

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业NO_x排放清单及排放特征 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)

兰州市煨炕污染物排放清单及其对PM_{2.5}浓度贡献 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)

北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)

郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)

菏泽市冬季PM_{2.5}中二元羧酸类SOA的昼夜变化特征 孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)

我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征 温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)

嘉兴市2015年人为源VOCs排放清单 郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)

上海某石化园区周边区域VOCs污染特征及健康风险 盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)

SBR工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征 杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)

太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应 石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)

巢湖2016年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析 胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)

蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响 彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)

三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响 陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)

纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响 白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)

澜沧江流域水体悬浮颗粒物δ¹⁵N空间差异及成因分析 唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)

潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律 耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)

蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素 张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)

典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算 熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)

农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)

城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征 刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)

不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响 葛德, 张守红 (5015)

四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用 王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)

厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用 卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)

光助-二茂铁/H₂O₂非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶 张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)

基于同位素技术的短程硝化过程N₂O产生途径 杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)

基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响 安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)

厌氧/好氧SPNDPR系统实现低C/N城市污水同步脱氮除磷的优化运行 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)

污水处理厂SNAD工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)

盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学 唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)

中试ANAMMOX-ASBR处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性 张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)

碳氮比对颗粒污泥CANON反应器脱氮性能和N₂O释放的冲击影响 付昆明, 姜姍, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)

污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析 房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)

重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析 伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)

韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布 刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)

有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源 杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)

纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的α-HCH 姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)

株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征 申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)

生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响 王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)

生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响 俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)

颗粒有机质对水稻稻吸收及转运的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

施肥对向日葵吸收积累Cd的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

不同水稻品种对重金属的积累特性 林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄久如 (5198)

芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)

三峡库区典型河流水-气界面CO₂通量日变化观测及其影响因素分析 罗佳宸, 李思悦 (5217)

富营养化湖区CH₄排放特征及其影响因素 商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)

短期放牧对半干旱草地生态系统CO₂和N₂O排放的影响 申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)

覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)

臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物(BVOCs)影响的研究进展 冯兆忠, 袁相洋 (5257)

地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展 杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)

污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素 张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)

《环境科学》征订启事(4848) 《环境科学》征稿简则(4990) 信息(5188, 5216, 5236)

太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应

石玉^{1,2}, 周永强^{2,3}, 张运林^{2,3*}, 姚晓龙^{2,3}, 黄昌春¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 有色可溶性有机物(CDOM)是溶解性有机物中能强烈吸收紫外辐射及蓝光的那部分有机物,并在碳、氮、磷等生源要素生物地球化学循环中起着重要的作用. 开展富营养化湖泊 CDOM 来源、组成结构和空间变化趋势的相关研究,有利于更好地揭示湖泊生源要素循环机制,服务于蓝藻水华控制和湖泊水质改善. 本文基于对不同水文情景下太湖和周边连通的 51 条河流 CDOM 光谱吸收及三维荧光光谱测定与分析,揭示太湖 CDOM 光谱组成对不同水文情景的响应机制. 结果表明,丰水期溶解有机碳浓度均值 (8.11 ± 1.26) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 显著大于枯水期均值 (3.53 ± 1.19) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (t -test, $P < 0.01$), 而丰水期 CDOM 吸收光谱斜率 $S_{275-295}$ 均值 (19.09 ± 1.81) μm^{-1} , 显著小于枯水期的 (20.89 ± 1.90) μm^{-1} (t -test, $P < 0.001$). 平行因子分析法对 CDOM 荧光图谱进行解析得到 3 个组分,且各组分受到上游来水量的影响较大,丰水期陆源类腐殖酸的荧光强度及占总荧光强度比重较枯水期显著增大. 叶绿素 a 与化学需氧量与陆源腐殖质和类色氨酸均呈显著正相关($P < 0.01$), 这表明陆源生活污水及藻死亡降解产生的 CDOM 可能是太湖 CDOM 库的重要潜在来源. 溶解氧浓度与 3 种荧光组分均呈现显著负相关($P < 0.01$), 说明 CDOM 不同组分均为微生物活动的重要基质. 本研究结果还发现溶解性有机碳浓度与陆源类腐殖酸组分荧光强度呈极显著线性正相关($r^2 = 0.58$, $P < 0.001$), 表明太湖溶解性有机碳主要以外源输入为主.

关键词: 有色可溶性有机物(CDOM); 平行因子分析法; 光谱吸收; 三维荧光; 太湖

中图分类号: X122; X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-4915-10 DOI: 10.13227/j.hjx.201802003

Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu

SHI Yu^{1,2}, ZHOU Yong-qiang^{2,3}, ZHANG Yun-lin^{2,3*}, YAO Xiao-long^{2,3}, HUANG Chang-chun¹

(1. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) is a fraction of dissolved organic matter that can strongly absorb light in the ultraviolet and blue regions and plays an important role in the biogeochemical cycling of carbon, nitrogen, and phosphorus. Unraveling the sources, optical composition, and corresponding spatial variabilities of CDOM can improve our understanding of carbon, nitrogen, and phosphorus cycling in lakes and lake water quality management. CDOM spectral absorption and fluorescent excitation-emission matrices were measured to investigate the compositional dynamics of CDOM under different hydrological scenarios. Our results showed that the mean value of dissolved organic carbon (DOC) concentration of (8.11 ± 1.26) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the rainy season was significantly higher than that in the dry season (3.53 ± 1.19) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (t -test, $P < 0.01$), whereas the mean spectral slope $S_{275-295}$ of (20.89 ± 1.90) μm^{-1} in the dry season was significantly greater than that in the rainy season (19.09 ± 1.81) μm^{-1} (t -test, $P < 0.001$). Three fluorescent components were identified using parallel factor analysis, and we further found that the dynamics of the three CDOM components were strongly influenced by hydrological conditions. Fluorescence intensity (F_{max}) of the terrestrial humic-rich component C2 increased with increasing water levels and rainfall. Significant negative relationships were found between all three fluorescent components and dissolved oxygen ($P < 0.01$), suggesting that all three components served as important substrates for microbial processing. Significant positive relationships were found between the terrestrial humic-rich C2 and tryptophan-like C1 and chlorophyll- α and chemical oxygen demand, indicating that anthropogenic inputs and algal degradation contributed significantly to the CDOM pool in Lake Taihu. We further found a significant positive relationship between DOC concentration and F_{max} of terrestrial humic-rich C2 ($r^2 = 0.58$, $P < 0.001$), suggesting that DOC in Lake Taihu was primarily derived from allochthonous input.

Key words: chromophoric dissolved organic matter (CDOM); parallel factor analysis; spectral absorption; excitation-emission matrices; Lake Taihu

收稿日期: 2018-02-01; 修订日期: 2018-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41621002, 41771514, 41661134036); 中国科学院前沿科学重点研究计划项目(QYZDB-SSW-DQC016); 中国科学院南京湖泊地理研究所启动基金项目(NIGLAS2017QD08)

作者简介: 石玉(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为有色可溶性有机物循环及其温室效应, E-mail: Shiyicarrots@163.com

* 通信作者, E-mail: ylzhang@niglas.ac.cn

有色可溶性有机物 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 是溶解性有机物中能强烈吸收紫外辐射及蓝光的那部分有机物. CDOM 中有一部分物质在一定波长的激发条件下会发出荧光, 这部分物质通常被称为荧光溶解性有机物 (fluorescent DOM, FDOM)^[1]. CDOM 主要包括腐殖酸、富里酸、脂肪族及芳香烃类物质, 来源和组成结构十分复杂, 往往无法用单一物质的浓度来表示^[2]. 由于 CDOM 光谱吸收和荧光测量简单易操作, 其变化常被用来表征溶解性有机物的丰度和组成变化^[3]. 概括起来, CDOM 主要有两种来源: 降水和陆源径流形成的外源输入^[4], 以及湖泊内生物死亡降解和沉积物再悬浮形成的内源释放^[5~7]. CDOM 降解转化主要有 3 种方式: 耐降解性强的荧光部分形成高分子有机物沉降埋藏成岩^[8]、微生物的摄取和降解^[9]以及光漂白作用形成的光降解^[10~12]. 此外, CDOM 与水体中的初级生产力有着密切的关系, 在深层水域有遮挡作用, 即使在浓度很低的时候, 也会对光的吸收产生影响^[13]. 在近海水体, CDOM 的吸收及荧光特性可能与盐度、叶绿素 (Chla) 密切相关, 而在富营养内陆水体则与 Chla 等诸多因素关系密切^[14]. 同时, CDOM 吸收增加对动、植物有害的紫外辐射衰减, 在一定程度上可以起到保护水生生物的作用^[15,16]. 因此, 对 CDOM 的研究在元素生物地球化学循环^[17]、湖泊生态过程和水色水质参数遥感反演等多方面均起着十分重要的作用^[18~20].

对 CDOM 的研究区域可以分为海洋海湾和内陆水体, 分析途径包括 CDOM 含量的变化, 空间分布的差异以及迁移变化^[17], 研究范围逐渐由沿海区域向内陆水体扩展^[21,22], 其快速发展始于本世纪初. 过去 10 余年, 对太湖 CDOM 的研究主要集中在时空异质上, Zhou 等^[23]的研究表明光化学反应和微生物活性导致了 CDOM 从太湖西北部向东南流动时受到损失. 江俊武等^[24]的研究表明西北湖区的 CDOM 丰度较大, 并且 CDOM 的荧光光谱特征参数的空间分布差异性显著. 刘新等^[25]的研究表明以梅梁湾为主的藻型湖区和以东太湖为主的草型湖区浮游植物和植物残体腐烂分解是太湖 CDOM 的主要贡献者. Yao 等^[26]的研究表明 CDOM 的分布特征主要受到空间异质性与风力扰动的作用. 但整体而言, 已有研究较少探讨河流湖泊水文过程对 CDOM 组成结构的影响.

CDOM 由于物质组成复杂多样, 所含各类物质浓度的直接测量较难, 传统的 CDOM 表征是根据吸

收光谱进行测量, 但光谱特征易受有机物来源和降解过程的影响而会发生改变, 对应的物质组成结构也会发生对应的变化^[27]. 近年来, 更具有敏感性的荧光光谱分析方法应用更加广泛^[28], 三维荧光光谱 (excitation-emission matrices, EEMs) 可以清晰表征不同荧光物质的组成特征. Zhou 等^[29]的实验证明了 CDOM 原位荧光测量可以起到地表水源和水质监测的潜在效用. Hunt 等^[30]用平行因子分析法对溶解有机物进行分析, 结果表明荧光光谱法可监测富含碳的土壤有机物分解. Stedom 等^[31]通过荧光光谱对丹麦海湾 CDOM 来源进行了探究, 得到了不同荧光组分随着环境变化的敏感性变化. 本文通过对比分析太湖多个样点不同水文时期 CDOM 的光吸收和荧光特性变化, 探讨太湖 CDOM 光谱组成结构对不同水文情景的响应, 有助于厘清外源输入 CDOM 来源和组成结构特征.

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

在太湖及其周边河流共设置 84 个采样点 (图 1), 其中包括 32 个湖面采样点和 52 个河道采样点, 分别在 2017 年的 2 月、5 月和 8 月进行采样, 共计 252 个水样. 用聚乙烯瓶保存, 在黑暗冷藏的条件下运送回实验室. 首先通过 0.7 μm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤水样用于测定溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 浓度. 通过 0.22 μm 孔径 Millipore 滤膜后的水样放在棕色玻璃瓶中在 4 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下冷藏保存, 测样前拿出,

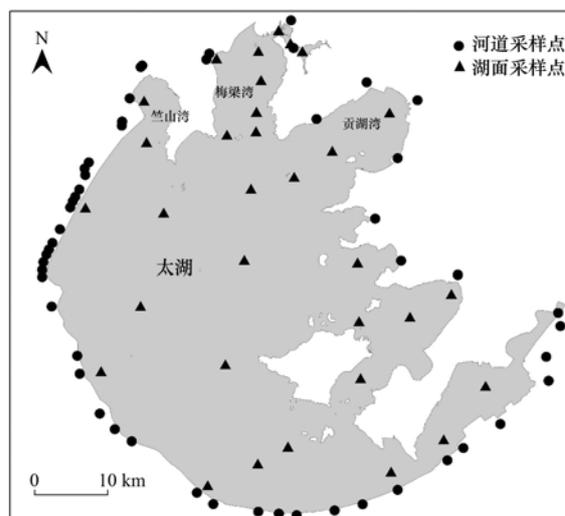


图 1 太湖及其周边河流采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Lake Taihu and surrounding rivers

待恢复到室温时进行吸收光谱、三维荧光的测定, 通常在样品采集后的 3 d 内完成。

1.2 水文数据的获取

本研究选取的水文数据由水利部太湖流域管理局提供(<http://www.tba.gov.cn/>), 包括 2017 年的 2、5 和 8 月的太湖的月降水量以及月平均水位。

1.3 参数测定及计算方法

1.3.1 主要水质参数测定

太湖的样品首先采用 0.7 μm Whatman GF/F 滤膜过滤, 用以测定 DOC、氨氮、化学耗氧量 (COD) 浓度。DOC 的浓度利用岛津总有机碳分析仪 (TOC-L) 在高温 (680 $^{\circ}\text{C}$) 环境下进行测定, 检测范围为 0.5 ~ 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 检测精度为 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。氨氮浓度采用流式注射仪 (Skalar SAN + +, 荷兰代尔夫特) 进行测定。COD 浓度经过重铬酸钾-硫酸进行测定^[32]。Chla 首先采用 80% 的乙醇进行热提纯, 继而采用紫外分光光度计测定 665nm 及 750nm 处的吸光度进行计算^[33]。溶解氧 (DO) 的测定为野外采样过程中原位采用 Yellow Springs Instruments (YSI) 6600 V2 多参数水质分析仪测定。

1.3.2 CDOM 光谱吸收系数的测定

通过 Shimadzu UV-2550 UV-Vis 分光光度计测定 CDOM 光谱, 所需的样品是经过 0.22 μm 滤膜过滤后的水样, 采用 5 cm 比色皿, 以 Milli-Q 水为空白, 在 200 ~ 800 nm 和间隔 1 nm 的设置下测量 CDOM 的吸光度。然后根据公式 (1) 的计算得到对应波长的吸收系数^[13]:

$$a(\lambda) = 2.303 \times D(\lambda) / r \quad (1)$$

式中, $a(\lambda)$ 表示在波长 λ 时的 CDOM 吸收系数 (m^{-1}), $D(\lambda)$ 表示在波长 λ 处校正后的吸光度, r 为光程路径 (m)。本研究采用 350 nm 处吸收系数 $a(350)$ 表征水样中 CDOM 的浓度^[34]。

1.3.3 光谱斜率 $S_{275-295}$ 值的计算

$S_{275-295}$ 表示在 275 ~ 295 nm 的波长范围内拟合得到的指数函数的曲线光谱斜率, 可以用来半定量反映 CDOM 的芳香性和平均分子量大小。 $S_{275-295}$ 值越小, 表示 CDOM 的陆源腐殖程度越高。 $S_{275-295}$ 通过下式采用最小二乘法对光谱的斜率进行拟合得到:

$$a(\lambda) = a(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (2)$$

式中, $a(\lambda)$ 和 $a(\lambda_0)$ 分别是在波长 λ 和参考波长 λ_0 下的 CDOM 吸收系数。

1.3.4 CDOM 三维荧光光谱测定与计算

采用 Hitachi 公司生产的 F-7000 分子荧光光度

计对 CDOM 三维荧光光谱进行测定, 激发光谱范围是 200 ~ 450 nm, 间隔为 5 nm, 发射光谱为 250 ~ 600 nm, 间隔为 1 nm。拉曼散射通过扣除每日纯水空白 EEMs 得以订正。瑞丽散射采用 drEEM 工具包插值的方法予以消除^[35], 内滤波效应校正以相应激发发射波长处的吸光度予以校正^[36]。最终以每日测定的超纯水 EEMs 光谱中 350 nm 下的荧光强度将所有 EEMs 定标为拉曼单位 (Raman unit, R. U.) 以消除仪器自身因素造成的系统误差^[37]。

1.3.5 平行因子分析 PARAFAC

采用 MATLAB2015b 下的 drEEM 工具箱 (ver. 0.2.0) 进行平行因子分析^[35], 该工具箱中的 N-way 工具包为模型运行引擎。平行因子分析共抽取 252 个 EEMs 矩阵进行运算, 每个矩阵包含 251 个发射波段及 45 个激发波段。EEMs 矩阵被剖分成 6 个随机子集, 3 个子集为建模所需, 另外 3 个为模型验证数据集, 每个 EEMs 子集均逐步从 2 ~ 5 个组分模型逐一验证。对半检验、随机初始化分析及残差分析结果均表明 3 个组分模型能很好解释整个 EEMs 数据集 (图 2)。平行因子分析中每个 PARAFAC 荧光组分最大得分值 (F_{\max}) 表征各类荧光物质浓度和荧光组分强度^[38]。

1.3.6 统计分析

使用 IBM SPSS Statistics 22 软件进行统计分析, 其中包括平均数、标准差和 t 检验。使用 MATLAB R2016a 软件, 对 CDOM 荧光特性与 COD、Chla 及 DOC 浓度进行拟合分析。

2 结果与分析

2.1 水文特征的划分

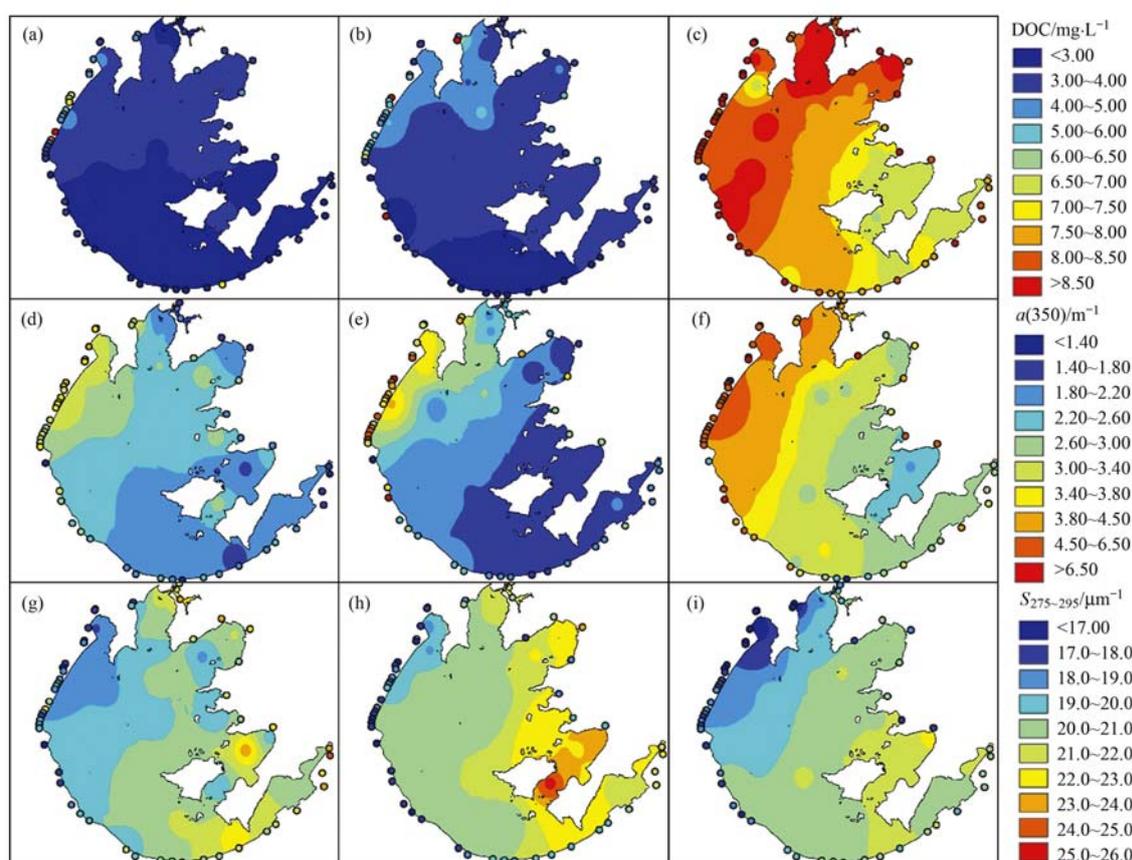
3 次野外采样覆盖太湖不同的水文期, 依据不同时期的降水量的大小将水文情景分为枯水期、平水期和丰水期。2 月降水量最少为 24.2 mm, 对应的水位为 3.12 m, 为太湖枯水期; 5 月降水为 86.3 mm, 对应水位为 3.18 m, 为太湖平水期; 8 月降水量最大为 189.3 mm, 对应的水位为 3.26 m, 为太湖丰水期。

2.2 DOC 浓度和 CDOM 光学特性对不同水文条件的响应

从不同的采样季节来看, 太湖及周边河道的 CDOM 吸收系数 $a(350)$ 在丰水期的平均值 [(4.29 \pm 1.75) m^{-1}] 高于枯水期的平均值 [(2.50 \pm 0.73) m^{-1}] (t 检验, $P < 0.001$, 表 1), $a(350)$ 高值主要分布在梅梁湾和竺山湾; 其次, 河道的 $a(350)$ 在丰

水期的平均值 $[(4.78 \pm 1.97) \text{ m}^{-1}]$ 高于同水文时期下太湖湖面 $a(350)$ 的平均值 $[(3.52 \pm 0.93) \text{ m}^{-1}]$, 这意味着在太湖, 竺山湾和梅梁湾地区的 CDOM 浓度最大, 并且受上游地表径流所携带的大量陆源 CDOM 输入的强烈影响. 与 $a(350)$ 结果相反, 丰水季节的光谱斜率 $S_{275-295}$ 平均值 $[(19.09 \pm 1.81) \mu\text{m}^{-1}]$ 显著低于枯水季节均值 $[(20.89 \pm 1.90) \mu\text{m}^{-1}]$, 丰水期太湖湖面 $S_{275-295}$ 的平均值 $[(19.96 \pm 1.45) \mu\text{m}^{-1}]$ 高于同水文条件下河道的平均值 $[(18.52 \pm 1.79) \mu\text{m}^{-1}]$, 这说明竺山湾地区的芳香性随着来水量的增大而增强, 即陆源有机

质的信号增强, 此时 CDOM 的行为受控于上游陆源径流的输入. 太湖 DOC 的浓度的结果与 $a(350)$ 相似, 在丰水期 DOC 均值 $[(8.11 \pm 1.26) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}]$ 显著高于枯水期均值 $[(3.53 \pm 1.19) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}]$. 上述结果进一步证实了已有研究发现的 CDOM 吸收系数 $a(350)$ 与 DOC 浓度存在着显著的正相关的结论^[43,44]. 从空间上可以清晰地看到, $a(350)$ 与 DOC 的高值区从枯水期的竺山湾及梅梁湾扩大到平水期的西北湖区, 再到丰水期的整个太湖 (图 2), $S_{275-295}$ 的空间分布与之相反, 低值主要分布在太湖的入湖河道处.



(a)、(d)、(g)为枯水期; (b)、(e)、(h)为平水期; (c)、(f)、(i)为丰水期

图2 2017年2月、5月和8月的DOC浓度、 $a(350)$ 和 $S_{275-295}$ 的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of DOC concentration, CDOM absorption coefficient $a(350)$ and CDOM spectral slope $S_{275-295}$ in February, May, and August, 2017

2.3 平行因子分析的结果

由于 CDOM 结构的复杂性, 三维荧光光谱所反映的物质组成代表着一类具有相同荧光性质的荧光团, 不同来源的 CDOM 可以通过不同的光谱峰值体现^[38]. 在本研究中, 根据 PARAFAC 法对 CDOM 光谱进行分析可得到 3 种荧光组分, 1 个陆源类腐殖质组分 C2 和 2 个类蛋白质组分 (类色氨酸 C1 和类

酪氨酸 C3), 见图 3. 组分 C1 有两个激发波长, 分别在 $<230 \text{ nm}$ 和 285 nm 处, 一个发射波长在 332 nm , 与传统意义上的 T 峰位置比较相近^[41], 为类色氨酸荧光组分, 与 DOM 中的芳环氨基酸有关, 表征生物降解或者生活污水来源^[40]; 组分 C2 光谱形态具有强烈的陆源土壤有机质类腐殖质的光谱特征, 类似于 A 峰或者 C 峰^[41], 反映了外源输入的

腐殖酸, 是陆源 CDOM 输入的重要信号; 荧光组分 C3 光谱形态类似于类酪氨酸物质, 与传统的 B 峰对应^[41], 主要是表征生物降解产生的芳香性蛋白类结构的荧光团^[42].

表 1 太湖及周边河流 CDOM 光学组成指标在枯水期(2月)和丰水期(8月)平均值对比及 *t* 检验结果

Table 1 Comparisons of mean values and the significance level of *t*-test results between the dry (February) and the wet (August) season in 2017 for CDOM optical composition indices in Lake Taihu and surrounding rivers

地点	时期	$\alpha(350)$ /m ⁻¹	$S_{275-295}$ /μm ⁻¹	DOC /mg·L ⁻¹	荧光强度/R. U.		
					C1	C2	C3
太湖及周边河流	枯水期	2.50 ± 0.73	20.89 ± 1.90	3.53 ± 1.19	2.35 ± 1.43	0.62 ± 0.21	2.04 ± 1.01
	丰水期	4.29 ± 1.75	19.09 ± 1.81	8.11 ± 1.26	4.18 ± 3.68	1.14 ± 0.45	2.69 ± 1.75
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.01	<0.01	<0.001	<0.01
太湖湖面	枯水期	2.30 ± 0.50	20.30 ± 1.40	3.05 ± 0.44	2.20 ± 0.99	0.58 ± 0.14	2.11 ± 0.81
	丰水期	3.52 ± 0.93	19.96 ± 1.45	7.90 ± 0.85	3.36 ± 1.25	0.93 ± 0.29	2.67 ± 0.82
	<i>P</i> 值	<0.01	<0.01	<0.5	<0.01	<0.01	<0.001
太湖河道	枯水期	2.62 ± 0.83	19.96 ± 2.15	3.82 ± 1.39	2.44 ± 1.64	0.65 ± 0.25	2.00 ± 1.12
	丰水期	4.78 ± 1.97	18.52 ± 1.79	8.24 ± 1.44	4.70 ± 4.53	1.28 ± 0.48	2.71 ± 2.14
	<i>P</i> 值	<0.001	<0.001	<0.01	<0.05	<0.001	<0.05

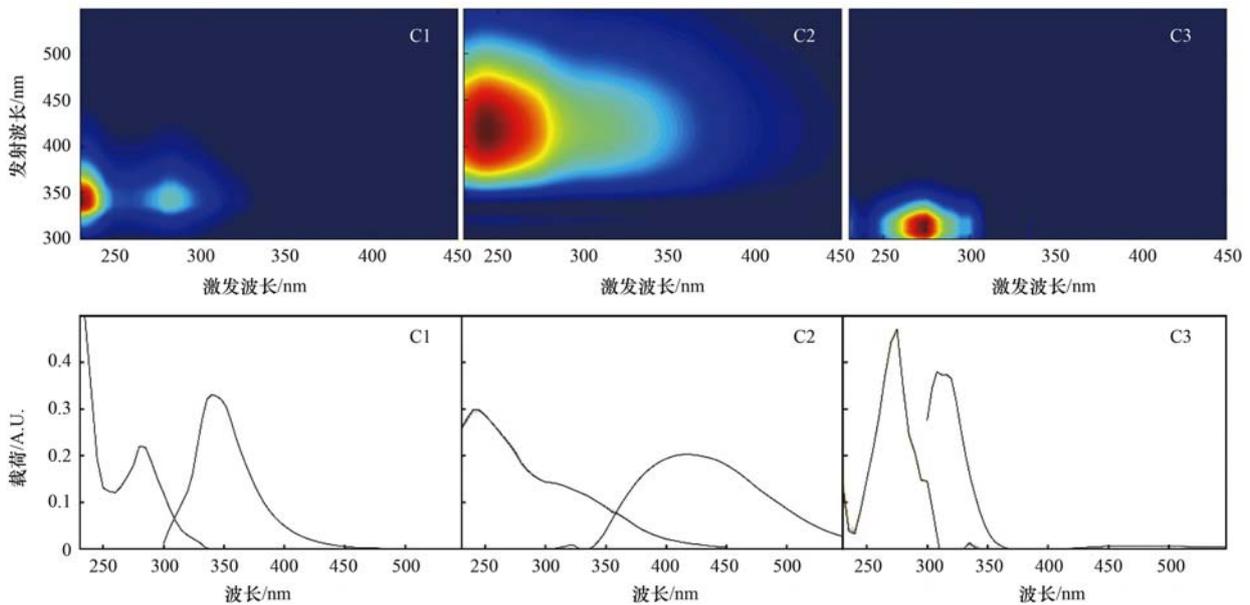


图 3 平行因子分析得到的 3 个荧光组分激发发射荧光图谱和对半检验

Fig. 3 Excitation-emission fluorescence spectral shapes of the three components identified by PARAFAC and split-half validation

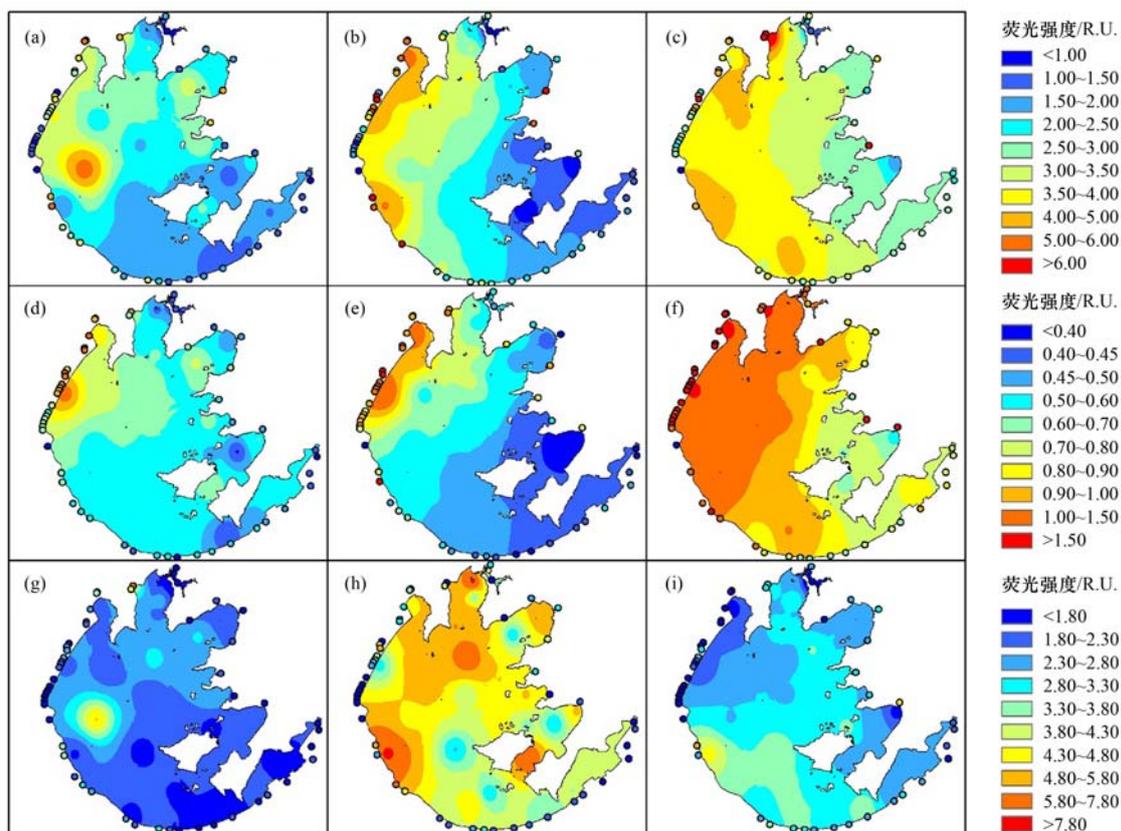
2.4 不同水文条件下的荧光组分空间分布

在河流入湖口处, 上游地表径流携带大量工业废水、生活污水以及土壤有机质, 因此河口处的 CDOM 来源主要是陆源控制, 类腐殖酸 C2 的荧光强度比较强. 3 种组分的荧光强度在丰水期均大于枯水期(表 1), 类色氨酸 C1 与类酪氨酸 C3 的平均荧光强度在丰水期为(4.18 ± 3.68) R. U.、(2.69 ± 1.75) R. U., 高于枯水期的(2.35 ± 1.43) R. U.、(2.04 ± 1.01) R. U. (*t* 检验, *P* < 0.01); 类腐殖酸 C2 的平均荧光强度在丰水期为(1.14 ± 0.45) R. U., 明显高于枯水期的平均强度(0.62 ± 0.21) R. U. (*P* < 0.001). C2 在太湖湖面丰水期的平均荧光强度(0.93 ± 0.29) R. U. 低于同时期的太湖河道

平均荧光强度(1.28 ± 0.48) R. U., C2 荧光强度的高值主要聚集在竺山湾的殷村港与梅梁湾, 与 $\alpha(350)$ 和 $S_{275-295}$ 的空间分布模式相似, C2 的高值从太湖的西北湖区向东南湖区逐渐扩大(图 4), 这意味着殷村港携带着大量的陆源有机质输入太湖湖面. 类色氨酸 C2 的高值出现在梅梁湾, 很有可能是受到入湖河道周围工厂、人类活动导致的工业及生活用水排放的影响.

2.5 不同水文条件下太湖 CDOM 相关参数的空间变化及相关分析

从空间分布来看, 叶绿素(Chla)的值从 2.89 ~ 133.1 μg·L⁻¹, 高值主要出现在梅梁湾与竺山湾的殷村港附近(图 5). COD 的浓度的范围从 2.8 ~ 8.4



(a) C1-枯水期、(d) C2-枯水期、(g) C3-枯水期; (b) C1-平水期、(e) C2-平水期、(h) C3-平水期;
(c) C1-丰水期、(f) C2-丰水期、(i) C3-丰水期

图4 2017年枯水期(2月)、平水期(5月)和丰水期(8月)的3种不同荧光组分的分布差异

Fig. 4 Spatial variations of the three components of different hydrological conditions in February, May, and August, 2017

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与 Chla 的分布相似, 高值聚集在西北湖区, 并向东南湖区扩散. 这与 $a(350)$ 和陆源腐殖质 C2 荧光强度的分布相似, 说明在太湖北部湖区的水体受到上游地表径流所携带的陆源腐殖质的强烈影响. 而 DO 的分布则与 Chla 和 COD 的分布特点相反. 从采样的时间来看, 丰水期 Chla 和 COD 的高值明显比枯水期的范围更广, 这就意味着太湖的 CDOM 丰度很可能受到上游来水量的影响. DO 的浓度在枯水期的高值比丰水期分布地更广泛, 这意味着随着上游来水量的增加, 湖泊内部的需氧量逐渐增加.

本研究区域, 陆源类腐殖酸 C2 与 DOC 浓度的

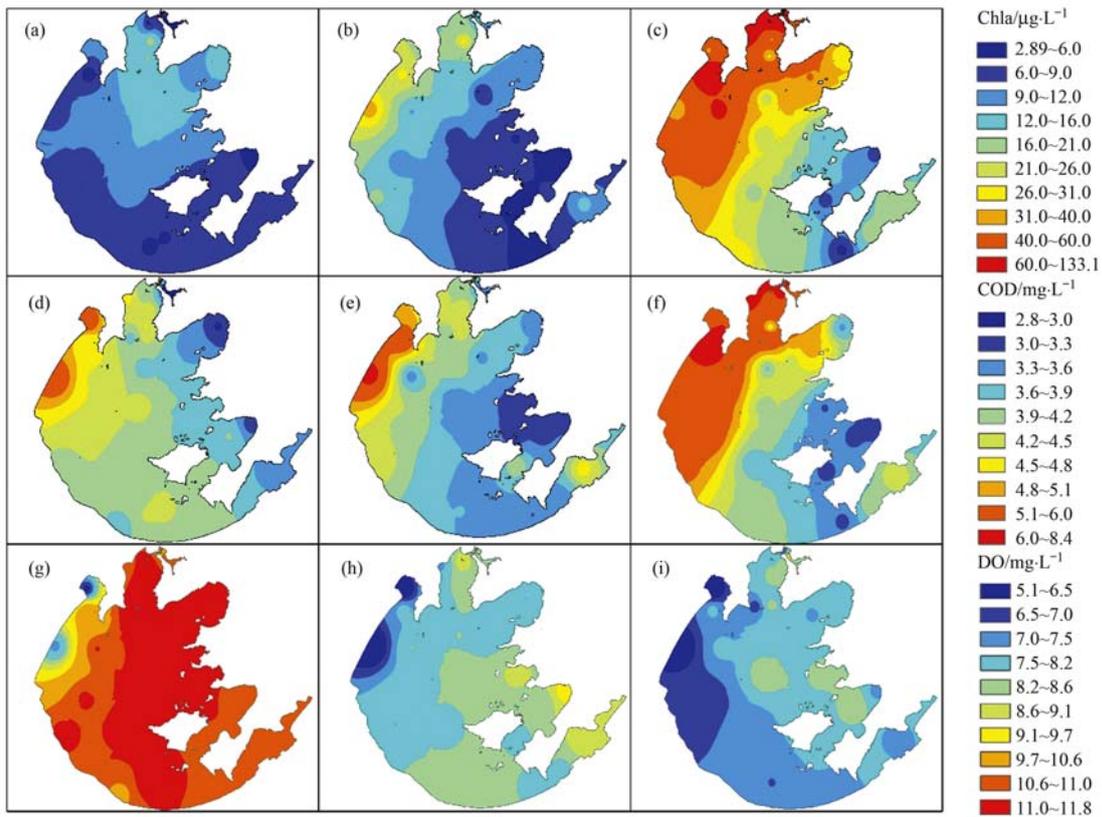
相关性最好 ($r^2 = 0.58, P < 0.01$); 类色氨酸 C1 的荧光强度与 DOC 的浓度显著相关 ($r^2 = 0.09, P < 0.01$), 类酪氨酸 C3 与 DOC 浓度几乎不存在相关性 (图 6). 对太湖水体物理化学指标与荧光团组分进行相关性分析发现, 类色氨酸 C1 与 COD ($r^2 = 0.28, P < 0.001$) 呈显著正相关, 与 DO ($r = -0.42, P < 0.01$) 呈显著负相关, 陆源类腐殖质 C2 与 Chla ($r^2 = 0.50, P < 0.001$) 呈显著正相关, 与 DO ($r = -0.56, P < 0.01$) 呈显著负相关, 类酪氨酸 C3 与温度 ($r = 0.33, P < 0.01$) 呈显著正相关, 与 DO ($r = -0.31, P < 0.01$) 呈显著负相关 (图 6, 表 2).

表2 类色氨酸 C1、陆源类腐殖酸 C2 和类酪氨酸 C3 荧光强度与水物理化学指标的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 2 Pearson's correlation coefficient of tryptophan C1, humic-like C2 and tyrosine-like C3 and physico-chemical parameters

	水温	pH	DO	COD	Chla	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$
C1	0.31**	0.28**	-0.42**	0.50**	0.44**	0.17
C2	0.41**	0.36**	-0.56**	0.78**	0.70**	0.25*
C3	0.33**	0.10	-0.31**	-0.09	-0.13	-0.11

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$



(a) Chla-枯水期、(d) COD-枯水期、(g) DO-枯水期；(b) Chla-平水期、(e) COD-平水期、(h) DO-平水期；(c) Chla-丰水期、(f) COD-丰水期、(i) DO-丰水期

图5 2017年2月、5月和8月下的Chla浓度、COD浓度和DO浓度的空间分布

Fig. 5 Spatial distributions of Chla, COD, and DO in February, May, and August, 2017

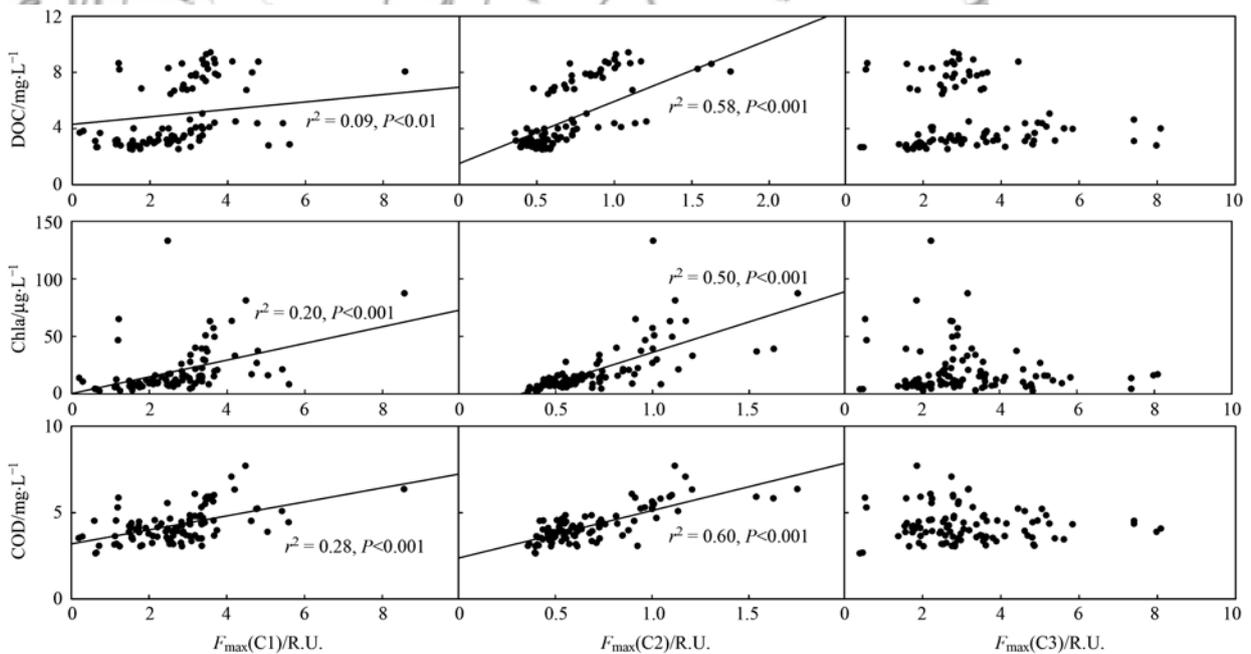


图6 DOC、Chla、COD浓度与类色氨酸C1、陆源类腐殖酸C2和类酪氨酸C3荧光强度的相关性

Fig. 6 Relationships between mean DOC, Chla, COD concentration and the fluorescence intensity of tryptophan C1, humic-like C2, and tyrosine-like C3

3 讨论

太湖是中国第三大淡水湖,对人类的生产生活都起着非常重要的作用. 河流从太湖流域的西北部入湖,而出湖水主要通过东太湖进入太浦河,最终入海,因此污染物通过太湖西北竺山湾水域及梅梁湾周边的直湖港、梁溪河等进入太湖后,致使北部水质相对较差. 湖泊中 CDOM 成分来源复杂,受到上游各个子土地利用类型等影响^[43],因此外源输入会导致 CDOM 的光学性质与荧光特征发生显著的变化. Zhou 等^[23]的研究显示太湖 CDOM 的吸收与荧光强度在北部和南部发生了根本性的变化,陆源 CDOM 对太湖的 CDOM 库有重要的贡献. 刘新等^[25]的研究表明太湖东部的 CDOM 分子量与腐殖质荧光组分远小于梅梁湾地区,且藻类堆积死亡后能释放大量的类色氨酸. Yao 等^[26]通过平行因子分析法得到了 4 种类腐殖物质与两种类蛋白荧光组分,并且在太湖西北部得到了较强的陆源 CDOM 特征. 与本文的研究结果一致,随着来水量的增大,河道中最先表现出 $a(350)$ 的高值与 $S_{275-295}$ 的低值,说明上游地表径流携带了大量陆源 CDOM 由河道进入太湖湖区,并从湖区的西北部向东南部扩大. 温度与降雨量表现出一致性,当温度升高,尤其是梅梁湾地区,由于工业生活废物的排放,氮磷含量较高^[44],适宜藻类的生长,湖泊中溶解氧的浓度逐渐降低,随着降雨量的增加,水体中陆源有机质的浓度随之增加,进一步刺激了藻类的生长,因此湖区中类色氨酸 C1 的荧光强度增大. 随着温度的降低,来水量和溶解氧减少,藻类开始衰亡,此时太湖中类蛋白质开始增加. 这进一步证实了不同水文情景对于太湖 CDOM 结构有着显著的影响. 在丰水期到来之前,可以提前做好相应的准备,通过围网等途径拦截上游径流带来的污染物、加强对生活、工业废水排放的管控,尽可能地降低人类活动造成的 CDOM 的汇存量.

根据已有的研究,有学者着眼于荧光强度和 DOC 的相关性,以期通过荧光强度反演 DOC 的浓度. 张绪琴等^[45]指出海水样品中随着海水黄色物质浓度的增加,荧光的强度也在呈现线性的增加,季乃云等^[46]的研究表明类蛋白与 DOC 的相关性好,而与腐殖质类的荧光强度相关性差. Huang 等^[47]的研究表明 DOC 浓度的高值主要分布在太湖的西北部,当藻类暴发时,藻类产生的有机物成为太湖 DOC 的主要来源. 对本研究中的 DOC 浓度和

荧光强度进行相关性分析发现,陆源类腐殖酸相对于其他荧光组分而言与 DOC 浓度有更好的相关性,这可能是由于径流携带大量枯枝落叶等有机物含量多的物质进入河流,成为湖泊中主要的 DOC 来源,类蛋白质也可以反映出 DOC 浓度的变化,但是相关性较差. 这可能是由于太湖作为典型的东亚季风区湖泊,受到外源河流输入的影响较大,当夏季径流量增加时,陆源有机物的输入变成了太湖 CDOM 的主要来源.

4 结论

(1)入湖径流对湖泊中的 CDOM 组成结构有着非常显著的影响. 丰水时期,大量的陆源有机物随着径流进入湖区,使得湖区内 CDOM 浓度增大,吸收系数光谱斜率减小,陆源腐殖质的荧光强度增加,各荧光组分的荧光强度总体上呈现出从太湖的西北湖区向东南湖区逐渐递减的趋势.

(2)DOC 浓度与陆源腐殖酸的荧光强度相关性很高,而与类蛋白质的相关性较差. 综合来看,目前荧光定性的手段相对来说较为稳定,但是定量的方法进展缓慢,是否能够利用荧光强度和 DOC 浓度的相关性,对 DOC 进行反演还需要进一步研究.

(3)太湖在丰水期的差异比枯水期时更强烈,丰水时期适宜的温度和充足的养分致使藻类大量繁殖,随后死亡裂解释放的蛋白类物质加重了水质的恶化.

致谢:感谢张毅博、胡耀躲、夏忠及张成英等同志在样品采集和实验过程中的大力协助.

参考文献:

- [1] Organelli E, Bricaud A, Antoine D, *et al.* Seasonal dynamics of light absorption by chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the NW Mediterranean Sea (BOUSSOLE site)[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2014, **91**: 72-85.
- [2] 张运林, 吴生才, 秦伯强, 等. 太湖梅梁湾有色可溶性有机物对光的吸收[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(4): 405-409. Zhang Y L, Wu S C, Qin B Q, *et al.* Absorption of light by chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Meiliang Bay of Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2004, **24**(4): 405-409.
- [3] Le C, Lehrter J C, Hu C, *et al.* Relation between inherent optical properties and land use and land cover across Gulf Coast estuaries[J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, **60**(3): 920-933.
- [4] Zhang Y L, Gao G, Shi K, *et al.* Absorption and fluorescence characteristics of rainwater CDOM and contribution to Lake Taihu, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **98**: 483-491.

- [5] Wada S, Aoki M N, Tsuchiya Y, *et al.* Quantitative and qualitative analyses of dissolved organic matter released from *Ecklonia cava* Kjellman, in Oura Bay, Shimoda, Izu Peninsula, Japan[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, **349**(2): 344-358.
- [6] Fukushima T, Park J C, Imai A, *et al.* Dissolved organic carbon in a eutrophic lake; dynamics, biodegradability and origin[J]. *Aquatic Sciences*, 1996, **58**(2): 139-157.
- [7] Zhang Y L, Zhang E L, Yin Y, *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2645-2659.
- [8] Zanardi-Lamardo E, Moore C A, Zika R G. Seasonal variation in molecular mass and optical properties of chromophoric dissolved organic material in coastal waters of southwest Florida [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 37-54.
- [9] Osburn C L, Morris D P. Photochemistry of chromophoric dissolved organic matter in natural waters[A]. In: Helbling E W, Zagarese H (Eds.). *UV Effects in Aquatic Organisms and Ecosystems*[M]. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2003. 187-209.
- [10] Vähätalo A V, Wetzel R G. Photochemical and microbial decomposition of chromophoric dissolved organic matter during long (months-years) exposures [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 313-326.
- [11] Zhang Y L, Liu X H, Wang M Z, *et al.* Compositional differences of chromophoric dissolved organic matter derived from phytoplankton and macrophytes [J]. *Organic Geochemistry*, 2013, **55**: 26-37.
- [12] Su R G, Bai Y, Zhang C S, *et al.* The assessment of the spatial and seasonal variability of chromophoric dissolved organic matter in the Southern Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **100**(1): 523-533.
- [13] Matsuoka A, Ortega-Retuerta E, Bricaud A, *et al.* Characteristics of colored dissolved organic matter (CDOM) in the Western Arctic Ocean; Relationships with microbial activities [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, **118**: 44-52.
- [14] Yang L Y, Chen C T A, Lui H K, *et al.* Effects of microbial transformation on dissolved organic matter in the east Taiwan Strait and implications for carbon and nutrient cycling [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, **180**: 59-68.
- [15] Twardowski M S, Boss E, Sullivan J M, *et al.* Modeling the spectral shape of absorption by chromophoric dissolved organic matter[J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 69-88.
- [16] Gonnelli M, Galletti Y, Marchetti E, *et al.* Dissolved organic matter dynamics in surface waters affected by oil spill pollution; results from the Serious Game exercise[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, **133**: 88-99.
- [17] 张运林. 水体中有色可溶性有机物的研究进展[J]. *海洋湖沼通报*, 2006, (3): 119-127.
Zhang Y L. Advances in chromophoric dissolved organic matter in aquatic ecosystems [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006, (3): 119-127.
- [18] Lapierre J F, Guillemette F, Berggren M, *et al.* Increases in terrestrially derived carbon stimulate organic carbon processing and CO₂ emissions in boreal aquatic ecosystems [J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 2972.
- [19] Mladenov N, Sommaruga R, Morales-Baquero R, *et al.* Dust inputs and bacteria influence dissolved organic matter in clear alpine lakes[J]. *Nature Communications*, 2011, **2**: 405.
- [20] Coble P G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color[J]. *Chemical Reviews*, 2007, **107**(2): 402-418.
- [21] Stedmon C A, Thomas D N, Granskog M, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter in Baltic coastal sea ice; allochthonous or autochthonous origins? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(21): 7273-7279.
- [22] Zhou Y Q, Jeppesen E, Zhang Y L, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter of black waters in a highly eutrophic Chinese lake: Freshly produced from algal scums? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **299**: 222-230.
- [23] Zhou Y Q, Zhang Y L, Shi K, *et al.* Lake Taihu, a large, shallow and eutrophic aquatic ecosystem in China serves as a sink for chromophoric dissolved organic matter[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, **41**(2): 597-606.
- [24] 江俊武, 李帅东, 沈胤胤, 等. 夏季太湖 CDOM 光学特性空间差异及其来源解析[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(7): 1020-1030.
Jiang J W, Li S D, Shen Y Y, *et al.* Spatial differences of optical properties of CDOM and their source apportionment in Taihu Lake in summer[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(7): 1020-1030.
- [25] 刘新, 王友权, 徐华成, 等. 富营养化湖泊藻型及草型区微生物群落对有色可溶性有机物组成的影响[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(8): 1403-1409.
Liu X, Wang Y Q, Xu H C, *et al.* Effects of microbial communities on the composition of algae-derived and grass-derived chromophoric dissolved organic matter in eutrophic lake [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(8): 1403-1409.
- [26] Yao B, Hu C M, Liu Q Q. Fluorescent components and spatial patterns of chromophoric dissolved organic matters in Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(22): 23057-23070.
- [27] Loiselle S A, Bracchini L, Dattilo A M, *et al.* Optical characterization of chromophoric dissolved organic matter using wavelength distribution of absorption spectral slopes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, **54**(2): 590-597.
- [28] Coble P G, Green S A, Blough N V, *et al.* Characterization of dissolved organic matter in the Black Sea by fluorescence spectroscopy[J]. *Nature*, 1990, **348**(6300): 432-435.
- [29] Zhou Y Q, Jeppesen E, Zhang Y L, *et al.* Dissolved organic matter fluorescence at wavelength 275/342 nm as a key indicator for detection of point-source contamination in a large Chinese drinking water lake[J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 503-509.
- [30] Hunt J F, Ohno T. Characterization of fresh and decomposed dissolved organic matter using excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy and multiway analysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, **55**(6): 2121-2128.
- [31] 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.

- [32] Kowalczyk P, Zablock M, Sagan S, *et al.* Fluorescence measured in situ as a proxy of CDOM absorption and DOC concentration in the Baltic Sea[J]. *Oceanologia*, 2010, **52**(3): 431-471.
- [33] Murphy K R, Stedmon C A, Graeber D, *et al.* Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC [J]. *Analytical Methods*, 2013, **5**(23): 6557-6566.
- [34] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(1): 38-48.
- [35] Lawaetz A J, Stedmon C A. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water [J]. *Applied Spectroscopy*, 2009, **63**(8): 936-940.
- [36] Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(2): 686-697.
- [37] Huang C C, Li Y M, Yang H, *et al.* Study of influencing factors to chromophoric dissolved organic matter absorption properties from fluorescence features in Taihu lake in autumn[J]. *Journal of Limnology*, 2013, **72**(2): 326-335.
- [38] Zhou L, Zhou Y Q, Hu Y, *et al.* Hydraulic connectivity and evaporation control the water quality and sources of chromophoric dissolved organic matter in Lake Bosten in arid northwest China [J]. *Chemosphere*, 2017, **188**:608-617.
- [39] 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.
- [40] 宋晓娜, 于涛, 张远, 等. 利用三维荧光技术分析太湖水体溶解性有机质的分布特征及来源[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(11): 2321-2331.
Song X N, Yu T, Zhang Y, *et al.* Distribution characterization and source analysis of dissolved organic matters in Taihu Lake using three dimensional fluorescence excitation-emission matrix [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(11): 2321-2331.
- [41] Coble P G, Del Castillo C E, Avril B. Distribution and optical properties of CDOM in the Arabian Sea during the 1995 Southwest Monsoon [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1998, **45**(10-11): 2195-2223.
- [42] Chen J, LeBoeuf E J, Dai S, *et al.* Fluorescence spectroscopic studies of natural organic matter fractions [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(5): 639-647.
- [43] Walker S A, Amon R M W, Stedmon C A. Variations in high - latitude riverine fluorescent dissolved organic matter: a comparison of large Arctic rivers [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118**(4): 1689-1702.
- [44] 吴雅丽, 许海, 杨桂军, 等. 太湖水体氮素污染状况研究进展[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(1): 19-28.
Wu Y L, Xu H, Yang G J, *et al.* Progress in nitrogen pollution research in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(1): 19-28.
- [45] 张绪琴, 张士魁, 吴永森, 等. 海水黄色物质研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2000, **18**(1): 89-92.
Zhang X Q, Zhang S K, Wu Y S, *et al.* Progress in research on yellow-substance in seawater[J]. *Advances in Marine Science*, 2000, **18**(1): 89-92.
- [46] 季乃云, 赵卫红, 王江涛, 等. 胶州湾赤潮暴发水体中溶解有机物荧光特征[J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 257-262.
Ji N Y, Zhao W H, Wang J T, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter during algal bloom in Jiaozhou Bay[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(2): 257-262.
- [47] Huang C C, Li Y M, Liu G, *et al.* Tracing high time-resolution fluctuations in dissolved organic carbon using satellite and buoy observations: case study in Lake Taihu, China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, **62**: 174-182.

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the δ ¹⁵ N of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α-HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshuitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)