

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征

李翔^{1,2}, 李致春^{1,2,3}, 汪旋^{1,2}, 张思远^{1,2}, 王慧敏¹, 厉荣强¹, 王国祥^{1,2*}, 李启蒙^{1,2}

(1. 南京师范大学环境学院, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 江苏省水土环境生态修复工程实验室, 南京 210023; 3. 宿州学院环境与测绘工程学院, 宿州 234000)

摘要: 为探究蓝藻水华衰亡过程中溶解性有机物(DOM)的迁移转化机制, 本文对蓝藻衰亡过程进行室内模拟实验, 基于紫外-可见光谱(UV-vis)和三维荧光光谱(EEMs)表征上覆水溶解性有机物的光谱特征, 同时分析水质理化指标及溶解性有机碳(DOC)、溶解性无机碳(DIC)含量变化。结果表明, 蓝藻衰亡初期阶段释放出大量有机质, 溶解氧(DO)急剧降低, 随着反应时间延长, DOC逐渐转变为DIC, 改变了水体氧化还原环境和酸碱环境; UV-vis光谱显示蓝藻衰亡释放出大量芳香性很高、腐殖化程度高的DOM, 并且DOM随反应时间被逐渐降解。通过三维荧光光谱平行因子分析(EEM-PARAFAC), 解析出3种荧光组分, 分别为难降解的类腐殖质(C1), 藻类产生的类蛋白质色氨酸(C2), 以及与微生物活动有关的类腐殖质富里酸(C3)。蓝藻衰亡产生的类蛋白质大部分被微生物降解成类富里酸, 异养型微生物促进了藻源性DOM的生成, 同时也加快了对新生DOM的降解。蓝藻衰亡产生的DOM最终大部分转化为较难降解类腐殖质。对水质参数、UV-vis光谱和EEMs光谱参数进行相关性分析可知, ORP与DO呈显著正相关($P < 0.05$), pH与DOC呈显著负相关($P < 0.05$), 与DOC向DIC转变趋势相吻合; C1与 $F_{n_{355}}$ 有显著正相关关系($P < 0.05$), C2与DOC和 $F_{n_{280}}$ 都有显著正相关关系($P < 0.05$), C3与FI、BIX以及 $\beta:\alpha$ 呈显著正相关($P < 0.05$), 这些光谱参数的变化趋势与DOM组分变化一致。综上所述, 通过对蓝藻水华衰亡过程中上覆水DOM的水质特征和光谱特征的探究, 为分析湖泊DOM的动态迁移转化和碳循环的变化提供技术支持。

关键词: 蓝藻水华; 溶解性有机物(DOM); 上覆水; 平行因子分析(PARAFAC); 相关性分析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3281-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011241

Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay

LI Xiang^{1,2}, LI Zhi-chun^{1,2,3}, WANG Xuan^{1,2}, ZHANG Si-yuan^{1,2}, WANG Hui-min¹, LI Rong-qiang¹, WANG Guo-xiang^{1,2*}, LI Qi-meng^{1,2}

(1. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Jiangsu Engineering Laboratory of Water and Soil Eco-remediation, Nanjing 210023, China; 3. School of Environment and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, China)

Abstract: In this study, indoor simulation experiments were performed to elucidate the effects of migration and transformation of dissolving organic matter (DOM) during the decay of algal blooms. Based on ultraviolet-visible spectra (UV-vis) and excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs), spectral characterizations of dissolved organic matter (DOM) in overlying water were evaluated with analyses of the physical and chemical indexes, variation in dissolved organic carbon (DOC), and variation in dissolved inorganic carbon (DIC). Results showed that at the early stage of decay, a large amount of organic matter was released, and dissolved oxygen (DO) decreased sharply. With the extension of reaction time, DOC gradually changed into DIC, which further changed the oxidation-reduction and acid-base characteristics of the water. UV-vis spectra showed that a large amount of DOM was released with high aromaticity and a high degree of humification, and the released DOM was gradually degraded. With the application of parallel factor analysis in excitation-emission matrix spectroscopy (EEM-PARAFAC), three fluorescence components were analyzed: refractory humic-like substances (C1), protein-like tryptophan substances (C2) produced by algae, and fulvic-like substances (C3) related to microbial activities. Most protein-like tryptophan substances were degraded into fulvic-like substances by microorganisms during the decaying process. Heterotrophic microorganisms promoted the release of algae-derived DOM and accelerated the degradation of DOM. The DOM born during algae blooms decaying process was eventually converted into humic-like substance, which was difficult to be degraded. We analyzed correlations of water quality, UV-vis spectrum, and EEMs parameters. Results showed that ORP was positively correlated ($P < 0.05$) with DO. There was a significant negative correlation ($P < 0.05$) between pH and DOC, which was consistent with the trend of the transformation to from DOC to DIC; C1 was positively correlated ($P < 0.05$) with $F_{n_{355}}$; and C2 was significantly positively correlated ($P < 0.05$) with DOC and $F_{n_{280}}$; C3 was positively correlated ($P < 0.05$) with FI, BIX and $\beta:\alpha$. The variation trend of these spectral parameters was consistent with that of DOM components. In summary, with the analyses of water quality characteristics and spectral

收稿日期: 2020-11-28; 修订日期: 2020-12-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-003); 国家自然科学基金项目(41971043); 安徽省高等学校自然科学研究重点项目(KJ2019A0667); 安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyqZD2020047)

作者简介: 李翔(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: 763225180@qq.com

* 通信作者, E-mail: guoxiangwang@yeah.net

characteristics of DOM in overlying water during algae blooms decaying process, it was expected that our results could contribute to the further exploration of the dynamic migration and transformation of lake DOM and the changes of carbon cycling.

Key words: algae blooms; dissolved organic matter (DOM); overlying water; parallel factor analysis (PARAFAC); correlation analysis

富营养化湖泊蓝藻水华暴发时期,大量藻类碎屑聚集、沉降和分解(蓝藻水华衰亡),造成水质严重恶化^[1,2].有机碳作为湖泊碳循环的关键组分,藻源性有机碳的迁移和转化显著改变了湖泊碳循环强度^[3,4].由于蓝藻衰亡会释放大量的藻内含物到上覆水中,这些藻内含物会生成各种次级代谢产物^[5].蓝藻水华衰亡过程影响着诸如光化学反应、微生物生长和污染物迁移等重要生物地球化学过程,因此探究蓝藻水华衰亡过程中溶解性有机物的迁移转化对于湖泊生态学研究有重要的意义.

蓝藻衰亡释放出的溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)^[6,7]含有多种复杂成分,主要由类腐殖质(占50%~80%)、类蛋白质以及碳水化合物等组成^[8,9],其迁移和转化对于湖泊碳循环有重要意义.紫外-可见吸收光谱(UV-visible absorption spectroscopy, UV-vis)和三维荧光光谱(excitation-emission matrix spectroscopy, EEMs)能快速对有机物进行定性和定量判别,并且可以方便快捷地揭示DOM的化学特性^[10,11].Li等^[12]的研究利用 a_{254} 、E2/E3和E3/E4等UV-vis光谱的特征参数定量描述DOM特征.Stedmon等^[13]把平行因子分析法(parallel factor analysis, PARAFAC)应用到三维荧光光谱的分析中,对于叠加的荧光峰进行准确的识别,增强了荧光光谱的定量译制能力^[14].

近年来,国内外学者对于自然水体中DOM的时空分布和来源影响进行了大量研究^[9,15~17],但对于实验模拟验证DOM的来源、迁移转化和对溶解性碳的影响鲜见报道^[18].室内模拟实验是接近原位情况下,通过自由设定条件,来表征各种驱动因素的影响.相较于野外干扰因素太多,室内模拟实验能够较准确分析驱动因素,从而深入研究整个变化过程.本研究通过室内模拟蓝藻水华衰亡过程,探究上覆水中的溶解性氧(dissolved oxygen, DO)、氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)和pH等水质参数变化,并通过UV-vis光谱及EEMs光谱探究蓝藻水华衰亡过程中上覆水DOM动态变化特征,进而深入认识湖泊富营养化过程对湖泊碳循环的影响机制.

1 材料与方法

1.1 实验系统建立

2018年7月中旬,在太湖竺山湾符渚港附近

开阔水域(N31°24'38.40", E120°02'12.45")使用彼得森采泥器采集表层0~20 cm的沉积物.同时,原位采集符渚港湖水样品及新鲜蓝藻样品,分别装入不同塑料桶中,采集当天运回实验室以建立实验系统.

在实验室中,将采集的沉积物样品过100目筛后去除杂质并充分混匀,将湖水通过300目尼龙网布过滤.向每根直径6.5 cm、高30 cm的有机玻璃管中添加300 g混匀的沉积物样品,并加入560 mL湖水,不加盖.将装好水样和沉积物的有机玻璃管垂直放入装有加热棒的水箱中进行水浴,温度始终控制在 $(28 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,期间每天测定上覆水理化指标,观察平行样品差异性.

水-沉积物系统建立完毕后放置一周,待测定各项理化指标包括pH、DO和ORP基本稳定后,再进行蓝藻添加.本研究实验组分为加藻组(M)和对照组(K),加藻组通过加入新鲜蓝藻150 g模拟野外条件蓝藻水华衰亡分解,用磁力搅拌器将藻浆混合均匀,而对照组不加蓝藻作为空白对照,如图1所示.

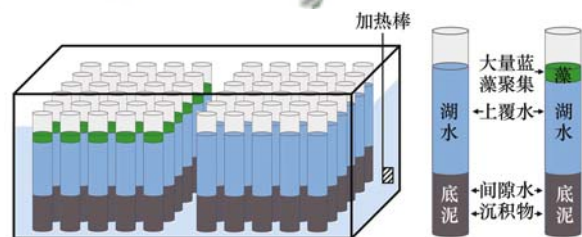


图1 蓝藻水华衰亡过程室内模拟实验系统设计

Fig. 1 Design of indoor simulation experiment system for the decaying process of algal blooms

蓝藻分解阶段过程中每天根据实际情况用5~10 mL高纯水补充上覆水水量以保证实验正常运行.每次采样,分别同时采集加藻组3根有机玻璃管和对照组3根有机玻璃管中的上覆水样品,采集的上覆水是沉积物以上5~10 cm处的水^[19,20],保证样品测定指标平行性质量控制,在蓝藻消失前(第1、3、5、9、13 d)、蓝藻消失后(第13、18、22 d)和实验后期(第31、46、61 d)分别采集样品,实验期间共采样10次.实验过程中,添加蓝藻前采样1次,观察上覆水表层蓝藻从投加开始直至腐解为无明显团状蓝藻漂浮时实验结束.

1.2 上覆水理化指标测定方法

上覆水DO、ORP和pH指标应用美国Hach公

司校准的探针进行测定. 上覆水经孔径 0.7 μm Whatman 玻璃纤维滤膜 (450℃ 灼烧 4 h) 过滤后用碳氮元素分析仪 (Multi N/C 3100; AnalytikJena, 德国) 测定溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 的含量. 测定方法为燃烧氧化-非分散红外吸收法, 定量方法为差减法, 即先测得总溶解性碳 (total dissolved carbon, TDC) 浓度, 然后测得溶解性无机碳 (dissolved inorganic carbon, DIC) 浓度, 通过 TDC 浓度减去 DIC 浓度获得 DOC 浓度.

表 1 紫外-可见光谱和三维荧光光谱相关参数描述

Table 1 Description of ultraviolet-visible absorption spectrum parameters and fluorescence spectrum parameters		
光谱参数	参数定义	参数描述
吸收系数 $a_{(\lambda)}$	$a_{(\lambda)} = 2.303 \cdot D_{(\lambda)} / r$, $D_{(\lambda)}$ 为吸光度, r 为光程路径, 单位为 m	a_{254} 和 a_{355} 表征 DOM 浓度 ^[17]
E2/E3	250 nm 和 365 nm 处的紫外吸光度之比	与 DOM 相对分子质量呈负相关 ^[21]
E3/E4	300 nm 和 400 nm 处的紫外吸光度之比	与腐殖化程度呈负相关, E3/E4 < 3.5 时腐殖化程度较高, E3/E4 > 3.5 时腐殖化程度较低 ^[12]
URI	210 nm 和 254 nm 处的紫外吸光度之比	与 DOM 芳香性呈负相关 ^[22]
荧光指数 (FI)	$E_x = 370 \text{ nm}$, E_m 在 470 nm 与 520 nm 处的荧光强度比值	判定 DOM 腐殖质的来源和特性 ^[23,24]
腐殖化指数 (HIX)	$E_x = 254 \text{ nm}$, E_m 为 435 ~ 480 nm 和 300 ~ 345 nm 波段内的荧光强度积分值的比值	表征 DOM 腐殖化程度 ^[25]
生物源指数 (BIX)	$E_x = 310 \text{ nm}$ 时, E_m 在 380 nm 和 430 nm 处荧光强度的比值	衡量内源物质对 DOM 的相对贡献 ^[26]
新鲜度指数 ($\beta:\alpha$)	$E_x = 310 \text{ nm}$ 时, E_m 在 380 nm 处荧光强度与 E_m 在 420 ~ 435 nm 区间最大荧光强度的比值	反映新生 DOM 的比例占整体 DOM 比例 ^[27]
Fn_{280}	$E_x = 280 \text{ nm}$ 时, E_m 在 340 ~ 360 nm 间最大荧光强度	代表类蛋白质相对浓度水平 ^[28]
Fn_{355}	$E_x = 355 \text{ nm}$ 时, E_m 在 440 ~ 470 nm 间最大荧光强度	代表类腐殖质的相对浓度水平 ^[28]

1.4 数据分析

三维荧光光谱测定结果扣除 Milli-Q 超纯水数据以去除拉曼散射影响, 并结合 Delaunay 三角形内插值法^[29] 修正去除瑞利散射. 利用 MATLAB 2019a 软件对光谱数据进行平行因子分析, 采用 N-way 和 DOMFluor 工具箱^[13], 利用拉曼光谱数据对荧光强度进行 Raman 归一化处理以消除样品浓度带来的光谱影响, 并通过核一致性分析确定荧光组分, 利用折半性来分析结果的可靠性. 应用 R 软件对上覆水 DOM 的特征参数进行相关性分析, 利用 Origin 软件绘制相关图形.

2 结果与讨论

2.1 蓝藻不同衰亡阶段上覆水 DO、ORP、pH 和 DOC 变化

在蓝藻衰亡阶段, 加藻组上覆水的理化指标出现了明显变化 (图 2). 加藻组上覆水的初始 DO 为 3.04 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 0 ~ 3 d 迅速降低, 在第 3 d 降低到 0.23 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明蓝藻降解释放大量 DOC 消耗大量氧气, 引起水体缺氧^[30,31]. 在第 5 ~ 31 d, DO 浓度维持在最低的浓度水平, 蓝藻持续降解消耗 DO. 在第 31 d 后, 上覆水的 DO 浓度逐渐增加并恢复到正常水平. 对照组的 DO 总体看来是呈上升趋势的. 加

1.3 光谱及相关指数测定

紫外吸收光谱采用分光光度计 (UV-6100; MAPADA, 上海) 测定, 用 Milli-Q 超纯水作空白, 用 10 mm 石英比色皿在扫描波长为 200 ~ 800 nm 范围内测定吸光度, 扫描间隔为 1 nm. 三维荧光光谱采用荧光分光光度计进行测定. 设定激发波长 (E_x) 为 200 ~ 500 nm, 波长间隔为 5 nm; 发射波长 (E_m) 为 250 ~ 600 nm, 波长间隔为 0.1 nm, 扫描速度为 1 200 $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$. 光谱相关参数如表 1 所示.

藻组上覆水的初始 ORP 为 241 mV, 在 0 ~ 3 d 降低到最低 -307 mV, 随后缓慢上升直至 183 mV 与对照组相近, 说明蓝藻在前 3 d 内氧化分解使得 ORP 降低. 对照组的 ORP 一开始也是逐渐下降的, 可能是系统中原有的有机物造成 ORP 降低. 实验开始时, 水体呈碱性, 加藻组的初始 pH 为 7.29, 在 0 ~ 5 d 逐渐降低, 在第 5 d 降低到最低 6.01, 表明蓝藻开始降解时其含有的蛋白质、脂类和糖类物质发生降解, 这三大物质降解会产生许多次级代谢产物如有机酸^[32], 使水体变成酸性; 在第 5 d 后 pH 逐渐上升, 最后稳定在 7.5 ~ 8 之间. 对照组的 pH 先升高后降低, 始终稳定在 7 ~ 8 之间.

图 3 是上覆水 DOC 和 DIC 浓度随时间的变化情况. 对照组的 DOC 和 DIC 在整个实验过程中基本保持不变, 平均值分别为 7.20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 23.32 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 加藻组的 DOC 在 1 ~ 9 d 迅速升高, 在第 9 d 达到最大值 129.77 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随后 DOC 浓度逐渐降低; 而 DIC 浓度在第 22 d 达到最大值 64.12 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 说明蓝藻降解在前 9 d 内释放大量 DOC, 随后 DOC 逐渐转化为 DIC, 同时使得水体 pH 下降. 前人的研究表明 DOC 向 DIC 转化的趋势可能与微生物活动有关^[4,30], 微生物促进了溶解性腐殖质的矿化^[33]. 综合理化指标和碳浓度变化情况可知, 蓝

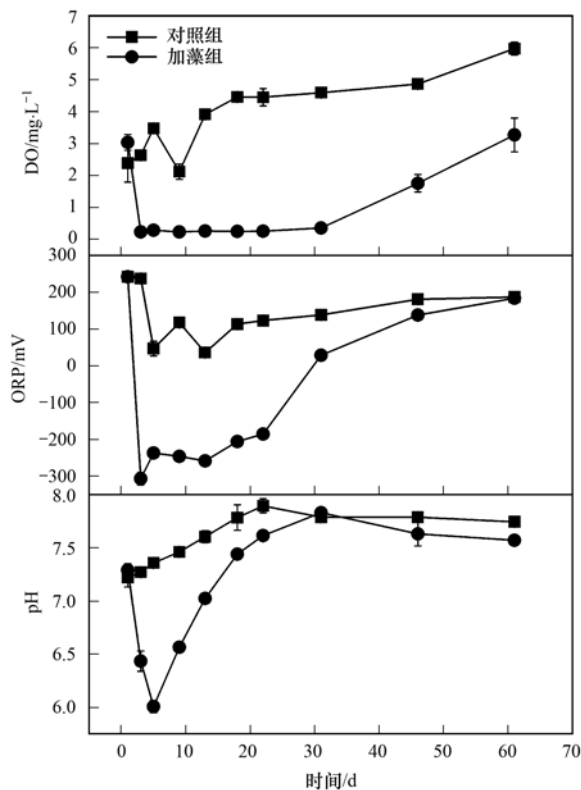


图2 蓝藻衰亡过程中上覆水 DO 浓度、ORP 和 pH 变化

Fig. 2 Variations in DO, ORP, and pH of overlying water during algal bloom decay

藻降解消耗 DO 并释放大量的 DOC, DOC 向 DIC 转化改变了水体氧化还原环境和酸碱环境^[4]。

2.2 蓝藻不同衰亡阶段上覆水紫外-可见吸收光谱分析

UV-vis 光谱可以反映水样中 DOM 的紫外吸收特性^[34]。对比蓝藻不同衰亡阶段上覆水在 240 ~ 300

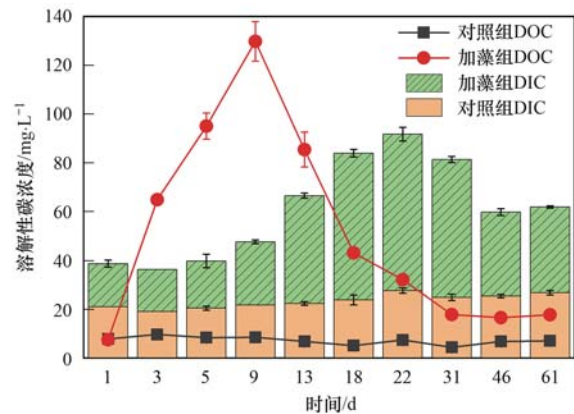


图3 蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性碳(DOC 和 DIC)的变化

Fig. 3 Variations in dissolved carbon (DOC & DIC) of overlying water during algal bloom decay

nm 的紫外吸收光谱[图 4(a)],第 5 ~ 22 d 的吸光度比其余时间的吸光度明显要高,说明蓝藻衰亡过程中产生芳香性高、结构复杂的难降解有机物。

本研究用 a_{254} 和 a_{355} [图 4(b) 和 4(c)] 表示 DOM 的相对浓度,加藻组的 a_{254} 和 a_{355} 都在前 5 d 内升高,在第 5 d 分别达到最大值 132.08 m^{-1} 和 42.72 m^{-1} ,随后都在第 5 d 后逐渐下降,说明实验前期蓝藻分解释放大量 DOM^[35]。

为了进一步分析上覆水 DOM 的特性,本研究分析了紫外-可见光谱中相关参数,具体包括 E2/E3、E3/E4 和 URI 的变化情况,用来分析水体 DOM 腐殖质的腐殖化程度、芳香性、相对分子质量以及来源。如图 4(e) 所示,第 1 d 后加藻组的 E2/E3 (平均值为 4.22) 明显小于对照组 (平均值为 6.28),加藻

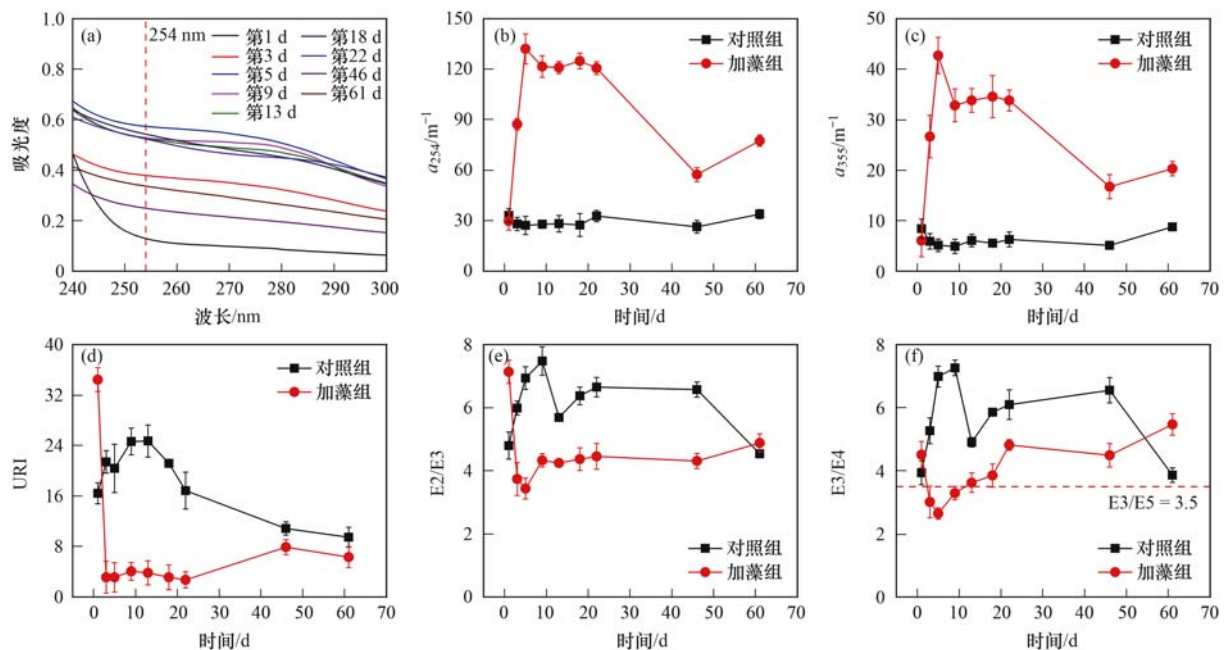


图4 蓝藻衰亡过程中上覆水 UV-vis 吸收光谱参数变化

Fig. 4 Variations in UV-vis absorption spectrum parameters of overlying water in algal bloom decay

组的 E2/E3 在第 5 d 最低为 3.44, E2/E3 与 DOM 的分子量呈反比^[21], 表明加藻组在蓝藻开始分解后产生大量分子量较高的 DOM. E3/E4 用来衡量腐殖质的腐殖化程度、芳香性以及相对分子质量等, 与腐殖化程度呈负相关, 一般而言, 当 E3/E4 < 3.5 时腐殖质以腐殖酸为主, E3/E4 > 3.5 时以富里酸为主^[12]. 如图 4(f) 所示, 实验全程对照组的 E3/E4 (平均值为 5.85) 均大于 3.5, 且明显高于加藻组 (平均值为 3.90), 说明加藻组的腐殖化程度较高, 在第 3 ~ 9 d 加藻组的 E3/E4 小于 3.5 (第 5 d 的最低值为 2.64) 表明这段时间内 DOM 以腐殖酸为主. URI 与芳香性呈负相关^[22], 如图 4(d) 所示, 第 1 d 后加藻组的 URI (平均值为 4.28) 明显小于对照组 (平均值为 18.70), 加藻组的 URI 在第 3 ~ 22 d 维持在 3.12 ~ 4.07 之间, 说明这段时间 DOM 的芳香性很高. 总的来说, 蓝藻衰亡释放出大量芳香性很高、腐殖化程度高的 DOM^[36], 并且 DOM 在实验中后期被逐渐降解^[37].

2.3 不同蓝藻衰亡阶段上覆水荧光参数分析

本文对上覆水 DOM 的荧光光谱特征参数进行了分析, 结果如图 5 所示. 荧光指数 FI 可以表征 DOM 中腐殖质的来源, FI > 1.9 表示以微生物代谢自生源为主^[23]. 由图 5(a) 可知, 加藻组的 FI (平均值为 3.32) 在实验全程均大于 1.9 且明显高于对照组 (平均值为 2.84), 说明加藻组 DOM 中的腐殖质是由微生物代谢自身产生的. 腐殖化指数 HIX 用来表征 DOM 腐殖化程度, HIX < 4 表示腐殖化程度较弱且腐殖质以自生源为主^[25]. 由图 5(b) 可知, 在第

3 ~ 13 d 加藻组的 HIX (平均值为 3.48) 均小于 4, 说明蓝藻降解时腐殖质主要由自身降解产生. BIX 用于衡量内源物质对水体 DOM 的相对贡献, BIX > 1 表示 DOM 的新生自生源占主要贡献, 0.6 ~ 0.7 表示自生源较少^[26], 由图 5(c) 可知, 第 3 ~ 13 d 加藻组的新生 DOM 较多. 新鲜度指数 $\beta:\alpha$ 反映了新生 DOM 在整体 DOM 中所占的比例^[27], 如图 5(d) 所示, 第 1 ~ 22 d 加藻组的 $\beta:\alpha$ (平均值为 0.82) 高于其余时间段, 且比同时间段对照组的 $\beta:\alpha$ (平均值为 0.69) 高, 表明加藻组新生成的 DOM 较多. F_{n280} 和 F_{n355} 分别表示类蛋白质和类腐殖质的相对浓度水平^[28]. 由图 5(e) 和图 5(f) 可知, 实验全程对照组的 F_{n280} 和 F_{n355} 基本保持不变, 说明对照组的类蛋白质和类腐殖质的相对浓度无明显变化. 加藻组的 F_{n280} 在第 1 ~ 9 d 持续增加, 在第 9 d 达到最大值 3439.12, 随后迅速降低至 351.22, 说明蓝藻分解初期会释放大类蛋白质并在随后被逐渐降解. 加藻组的 F_{n355} 在第 1 ~ 9 d 持续增加, 在第 9 d 达到最大值 1904.56, 随后缓慢降低至 1211.64, 说明蓝藻分解也会产生类腐殖质并被缓慢降解. 结合 F_{n280} 和 F_{n355} 的数据, 可以看出蓝藻衰亡释放出的类蛋白质会转化为类腐殖质^[18].

通过 PARAFAC 对上覆水进行三维荧光解析, 基于多种诊断标准和分割验证, 建立了 3 组分模型, 3 个组分的荧光光谱如图 6 所示. 导出荧光组分与 OpenFluor 数据库^[38]进行了交叉引用, 这为这些有机荧光载体与全球其他研究报告的类似物提供了背景, 表 2 列出了这 3 个组分的荧光组分特征.

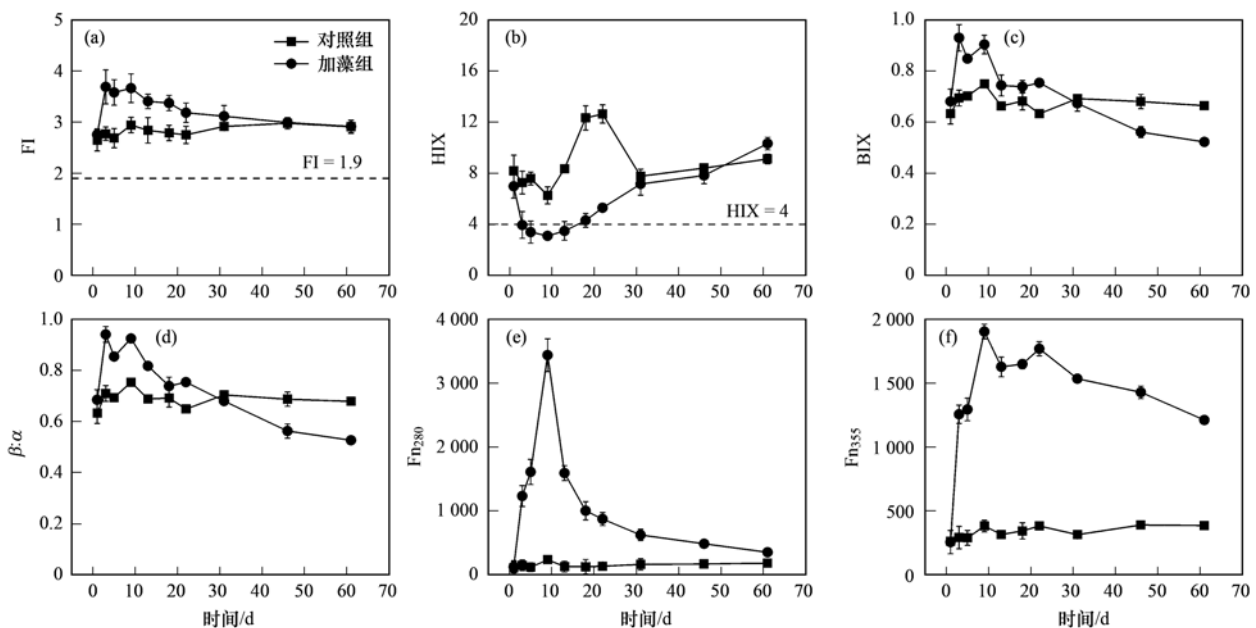
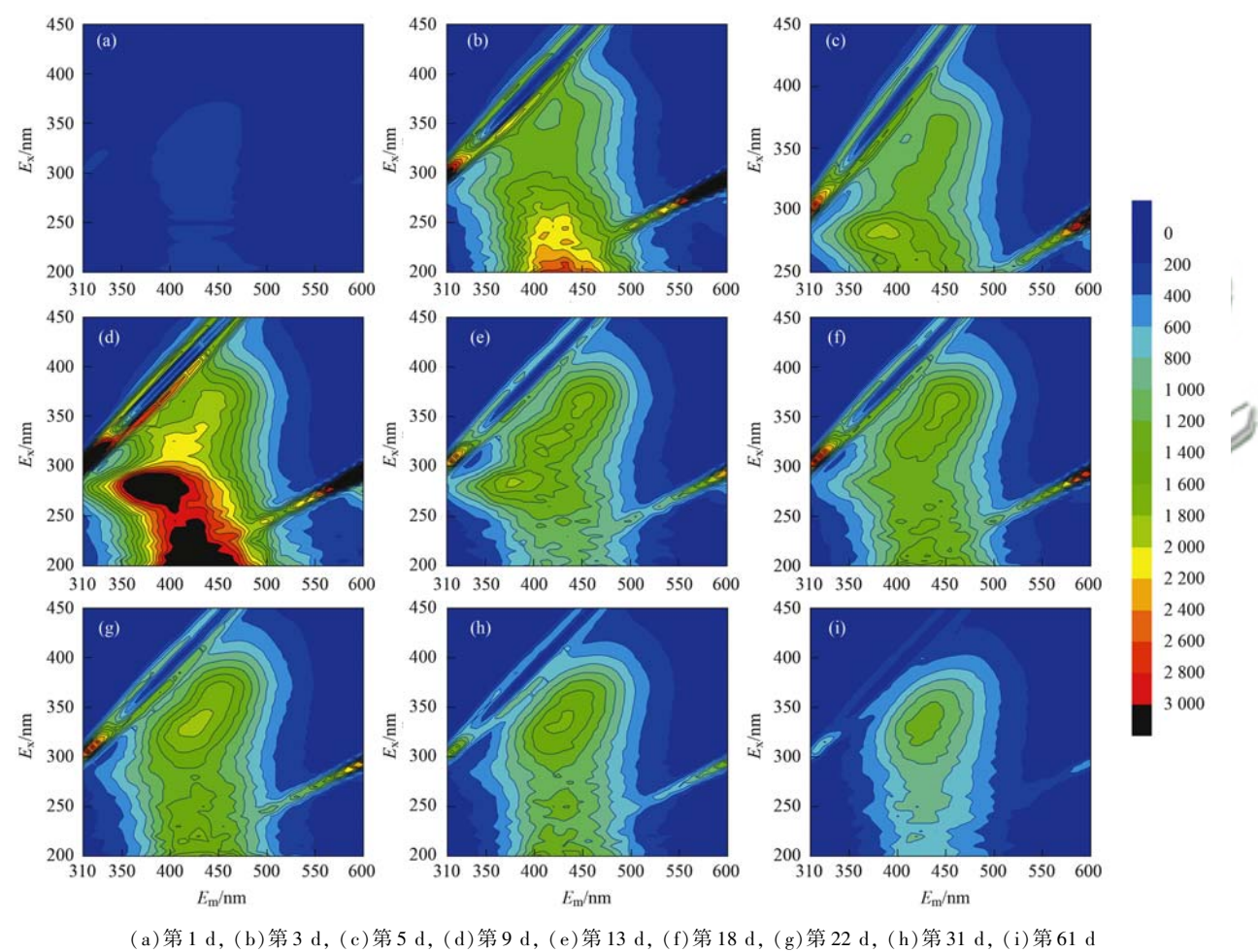


图 5 蓝藻衰亡过程中上覆水三维荧光光谱参数变化

Fig. 5 Variations in fluorescence spectrum parameters of overlying water during algal bloom decay

表 2 上覆水样品 DOM 的荧光组分特征

组分	$(E_x/E_m)/\text{nm}$		基本描述
	本研究	其他研究	
C1	350 (270)/450	340/450 ^[39]	陆源类腐殖质
		365 (265)/472 ^[40]	
		345 (250)/438 ^[41]	
C2	280 (340)/375	280/364 ^[41]	浮游植物产生的类蛋白质色氨酸
		(270 ~ 295)/(330 ~ 380) ^[15,42]	
		280/350 ^[17]	
C3	220/420	220/430 ^[43]	微生物活动有关的类腐殖质富里酸
		<260/412 ^[39,44]	



(a)第1 d, (b)第3 d, (c)第5 d, (d)第9 d, (e)第13 d, (f)第18 d, (g)第22 d, (h)第31 d, (i)第61 d

图 6 蓝藻衰亡过程中加藻组上覆水 EEM 光谱变化

Fig. 6 Variations in fluorescence spectrum of overlying water in the group with added algae biomass during algal bloom decay

解析出的组分中包含 2 个组分为类腐殖质(C1 和 C3)和 1 个类蛋白质组分(C2),如图 7 所示. 其中,组分 C1 $[E_x/E_m = 350\ (270)/450\ \text{nm}]$ 含有两个峰[图 7(a)],分别属于可见区类腐殖质类荧光峰 C 和紫外区腐殖质荧光峰 A^[24],体现长波类腐殖质的荧光特性,主要是水体自生及人类活动影响产生. 类腐殖酸是一类含有大量长链烷烃和少量芳香基和碳水化合物的物质,是由于有机质不完全分解而产生,代表较难降解的 DOM^[15]. 组分 C2 $[E_x/E_m = 280\ (340)/375\ \text{nm}]$ 含有两个峰[图 7(b)],与在自然水

域的环境中发现类蛋白质峰 $[E_x/E_m = 270\sim 295/330\sim 380\ \text{nm}]$ 光谱特征相对应,其峰值与氨基酸色氨酸荧光相似^[42],主要是由浮游植物产生的^[41]. 组分 C3 $[E_x/E_m = 220/420\ \text{nm}]$ 含有一个峰[图 7(c)],体现短波腐殖质的荧光特性,主要是类富里酸^[43],与微生物活动密切相关.

图 7(d)是加藻组上覆水不同组分荧光强度变化. 加藻组的 3 种组分的荧光强度在第 1~9 d 迅速升高,C1、C2 和 C3 在第 9d 分别升高到最大值 1 767. 64、3 356. 39 和 2 832. 28,说明蓝藻降解初期

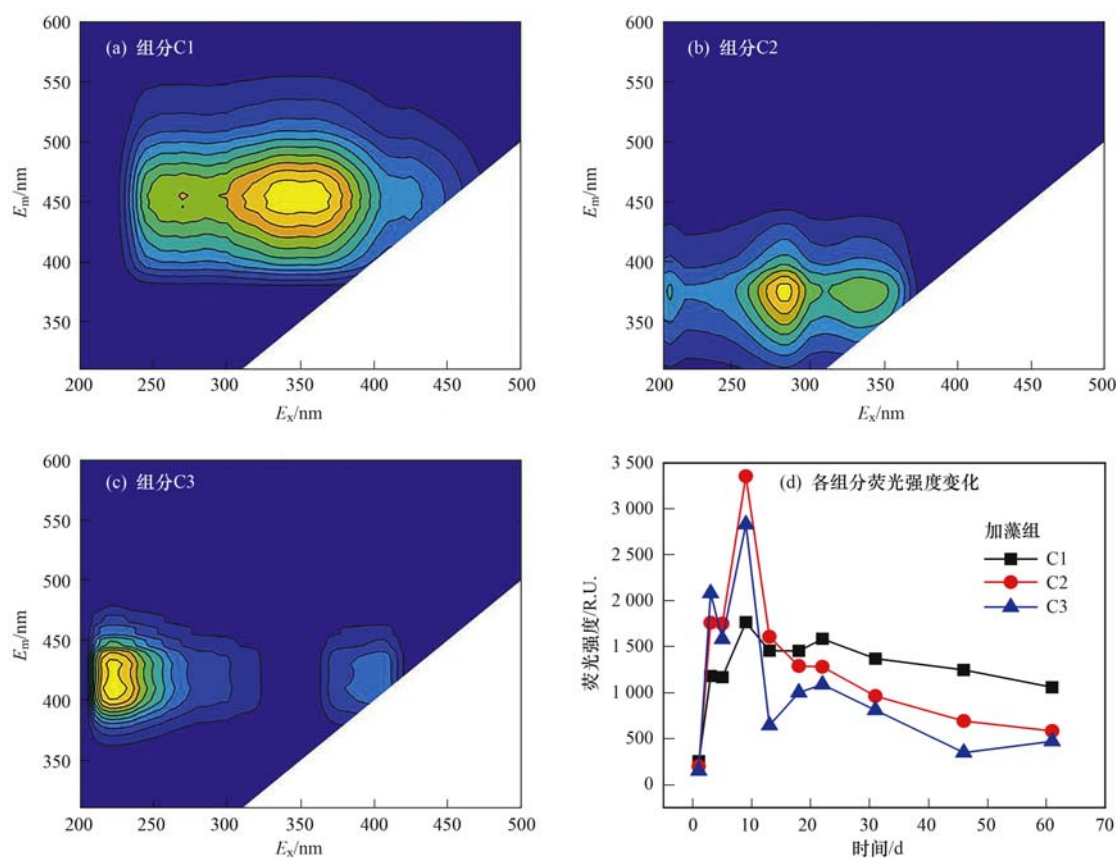


图7 PARAFAC解析出3个荧光组分和加藻组各组分荧光强度变化

Fig. 7 Fluorescence spectra of three components identified by PARAFAC model and variations in fluorescence intensity of three components in the group with added algae biomass during algal bloom decay

释放产生大量类蛋白质,同时微生物代谢产生大量类富里酸.在第9~13 d时C2和C3的荧光强度迅速下降,C1缓慢下降,说明大部分类蛋白质和微生物代谢产生的类富里酸被迅速降解,难降解的类腐殖质浓度下降缓慢. Stedmon等^[45]的实验表明,光降解去除了大部分浮游植物产生的内源类腐殖质,而类蛋白质同时受到光降解和微生物作用,这就造成了二者降解速率的差异,体现在本实验中就是类蛋白质C2比类腐殖质C1下降得快,乔煜琦等^[18]的模拟实验中也有相似现象.在第13~22 d内C1和C3的荧光强度有略微上升的趋势,C2持续下降,说明类蛋白质部分被转化为类腐殖质.在第22 d后,C1、C2和C3的荧光强度逐渐降低直至实验结束,说明此阶段蓝藻分解基本完成,对释放出来的有机质进一步降解.对比第61 d的对照组和加藻组,类蛋白质和微生物产生的类富里酸基本处于相同浓度水平,加藻组的类腐殖质浓度高出对照组许多,说明蓝藻分解产生的DOM最终产物大部分转化为较难降解类腐殖质.蓝藻衰亡为异养型微生物提供了大量营养元素并使其迅速繁殖^[46],这些微生物既可以促进蓝藻降解产生DOM^[18],同时又可以加快对新生DOM的降解^[47].

2.4 DOM光谱参数及水质参数相关性分析

为了进一步研究上覆水的DOM特征,本研究基于理化指标、紫外-可见光谱特征参数和三维荧光光谱参数进行了相关性分析($P < 0.05$),结果如图8所示.

ORP与DO呈显著正相关,相关系数达到0.89($P < 0.05$),表明蓝藻降解消耗DO的同时也使得水体ORP下降^[4];pH与DOC呈显著负相关,相关系数为-0.8($P < 0.05$),说明蓝藻降解释放DOC的时候pH明显下降,这与蓝藻降解会释放大量有机酸改变水体pH相符合^[32].

加藻组上覆水的C2和C3呈现显著正相关,相关系数达到0.93($P < 0.05$),表明C2和C3有很高的同源性,蓝藻降解产生的类蛋白质大部分被微生物降解成类富里酸;而C1和C2以及C1和C3的相关性不大,并不显著,表明C1与C2和C3来源不同.C1与 F_{n355} 有显著正相关关系,相关系数为1($P < 0.05$),与C1的类腐殖质成分相一致^[9];C2与DOC和 F_{n280} 都有显著正相关关系,相关系数分别为0.93($P < 0.05$)和0.98($P < 0.05$),与 F_{n280} 代表的蛋白质相对浓度相一致,高洁等^[48]的研究中也体现出相似的相关性,表明蓝藻降解释放的类蛋白为

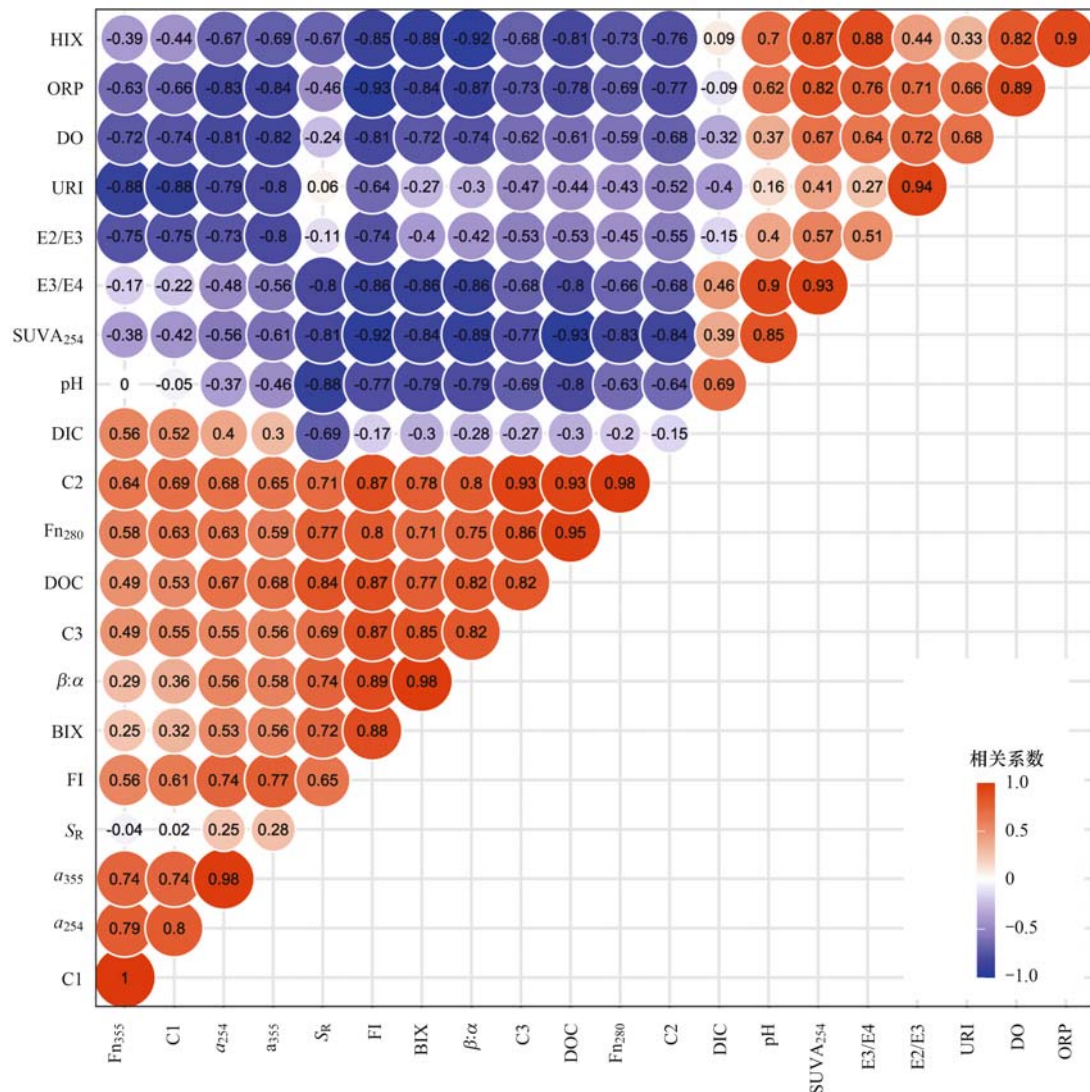


图8 加藻组上覆水理化指标、紫外-可见光谱参数以及三维荧光光谱参数的相关性分析

Fig. 8 Correlations between physicochemical indexes and spectral characteristics based on UV-vis and EEMs in group with added algae biomass

DOM 的重要组成部分^[35]并且造成了 DOC 浓度的增加; C3 与 FI、BIX 和 $\beta:\alpha$ 呈显著正相关,说明 C3 是新生 DOM,是由微生物代谢生成的类富里酸。

3 结论

(1) 蓝藻衰亡在前 9 d 内释放大量有机质,使得上覆水 DOC 浓度升高,消耗上覆水 DO,水体 ORP 下降,随后这些有机质慢慢降解为小分子酸,DOC 向 DIC 的转化使 pH 降低。

(2) 加藻组的 UV-vis 光谱参数变化如下: a_{254} 和 a_{355} 都在前 9 d 升高,E2/E3 在第 5 d 最低,E3/E4 在第 3~9 d 都小于 3.5,URI 从第 3 d 开始维持在较低水平。这些光谱参数说明蓝藻衰亡过程中产生芳香性高、结构复杂的有机物。

(3) EEM-PARAFAC 分析结果表明加藻组上覆水中有 3 种组分,其中 C1 为难降解的类腐殖质,C2 为蓝藻降解释放的类蛋白质色氨酸,C3 为微生物活

动产生的类腐殖质富里酸。蓝藻衰亡产生的类蛋白质大部分被微生物降解成类富里酸,生成的 DOM 最终大部分转化为较难降解类腐殖质,异养型微生物促进蓝藻降解产生 DOM 同时加快对新生 DOM 的降解。

(4) 相关性分析表明加藻组上覆水的 C2 和 C3 呈现显著正相关,C1 和 C2 以及 C1 和 C3 的相关性不大。C1 与 F_{n355} 有显著正相关关系,C2 与 DOC 和 F_{n280} 都有显著正相关关系,C3 与 FI、BIX 和 $\beta:\alpha$ 呈显著正相关。相关性分析的结果显示可以用光谱参数变化与 DOM 的特征变化相符合。

参考文献:

- [1] Cao J X, Sun Q, Zhao D H, *et al.* A critical review of the appearance of black-odorous waterbodies in China and treatment methods[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **385**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121511.
- [2] Chen C, Shi X L, Yang Z, *et al.* An integrated method for controlling the offensive odor and suspended matter originating from algae-induced black blooms[J]. *Chemosphere*, 2019, **221**:

- 526-532.
- [3] 胡万婷, 唐千, 孙伟, 等. 水体中蓝藻水华分解产甲烷动态过程研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(2): 702-710.
Hu W T, Tang Q, Sun W, *et al.* Dissolved methane dynamics during the degradation of organic matter derived from cyanobacterial bloom[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(2): 702-710.
- [4] Yan X C, Xu X G, Wang M Y, *et al.* Climate warming and cyanobacteria blooms: looks at their relationships from a new perspective[J]. Water Research, 2017, **125**: 449-457.
- [5] Yang Z, Zhang M, Shi X L, *et al.* Nutrient reduction magnifies the impact of extreme weather on cyanobacterial bloom formation in large shallow Lake Taihu (China) [J]. Water Research, 2016, **103**: 302-310.
- [6] Chen B F, Huang W, Ma S Z, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter in the littoral zones of eutrophic lakes taihu and hongze during the algal bloom season [J]. Water, 2018, **10**(7), doi: 10.3390/w10070861.
- [7] Yang X F, Zheng X, Wu L J, *et al.* Interactions between algal (AOM) and natural organic matter (NOM): impacts on their photodegradation in surface waters[J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 1185-1197.
- [8] Lipczynska-Kochany E. Humic substances, their microbial interactions and effects on biological transformations of organic pollutants in water and soil: a review[J]. Chemosphere, 2018, **202**: 420-437.
- [9] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 基于 UV-vis 和 EEMs 解析白洋淀冬季冰封期间隙水 DOM 的光谱特征及来源[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 604-614.
Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spectral characteristics and sources of DOM in sediment interstitial water from Baiyangdian Lake in Xiong'an new area during the winter freezing period based on UV-Vis and EEMs[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 604-614.
- [10] Birdwell J E, Engel A S. Characterization of dissolved organic matter in cave and spring waters using UV-Vis absorbance and fluorescence spectroscopy[J]. Organic Geochemistry, 2010, **41**(3): 270-280.
- [11] Li Y P, Wang S R, Zhang L. Composition, source characteristic and indication of eutrophication of dissolved organic matter in the sediments of Erhai Lake [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **74**(5): 3739-3751.
- [12] Li P H, Hur J. Utilization of UV-Vis spectroscopy and related data analyses for dissolved organic matter (DOM) studies: a review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2017, **47**(3): 131-154.
- [13] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2008, **6**(11): 572-579.
- [14] Zhou Z Z, Guo L D, Shiller A M, *et al.* Characterization of oil components from the Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico using fluorescence EEM and PARAFAC techniques[J]. Marine Chemistry, 2013, **148**: 10-21.
- [15] 范佳鑫. 桂林漓江干流水体有色溶解有机质(CDOM)的来源和影响因素[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [16] 刘堰杨, 秦纪洪, 刘琛, 等. 基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 720-728.
Liu Y Y, Qin J H, Liu C, *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rivers of western sichuan plateau based on EEM-PARAFAC analysis [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 720-728.
- [17] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 213-223.
Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Spatial distribution, spectral characteristics, and sources analysis of dissolved organic matter from baiyangdian lake in Xiong'an new district during the winter freezing period [J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 213-223.
- [18] 乔煜琦, 江海洋, 李星, 等. 蓝藻水华暴发和衰亡对太湖有色可溶性有机物的影响[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 907-915.
Qiao Y Q, Jiang H Y, Li X, *et al.* Impacts of cyanobacterial blooms outbreak and decline on chromophoric dissolved organic matter in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(4): 907-915.
- [19] 何露露, 杨平, 谭立山, 等. 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[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1788-1796.
He L L, Yang P, Tan L S, *et al.* Nutrient distribution of overlying water in tidal marshes in five estuaries and bays of the Fuzhou region in autumn [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1788-1796.
- [20] 瞿畏, 龚丽玲, 邓征宇, 等. 2017 年南汉垵水渠清淤前后水中沉积物与其上覆水界面氮扩散通量估算[J]. 湿地科学, 2020, **18**(4): 468-474.
Qu W, Gong L L, Deng Z Y, *et al.* Estimation of nitrogen diffusion flux of interface between sediment and its overlying water in ditches in Nanhan embankment before and after dredging in 2017 [J]. Wetland Science, 2020, **18**(4): 468-474.
- [21] Santos L, Pinto A, Filipe O, *et al.* Insights on the optical properties of estuarine DOM-hydrological and biological influences [J]. PLoS One, 2016, **11**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0154519.
- [22] Huang H P, Chow C W K, Jin B. Characterisation of dissolved organic matter in stormwater using high-performance size exclusion chromatography [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **42**: 236-245.
- [23] Lavonen E E, Kothawala D N, Tranvik L J, *et al.* Tracking changes in the optical properties and molecular composition of dissolved organic matter during drinking water production [J]. Water Research, 2015, **85**: 286-294.
- [24] 翟天恩, 霍守亮, 张靖天. 沉积物中溶解性有机质的垂直分布光谱特性[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(11): 6196-6204.
Zhai T E, Huo S L, Zhang J T. Spectral characteristics of vertical distribution of dissolved organic matters in sediments [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(11): 6196-6204.
- [25] Kowalczyk P, Tilstone G H, Zabłocka M, *et al.* Composition of dissolved organic matter along an Atlantic Meridional Transect from fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis [J]. Marine Chemistry, 2013, **157**: 170-184.
- [26] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. Organic Geochemistry, 2009, **40**(6): 706-719.
- [27] Hansen A M, Kraus T E C, Pellerin B A, *et al.* Optical properties of dissolved organic matter (DOM): effects of biological and photolytic degradation [J]. Limnology and Oceanography, 2016, **61**(3): 1015-1032.
- [28] Zhang Y L, Liu M L, Qin B Q, *et al.* Photochemical degradation

- of chromophoric-dissolved organic matter exposed to simulated UV-B and natural solar radiation[J]. *Hydrobiologia*, 2009, **627** (1): 159-168.
- [29] Zepp R G, Sheldon W M, Moran M A. Dissolved organic fluorophores in southeastern US coastal waters: correction method for eliminating Rayleigh and Raman scattering peaks in excitation-emission matrices[J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 15-36.
- [30] Shao K Q, Gao G, Chi K X, *et al.* Decomposition of *Microcystis* blooms; implications for the structure of the sediment bacterial community, as assessed by a mesocosm experiment in Lake Taihu, China[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2013, **53**(6): 549-554.
- [31] Song N, He Y H, Jiang H L. Inferior adaptation of bay sediments in a eutrophic shallow lake to winter season for organic matter decomposition[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 794-803.
- [32] Tibbetts S M, Milley J E, Lall S P. Chemical composition and nutritional properties of freshwater and marine microalgal biomass cultured in photobioreactors[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2015, **27**(3): 1109-1119.
- [33] Marie L, Pernet-Coudrier B, Waeles M, *et al.* Dynamics and sources of reduced sulfur, humic substances and dissolved organic carbon in a temperate river system affected by agricultural practices[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **537**: 3-32.
- [34] Yu H B, Song Y H, Du E D, *et al.* Comparison of PARAFAC components of fluorescent dissolved and particulate organic matter from two urbanized rivers [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(11): 10644-10655.
- [35] 陈昭宇, 李思悦. 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5309-5317.
- Chen Z Y, Li S Y. Absorption and fluorescence spectra of dissolved organic matter in rivers of the Three Gorges reservoir area under the background of urbanization [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5309-5317.
- [36] Zhang Y L, Van Dijk M A, Liu M L, *et al.* The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence [J]. *Water Research*, 2009, **43**(18): 4685-4697.
- [37] 魏莱, 邹立, 杨阳, 等. 芦苇和海洋微藻有色溶解有机物的吸收和荧光光谱特征分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2017, **47**(6): 25-33.
- Wei L, Zou L, Yang Y, *et al.* Absorption and fluorescence spectra characterization of chromophoric dissolved organic matter from reeds and marine microalgae [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, **47**(6): 25-33.
- [38] Murphy K R, Stedmon C A, Wenig P, *et al.* OpenFluor-an online spectral library of auto-fluorescence by organic compounds in the environment[J]. *Analytical Methods*, 2014, **6**(3): 658-661.
- [39] Osburn C L, Wigdahl C R, Fritz S C, *et al.* Dissolved organic matter composition and photoreactivity in prairie lakes of the U. S. Great Plains [J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, **56**(6): 2371-2390.
- [40] Yu H R, Liang H, Qu F S, *et al.* Impact of dataset diversity on accuracy and sensitivity of parallel factor analysis model of dissolved organic matter fluorescence excitation-emission matrix [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep10207.
- [41] Borisover M, Laor Y, Saadi I, *et al.* Tracing organic footprints from industrial effluent discharge in recalcitrant riverine chromophoric dissolved organic matter[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, **222**(1-4): 255-269.
- [42] Zhou Y Q, Li Y, Yao X L, *et al.* Response of chromophoric dissolved organic matter dynamics to tidal oscillations and anthropogenic disturbances in a large subtropical estuary [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **662**: 769-778.
- [43] Derrien M, Choi H, Jardé E, *et al.* Do early diagenetic processes affect the applicability of commonly-used organic matter source tracking tools? An assessment through controlled degradation /end-member mixing experiments [J]. *Water Research*, 2020, **173**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115588.
- [44] Yamashita Y, Boyer J N, Jaffé R. Evaluating the distribution of terrestrial dissolved organic matter in a complex coastal ecosystem using fluorescence spectroscopy[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, **66**: 136-144.
- [45] Stedmon C A, Markager S. Tracing the production and degradation of autochthonous fractions of dissolved organic matter by fluorescence analysis [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(5): 1415-1426.
- [46] Niu Y, Shen H, Chen J, *et al.* Phytoplankton community succession shaping bacterioplankton community composition in Lake Taihu, China[J]. *Water Research*, 2011, **45**(14): 4169-4182.
- [47] Guillemette F, Del Giorgio P A. Simultaneous consumption and production of fluorescent dissolved organic matter by lake bacterioplankton [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, **14**(6): 1432-1443.
- [48] 高洁, 江韬, 李璐璐, 等. 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 151-162.
- Gao J, Jiang T, Li L L, *et al.* Ultraviolet-visible (UV-Vis) and fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils of water-level fluctuation zones of the Three Gorges reservoir region [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 151-162.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)