

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.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)
南昌市扬尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)
金属有机框架 MIL-53(Fe)可见光催化还原水中 U(VI)	闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉珊(1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹(1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N ₂ O)浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)
《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)	

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性

马航¹, 李之鹏¹, 柳峰¹, 徐仲¹, 尤宏^{1,2,*}, 王芳¹, 陈其伟³

(1. 哈尔滨工业大学(威海), 海洋科学与技术学院, 威海 264200; 2. 哈尔滨工业大学环境学院, 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)

摘要:以海水养殖废水为研究对象, 探究了微藻膜反应器的脱氮除磷效能及膜污染特性. 采用青岛大扁藻(*Platymonas helgolandica tsingtaoensis*)作为生物源, 经过60 d的运行, 微藻膜反应器的TN和TP去除率分别为73.6%和77.9%, TN和TP去除速率达到 $15 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $2.8 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 反应器中的微藻能够较快富集, 最大生长速率可达 $53.3 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 最大生物量可达 $1.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 第18d和38d分别对反应器中的微藻进行采收, 未影响反应器的脱氮除磷效能, 且可以在一定程度上缓解膜污染现象. 微藻生物量的增加会显著提高膜污染物质的含量, 三维荧光光谱结果表明, 色氨酸类蛋白质和芳香类蛋白质是造成膜污染的重要因素.

关键词:微藻; 膜反应器; 脱氮除磷; 膜污染; 海水养殖废水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1865-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201808121

Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor

MA Hang¹, LI Zhi-peng¹, LIU Feng¹, XU Zhong¹, YOU Hong^{1,2,*}, WANG Fang¹, CHEN Qi-wei³

(1. School of Marine Science and Technology, Harbin Institute of Technology, 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)

Abstract: In order to treat mariculture wastewater, the pollutant removal performance and membrane fouling characteristics of a microalgae membrane reactor were investigated using *Platymonas helgolandica tsingtaoensis*. After 60 days of operation, the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) removal efficiency of the reactor were 73.6% and 77.9%, respectively, and the removal rates of TN and TP reached $15 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ and $2.8 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. The microalgae in the reactor could be enriched rapidly, with a maximum growth rate of $53.3 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ and a maximum biomass of $1.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. The microalgae in the reactor were harvested on day 18 and day 36; harvesting did not affect the nitrogen and phosphorus removal efficiency of the reactor. To some extent, the membrane fouling phenomenon was alleviated. The increase in the microalgae biomass would significantly increase the pollutant content of the membrane. The three-dimensional excitation-emission matrix (EEM) spectra results confirmed that tryptophan-like substances and aromatic proteins had a significant effect on membrane fouling.

Key words: microalgae; membrane reactor; nitrogen and phosphorus removal; membrane fouling; aquaculture wastewater

海水养殖业的迅速发展, 给人们的生活带来了便利, 但也导致了海水养殖废水的大量排放. 海水养殖废水中含有大量的 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 等营养物质, 直接排入水体会破坏水生生态平衡^[1,2], 困扰着海水养殖业的可持续发展. 针对废水中营养盐的去除, 生物化学方法因其处理成本低受到研究者的青睐. 目前报道了多种海水养殖废水的处理工艺, 但会存在污泥产量大^[3,4]、曝气能耗高、除磷效果差^[5]的问题.

微藻作为一种生物能源, 在生长过程中能有效吸收环境中的氮磷^[6], 利用光能合成碳水化合物, 通过进一步生化反应生成蛋白质、油脂等物质^[7], 广泛应用于水产养殖、食品、生物柴油等领域^[8,9]. 目前关于微藻去除废水中氮磷的研究较多, 但多以序批式实验为主^[10-12], 研究对象多为低盐度废水, 脱氮除磷效能较差, 且微藻沉降性能较差, 难以和

水分离, 长时间处理废水导致代谢产物无法排出^[13], 严重制约了微藻的脱氮除磷效能. 膜生物反应器(MBR)技术在高效降解污染物的同时, 能够起到截留生物量的作用^[14,15], 已经广泛应用于水处理领域. 但膜污染的产生显著增加了废水处理成本, 成为MBR的发展瓶颈^[16].

为此, 本文以海水养殖废水为研究对象, 基于微藻对废水中氮、磷的吸收作用, 搭建微藻膜反应器, 高效降解污染物的同时富集微藻, 实现废水的资源化利用; 同时对系统的膜污染行为进行探究, 降低处理成本, 以期对海水养殖废水的处理及微藻的资源化利用提供参考.

收稿日期: 2018-08-15; 修订日期: 2018-10-16

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: 马航(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: mhllymhh@qq.com

* 通信作者, E-mail: youhong@hit.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验装置

反应装置为柱状, 有机玻璃制成, 有效容积 3 L, 通过底部曝气使反应器内液体混合均匀(图 1). 曝气区放置膜组件, 膜孔径为 $0.03\ \mu\text{m}$, 总膜面积为 $0.04\ \text{m}^2$. 反应器内液面由液位控制器保持, 通过蠕动泵的抽吸作用将膜组件过滤后的出水抽出, 利用时间继电器实现间歇式出水(8 min 抽、2 min 停), 通过精密真空压力表记录跨膜压差(TMP), 光照度为 $2\ 000\ \text{lx}$, 光照周期为 12 h: 12 h.

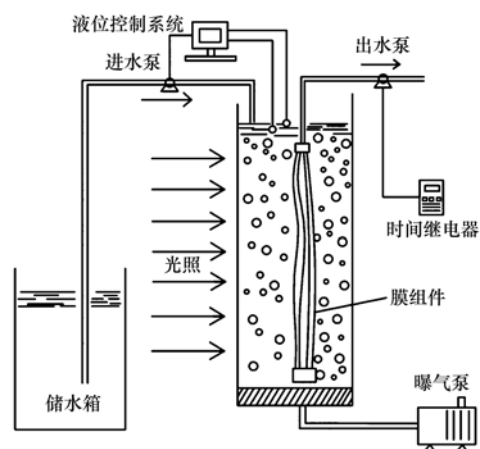


图 1 反应装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the reactor

1.2 微藻藻种来源及培养

本实验采用青岛大扁藻 (*Platymonas helgolandica tsingtaoensis*) 为生物源, 购自中国科学院海洋研究所. 于光照培养箱中, 采用 f/2 培养基进行培养, 光照度为 $2\ 000\ \text{lx}$, 光照周期为 12 h: 12 h, 每日定时摇 3 次以防沉淀.

1.3 废水水质

本研究所用废水采用模拟对虾养殖废水^[17], 废水主要污染物含量如下: $18.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{NaNO}_3$, $50\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{NH}_4\text{Cl}$, $13.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{KH}_2\text{PO}_4$, 未投加诸如碳酸氢盐的缓冲剂, 所用海水取自山东省威海市环翠区小石岛.

1.4 实验方法

微藻膜反应器的搭建及处理海水养殖废水效能: 以海水养殖废水为研究对象, 搭建微藻膜反应器, 采用连续流进水方式, 采用分光光度法对进出水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 进行持续监测, 考察微藻生物量的变化; 同时记录反应器内温度及进出水 pH 值, 考察环境因素对微藻膜反应器的影响.

微藻膜反应器膜污染行为探究: 对反应器运行时 TMP 的变化进行持续记录, 定期提取反应器过

滤前后的溶解性微生物产物(SMP)和胞外聚合物(EPS), 测定其含量变化, 利用分子光谱(红外光谱、三维荧光光谱)考察进出水 SMP 和反应器内 EPS 的特性, 并结合微藻生物量、TMP 及膜污染物含量的变化阐述反应器的膜污染特性.

1.5 分析项目与方法

每日定时取反应器进、出水, 经过 $0.45\ \mu\text{m}$ 醋酸纤维膜过滤后, 对主要污染物进行测定. NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的测定参照海洋监测规范^[18](GB 12763.4-91). SMP 和 EPS 蛋白质测定采用福林酚分光光度法, 多糖测定采用苯酚-硫酸法, 将微藻离心、烘干、称量后得到生物量(干重).

TMP 直接由精密真空压力表示数读出, 将提取的 SMP、EPS 放置于广口瓶中, 于 50°C 下干燥 48 h 以上, 采用傅里叶红外光谱仪进行测定, 对未干燥的样品进行三维荧光光谱分析, 激发光和发射光波长范围分别为 $220\sim 450\ \text{nm}$ 和 $220\sim 600\ \text{nm}$, 步长均为 $10\ \text{nm}$, 扫描速度为 $1\ 500\ \text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$, 采用 Origin 9.0 进行分析.

2 结果与讨论

2.1 微藻膜反应器处理海水养殖废水性能

以海水养殖废水为研究对象, 进水 NO_3^--N 浓度 $3.3\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+-N 浓度为 $12\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度为 $3\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水流量为 $2.6\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, HRT 为 1 d, 室温下运行.

2.1.1 氮磷去除效果

反应器运行初期, 出水 NH_4^+-N 浓度为 $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水水质较差, 如图 2(a) 所示. 运行至第 6 d, 出水 NH_4^+-N 浓度下降至 $7\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 之后 NH_4^+-N 浓度维持在 $5\sim 7\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 第 18 d 由于生物量稳定在 $1.15\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 为了更好地实现微藻的资源化利用, 并且不因反应器内生物量过低影响脱氮除磷效能, 将反应器内 1.2 L 藻液采收. 排藻后, 微藻生物量为 $0.6\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 出水 NH_4^+-N 浓度略有上升. 第 20~38 d(阶段 2), 随着生物量的不断升高, 出水 NH_4^+-N 浓度稳定在 $1.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 第 38 d 第二次排藻, 使得反应器内微藻生物量与第二阶段初始生物量($0.6\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)保持一致, 微藻采收量约为 1.7 L, 进入阶段 3. 排藻后出水 NH_4^+-N 浓度由 $1.7\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $3.4\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 第 48~60 d, 出水 NH_4^+-N 浓度维持在 $1.5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下.

在反应器运行的 60 d 内, 可以看出微藻膜反应器对 NO_3^--N 的去除效果较差, 雷国元^[19]报道当

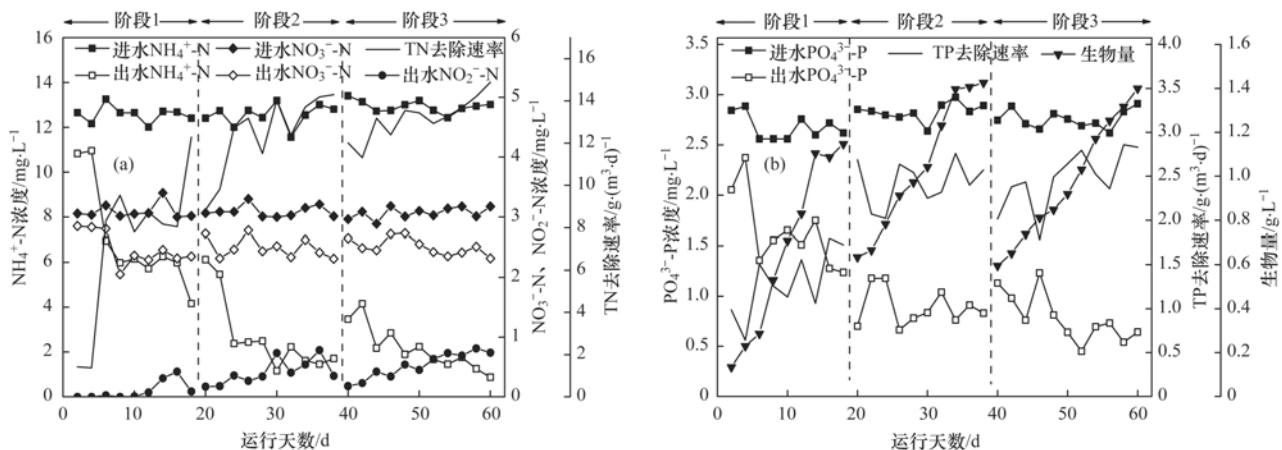


图2 反应器的脱氮除磷效能

Fig. 2 Nitrogen and phosphorus removal efficiency of the reactor

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 同时存在时, 微藻优先利用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 王伟伟等^[20]在筛选微藻过程中表明, 某些微藻会优先利用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 且 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的存在会抑制藻细胞对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收. 本实验中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果较好, 可能影响了微藻对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除效果.

$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 是微生物许多生化反应的中间产物, 但 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的过多积累会对微生物产生毒性作用^[21], 对生化反应产生抑制, 不利于反应器的稳定运行. 如图2所示, 在反应器运行的1~10 d内, 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度几乎为0, 没有明显的积累. 第10 d后, 随着反应器内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果的提升, 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度逐渐升高, 最高可达 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 第一次排藻后, 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度略有下降, 但在第2阶段, 随着生物量和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除的升高, 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度逐渐上升至 $0.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. 第3阶段, 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度从初始的 $0.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐上升至 $0.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 宋明明^[22]的研究表明, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在藻细胞内先后被硝酸盐还原酶、亚硝酸盐还原酶还原生成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 最后以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形式被同化为氨基酸, 因此出水中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 可能是由于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化; 此外, 相比于光照培养箱无菌环境中培养微藻, 由于膜的截留作用也可以增加系统中硝化细菌的量, 反应器内不可避免会存在硝化反应, 导致了 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的生成. Praveen 等^[23]搭建了微藻光生物反应器处理三级出水, 在 HRT 为 4 d 的条件下无 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的积累. 因此, 本实验后期 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度升高可能是由于 HRT 过短导致.

反应器运行第1~4 d, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 运行至第6 d, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度下降至 $1.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的下降类似, 如图2

(b)所示. 第18 d采收微藻后, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度可稳定在 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 此后, 反应器的出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度稳定在 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下. 第38 d第二次排藻后, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 略有上升, 第48~60 d, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 维持在 $0.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 出水水质较好.

Guo 等^[24]利用亚心形扁藻对海水养殖废水进行处理, 采用序批式实验, TN 和 TP 去除速率分别为 $0.51 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $3.35 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; Praveen 等^[23]利用连续流微藻-膜生物反应器处理三级出水, TN 和 TP 去除速率分别为 $3.6 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.8 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; Gao 等^[25]采用连续流光-膜生物反应器, 微藻生长速率可达 $42.6 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, TN 和 TP 去除速率分别为 $5.85 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.42 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 通过对进出水水质的持续监测, 考察了反应器的 TN 和 TP 去除速率, 由图2可以看出, 随着微藻生物量的不断增加, TN 和 TP 去除率可达到 73.6% 和 77.9%, TN 和 TP 去除速率分别可达 $15 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $2.8 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 氮磷去除效果高于上述报道. 微藻生物量最大为 $1.4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 3个阶段的微藻平均生长速率分别为 $53.3 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $39.5 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $40 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, 与上述报道相近. 本实验设置的 N/P 约为 5.1, 在此条件下, 反应器的脱氮除磷效能和微藻生长能够达到较高的水平. 林忠洲等报道^[26], 当 N/P 值由 4.04 逐渐提高至 14.81 时, 青岛大扁藻藻密度也随之增加, 因此后期可考虑通过优化 N/P 来强化反应器的脱氮除磷效能和微藻生长情况.

2.1.2 温度和 pH 值的影响

在微藻的培养过程中, 影响微藻生长的因素众多, 其中温度和 pH 是两个重要的环境因子^[27]. 在反应器运行期间, 对反应器内温度、进出水 pH 进行了持续监测(图3). 反应器运行温度变化范围为

20~25℃, 反应器的脱氮除磷效能未受到温度波动的影响. pH 值是微藻培养中最重要的环境条件之一, 因为它决定了二氧化碳和基质的溶解度和传质效率, 对微藻的新陈代谢有重大影响^[28]. 本实验中, 当进水 pH 稳定在 7.6~7.8 之间时, 出水 pH 为 8.2~8.8, 且随着反应器氮磷去除效能的提升, 出水 pH 有升高的趋势.

苟彬等^[29]报道微藻在利用溶解性无机碳(DIC)的同时, 会导致碳酸盐体系平衡的移动和 pH 的升高; 里士曼^[30]也曾指出 CO₂ 的固定会导致 pH 逐渐上升, 在无额外的 CO₂ 供给时, 高密度藻类生产系统中 pH 可高达 11, 但过高的 pH 会影响藻细胞的生长. 本实验使用曝气(空气)设备, 无额外 CO₂ 供给, 且在无缓冲剂投加的条件下, 出水 pH 可以控制在 8.2~8.8, 说明微藻膜反应器能够为微藻的生长创造良好的环境. 如前所述, 由于硝化细菌的富集, 反应器内存在硝化反应, 硝化过程会导致反应体系 pH 下降. 相比于进水 pH, 反应器出水 pH 有明显的升高, 因此微藻在去除废水污染物的过程中发挥主要作用.

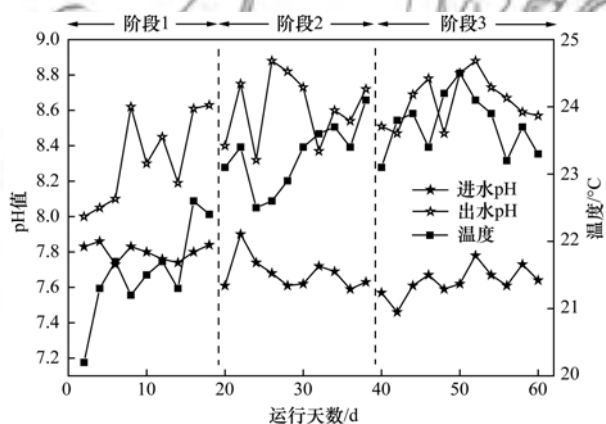


图3 反应器温度和 pH 变化

Fig. 3 Variations of temperature and pH in the reactor

2.2 微藻膜反应器膜污染特性研究

2.2.1 膜污染趋势

TMP 可以直观地反映反应器内的膜污染情况, 通过定期记录 TMP, 可以看出第 1~18 d, TMP 缓慢增长, 由 0.5 kPa 逐渐上升至 3.7 kPa, 如图 4 所示. 第 18 d 排藻后, TMP 下降至 3.1 kPa, 说明在其余条件不变时, 反应器内藻密度的下降可以在一定程度上缓解膜污染现象. 随后, TMP 逐渐增长, 第 38 d 上升为 6.9 kPa. 第二次采收微藻后, TMP 下降至 6 kPa, 在接下来的 20 d 内, TMP 缓慢增加至 14.3 kPa. 整体来看, 在反应器运行过程中, 未观察到 TMP 的跃迁, 膜污染程度较轻.

2.2.2 SMP 和 EPS 的含量变化

在反应器运行期间, 同步考察了反应器内

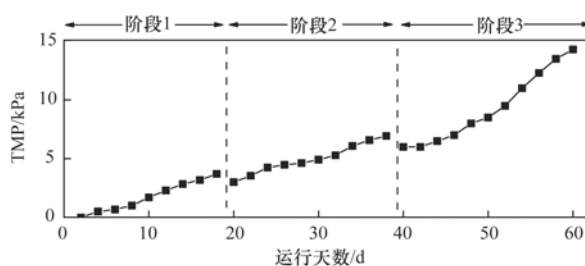


图4 反应器 TMP 的变化

Fig. 4 Variations of TMP in the reactor

SMP、EPS 和出水上清液中 SMP 浓度的变化. 由图 5 可以看出, 反应器内 SMP 和 EPS 的含量随着生物量的增加而升高. 因此, 在排藻后, 反应器内 SMP 与 EPS 的浓度也随之降低, 导致了 TMP 有所下降. 通过对比反应器内(过滤前)SMP、EPS 和出水(过滤后)SMP 的浓度, 可以看出经过膜组件过滤后, 蛋白质和多糖含量有明显地降低, 且蛋白质浓度降低较明显.

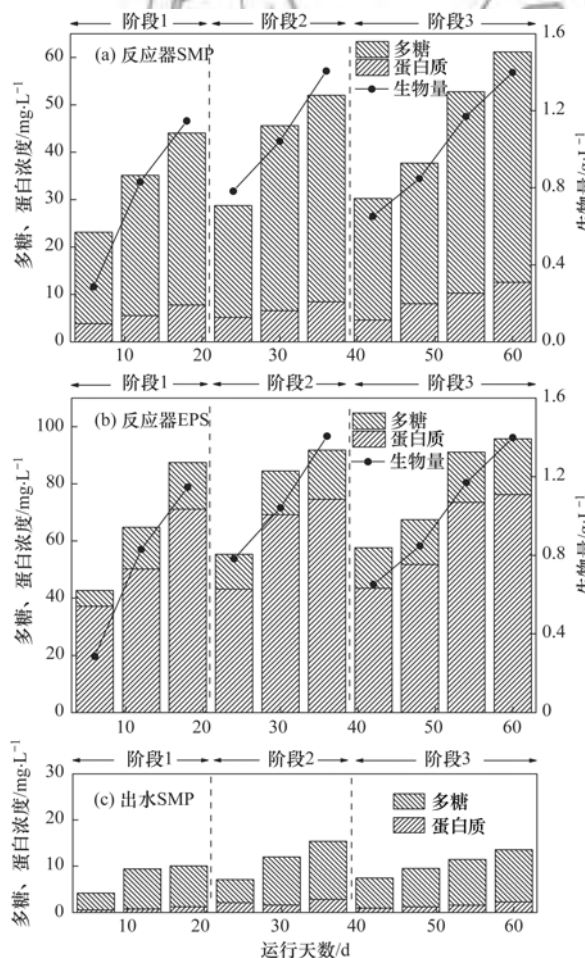


图5 反应器 SMP 和 EPS 的含量变化

Fig. 5 Variations of SMP and EPS content in the reactor

2.2.3 红外光谱和三维荧光光谱

利用红外光谱识别反应器 SMP 和 EPS 的主要官能团, 如图 6 所示. 通过分析可知, SMP 和 EPS 出峰位置类似, 大致结果如下: 在 3 300 cm⁻¹ 处对应

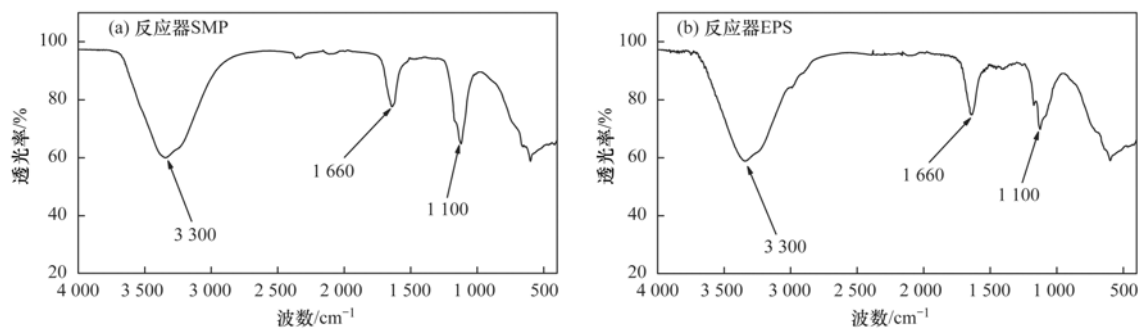


图 6 反应器内 SMP、EPS 的红外光谱

Fig. 6 FTIR spectra of SMP and EPS in the reactor

着羟基基团 O—H 的伸缩峰；在 1 660 cm⁻¹和 1 550 cm⁻¹处分别对应着蛋白质的一级 (C=O) 和二级结构 (C—N + N—H)；在 1 100 cm⁻¹处有较强的 C—O 伸缩峰，证明了糖类的存在^[31]，与上述结果一致，Sun 等^[32]在研究藻菌共生体系 SMP 特性时也发现类似的现象。

为了进一步分析反应器内 SMP 和 EPS 特性，对进出水 SMP 和反应器内 EPS 进行了三维荧光光谱分析。通过测定可知，反应器内 SMP 存在 4 个特征峰，如表 1 所示。A 峰代表色氨酸类蛋白质，B

峰代表芳香性蛋白质，C 峰代表腐殖酸类物质，D 峰代表类富里酸类物质。而反应器内 EPS 存在明显的色氨酸类蛋白质类和芳香类蛋白质特征峰，且相比于反应器内 SMP 和 EPS，出水 SMP 的 C、D 峰荧光强度略有减弱，A、B 峰荧光强度下降较明显，几乎检测不到 B 峰，说明膜组件对色氨酸类蛋白质和芳香类蛋白质的截留率较高，而腐殖酸类和类富里酸类物质分子较小，易通过薄膜^[33]，因此出水 SMP 中 C、D 峰强度无明显衰减。综上可知，色氨酸类蛋白质和芳香类蛋白质是造成膜污染的重要因素。

表 1 SMP 和 EPS 的荧光波谱参数

项目	A 峰		B 峰		C 峰		D 峰	
	$E_x/E_m/\text{nm}$	荧光强度	$E_x/E_m/\text{nm}$	荧光强度	$E_x/E_m/\text{nm}$	荧光强度	$E_x/E_m/\text{nm}$	荧光强度
反应器 SMP	280/310	354.1	230/330	119.8	340/410	118.6	270/430	131.2
反应器 EPS	280/310	200.6	230/330	143.9	—	—	—	—
出水 SMP	280/310	148.7	—	—	340/380	92.9	270/430	109.8
SMP(ASB-MBR ^[32])	280/328	507.2	—	—	360/442	561.6	270/450	458.8
SMP(S-MBR ^[33])	280/326	251.6	235/340	184.3	—	—	—	—
EPS(ASB-MBR ^[32])	275/344	536.9	230/340	292.4	—	—	—	—
EPS(S-MBR ^[33])	280/346	486.4	225/338	431.3	—	—	—	—

Sun 等^[32]探究了藻菌共生膜反应器中的 SMP、EPS 特性，在 SMP 样品中检测到了 A 峰 (280/328)、C 峰 (360/442)、D 峰 (270/450)，EPS 样品中检测到了 A 峰 (275/344)。相比于其他报道^[32,33]，如表 1 所示，本实验中荧光峰的位置出现蓝移，蓝移与大分子的破碎相关^[31]，这可能是反应器膜污染周期较长的重要原因。

3 结论

(1)室温下，微藻膜反应器对海水养殖废水中 NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 的去除效果较好，在 HRT 为 1d 的条件下，TN 和 TP 去除率分别为 73.6% 和 77.9%，TN 和 TP 去除速率达到 15 g·(m³·d)⁻¹ 和 2.8 g·(m³·d)⁻¹。

(2)经过 60 d 的运行，微藻生物量最大为 1.4 g·L⁻¹，最大生长速率为 53.3 mg·(L·d)⁻¹，且微藻

的采收未影响反应器的脱氮除磷效能。

(3)随着反应器内微藻生物量的上升，SMP 和 EPS 的浓度显著增加，微藻的采收可以在一定程度上减轻膜污染现象。微藻膜反应器的膜污染程度较轻，色氨酸类蛋白质和芳香类蛋白质是造成膜污染的重要因素。

参考文献：

[1] Jin Y C, Fu J L, Chen R Y, *et al.* Ammonium and phosphorus recovery and electricity generation from mariculture wastewater by the seawater battery[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, **160**: 396-402.

[2] Li S, Zhang S H, Ye C S, *et al.* Biofilm processes in treating mariculture wastewater may be a reservoir of antibiotic resistance genes[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **118** (1-2): 289-296.

[3] 何晶晶, 王颖, 胡洁, 等. 应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥[J]. *环境科学*, 2016, **37** (11): 4317-4325.

He J J, Wang Y, Hu J, *et al.* Biological pre-treatment of surplus sludge using the protease-secreting bacteria[J]. *Environmental*

- Science, 2016, **37**(11): 4317-4325.
- [4] Duan J M, Fang H D, Su B, *et al.* Characterization of a halophilic heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium and its application on treatment of saline wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **179**(3): 421-428.
- [5] 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.
- [6] Suresh Kumar K, Dahms H U, Won E J, *et al.* Microalgae-A promising tool for heavy metal remediation [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **113**: 329-352.
- [7] Milano J, Ong H C, Masjuki H H, *et al.* Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **58**: 180-197.
- [8] Barros A I, Gonçalves A L, Simões M, *et al.* Harvesting techniques applied to microalgae: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **41**: 1489-1500.
- [9] Kunjapur A M, Eldridge R B. Photobioreactor design for commercial biofuel production from microalgae [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, **49**(8): 3516-3526.
- [10] Yang S, Xu J, Wang Z M, *et al.* Cultivation of oleaginous microalgae for removal of nutrients and heavy metals from biogas digestates [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **164**: 793-803.
- [11] Da Fontoura J T, Rolim G S, Farenzena M, *et al.* Influence of light intensity and tannery wastewater concentration on biomass production and nutrient removal by microalgae *Scenedesmus* sp. [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, **111**: 355-362.
- [12] Tan F, Wang Z, Zhouyang S Y, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal coupled with carbohydrate production by five microalgae cultures cultivated in biogas slurry [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **221**: 385-393.
- [13] Liu J Z, Wu Y H, Wu C X, *et al.* Advanced nutrient removal from surface water by a consortium of attached microalgae and bacteria: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **241**: 1127-1137.
- [14] 王芳, 李之鹏, 徐仲, 等. AF-MBR 处理海水养殖废水性能及膜污染特性 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(5): 1760-1766.
- Wang F, Li Z P, Xu Z, *et al.* Studies on the nitrogen removal performance and membrane fouling characteristics of AF-MBR for mariculture wastewater treatment [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(5): 1760-1766.
- [15] 董秉直, 高昊旻, 胡孟柳. 臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2732-2739.
- Dong B Z, Gao H Y, Hu M L. Effects and mechanism of the combination of ozone-PAC as a pretreatment for the reduction of membrane fouling [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2732-2739.
- [16] 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 等. ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5154-5161.
- Lv L, Zhao S H, Wei J M, *et al.* Realization of shortcut nitrification in the ABR-MBR process treating domestic wastewater [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5154-5161.
- [17] 国家海洋局. 海洋监测规范 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [18] 郭迪. 电化学技术去除海水养殖废水中氨氮的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016. 18-19.
- [19] 雷国元. 大型丝状绿藻去除氮磷和抑制微藻的特性及其作用机制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. 42-44.
- [20] 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.
- [21] 马航, 朱强, 朱亮, 等. 硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3094-3100.
- Ma H, Zhu Q, Zhu L, *et al.* Feasibility of sulfur-based autotrophic denitrification of photovoltaic wastewater containing high fluorine [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3094-3100.
- [22] 宋明明. 高产油脂能源微藻筛选及其脱氮除磷与油脂积累的优化研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016. 11-12.
- [23] Praveen P, Loh K C. Nitrogen and phosphorus removal from tertiary wastewater in an osmotic membrane photobioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **206**: 180-187.
- [24] Guo Z, Liu Y, Guo H Y, *et al.* Microalgae cultivation using an aquaculture wastewater as growth medium for biomass and biofuel production [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(S1): S85-S88.
- [25] Gao F, Li C, Yang Z H, *et al.* Continuous microalgae cultivation in aquaculture wastewater by a membrane photobioreactor for biomass production and nutrients removal [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **92**: 55-61.
- [26] 林忠洲, 徐善良, 邵波, 等. 不同氮磷质量浓度下青岛大扁藻和牟氏角毛藻的种间竞争关系 [J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2013, **26**(1): 12-17.
- Lin Z Z, Xu S L, Shao B, *et al.* The competitive relationship of *Platymonas helgolandica* var. *tsingtaoensis* and *Chaetoceros muelleri* Lemmerman in different mass concentrations of nitrogen and phosphorus [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2013, **26**(1): 12-17.
- [27] Singh N K, Dhar D W. Microalgae as second generation biofuel. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, **31**(4): 605-629.
- [28] Qiu R H, Gao S, Lopez P A, *et al.* Effects of pH on cell growth, lipid production and CO₂ addition of microalgae *Chlorella sorokiniana* [J]. *Algal Research*, 2017, **28**: 192-199.
- [29] 苟彬, 高永利, 殷克东, 等. 不同无机氮浓度下中肋骨条藻和三角褐指藻生长对生长环境 pH 的影响 [J]. *热带海洋学报*, 2011, **30**(3): 82-87.
- Gou B, Gao Y L, Yin K D, *et al.* Effects of growth of *Skeletonema costatum* and *Phaeodactylum tricornutum* on medium pH in different initial inorganic nitrogen concentrations [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, **30**(3): 82-87.
- [30] 里士曼 A. 微藻培养指南: 生物技术与应用藻类学 [M]. 黄和, 高振, 宋萍, 译. 北京: 科学出版社, 2014. 74-75.
- [31] 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.
- [32] Sun L, Tian Y, Zhang J, *et al.* A novel membrane bioreactor inoculated with symbiotic sludge bacteria and algae: performance and microbial community analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **251**: 311-319.
- [33] 李之鹏. 膜生物反应器-蠕虫床耦合系统中 EPS 的膜污染行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. 36-38.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)