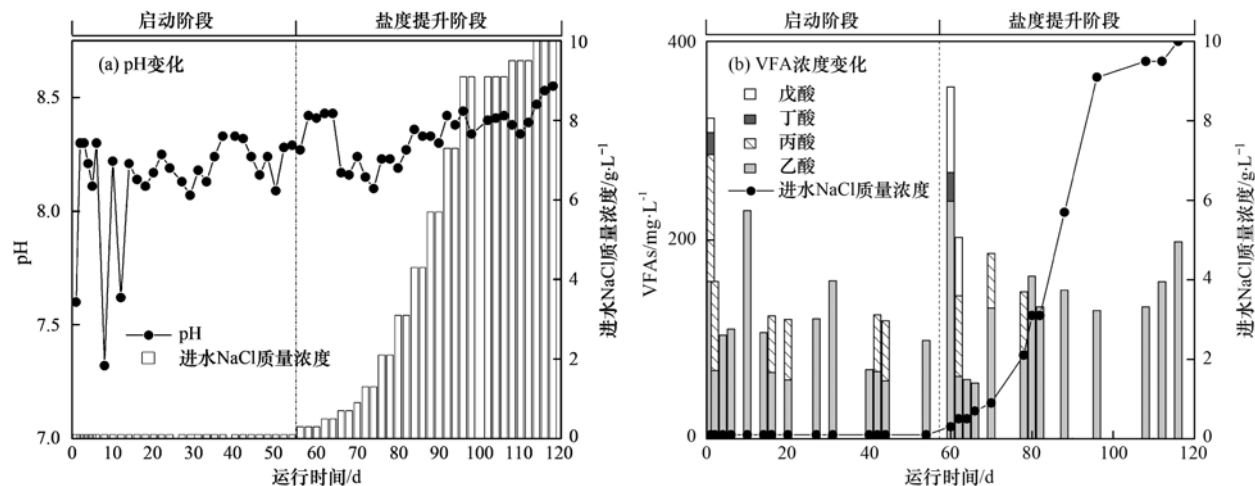


图3 反应器出水pH和VFA浓度变化

Fig. 3 Variations of pH and VFA concentrations in permeate

3(b)对比发现虽然反应器内 pH 值升高,乙酸浓度和 VFA 总量增加,但气体产量和甲烷占比均明显下降,分析原因可能是一方面产酸菌对环境 pH 值的适应范围较宽,一些产酸菌在 pH 值为 5.5~8.5 范围内生长良好,另一方面产甲烷菌比产酸菌对盐度更敏感,高盐度使产甲烷菌细胞渗透压失衡、酶活性下降,且盐度越高乙酸硝化产生甲烷的量越少^[19~23]。

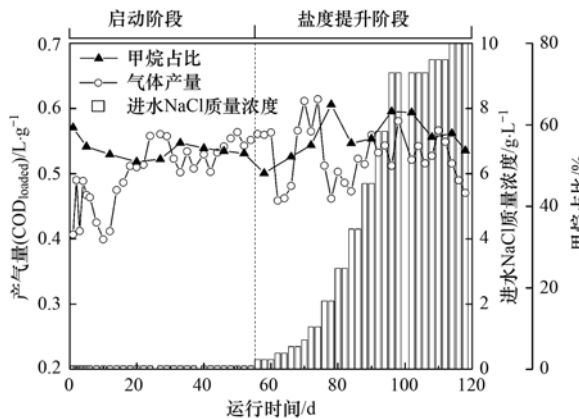


图4 AnMBR 气体产量和甲烷含量

Fig. 4 Gas production and methane content in the AnMBR

2.2 AnMBR 污泥性质

2.2.1 盐度对污泥浓度的影响

图5反映了 AnMBR 运行期间污泥浓度的变化情况.混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 和混合液挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS) 在启动阶段略有波动,基本稳定在 $5.0 \sim 6.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间;随着盐度提升,MLVSS/MLSS 不断下降,二者均呈现先增加趋势,且在盐度为 $2.1 \sim 9.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内增加最明显,其原因可能是活性污泥中的微生物在这一盐度范围内生长代谢加快,微生物量增加;当盐度大于 $9.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,二者均减少,说明过高的盐度会使微生物裂解死亡并分泌大量胞外聚合物最终使污泥浓度下降^[18, 24]。

2.2.2 盐度对污泥沉降性能的影响

分析图6发现污泥体积指数 (SVI) 在启动阶段由 $126.94 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 突增到 $140.38 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,这可能是水力停留时间过短同时反应器运行初期存在跑泥现象造成的;随着反应器内有机负荷的增加,SVI 逐渐降低,说明污泥絮体因微生物生长代谢所分泌的胞外产物而絮凝在一起,使得污泥沉降性能增强.盐度提升阶段,SVI 值在盐度为 $0.3 \sim 3.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内下降,说明这一范围的盐度使得各个微生物群落结合得更紧密;但当盐度继续升高时,SVI 值增加,可能是高盐度微生物细胞裂解死亡后细胞质和分泌物大量悬浮在混合液中,导致污泥沉降性能变差。

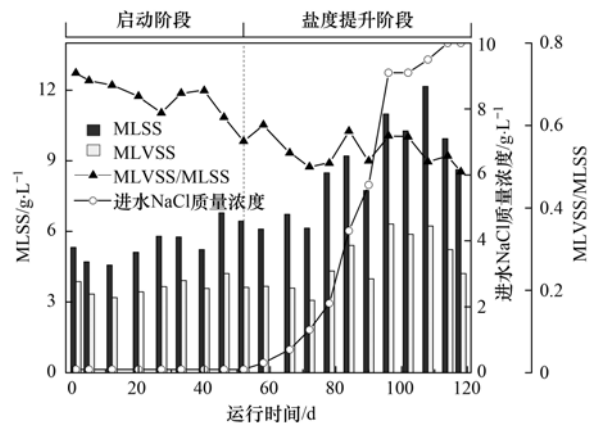


图5 活性污泥 MLSS 和 MLVSS 变化

Fig. 5 Variations of MLVSS and MLVSS

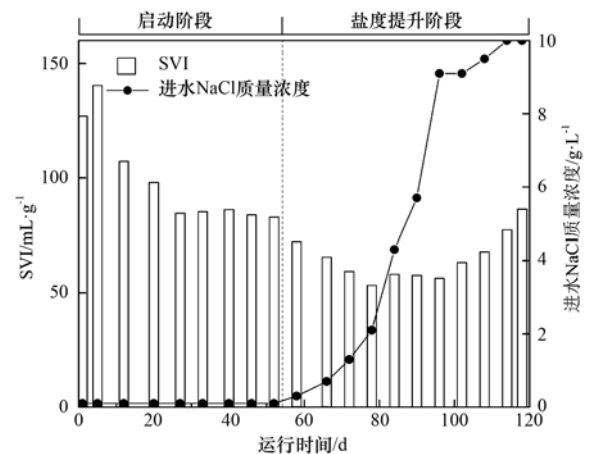


图6 污泥 SVI 值变化

Fig. 6 Variations of SVI

2.2.3 盐度对 SMP、EPS 的影响

图7直观地呈现了盐度提升阶段 AnMBR 污泥混合液中溶解性微生物产物 (SMP) 和胞外聚合物 (EPS) 的变化. SMP [图7(a)] 随盐度提升先稳中有降后增加, 除个别点外 EPS [图7(b)] 随盐度提升而增加. 分析原因可能是一方面一定范围盐度促进微生物生长代谢提高了其对多糖、蛋白质等有机物的利用能力, 分泌更多的胞外聚合物; 另一方面, 过高的盐度使微生物细胞脱水裂解死亡释放出蛋白酶等有机物, 导致污泥混合液中蛋白质和多糖的积累^[25, 26]。

2.3 膜污染特性

2.3.1 膜污染程度表征

跨膜压差 (TMP) 是衡量膜污染程度的重要参数, 这是因为与膜结垢有关的颗粒和胶体等物质会堵塞膜孔导致跨膜压差明显增加^[27]. 以膜组件开始运行到 TMP 超过 35 kPa 取出清洗计为一个周期, 分析图8发现 AnMBR 的中空纤维膜组件在 118 d 内一共运行了 3 个周期, 启动阶段 TMP 的快速增加可能是由于膜孔的快速阻塞和胶体物质在膜表面

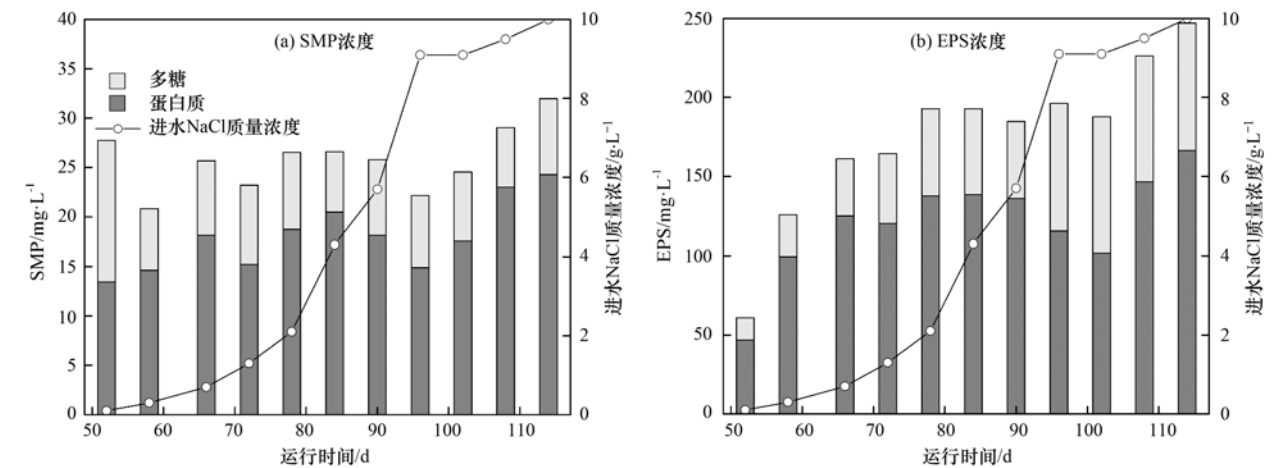


图7 SMP和EPS浓度变化

Fig. 7 Variations of SMP and EPS concentrations

聚集形成凝胶层^[28]。随后膜的运行周期延长,这可能是因为反应系统运行稳定,适当增加盐度能促进微生物对有机物的降解效能,污泥中的SMP、EPS中的蛋白质和糖类等物质减少,膜污染相较第1周期减轻^[24]。而膜运行的第3周期TMP较前两周期增加得更为缓慢,除以上原因外还可能是反应器长期在恒定过滤时间和恒定过滤流量的条件下运行,凝胶层和滤饼层积累得更为缓慢^[16]。

(图9),发现大量颗粒、胶体物质聚集在中空纤维膜表面形成密实的污染层^[28],几乎观察不到未被堵塞的膜孔,说明膜污染十分严重。膜面污染物中还出现一些方形的、有棱角的、类似结晶状物质,这极有可能是污泥混合液中的无机盐离子在膜表面结晶所致^[29]。

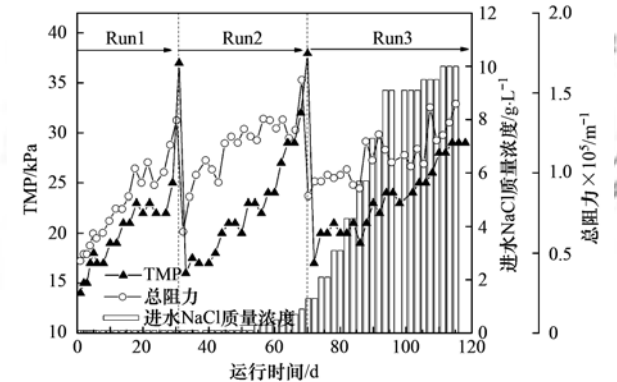


图8 跨膜压差变化

Fig. 8 Variations of membrane TMP

膜总阻力的变化规律与TMP基本相同。使用物理化学法清洗被污染的膜组件,重新运行时起始的膜总阻力总是要高于前一周期,分析其原因可能是物理化学法并不能清洗掉全部的膜垢,一些难以降解的物质会不断积累在膜孔中形成不可逆膜垢。

2.3.2 膜面污染物的扫描电镜-能谱(SEM-EDX)分析

通过SEM观察运行结束后膜面污染物的形态

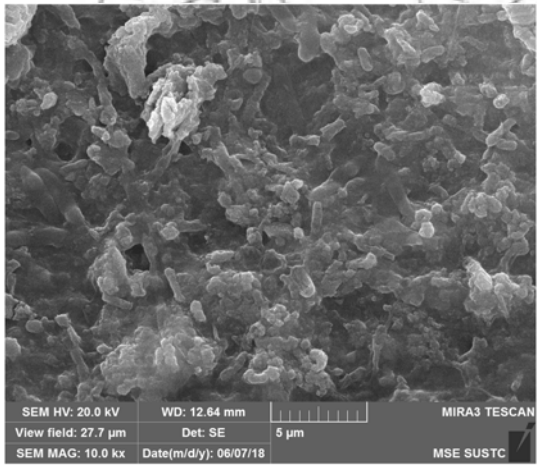


图9 膜面污染物SEM图

Fig. 9 SEM image of membrane foulants

采用EDX分析膜面污染物中的无机成分组成发现(图10和表1),C、O、S可认为是膜面污染物的有机成分,无机成分则为Na、Mg、Al、Si、Cl、K、Ca和Fe。Wang等^[30]发现由Mg、Al、Fe、Ca和Si等元素组成的无机物质沉积在膜表面和有机物结合形成的凝胶层是造成膜污染的重要原因。金属离子在通过膜时,可被微生物细胞和大分子有机物因电荷中和而络合,形成致密的膜垢,加速膜污染^[31]。

表1 膜面污染物中主要元素所占质量分数/%

元素	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
质量分数	54.25	33.62	0.97	0.71	1.43	3.14	1.82	0.26	0.33	0.44	3.04

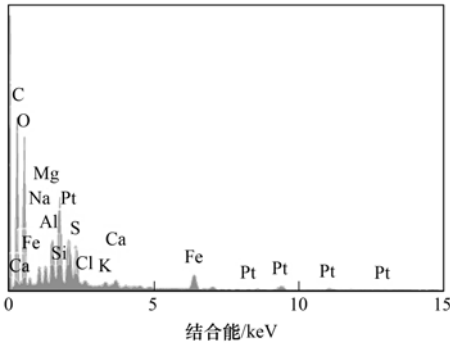


图 10 膜面污染物 EDX 图
Fig. 10 EDX results for the membrane foulants

2.3.3 膜面污染物的有机成分分析

目前普遍认为溶解性微生物产物(SMP)和胞外聚合物(EPS)是膜面污染物主要有机成分,其组成包括糖类和蛋白质等^[32].表2展示了污泥混合液和膜污染物中SMP、EPS的含量,其中膜污染物中两者的含量要远大于混合液中的含量,分析原因可能是混合液中的污染物在反应器长期运行中不断在膜面积累,并通过絮凝、络合、架桥等一系列相互作用,使得污染物之间结合更加致密^[24].

表 2 污泥混合液与膜面污染物中 SMP 和 EPS 含量 (MLSS)/mg·g⁻¹

样品	污泥混合液		膜污染物	
	SMP	EPS	SMP	EPS
蛋白质	5.8 ± 1.4	39.6 ± 0.7	15.5 ± 1.3	147.5 ± 1.4
多糖	1.8 ± 0.9	19.1 ± 1.2	6.1 ± 0.8	58.9 ± 1.6

图 11 显示了通过三维荧光光谱(EEM)分析膜面污染物的结果.观察到图谱中主要有 3 个荧光峰,对应的有机成分分别为中等激发波长类色氨酸(Ⅳ区)、低激发波长类络氨酸(Ⅱ区)以及高激发波长类腐殖酸(Ⅴ区)^[33].这表明蛋白质与腐殖酸类物质是膜面有机污染物的主要成分.

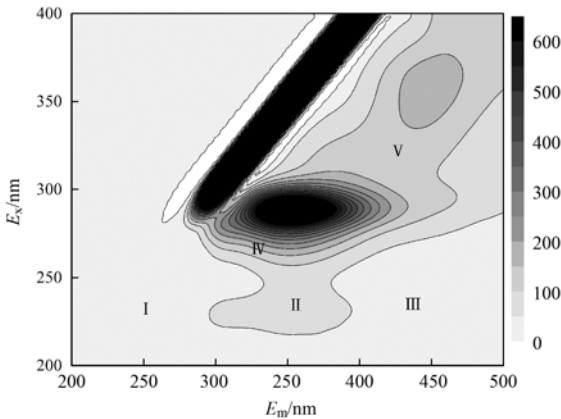


图 11 膜面污染物 EEM 图
Fig. 11 EEM results for the membrane foulants

3 结论

(1)盐度对 AnMBR 处理废水的运行效能有较大影响,当盐度大于 9.5 g·L⁻¹时,COD 去除率迅速从 98%降至 80%以下,反应器内挥发性脂肪酸积累,气体产量和甲烷占比均减少.

(2)随着 AnMBR 系统的盐度不断提升,污泥性质有较大变化,MLSS 和 MLVSS 缓慢增长,在盐度为 9.1 g·L⁻¹时达到最大值,SVI 先从 126.94 mL·g⁻¹降至 53.23 mL·g⁻¹后上升,SMP 和 EPS 增长相对稳定.

(3)中空纤维膜组件在 118 d 内运行了 3 个周期,且随盐度增加膜运行周期由 31 d 延长为 48 d.用 SEM-EDX 分析发现膜面污染物中有类似结晶状物质,Na、Mg、Al、Si、Cl、K、Ca 和 Fe 为主要无机元素.用 EEM 分析膜面污染物发现蛋白质与腐殖酸是膜面有机污染物的主要成分.

(4)综合盐度对 AnMBR 运行特性、污泥性质和膜污染的影响,将进水盐度逐渐提升并控制在 2.1~3.1 g·L⁻¹范围内能使系统处理含盐有机废水效率达到最高,并有效减缓膜污染.

参考文献:

[1] Zhao D F, Xue J L, Li S, *et al.* Theoretical analyses of thermal and economical aspects of multi-effect distillation desalination dealing with high-salinity wastewater[J]. Desalination, 2011, **273**(2-3): 292-298.

[2] Mannina G, Cosenza A, Di Trapani D, *et al.* Membrane bioreactors for treatment of saline wastewater contaminated by hydrocarbons (diesel fuel): An experimental pilot plant case study[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **291**: 269-278.

[3] Ho J, Sung S. Methanogenic activities in anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) treating synthetic municipal wastewater[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(7): 2191-2196.

[4] Yurtsever A, Calimlioglu B, Görür M, *et al.* Effect of NaCl concentration on the performance of sequential anaerobic and aerobic membrane bioreactors treating textile wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **287**: 456-465.

[5] Jeison D, Kremer B, Van Lier J B. Application of membrane enhanced biomass retention to the anaerobic treatment of acidified wastewaters under extreme saline conditions[J]. Separation and Purification Technology, 2008, **64**(2): 198-205.

[6] Visvanathan C, Abeynayaka A. Developments and future potentials of anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs)[J]. Membrane Water Treatment, 2012, **3**(1): 1-23.

[7] 范举红, 余素林, 张培帅, 等. 膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 950-954.

Fan J H, Yu S L, Zhang P S, *et al.* Mechanism of membrane fouling and filtration characteristics in a membrane bioreactor for industrial wastewater treatment[J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 950-954.

[8] Huang Z, Ong S L, Ng H Y. Performance of submerged anaerobic membrane bioreactor at different SRTs for domestic wastewater treatment[J]. Journal of Biotechnology, 2013, **164**

- (1): 82-90.
- [9] 原晓玉, 郭新超, 田昕茹. 温度对分置式厌氧膜生物反应器处理效果及膜污染的影响[J]. 环境工程, 2017, **35**(12): 45-50.
- Yuan X Y, Guo X C, Tian X R. Effect of temperature on removal performance and membrane fouling in separated anaerobic membrane bioreactor[J]. Environmental Engineering, 2017, **35**(12): 45-50.
- [10] Huang Z, Ong S L, Ng H Y. Submerged anaerobic membrane bioreactor for low-strength wastewater treatment: effect of HRT and SRT on treatment performance and membrane fouling[J]. Water Research, 2011, **45**(2): 705-713.
- [11] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the Folin phenol reagent [J]. Journal of Biological Chemistry, 1951, **193**(1): 265-275.
- [12] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. Analytical Chemistry, 1956, **28**(3): 350-356.
- [13] Meng F G, Zhang H M, Li Y S, *et al.* Application of fractal permeation model to investigate membrane fouling in membrane bioreactor[J]. Journal of Membrane Science, 2005, **262**(1-2): 107-116.
- [14] Wood J M. Perspectives on: The response to osmotic challenges: Bacterial responses to osmotic challenges[J]. Journal of General Physiology, 2015, **145**(5): 381-388.
- [15] Lay W C L, Liu Y, Fane A G. Impacts of salinity on the performance of high retention membrane bioreactors for water reclamation: A review[J]. Water Research, 2010, **44**(1): 21-40.
- [16] Wijekoon K C, Visvanathan C, Abeynayaka A. Effect of organic loading rate on VFA production, organic matter removal and microbial activity of a two-stage thermophilic anaerobic membrane bioreactor[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(9): 5353-5360.
- [17] Jeison D, Van Lier J B. Cake layer formation in anaerobic submerged membrane bioreactors (AnSMBR) for wastewater treatment[J]. Journal of Membrane Science, 2006, **284**(1-2): 227-236.
- [18] Song X Y, McDonald J A, Price W E, *et al.* Effects of salinity build-up on the performance of an anaerobic membrane bioreactor regarding basic water quality parameters and removal of trace organic contaminants[J]. Bioresource Technology, 2016, **216**: 399-405.
- [19] 谭潇, 黄靓, 杨平, 等. 盐度对EGSB反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3422-3428.
- Tan X, Huang L, Yang P, *et al.* Effects of salinity on the operation of EGSB reactors and the anaerobic granular sludge [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3422-3428.
- [20] 夏旦凌, 金潇, 徐期勇. 餐厨垃圾高温产甲烷的高盐度抑制及恢复性研究[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(3): 1426-1431.
- Xia D L, Jin X, Xu Q Y. Inhibition and recovery effects of high NaCl concentration on thermophilic methane production from food waste[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(3): 1426-1431.
- [21] 肖利平. 含盐有机废水厌氧生物处理的试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2003. 19-22.
- Xiao L P. A laboratory study of anaerobic treatment for saline organic wastewater[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2003. 19-22.
- [22] Rinzema A, Van Lier J, Lettinga G. Sodium inhibition of acetoclastic methanogens in granular sludge from a UASB reactor [J]. Enzyme and Microbial Technology, 1988, **10**(1): 24-32.
- [23] 李彬, 王志伟, 安莹, 等. 膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 643-650.
- Li B, Wang Z W, An Y, *et al.* Membrane surface fouling properties in MBRs for high-salinity wastewater treatment [J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 643-650.
- [24] Chen C, Guo W S, Ngo H H, *et al.* Challenges in biogas production from anaerobic membrane bioreactors[J]. Renewable Energy, 2016, **98**: 120-134.
- [25] Lin H J, Zhang M J, Wang F Y, *et al.* A critical review of extracellular polymeric substances (EPSs) in membrane bioreactors: Characteristics, roles in membrane fouling and control strategies[J]. Journal of Membrane Science, 2014, **460**: 110-125.
- [26] Liang S, Liu C, Song L F. Soluble microbial products in membrane bioreactor operation: Behaviors, characteristics, and fouling potential[J]. Water Research, 2007, **41**(1): 95-101.
- [27] Tan S W, Cui C Z, Chen X C, *et al.* Effect of biofouling on fouling-related biofouling in a membrane bioreactor during saline wastewater treatments[J]. Bioresource Technology, 2016, **224**: 285-291.
- [28] 夏天. 竹炭颗粒强化AnMBR工艺处理高浓度竹制品废水研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. 30-32.
- Xia T. Research on enhanced AnMBR process for bamboo products wastewater by addition of charcoal [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. 30-32.
- [29] Ishizaki S, Fukushima T, Ishii S, *et al.* Membrane fouling potentials and cellular properties of bacteria isolated from fouled membranes in a MBR treating municipal wastewater[J]. Water Research, 2016, **100**: 448-457.
- [30] Wang Z C, Gao M C, Wang Z, *et al.* Effect of salinity on extracellular polymeric substances of activated sludge from an anoxic-aerobic sequencing batch reactor [J]. Chemosphere, 2013, **93**(11): 2789-2795.
- [31] Meng F G, Chae S R, Drews A, *et al.* Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): membrane fouling and membrane material[J]. Water Research, 2009, **43**(6): 1489-1512.
- [32] Meng F G, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Characterization of cake layer in submerged membrane bioreactor[J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(11): 4065-4070.
- [33] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(24): 5701-5710.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)