

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



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源	林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)
南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析	杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)
西安市PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化特征	黄含含, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)
新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响	刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536)
长秋季生物物质燃烧对PM _{2.5} 中WSOC吸光性的影响	孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)
2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源	王倩 (2555)
南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)
郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析	任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)
上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献	韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)
北京市餐饮业大气污染物排放特征	孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)
北京市农业机械排放因子与排放清单	王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)
北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化	李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)
基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析	张颖蕾, 崔希民 (2617)
环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟	张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)
岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析	周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)
“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析	李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)
伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价	姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)
典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析	赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)
沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响	陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)
丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素	李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)
胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用	王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)
不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较	桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)
过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用	张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)
基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例	王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)
不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)
高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5	李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)
Fe-cyclam/H ₂ O ₂ 体系催化降解罗丹明B机制	余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)
微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO ₂ -NTs为光阳极	卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)
缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性	陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)
HRT对改良式A ² /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响	赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)
重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化	孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)
异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响	王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃亮, 潘涌璋 (2787)
火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替	薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)
游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响	沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)
死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰	苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)
中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价	陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)
土壤环境质量预警体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)
不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系	毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)
长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征	宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)
生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响	黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)
基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价	肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)
重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素	胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)
新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果	陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)
三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征	李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)
滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布	张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)
模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响	王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)
水肥气耦合对温室番茄土壤N ₂ O排放及番茄产量的影响	商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)
矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用	尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)
海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价	汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)
春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析	贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)
热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估	蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)
长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)	蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)
《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)	

缺氧 MBR-MMR 处理海水养殖废水性能及膜污染特性

陈凡雨¹, 徐仲¹, 尤宏^{1,2}, 柳锋¹, 李之鹏^{1*}, 陈其伟³, 韩红卫⁴

(1. 哈尔滨工业大学(威海)海洋科学与技术学院环境工程系, 威海 264200; 2. 哈尔滨工业大学环境学院环境科学与工程系, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 3. 泛华建设集团有限公司湖南分公司, 长沙 410000; 4. 济南市环境监控中心, 济南 250102)

摘要: 采用普通小球藻(*C. vulgaris*)作为实验藻种,搭建缺氧 MBR-微藻膜反应器(缺氧 MBR-MMR)耦合系统处理海水养殖废水,前置缺氧 MBR 用于有机物、 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的降解,释放的 NH_4^+ -N 进入 MMR 用于微藻生长而得到去除,考察协同处理效能和微藻采收情况,探究膜污染行为。反应系统共运行 91 d,对 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的去除率分别达到 90.0% 和 88.0% 以上,对 PO_4^{3-} -P 和 TOC 的平均去除率分别为 49.4% 和 84.7%。普通小球藻在进行连续采收的情况下,能以平均浓度为 9×10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 的生物量稳定运行,实现了较好的去除效能和资源化利用。通过红外光谱和三维荧光光谱分析,MMR 内造成膜污染的主要物质是色氨酸类蛋白质和腐殖酸类物质,与缺氧 MBR 内膜组件相比污染较轻。

关键词: 缺氧污泥;微藻;膜生物反应器;海水养殖废水;膜污染

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2762-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910057

Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR

CHEN Fan-yu¹, XU Zhong¹, YOU Hong^{1,2}, LIU Feng¹, LI Zhi-peng^{1*}, CHEN Qi-wei³, HAN Hong-wei⁴

(1. School of Marine Science and Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264200, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. PAN-CHINA Construction Group Co., Ltd., Hunan Branch, Changsha 410000, China; 4. Jinan Environmental Monitoring Center, Jinan 250102, China)

Abstract: An anoxic membrane bioreactor-microalgae membrane reactor coupling system (anoxic MBR-MMR) was used to deal with mariculture wastewater. Pre-anoxic MBR was used for the degradation of organic matter, NO_3^- -N and NO_2^- -N, and the released NH_4^+ -N entered MMR for microalgae growth and was removed. Meanwhile, the treatment efficiency and the microalgae recovery were studied, and the membrane fouling behavior was investigated. After running for 91 days, the removal rates of the system toward NO_3^- -N and NH_4^+ -N were stable at above 90.0% and 88.0%, respectively. Furthermore, the average removal rates of PO_4^{3-} -P and TOC were 49.4% and 84.7%, respectively. Under the condition that the microalgae were harvested continuously, the biomass can be stably operated at an average concentration of 9×10^7 cells $\cdot \text{mL}^{-1}$ and good removal efficiency and resource utilization could be achieved. Through infrared spectrum and three-dimensional fluorescence spectrum analysis, the main substances causing membrane fouling in MMR were tryptophan proteins and humic acids. The membrane fouling in MMR was lighter than that in anoxic MBR.

Key words: anoxic sludge; microalgae; membrane bioreactor; mariculture wastewater; membrane fouling

随着人口的增长,人们对于海产品的需求日益增长,中国的海产品产量占世界海产品总量的三分之二以上^[1],由于在生产过程中消耗的 95% 的水转化为受污染的废水,这导致了大量海水养殖废水的排放^[2],含盐废水通常被认为是一种难处理的废水^[3],且海水养殖废水多为寡营养水体^[4],现有的处理方法主要针对低 COD 浓度、低 NH_4^+ -N 浓度特征的海水养殖废水^[5,6],但是在养殖产业发展过程中,由于人工投喂大量配合饲料和鲜活饵料,也出现了污染物浓度较高的废水^[7,8],因此,针对此类废水开发经济高效的海水养殖废水处理工艺具有重要意义。

生物过程是一种可靠和有效的脱氮除磷的手段^[9],膜生物反应器(membrane bio-reactor, MBR)废

水处理技术已经发展了 30 多年^[10],并且广泛应用于含盐废水的处理中,但是盐度的胁迫往往带来很多工艺上的困难^[6],例如高盐环境影响微生物的生长、导致严重的膜污染等^[3]。缺氧滤池反应器在活性污泥的基础上投加悬浮填料,污泥颗粒附着在填料上形成生物相丰富的可实现同步硝化和反硝化的生物膜,使其在与 MBR 工艺结合后对膜污染有所缓解^[3,11]。但是对于海水养殖废水磷酸盐含量较高的特点,要实现较好的脱氮除磷效能,传统 MBR 存在排泥的问题。微藻不仅能用于生产各种类型的生物

收稿日期: 2019-10-10; 修订日期: 2019-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408158); 山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE020)

作者简介: 陈凡雨(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制, E-mail: 992311467@qq.com

* 通信作者, E-mail: lizhipengcn@hit.edu.cn

燃料,还能作为水产动物的开口饵料、人类保健食品等广泛用于各行业^[4],并且能有效去除营养物质、重金属和有机污染物等而广泛应用于废水处理^[12, 13]. 目前,小球藻是废水处理中最常用的藻种之一^[7, 10, 14],有较好的脱氮除磷效能,其总氮、总磷的去除率能达到 90% 以上^[15],但是由于各类废水的水质特征相差较大,选择合适的藻种对于特定废水的处理尤为重要.

为此,本研究采用缺氧 MBR 和微藻膜反应器 (microalgae membrane reactor, MMR) 耦合工艺处理人工合成的海水养殖废水,前置缺氧 MBR 用于有机物、NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 的降解,反应器内释放的 NH₄⁺-N 进入 MMR 用于微藻生长并且得到去除,两个反应器进行协同配合,同时考察普通小球藻的生物量变化,探究运行过程中的膜污染行为,对连续采收微藻进行资源化利用及开发高效经济的处理工艺提供理论依据.

1 材料与方法

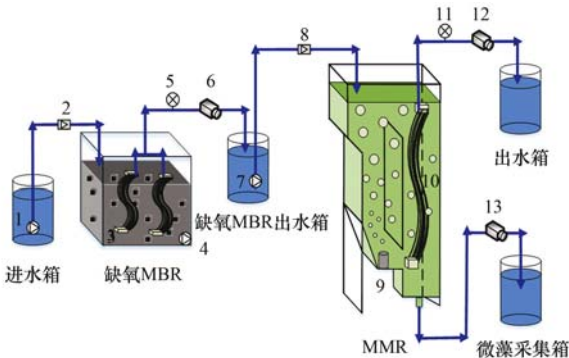
1.1 实验材料

1.1.1 实验装置

本研究采用的实验装置如图 1 所示,总反应系统由缺氧 MBR 和 MMR 耦合而成,反应器主体均由有机玻璃制成,有效容积分别为 8 L 和 7 L. 缺氧 MBR 内有边长为 2 cm 的立方体黑色聚氨酯海绵填料,填充率为反应器有效容积的 5%. 在启动前在填料上进行挂膜,在反应器中设置中空纤维膜组件,膜孔径为 0.03 μm,由两个膜面积分别为 0.050 m² 和 0.066 m² 的膜组件并联而成,为了使混合液搅拌均匀,在缺氧 MBR 内设有潜水泵. 曝气头放置在 MMR 内挡板一侧,通过曝气装置进行曝气,并连接气体流量计以控制气体流量,提供微藻生长所需的气体和使藻液保持良好的流态,反应器内膜组件面积为 0.101 m²,在反应器外部设置光照强度为 2 000 lx,光照周期亮暗比为 12 h: 12 h 的光源用于微藻生长.

两个反应器内液面均由液位控制器控制,系统出水通过蠕动泵控制,采用连续流进水方式,出水蠕

动泵均连有时间继电器,以 8 min 抽、2 min 停的方式间歇出水,反应器出水均通过精密真空压力表记录跨膜压差 (transmembrane pressure, TMP).



1、4、7:潜水泵; 2、8:液位控制装置; 3、10:中空纤维膜组件; 5、11:压力表; 6、12、13:蠕动泵; 9:曝气头

图 1 反应装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the reactor

1.1.2 污泥和微藻来源及其培养

缺氧 MBR 内所接种的缺氧污泥来自山东省威海市城市污水处理厂二沉池的活性污泥,缺氧 MBR 中接种污泥生物量 MLSS 约为 2 500 mg·L⁻¹. 在不曝气的情况下在聚氨酯海绵填料上进行挂膜,挂膜过程所用水水质与实验废水中第 1 阶段的水质相同 (如表 1),并且使用潜水泵进行搅拌以维持良好的流态;在填料内部附着有一定量时完成挂膜,持续培养 3 周后,污泥逐渐从棕色变为黑褐色,测定生物膜亚硝酸还原活性和硝酸还原活性 (以 N/VSS 计),在其分别达到 10 mg·(g·h)⁻¹ 和 8 mg·(g·h)⁻¹ 后搭建体系,以保证运行初期有一定的反硝化性.

MMR 内采用普通小球藻 (*C. vulgaris*) 作为实验藻种,购于中国科学院海洋研究所,反应器最初启动时微藻生物量约为 4 × 10⁷ 个·mL⁻¹.

1.1.3 实验废水水质

本研究所用废水为模拟龟鳖养殖废水,海水取自山东省威海市环翠区小石岛,分别以硝酸钠 (NaNO₃)、磷酸二氢钾 (KH₂PO₄) 和葡萄糖 (C₆H₁₂O₆) 作为污染物质的 N、P、C 源,并加入碳酸氢钠 (NaHCO₃) 调节 pH 在 7.5 ~ 8.5 范围内,运行过程中具体水质参数如表 1 所示.

表 1 实验废水水质

Table 1 Characteristic of experimental wastewater

项目	NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ -P/mg·L ⁻¹	TOC/mg·L ⁻¹	pH
第 1 阶段 (第 1 ~ 33 d)	5. 15	1. 20	151. 69	7. 7 ~ 8. 3
第 2 阶段 (第 34 ~ 50 d)	5. 15	4. 74	151. 69	7. 7 ~ 8. 3
第 3 阶段 (第 51 ~ 65 d)	10. 21	4. 74	151. 69	7. 7 ~ 8. 3
第 4 阶段 (第 66 ~ 91 d)	21. 04	4. 74	151. 69	7. 7 ~ 8. 3

1.2 实验方法

1.2.1 反应系统的搭建及运行

在缺氧 MBR 内挂膜完成和微藻培养至一定量后,连接缺氧 MBR 和 MMR 两部分反应器,水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)分别为 16 h 和 24 h,启动阶段将污染物浓度控制在较低条件下,运行 33 d 后,将 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度从 $1.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $4.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在运行的前 50 d 中, $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的浓度平均浓度为 $5.15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,逐步增大 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 浓度,在第 3 阶段(第 51~65 d)浓度为 $10.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,第 4 阶段(第 66~91 d)时 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的浓度平均值为 $21.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.系统采用连续流进水方式,并且稳定运行 12 d 后持续监测进水、缺氧 MBR 内混合液、缺氧 MBR 出水、MMR 内混合液和最终出水中 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TOC 的浓度,以探究系统的处理效能.由于缺氧 MBR 内设有潜水泵用以搅拌,且反硝化作用产生热能,因此缺氧 MBR 内平均温度为 25°C ,MMR 内平均温度为 22°C ,两个反应器内 pH 分别在 8.0 和 9.0 左右,在此期间持续监测微藻的生物量浓度,考察环境因素对微藻的采收产生的影响.

1.2.2 系统膜污染行为探究

反应器内控制膜组件出水的蠕动泵均连有精密压力表,根据 TMP 的示数,判断膜污染的严重程度,在运行的 91 d 时间内,对反应器内中空纤维膜组件进行多次物理清洗,整个运行过程不进行化学清洗.比较不同反应器内膜组件形貌及其附着物质的特性探究膜污染的特性.在膜污染严重时期,对反应器内混合液和清洗膜表面滤饼层所得的混合液提取溶解性微生物产物(soluble microbial products, SMP)和胞外聚合物(extracellular polymeric substance, EPS),探究膜污染行为.

1.3 分析方法

水质分析方法:分别取进水、缺氧 MBR 内混合液、缺氧 MBR 出水、MMR 内混合液和最终出水各 50 mL,采用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的醋酸纤维膜进行抽滤,采用文献[16]所述方法测定澄清液中的 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度,总有机碳通过 TOC 仪测定(TOC-5000A, Shimadzu, Japan).

微生物混合液及膜污染特性分析方法:微藻生物量采用分光光度法测定,污泥浓度采用国家标准方法^[17]测定;对提取所得的 SMP 和 EPS 进行傅里叶红外光谱和三维荧光光谱分析;取污染严重时期的膜组件,对膜表面进行物理清洗并烘干喷金后,在扫描电镜下进行观察^[18].

2 结果与讨论

2.1 缺氧 MBR-MMR 处理海水养殖废水性能

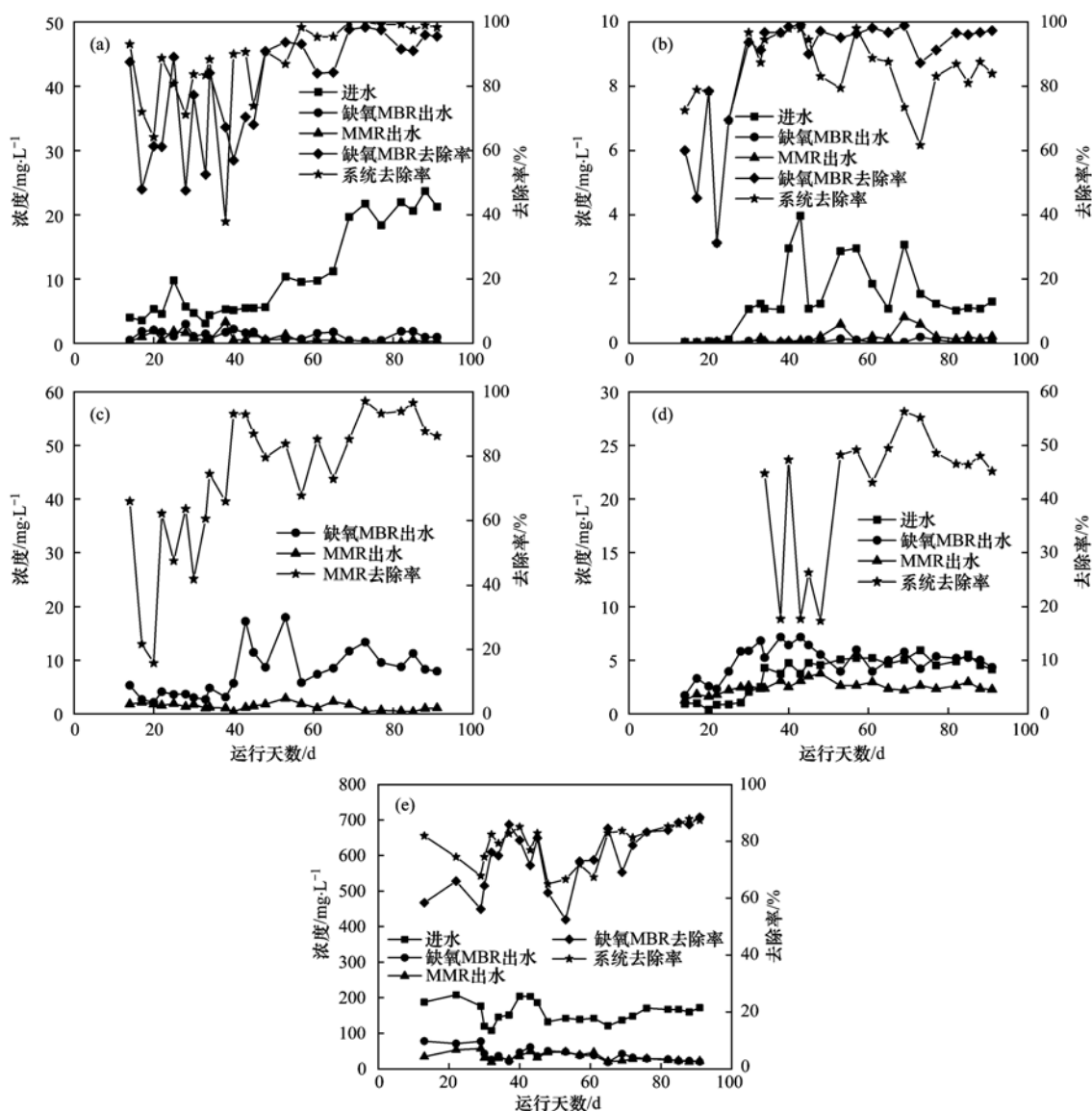
2.1.1 污染物去除效果

(1) $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的去除效果 整个运行过程根据 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 进水的浓度可以分成 3 个阶段,各阶段进水的平均浓度分别为 5.15 、 10.21 和 $21.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,从图 2(a)中可以看出,各阶段最终出水均低于 $5.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,第二、三阶段的出水浓度稳定在 $1.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,运行的前 50 d 时间内,对 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 的去除率在 $40.0\%\sim 90.0\%$ 范围内波动较大,随着进水浓度的升高,污染物的去除率逐渐上升,并在最后阶段稳定在 90.0% 以上.在整个系统中,缺氧 MBR 在 $\text{NO}_3^{-}\text{-N}$ 降解的过程中起到了主要的作用,在后两个阶段,经缺氧 MBR 后,去除率能达到 80.0% 以上.

(2) $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 的去除效果 由于模拟废水中不进行人为添加亚硝酸盐,进水的 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 来自天然海水和模拟废水中微生物对其他物质的转化.在缺氧 MBR 内,缺氧污泥及部分厌氧污泥进行反硝化反应,将 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 还原成 N_2 ^[19],由图 2(b)可以看出,进水经缺氧 MBR 后, $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 平均浓度可从 $1.38\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降至 $0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,缺氧 MBR 对进水中 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 的去除率可以达到 80.0% 以上,在后期可以稳定在 90.0% 左右;系统最终出水 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 平均浓度为 $0.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总的去除率在 $80.0\%\sim 90.0\%$ 之间,可见缺氧污泥在 $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 的去除中起到主要作用.

(3) $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 的去除效果 模拟废水中不进行人为添加铵盐,如图 2(c)所示,由于缺氧 MBR 内污泥发生氨化反应,包括水解及还原反应,使得部分氨基酸氨化而转化为 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$,因此,缺氧 MBR 出水中 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 的浓度较高,但是由于普通小球藻在利用氮源时,首先选择氨氮作为合成营养物质的对象,因此在通过 MMR 后,运行阶段后期(第 69~91 d)出水 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 的平均浓度为 $0.68\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均去除率为 91.0% ,且均能达到 80.0% 以上. Ma 等^[20]在采用青岛大扁藻处理废水实验中也发现了微藻对 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 的去除效果较好,这可能影响微藻对其他氮源的摄取.

(4) $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果 在反应器运行的初始阶段,进水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度较低,缺氧 MBR 不进行排泥导致 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 累积,从图 2(d)可以看出,自运行的 30 d 后,将进水浓度提升至 $5.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,经过缺氧 MBR-MMR 后最终出水的浓度为 $2.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率可以达到 50.0% 左右.总的去除率较低的原因可能是缺氧 MBR 不排泥导致 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的累积,超



(a) NO_3^- -N 的去除效能; (b) NO_2^- -N 的去除效能; (c) NH_4^+ -N 的去除效能; (d) PO_4^{3-} -P 的去除效能; (e) TOC 的去除效能

图2 缺氧 MBR-MMR 系统中污染物的去除效能

Fig. 2 Pollutants removal efficiency of the anoxic MBR-MMR system

出了微藻的降解负荷,普通小球藻对缺氧 MBR 出水中 PO_4^{3-} -P 去除率可以达到 50.0%~60.0%。

(5) TOC 的去除效果 从图 2(e) 中可以看出,进水中 TOC 的浓度在前期波动较大,在运行至 50 d 后,反应器的进水大致稳定在 $150.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,由于缺氧污泥及微藻生长较稳定,处理效果较好,去除效果最终稳定在 80.0%~90.0%。Vo 等^[21]研究表明,微藻对 TOC 的去除与盐度有关,盐度为 0.1% 和 1% 时,TOC 去除率最高,本实验所用海水盐度为 3.5%,较高的盐度可能是限制微藻处理效果的原因之一。

总的来说,在运行后期,系统脱氮除磷和对 TOC 的处理效果均有所提升,造成这一现象的原因之一可能是随着气温回暖,微生物所处环境温度逐

渐达到更适宜生存的条件,使得处理效能较好。

2.1.2 微藻生长情况

温度和 pH 是影响微藻生长的重要因素,在运行期间,反应器内温度和 pH 变化情况如图 3 所示。MMR 内的平均温度为 22°C ,pH 维持在 8.3~9.4 范围内,本实验曝气装置对 MMR 仅提供空气,未专门加入 CO_2 气体,对 MMR 中的 pH 影响较小。

在反应器运行的 91 d 时间内,对 MMR 内普通小球藻的生长情况进行了持续监测,结果如图 4 所示。根据采收情况将运行阶段分成阶段 1~4,分别在运行的第 10、27 和 61 d 进行了采收,在阶段 4 中,可能是由于启动阶段微藻浓度太低,导致了微藻持续培养生物量上升较慢,并在 68 d 后出现了下降情况。在前 3 个阶段运行的基础上得到微藻最高浓

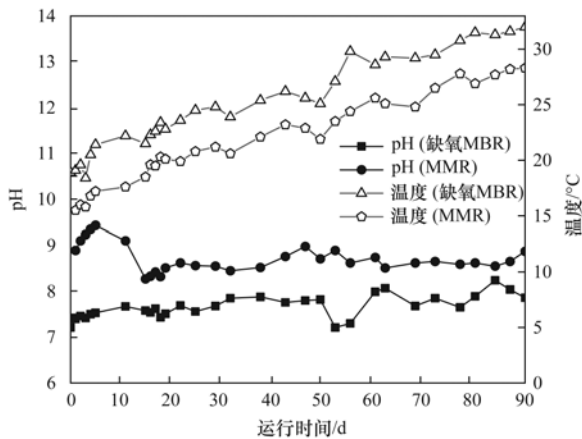


图3 缺氧 MBR-MMR 系统温度和 pH 变化

Fig. 3 Variations of temperature and pH in the anoxic MBR-MMR system

度大约在 12×10^7 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$, 并且在 $(2 \sim 10) \times 10^7$ 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度范围内生物量增长最快, 因此从运行的第 79 d 开始, 在生长对数期以 5×10^7 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 的浓度启动反应器, 并且以每天定时采收 1 L 的方式进行连续采收, 能较好地将浓度维持在 9×10^7 个 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 附近, 实现高效且稳定的采收和污染物的去除效果。

微藻生物量产率是衡量微藻生长情况的重要指标之一, 前 3 阶段的微藻最大生物量产率分别为 1.38×10^7 、 0.99×10^7 和 0.39×10^7 个 $\cdot(\text{mL}\cdot\text{d})^{-1}$ 。由于本研究所用普通小球藻对 NH_4^+-N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的利用率较高, 因此测算 NH_4^+-N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的平均去除速率分别为 $6.19 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $2.48 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, Ma 等^[20] 在采用微藻膜反应器处理海水养殖废水时得到青岛大扁藻对 TN 和 TP 去除速率达到 $15 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $2.8 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 去除速率相近。同时, 单位普通小球藻对 NH_4^+-N 的平均吸收情

况为 $2.02 \times 10^{-10} \text{ mg}\cdot\text{cell}^{-1}$, 吸收情况最好时可达 $8.81 \times 10^{-10} \text{ mg}\cdot\text{cell}^{-1}$, 单个细胞对 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的平均吸收情况为 $0.96 \times 10^{-10} \text{ mg}\cdot\text{cell}^{-1}$, 由此可见, 本研究中普通小球藻在对污染物的吸收中对 NH_4^+-N 的吸收效果最好。

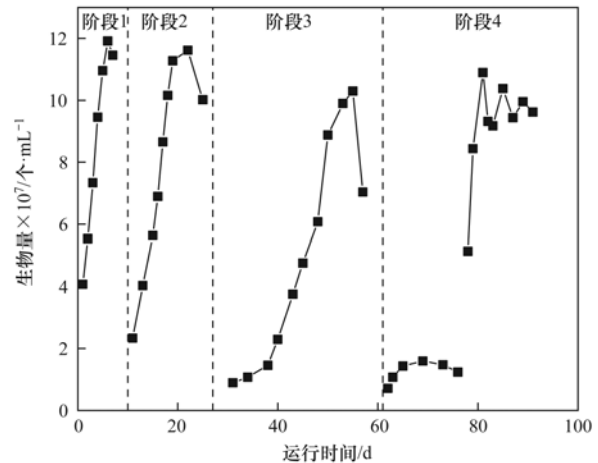


图4 MMR 中普通小球藻生物量增长情况

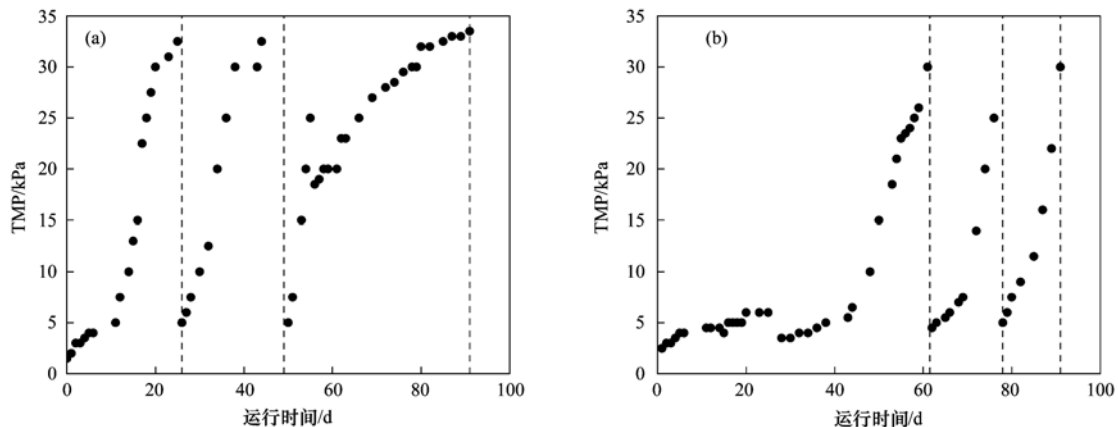
Fig. 4 Biomass growth of *C. chlorella* in MMR

2.2 微藻膜反应器膜污染特性研究

2.2.1 膜污染趋势

与渗透率相关的跨膜压差 (TMP) 是研究膜污染的重要参数^[22], 膜污染的严重程度可以由 TMP 直观地表示, 在反应器运行的 90 d 中, 对缺氧 MBR 及 MMR 中膜出水的跨膜压差进行监测, TMP 随运行天数的变化如图 5 所示。

在运行的第 56 d, 在缺氧 MBR 内新增中空纤维膜进行并联以缓解膜污染, 并联的膜表面积为 0.050 m^2 , 因此缺氧 MBR 内中空纤维膜总面积为 0.116 m^2 , 缺氧 MBR 出水跨膜压差分别第 20、38 和 78 d 达到了 30 kPa, 因此对膜组件进行物理清



(a) 缺氧 MBR 的 TMP 变化; (b) MMR 的 TMP 变化

图5 缺氧 MBR-MMR 系统 TMP 的变化

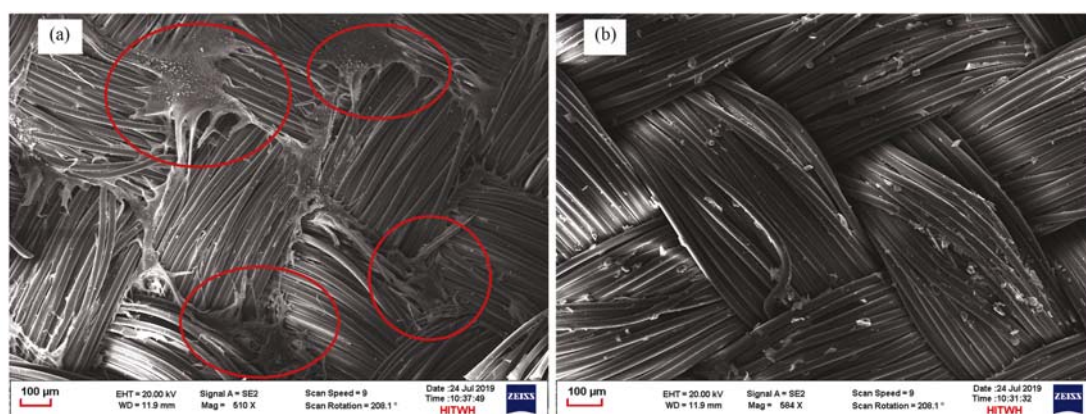
Fig. 5 Variations of TMP in the anoxic MBR-MMR system

洗. 并联前, 缺氧 MBR 内膜的污染周期分别为 20 d 和 18 d, 污染周期随着运行时间的推移越来越短, 并联后膜污染周期明显变长.

由图 5 可得, 在运行的第 61、78 和 91 d 时, 对 MMR 内膜进行了物理清洗, 由于物理清洗只能对中空纤维膜外表面的附着物质进行清理, 且整个运行阶段未对膜进行化学清洗, 因此, MMR 的 TMP 变化也呈现出膜污染周期逐渐变短的现象, 对膜的清洗随运行时间的推移越来越频繁. 此外, 对比缺氧 MBR 和 MMR 膜污染情况发现, 微生物的不同对膜污染的影响较大, 以微藻为生物源的 MMR 内膜组

件的污染较缺氧 MBR 来说更轻.

在反应器运行后期膜污染严重时, 分别对缺氧 MBR、MMR 内膜组件内部形态进行扫描电镜观察, 结果如图 6 所示. 从中可以看出, 缺氧 MBR 内膜组件的污染程度比 MMR 内污染更为严重, 在膜材料交结处存在絮状物质, 相比之下, MMR 内膜组件内部污染较轻, 主要是膜表面起截留作用的外表面层受到污染, 在物理清洗后能维持的周期较长. 另外, 在污垢处 (图 6) 均有规则的、呈晶体状的颗粒物质, 这可能是反应器内混合液中的无机盐结晶导致的^[23,24].



(a) 缺氧 MBR 内膜组件内部形态; (b) MMR 内膜组件内部形态

图 6 缺氧 MBR-MMR 系统中空纤维膜组件内部形态

Fig. 6 Internal morphology of hollow fiber membrane module in the anoxic MBR-MMR system

2.2.2 EPS 特性分析

2.2.2.1 EPS 的红外光谱特性

红外光谱图能反映物质中所包含的官能团信息, 其中波数位于 $3\,335\text{ cm}^{-1}$ 附近的出峰位置代表了 O—H 的伸缩振动, 位于 $2\,366\text{ cm}^{-1}$ 附近为蛋白物质的 N≡N 伸缩振动, 位于 $1\,636\text{ cm}^{-1}$ 附近为蛋白质酰胺一级结构的 C=O 伸缩振动^[25, 26].

因此, 对缺氧 MBR 及 MMR 运行末期 (91 d) 污染严重时的膜表面滤饼层 EPS 进行分析, 如图 7 所示. 从中可知, 两个反应器内 EPS 的主要物质均包含 O—H、N≡N 和 C=O, 说明 EPS 中含有蛋白质类物质, 为了进一步探究其物质组成, 对样品进行了三维荧光扫描.

2.2.2.2 EPS 的三维荧光特性

由文献^[26, 27]可知, 图 8 中峰 A 处于蛋白质物质区域; 峰 B 代表色氨酸类物质, 荧光范围是 $E_x/E_m = 270 \sim 280/300 \sim 310\text{ nm}$; 峰 C 代表样品中主要含有与微生物类副产物有关的类蛋白质, 荧光范围为 $E_x/E_m = 270 \sim 280/340\text{ nm}$.

可以看出, 本研究中造成膜污染的 EPS 中主要

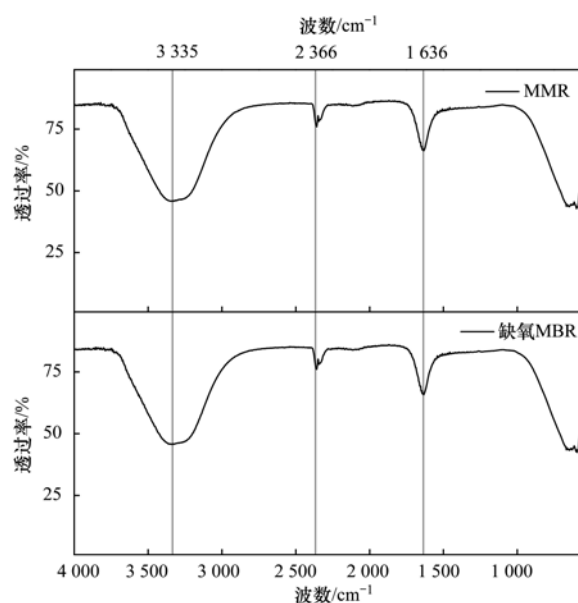


图 7 缺氧 MBR-MMR 系统内膜表面滤饼层 EPS 的红外光谱

Fig. 7 FTIR spectra of EPS of mud cake layer on the inner surface in the anoxic MBR-MMR system

的组成物质为蛋白质类物质, 并且主要以色氨酸为主, 在腐殖酸物质区域均未出现明显的峰. 实验所测

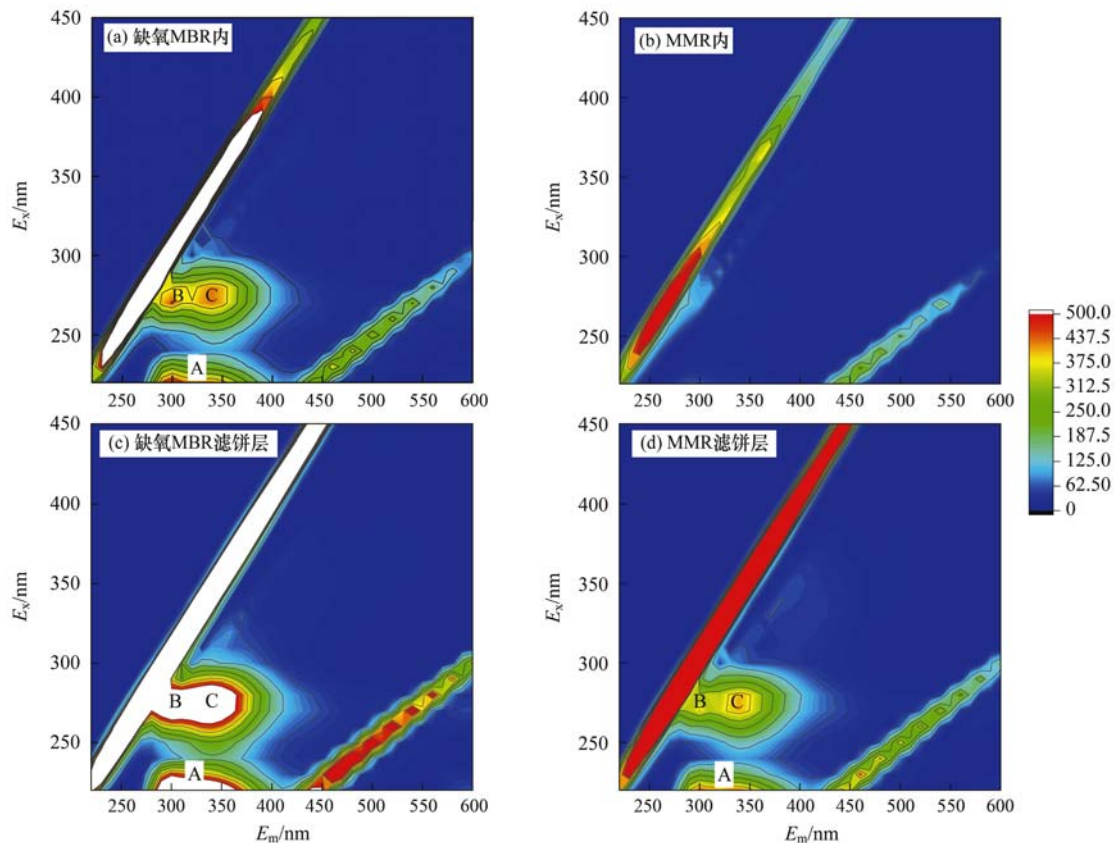


图8 EPS的三维荧光光谱图

Fig. 8 EEM results for the EPS samples

样品均在原液基础上稀释 10 倍所得,通过比较缺氧 MBR 和 MMR 内混合液的谱图可得,缺氧 MBR 各峰强度明显高于 MMR. 杨明明等^[28]在厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 中检测到了色氨酸蛋白质类物质(峰 C)和 E_x/E_m 位于 220/325 ~ 345 nm 的芳香类蛋白质以及 E_x/E_m 位于 220/325 ~ 345 nm 的酪氨酸类蛋白质.

2.2.3 SMP 特性分析

2.2.3.1 SMP 的红外光谱特性

SMP 呈现出与 EPS 相似的红外光谱特性,出峰位置为 3 335、2 366 和 1 636 cm^{-1} 附近(图 9),并且对于缺氧 MBR 内膜表面滤饼层来说,相较于运行中期阶段,运行末期也在 2 366 cm^{-1} 附近出现 $\text{N}\equiv\text{N}$ 伸缩振动.

2.2.3.2 SMP 的三维荧光特性

如图 10 所示,SMP 的荧光特性表明缺氧 MBR 与 MMR 内混合液的谱图相似,出峰位置大致相同,对比相关资料可知^[27],反应器内 SMP 均含有色氨酸类物质(B 峰)和腐殖酸类物质(峰 D、峰 E). 对比与腐殖酸类物质相关的峰强,缺氧 MBR 均高于 MMR,这与缺氧 MBR 内膜污染较严重的事实相符.

滤饼层的谱图出峰位置也大致相同,并且缺氧 MBR 内膜表面的滤饼层出峰位置相较于 MMR 发生

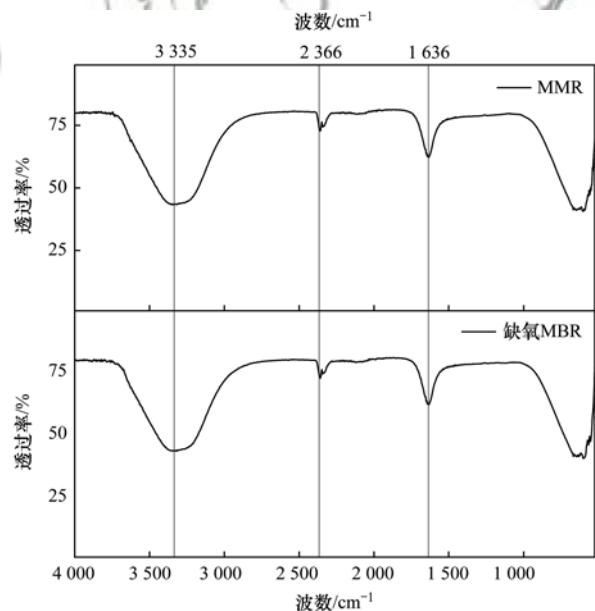


图9 缺氧 MBR-MMR 系统内膜表面滤饼层 SMP 的红外光谱

Fig. 9 FTIR spectra of SMP of mud cake layer on the inner surface in the anoxic MBR-MMR system

了红移,荧光峰的红移表明荧光基团中羰基、羧基、羟基和胺基含量有所增加^[28, 29]. 总的来说,系统 SMP 的主要物质为以色氨酸为主的蛋白质类物质和以海洋腐殖酸为主的腐殖酸类物质,蛋白质与腐殖酸是膜面有机污染物的主要成分^[23].

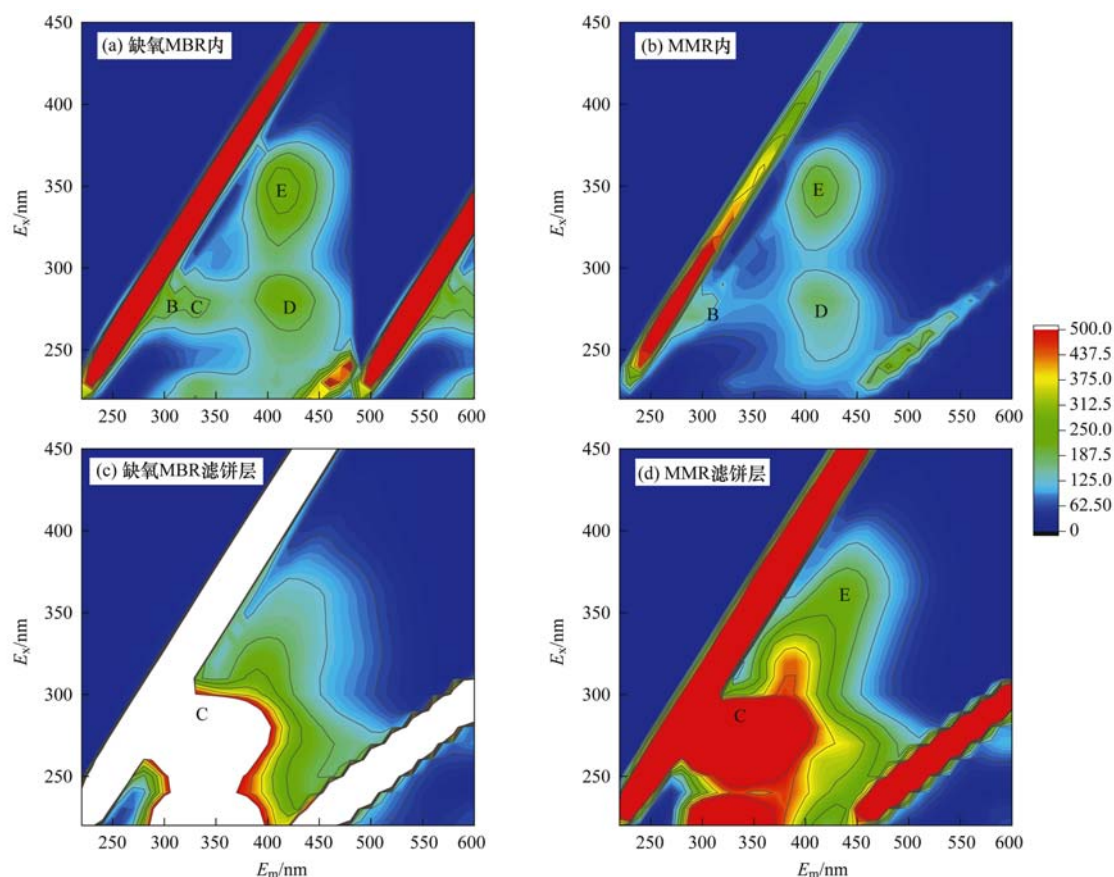


图 10 SMP 的三维荧光光谱图

Fig. 10 EEM results for the SMP samples

3 结论

(1) 室温条件下, 反应系统对 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的去除效果较好, 在缺氧 MBR 和 MMR 的 HRT 分别为 16 h 和 24 h 的条件下, 在进水 NO_3^- -N 的平均浓度达到 $21.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的阶段, 经过缺氧 MBR-MMR 后, 系统对 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 去除率分别稳定在 90.0% 和 88.0% 以上, 系统对 PO_4^{3-} -P 和 TOC 的平均去除率分别为 49.4% 和 84.7%。

(2) 在运行的 91 d 内, 对普通小球藻进行了 3 次序批次采收, 在此期间, 普通小球藻的最大生物量达到了 $11 \times 10^7 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$, 在运行后期以每天定时采收 1 L 的方式连续采收, 能较好地将浓度维持在 $9 \times 10^7 \text{ 个} \cdot \text{mL}^{-1}$ 附近, 实现了高效且稳定的采收。

(3) 在膜污染方面, 与缺氧 MBR 相比, 以普通小球藻为生物源的 MMR 内膜污染较轻, 造成两个反应器内膜污染的物质主要是 SMP 和 EPS 中的蛋白质和腐殖酸类物质。

参考文献:

- [1] Meng W Q, Feagin R A. Mariculture is a double-edged sword in China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, **222**: 147-150.
- [2] Nguyen N C, Chen S S, Nguyen H T, *et al.* Applicability of an integrated moving sponge biocarrier-osmotic membrane bioreactor

MD system for saline wastewater treatment using highly salt-tolerant microorganisms [J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, **198**: 93-99.

- [3] Song W L, Li Z P, Ding Y, *et al.* Performance of a novel hybrid membrane bioreactor for treating saline wastewater from mariculture: Assessment of pollutants removal and membrane filtration performance[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **331**: 695-703.
- [4] Zhang L J, Pei H Y, Yang Z G, *et al.* Microalgae nourished by mariculture wastewater aids aquaculture self-reliance with desirable biochemical composition[J]. *Bioresource Technology*, 2019, **278**: 205-213.
- [5] Li M, Liang Z L, Callier M D, *et al.* Nutrients removal and substrate enzyme activities in vertical subsurface flow constructed wetlands for mariculture wastewater treatment: effects of ammonia nitrogen loading rates and salinity levels[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **131**: 142-150.
- [6] Liu D Z, Li C W, Guo H B, *et al.* Start-up evaluations and biocarriers transfer from a trickling filter to a moving bed bioreactor for synthetic mariculture wastewater treatment [J]. *Chemosphere*, 2019, **218**: 696-704.
- [7] 赵秀侠, 杨坤, 方婷, 等. 3 种微藻在龟鳖养殖废水中的生长与脱氮除磷特性[J]. *水资源保护*, 2018, **34**(1): 83-87, 94.
- Zhao X X, Yang K, Fang T, *et al.* Growth feature and nitrogen and phosphorus removal characteristics of three microalgae in turtle breeding wastewater [J]. *Water Resources Protection*, 2018, **34**(1): 83-87, 94.
- [8] Zhang H N, Wang H Q, Jie M R, *et al.* Performance and microbial communities of different biofilm membrane bioreactors

- with pre-anoxic tanks treating mariculture wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2020, **295**: 122302.
- [9] Freytez E, Márquez A, Pire M, *et al.* Nitrogenated Substrate Removal Modeling in Sequencing Batch Reactor Oxidic-Anoxic Phases[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2019, **145** (10): 04019068.
- [10] Xiao K, Liang S, Wang X M, *et al.* Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications; a critical review [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **271**: 473-481.
- [11] 胡国威, 黄瑞敏, 张碗林, 等. 缺氧/三级好氧移动床生物膜反应器对印染废水的脱氮效果研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, **39**(10): 1140-1142, 1146.
Hu G W, Huang R M, Zhang W L, *et al.* Nitrogen removal for the printing and dyeing wastewater by anoxic/three stage aerobic MBBR process[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2017, **39**(10): 1140-1142, 1146.
- [12] Qin L, Liu Q H, Meng Q, *et al.* Anoxic oscillating MBR for photosynthetic bacteria harvesting and high salinity wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **224**: 69-77.
- [13] Fan L, Brett M T, Li B, *et al.* The bioavailability of different dissolved organic nitrogen compounds for the freshwater algae *Raphidocelis subcapitata* [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 479-486.
- [14] 王伟伟, 陈书秀, 钱瑞, 等. 海水养殖废水预处理方法与微藻藻种筛选[J]. *水产科学*, 2014, **33**(3): 181-185.
Wang W W, Chen S X, Qian R, *et al.* Mariculture effluent pretreatment methods and screening of microalgae[J]. *Fisheries Science*, 2014, **33**(3): 181-185.
- [15] Lv J P, Liu Y, Feng J, *et al.* Nutrients removal from undiluted cattle farm wastewater by the two-stage process of microalgae-based wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **264**: 311-318.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 李冬, 曹美忠, 郭跃洲, 等. 进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1360-1366.
Li D, Cao M Z, Guo Y Z, *et al.* Effect of influent ammonia concentration on a biological phosphorus removal granules system [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1360-1366.
- [19] Huang H, Ekama G A, Biswal B K, *et al.* A new Sulfidogenic Oxidic-Settling Anaerobic (SOSA) process: the effects of sulfur-cycle bioaugmentation on the operational performance, sludge properties and microbial communities [J]. *Water Research*, 2019, **162**: 30-42.
- [20] 马航, 李之鹏, 柳峰, 等. 微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1865-1870.
Ma H, Li Z P, Liu F, *et al.* Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1865-1870.
- [21] Vo H N P, Ngo H H, Guo W S, *et al.* Identification of the pollutants' removal and mechanism by microalgae in saline wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2019, **275**: 44-52.
- [22] Tan S W, Cui C Z, Chen X C, *et al.* Effect of bioflocculation on fouling-related biofouling in a membrane bioreactor during saline wastewater treatments[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **224**: 285-291.
- [23] 闫欢汐, 许振钰, 金春姬, 等. 厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2793-2799.
Yan H X, Xu Z Y, Jin C J, *et al.* Performance and membrane fouling properties in an anaerobic membrane bioreactor for salty wastewater[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2793-2799.
- [24] 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.
- [25] 杨毅, 杨霞霞. 城市污水处理过程中 DOM 的三维荧光光谱及紫外谱图特性[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(12): 5672-5676.
Yang Y, Yang X X. Characteristic of three dimensional fluorescence spectra and UV spectra of DOM during process of urban sewage treatment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(12): 5672-5676.
- [26] Song F H, Wu F C, Feng W Y, *et al.* Fluorescence regional integration and differential fluorescence spectroscopy for analysis of structural characteristics and proton binding properties of fulvic acid sub-fractions[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **74**: 116-125.
- [27] 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.
- [28] 杨明明, 刘子涵, 周杨, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 及其对污泥表面特性的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2341-2348.
Yang M M, Liu Z H, Zhou Y, *et al.* Extracellular polymeric substances of anammox granular sludge and its effects on sludge surface characteristics [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2341-2348.
- [29] Ding Y, Tian Y, Li Z P, *et al.* A comprehensive study into fouling properties of Extracellular Polymeric Substance (EPS) extracted from bulk sludge and cake sludge in a mesophilic anaerobic membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **192**: 105-114.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xinxiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)