环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第9期
2023年9月15日

目 次

河北南部城市臭氧和VOCs的污染特征及传输贡献 …… 赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊O_3浓度时空分布及潜在源区分析 …… 李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁睨月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征 …… 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层O_3和前体物HCHO及NO_2的时空特征 …… 王晓雯, 刘旻霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020年广东省大气甲醛排放演变特征 …… 明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业VOCs排放水平及减排潜力 …… 黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘PM_{10}和$PM_{2.5}$中碳组分特征 …… 沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应 …… 高爽, 逄超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系 …… 裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因 …… 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价 …… 陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险 …… 张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林岿璇 (4896)
太湖水华前表层水CDOM的光谱特征与来源解析 …… 王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域COD的组成及各组分贡献 …… 李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估 …… 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应 …… 李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜娴, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析 …… 于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颉, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群 …… 张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响 …… 李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响 …… 辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝菡, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 宋舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制 …… 赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌*Glutamicibacter* sp. WS1低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制 …… 魏渤惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制 …… 岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响 …… 贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估 …… 张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评价 …… 耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估 …… 马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征 …… 赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响 …… 陶辉, 于多, 杨兰, 陈怿扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响 …… 郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响 …… 赵肖琼, 张恒慧, 赵润柱, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算 …… 张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响 …… 徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素:基于Meta分析 …… 刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响 …… 张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素 …… 罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤AMF群落和团聚体稳定性的影响 …… 鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子 …… 赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响 …… 聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性 …… 唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响 …… 周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响 …… 王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如茵, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性 …… 刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
$CuFeO_2$改性生物炭对四环素的吸附特性 …… 刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于Meta分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应 …… 陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于PMF模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评价 …… 郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于PMF-PCA/APCS与PERI的菏泽油用牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估 …… 赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评价及土壤环境基准值推导 …… 马杰, 佘泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析 …… 贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张義 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评价 …… 杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征 …… 周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO_2泡沫混凝土碳封存潜力分析 …… 张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究:以电子废物拆解为例 …… 陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第44卷第9期 2023年9月
Vol.44,No.9 Sep.,2023

太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析

王永强[1,2,3], 卢少勇[1,2], 黄蔚[4], 韩镇阳[1,2], 国晓春[1,2*]
(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 3. 哈尔滨工业大学环境学院, 哈尔滨 150090; 4. 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)

摘要: 有色溶解性有机质(CDOM)是水生态系统中营养盐生物地球化学循环的重要环节,为探究太湖水华前表层水中 CDOM 的组分特征与来源,采用紫外-可见光谱与激发发射矩阵荧光光谱-平行因子分析(EEM-PARAFAC)技术对表层水中的 CDOM 组分进行了解析,结合 CDOM 光学参数(a_{355}、$SUVA_{254}$、a_{250}/a_{365}、FI、BIX 和 HIX)辨识其空间差异与污染来源,并与太湖 CDOM 组分历史数据进行了初步对比. 结果表明, a_{355}、$SUVA_{254}$和 a_{250}/a_{365}显示太湖东部表层水 CDOM 呈现高浓度、高芳香性和低相对分子量的特征,而北部与之相反. 平行因子分析法从 CDOM 中分离出 4 个组分,类酪氨酸(C1)、两种类色氨酸(C2、C4)和类富里酸(C3),且主要组分 C1 与 C2 和 C3 组分具有较强的线性关系,不同组分来自相似污染源,荧光指数显示,太湖 CDOM 不同区域间受内源与陆源输入影响存在差异,但整体腐殖化程度较低. 这表明太湖 CDOM 组分以类蛋白(C1、C2 和 C4)为主(>85%)且以自生源为主,可生化利用性好.

关键词:太湖; 有色溶解性有机质(CDOM); 水华前; 激发发射矩阵荧光光谱-平行因子分析(EEM-PARAFAC); 荧光指数
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)09-4906-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202208137

Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming

WANG Yong-qiang[1,2,3], LU Shao-yong[1,2], HUANG Wei[4], HAN Zhen-yang[1,2], GUO Xiao-chun[1,2*]
(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 4. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) is an important part of the nutrient biogeochemical cycle in aquatic ecosystems. To explore the characteristics and sources of CDOM components in the surface water of Taihu Lake, UV-visible spectroscopy and excitation emission matrix fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis were used to analyze CDOM components in surface water. Combined with CDOM optical parameters (a_{355}, $SUVA_{254}$, a_{250}/a_{365}, FI, BIX, and HIX), the spatial differences and pollution sources were identified, and a preliminary comparison was made between this study and the historical data of CDOM components in Taihu Lake. According to the results, a_{355}, $SUVA_{254}$, and a_{250}/a_{365} showed the characteristics of high concentration, high aromatic ability, and low relative molecular weight of CDOM in the surface water of the eastern part of Taihu Lake; however, the northern part showed the opposite characteristics. Four components were isolated from CDOM using parallel factor analysis: one tyrosine-like (C1), two types of tryptophan (C2 and C4), and one fulionic acid (C3). The main component C1 had a strong linear relationship with the C2 and C3 components, suggesting that different components originated from similar pollution sources. The fluorescence index showed that CDOM in different areas of Taihu Lake were differently affected by endogenous and terrestrial inputs; however, the overall humification degree was low. This indicated that the CDOM components in Taihu Lake were primarily protein-like (C1, C2, and C4) (>85%) and autogenous, with good biochemical availability.

Key words:Taihu Lake; chromophoric dissolved organic matter(CDOM); before cyanobacterial blooming; excitation emission matrix fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis (EEM-PARAFAC); fluorescence index

溶解性有机物(dissolved organic matter,DOM)指通过动植物、微生物腐解等过程产生的一类复杂的混合有机物[1],有色溶解有机物(chromophoric dissolved organic matter,CDOM)是 DOM 的一种光学活性成分,在紫外和可见光区域具有良好的吸收性能. CDOM 可以影响疏水有机物/重金属等物质的吸附、解析、富集或降解等过程,其反应性直接取决于它的组成和结构特征[2]. 同时,CDOM 作为湖泊富营养化状况的重要指示因子,在碳、氮和磷等元素的生物地球化学循环中起着重要的作用[3,4]. 因此,有必要厘清湖泊中 CDOM 的来源与结构特征.

CDOM 物质组成复杂且具有连续的分子量分布和多官能团结构,因此难以对其中的各类物质进行精准测量. 随着光谱技术的发展,使用紫外-可见吸收和荧光光谱来表征 CDOM,并通过激发-发射矩阵(EEM)荧光光谱结合平行因子法(PARAFAC)来分析 CDOM 的结构以及组成特征,具有灵敏度高、样

收稿日期: 2022-08-15; **修订日期**: 2022-11-25
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07208008); 科技基础性工作专项(2015FY110900)
作者简介: 王永强(1994~),男,博士研究生,主要研究方向为湖泊水体富营养化,E-mail:yqwang0_0@163.com
* 通信作者,E-mail:guoxiaochun419@163.com

品不破坏、选择性好和可定量表征荧光 DOM 组成等特点[5~7]. Zhou 等[8]采用平行因子法解析博斯腾湖 CDOM 主要组成为类蛋白质与类腐殖质，将 CDOM 与环境因素进行主成分分析发现湖内类蛋白质占比受盐度影响高于支流. Feng 等[9]使用 EEM-PARAFAC 鉴定出南四湖中 3 种荧光物质（包括 UVC 类腐殖质、UVA 类腐殖质和类酪氨酸成分），发现不同采样点 DOM 组分分布差异明显，南四湖以 UVA 类腐殖质组分为主，荧光光谱指标表明 DOM 的来源主要来自外源或陆地输入. 激发发射矩阵荧光光谱-平行因子分析（excitation emission matrix fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis，EEM-PARAFAC）作为获取 CDOM 特征的监测工具，尽管无法与核磁共振或傅里叶变换离子回旋共振质谱等高分辨率方法的准确性相媲美[10,11]，但是仪器成本低廉、实验操作简单而更易被广泛应用，这使其成为表征和跟踪水生生态系统中 CDOM 的一种很有前景的方法.

太湖作为我国五大淡水湖泊之一，多年来深受富营养化问题的困扰，夏季“蓝藻水华”频发. 而自 2019 年“新冠疫情”暴发后，流域内的生产生活方式发生了极大的改变，这不可避免地影响了湖泊内 CDOM 的汇入，使得水质呈向好趋势. 根据江苏省生态环境厅发布消息显示：2021 年上半年太湖藻情持续好转，蓝藻水华发生次数同比减少 11 次；平均面积与湖体藻密度同比减少 30% 以上[12]. 京杭大运河苏南段受疫情影响导致地区内各行业停工，水质参数和荧光成分均降至低位，而国内疫情得到控制后，又呈现逐渐上升趋势[13]. 因此，疫情背景下水华前 CDOM 的组分变化与来源差异值得深入探究，以期为太湖富营养化的管控提供重要理论支撑.

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

太湖是中国第三大浅水淡水湖，地跨 3 省 1 市（苏、浙、皖和沪），流域面积 3.69 万 km^2，水域面积 6 137 km^2，西部多丘陵，东部以平原水网为主，位于长江三角洲的核心区域，具有人口密集、经济发达和城市化高等特点[14]，十几年来一直受到严重的蓝藻水华等问题的困扰[15].

1.2　样品的采集与处理

在太湖共设置 43 个采样点（图 1），将太湖划分为近湖心、竺山湾、梅梁湾、贡湖湾、东太湖、东太湖湾和西太湖这 7 个区域，于 2021 年 4 月 13 ~ 17 日太湖蓝藻暴发前（通常于 5 月进入蓝藻水华高发期）进行采样，使用聚乙烯瓶低温保存，运回实验室后 48 h 内完成后续实验. 表层水样品经 0.22 μm 的醋酸纤维素滤膜过滤后，依托中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室，采用 TOC 分析仪（岛津 TOC-LCPN）测定样品 DOC

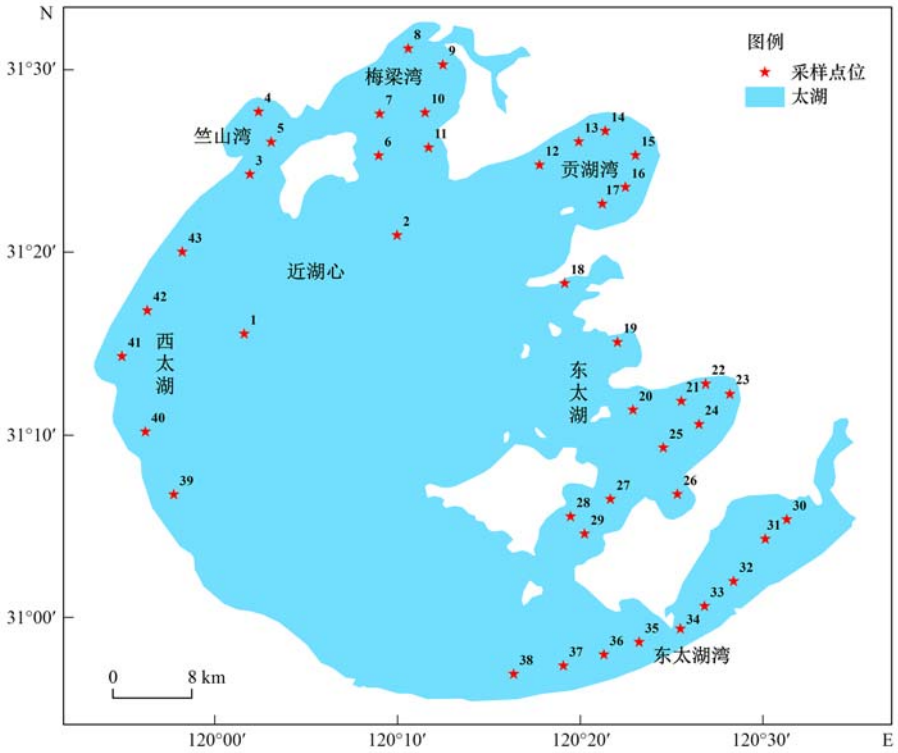


图 1　太湖采样点位置示意

Fig. 1　Sampling sites in Taihu Lake

质量浓度. 根据获得 DOC 结果对水样进行稀释,统一至 10 mg·L^{-1}左右以消除内滤波效应,然后扫描 DOM 三维荧光光谱.

三维荧光光谱采用日立 F-7000 荧光光谱分析仪进行测定. 激发光源为 150W 氙灯,PMT 电压设为 700 V. 扫描波长范围设定:激发波长 200 ~ 450 nm,发射波长为 250 ~ 600 nm,激发与发射波长狭缝宽度均为 5 nm,响应时间设为自动,扫描速度设为 2 400 nm·min^{-1}[16],扫描光谱进行仪器自动校正,水样装入 1 cm 石英荧光样品池中测量.

紫外-可见吸收光谱扫描:将水样经 0.22 μm 的醋酸纤维素滤膜过滤后使用紫外-可见分光光光度计(UV756CRT,上海佑科)对样品进行紫外-可见光光谱扫描,以超纯水作为空白,扫描波长为 200 ~ 900 nm,步长为 1 nm,中速扫描,使用 1 cm 石英比色皿.

1.3 光谱分析

紫外-可见吸收光谱:吸收系数(a_λ)计算公式见式(1):

$$a_\lambda = 2.303 \times (A_\lambda - A_0)/L \quad (1)$$

式中, a_λ 为波长 λ 处的吸收系数,m^{-1}; A_λ 为波长 λ 处的吸光度; A_0 为 680 ~ 700 nm 波段的吸光度平均值,通过减去 A_0 来扣除仪器本身的基线漂移和散射等影响; L 为比色皿宽度,m. a_{355} 为 355 nm 处的吸收系数,可以用来表示 CDOM 的含量. $SUVA_{254}$ 为 a_{355} 与 DOC 质量浓度的比值用以评价 CDOM 的芳香性,值越大表示组分中所含苯环化合物越多,有机质的腐殖化程度也越高. a_{250}/a_{365} 为吸收系数, a_{250} 与 a_{365} 的比值可以用于表征 CDOM 的相对分子量,其比值越高表明分子量越小[17].

三维荧光光谱:光谱数据用仪器自带软件 Hitachi FL Solutions Application 读取并导出,然后用软件 MATLAB 2019a 中 DOMFlour 工具箱对三维荧光光谱矩阵的 PARAFAC 分析,异常值去除及 PARAFAC 模型有效性验证参考王书航[5]和张广彩等[16]的研究,最终经过反复迭代确定合适的 DOM 组分数[18]. 并对 DOM 的荧光指数 FI、自生源指数 BIX 和腐殖化指数 HIX 进行计算[17,19,20].

1.4 数据处理与绘图

使用 Excel 2016 分析数据, Arcmap 10.2、Matlab 2019a 和 OriginPro 9.1 软件绘制采样点分布、三维荧光组分和荧光光谱参数图等.

2 结果与讨论

2.1 紫外-可见吸收光谱

太湖表层水中 CDOM 吸收系数 a_{355} 的范围为 0.81 ~ 6.91 m^{-1},平均值为 2.73 m^{-1}[图 2(a)]. 可以看出,贡湖湾和东太湖区域的 a_{355} 的平均值较高,分别为 3.61 m^{-1}和 3.74 m^{-1},说明两个区域内表层水中 CDOM 的浓度水平较高,竺山湾的 a_{355} 平均值最低,为 1.72 m^{-1}. 而石玉等[21]在 2017 年的研究发现由于大量陆源 CDOM 输入,太湖竺山湾和梅梁湾表层水 CDOM 浓度最大,与本研究结果相反,这说明目前太湖流域外源污染输入发生了转变. 由图 2(b)可知 $SUVA_{254}$ 的范围为 0.45 ~ 3.80 L·(mg·m)$^{-1}$,平均值为 1.93 L·(mg·m)$^{-1}$,CDOM 芳香性由高到低依次为:贡湖湾 > 东太湖 > 近湖心 > 西太湖 > 东太湖湾 > 梅梁湾 > 竺山湾. 图 2(c)中 a_{250}/a_{365} 的变化范围为 3.84 ~ 12.13,平均值为 6.99,综合其与 $SUVA_{254}$ 和

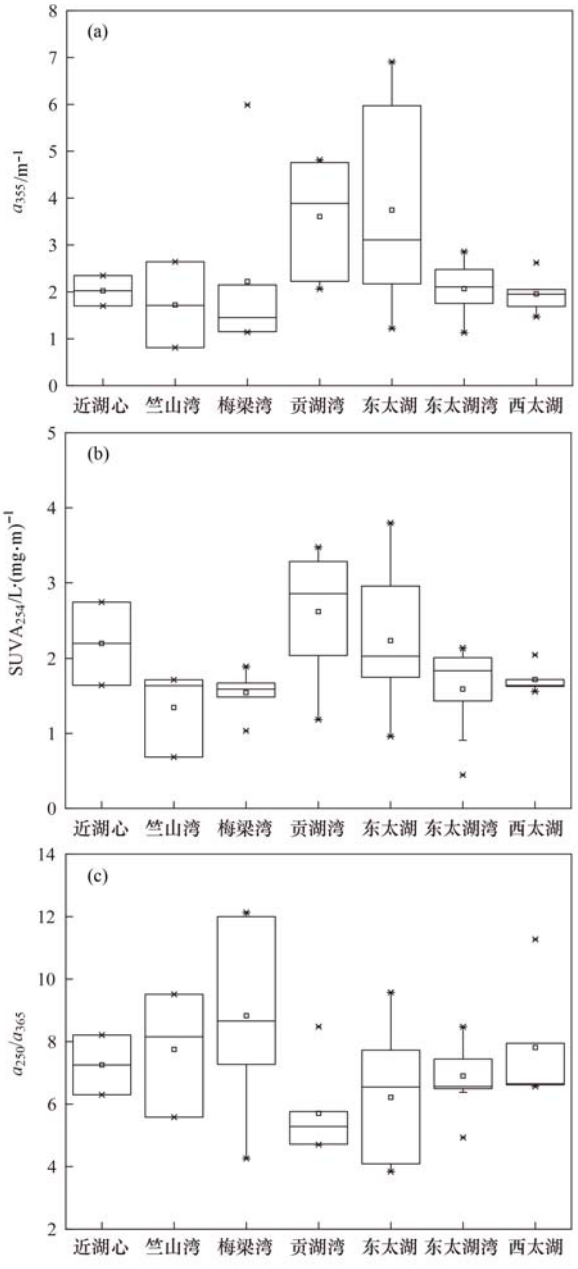


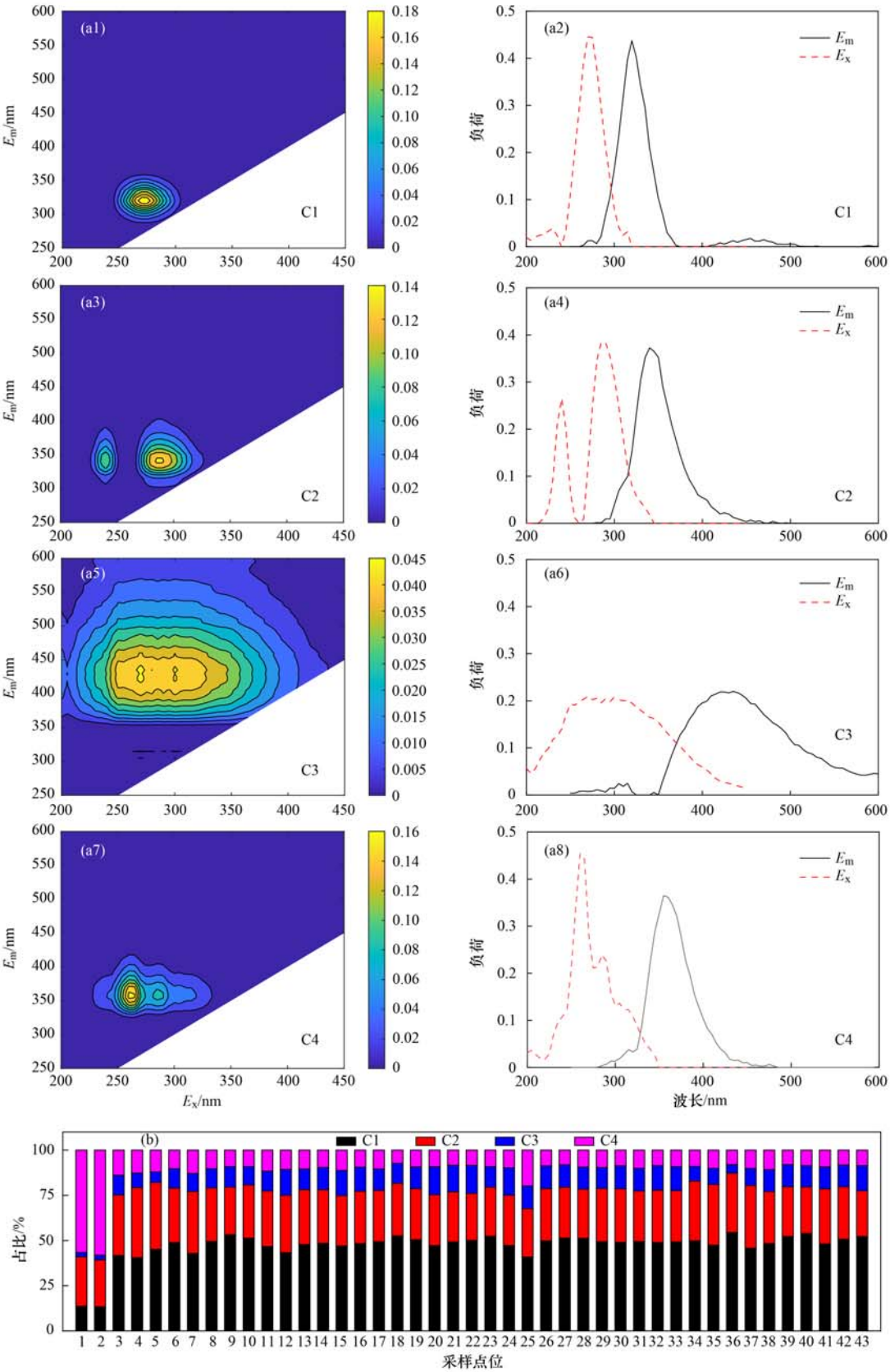
图 2 CDOM 紫外-可见吸收光谱参数的空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of UV-visible absorption spectrum parameters of CDOM

a_{250}/a_{365}空间分布趋势可以看出，贡湖湾和东太湖 CDOM 浓度相对较高，以低相对分子量的高芳香性物质为主，而竺山湾和梅梁湾以低浓度水平和高相对分子量的低芳香性物质为主.

2.2　荧光组分特征

太湖表层水中 CDOM 经 PARAFAC 解析出 4 种



(a)荧光组分 C1 ~ C4；(b)各组分占比

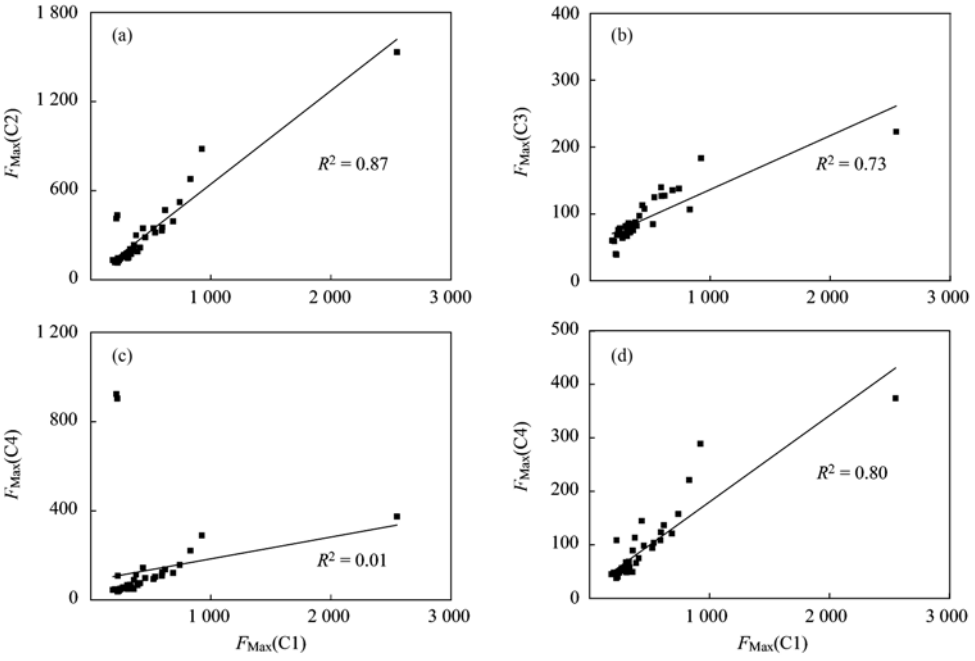
图 3　PARAFAC 模型输出 4 个组分的荧光特征

Fig. 3　PARAFAC model output showing fluorescence signatures of four components identified

荧光组分 C1 ~ C4. 如图 3(a1) ~ 3(a8)所示,组分 C1(E_x = 275 nm, E_m = 320 nm)为类酪氨酸,其峰值对应传统意义上的自生源类蛋白荧光峰 B 峰[22]. 组分 C2(E_x = 240/290 nm, E_m = 340 nm)为类色氨酸[23],与传统意义上的 T 峰位置比较相近,可能源自细菌参与的蓝藻生物质降解[24]. 组分 C3(E_x = 270 nm, E_m = 430 nm)为类富里酸,与传统 A 峰相比有一定的红移,属于紫外区类富里酸,主要源自土壤有机质的陆地输入[25],组分 C4(E_x = 260 nm, E_m = 355 nm)接近 T1 峰仍可归为类色氨酸,主要来源于微生物及细菌代谢[22]. 4 种 CDOM 荧光组分中(C1 ~ C4)的占比分别为 13.39% ~ 54.48%、25.32% ~ 38.73%、2.44% ~ 15.44% 和 7.26% ~ 58.13% [图 3(b)],类酪氨酸组分 C1 占比平均值最高,为 47.05%, 类色氨酸组分(C2 和 C4)占比其次,分别为 29.53% 和 12.17%, 类富里酸组分 C3 占比仅为 11.25%. Jiang 等[26]在长寿湖也发现两个蛋白质样峰,包括色氨酸(T)和酪氨酸(B)氨基酸样成分,受陆源影响还有两个腐殖质样峰(A 和 C). 王爽等[17]在 2019 ~ 2021 年对太湖流域内南白荡表层水中 DOM 多次采样研究,主要含有类酪氨酸、陆源类腐殖酸和类色氨酸等常见荧光组分,以生物内源为主.

太湖表层水中以类蛋白(C1、C2 和 C4)为主. 类蛋白物质多为低分子量和不稳定的有机物质,主要受微生物代谢影响,易作为营养源被利用转化为无机物. Zhao 等[27]在富营养化湖泊洱海表层水中分离出 4 种 CDOM 组分,其中类蛋白质占比最高(41.98%),而滇池由于受大型植物与藻类分布以及流入河流的影响,DOM 成分容易腐殖化,导致腐殖质类物质成为重要的 DOM 组分[28]. 水环境中类蛋白物质还会受人类活动和环境条件等多种因素影响. Lyu 等[7]研究发现在城市化水域由于人类活动会导致 DOM 中蛋白质成分显著增加,同时夏季光照充足,光降解在腐殖质组分的降解中也起到了重要的作用,降低表层水中腐殖质组分的占比,光降解可以通过去除或者转化水中的 DOM 来影响其生物利用度与最终归趋[29,30]. 此外,雨水作为湖泊 CDOM 湿沉降的重要过程,也是容易被忽略的污染源之一,其与太湖水中 CDOM 和营养物质存在密切联系,年贡献率可达 11.7%, 在一定程度上也影响类蛋白物质的含量[4].

Wang 等[31]也发现不同来源 CDOM 中,蛋白质组分和腐殖质组分之间因存在相互作用而具有较强的相关性. 因此,对主要组分 C1 与 C2 ~ C4 组分的荧光强度 F_{Max} 进行线性拟合发现, C1 与 C2(R^2 = 0.73, P < 0.05)及 C1 与 C3(R^2 = 0.87, P < 0.05)之间呈现线性关系,C1 与 C2 和 C3 的线性关系较强[图 4(a)和 4(b)]. C1 与 C4 关系较弱[图 4(c)],主要原因是近湖心 1 和 2 号点位荧光强度差异较大导致,当剔除两个点位再对 C1 与 C4 进行线性拟合后发现有良好的线性关系[图 4(d)],这说明在 CDOM 向湖中心传输过程中,类蛋白质物质组分可能受微生物或浮游植物代谢等影响发



(a)C1 与 C2 拟合; (b)C1 与 C3 拟合; (c)C1 与 C4 拟合; (d)C1 与 C4 拟合(不含 1、2 号近湖心点位荧光数据)

图 4 C1 与 C2 ~ C4 组分的最大荧光强度(F_{Max})线性拟合

Fig. 4 Linear relationship between F_{Max} of C1 and C2-C4

生了变化. Zhang 等[32]在实验中发现了源自本土浮游植物和大型植物的 CDOM 荧光包含腐殖酸和富里酸特征,虽然类似于从陆源(如土壤)输入的特征,但实际上是在植物衰亡和微生物降解过程中释放的. Zhou 等[24]也指出蓝藻水华暴发过程中大量 CDOM 来自于微生物内源,使得表层水中大多 CDOM 具有同源性.

2.3　DOM 荧光指数

DOM 荧光指数通常用来指示 DOM 来源以及各来源贡献率高低,其中荧光指数(FI)用以表示 CDOM 来源,当 FI > 1.9、FI < 1.4 和 1.4 < FI < 1.9 时分别表示 CDOM 主要来自于藻类或微生物分解的内源代谢产物、陆地外源输入有机物和兼具内外来源. 腐殖化指数(HIX)数值越大表示 CDOM 腐殖化程度越高. 自生源指数(BIX)表征各荧光组分的自生源特征以及 DOM 的生物可利用性,当 BIX > 0.8 时为强自生源性,BIX < 0.8 时表示自生源不明显. 如图 5 所示,FI、HIX 和 BIX 的范围分别为 0.67 ~ 5.69、0.21 ~ 0.76 和 0.68 ~ 4.12,总体来说水体 DOM 腐殖化程度较低,以自生源为主,生物可利用性较高[33]. 从图 5(a)可以看出:腐殖化程度由高到低依次为:贡湖湾 > 东太湖 > 竺山湾 > 梅梁湾 > 西太湖 > 东太湖湾 > 近湖心;生物可利用性由高到低依次为:近湖心 > 竺山湾 > 东太湖湾 > 梅梁湾 > 贡湖湾 > 西太湖 > 东太湖.

近湖心的 1 号和 2 号点位 BIX > 4 远高于其他点位,生物可利用性较高,而 FI 指数表示 1 点位 DOM 为陆源输入,2 点位则以内源性有机物为主,值得注意的是两个点位均处于蓝藻水华高发区[34],这说明导致太湖不同区域水华的原因可能存在区别. 除了氮磷元素的过量输入导致藻类水华频发外,藻类和浮游生物对外源输入响应不明显,即使控制了外源氮和磷的输入,内源输入仍然对富营养化和水华产生重要影响[35]. 梅梁湾的 BIX > 0.8,FI 指数平均值 > 1.9,说明主要来自于由微生物分解的内源性代谢产物. 有研究也表明太湖流域受外源贡献类腐殖质荧光成分从河流到湖泊明显减少,而类蛋白质荧光成分明显增加[36]. 贡湖湾北侧以内源性有机质(FI > 2.2)为主,可能受贡湖湾湿地公园与大溪港湿地公园的影响,陆源有机物输入较少,而南侧为旅游度假区且靠近工业园区,导致部分陆源性有机质的输入增加(1.1 < FI < 2.8). 东太湖湾和西太湖(36、40 和 43 号点位除外)CDOM 则兼具陆源和内源的特征[37],且 HIX 指数显示东太湖湾区域(30 ~ 36 点位)作为太湖出湖口,其 DOM 腐殖化程度呈逐渐升高趋势.

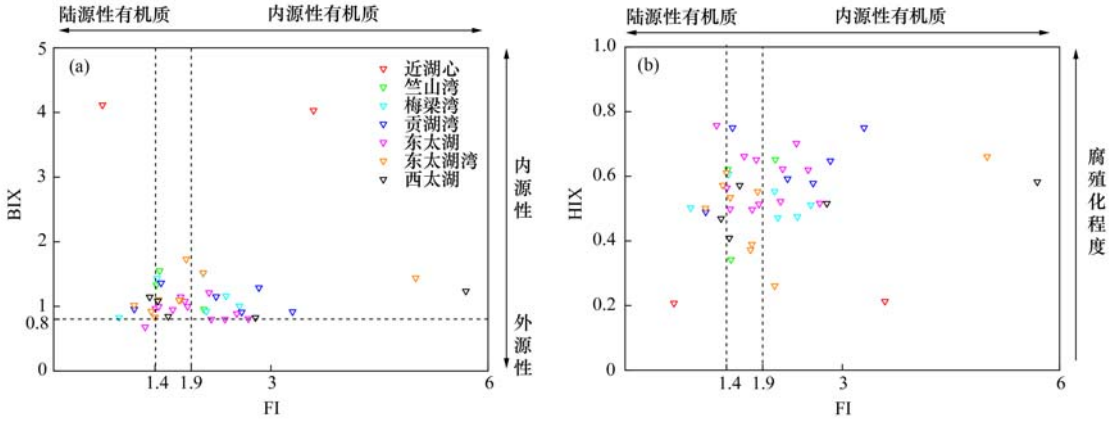


图 5　太湖 CDOM 的荧光指数 FI-HIX 和 FI-BIX 分布

Fig. 5　FI-HIX and FI-BIX distributions of CDOM in Taihu Lake

2.4　与现有太湖 CDOM 研究对比

太湖作为流域内城市人口生产生活以及工农业活动污水的蓄积库,CDOM 来自陆地河流输入、沉积物释放和湖内浮游植物降解,并在太湖的微生物代谢和强烈的光氧化等作用下发生分解,剩余难降解的 CDOM 向下游及底质中传输[38]. 这就导致 CDOM 组分与来源受时间推移、环境条件改变、蓝藻水华暴发和外源污染输入波动等因素影响会不断发生变化. 有研究较早开始使用三维荧光技术分析太湖水体溶解性有机质,发现不同时期太湖中 CDOM 组分存在差异[24,32,39]. 总结太湖表层水体 CDOM 的历史研究发现(表 1),CDOM 来源解析大多为 3 ~ 5 种组分,主要有类腐殖质、类富里酸、类色氨酸和类酪氨酸等,类腐殖质又可细分为微生物源腐殖质、陆源腐殖质、农业类腐殖质物质或红移微生物类腐殖质物质等[24,40],类富里酸细分为紫外光区和可见光区类富里酸[41],以及高激发区/低激发区类色氨酸和类酪氨酸等[6].

从近年研究结果来看,宋晓娜等[39]、Zhang 等[41]和胡琼丹等[42]在太湖蓝藻水华暴发时进行采

样研究,均发现 20% 以上类富里酸物质. 太湖除了富营养化与有害蓝藻水华问题外,黑水团问题(一种蓝藻水华腐烂降解后释放的大量溶解性有机物形成的黑色水体)同样会对 CDOM 产生影响[43]. Zhou 等[24]研究黑水团污染现象出现时,分析太湖表层水 CDOM 组分发现了 26.3% 的类腐殖质. 上述研究均发现蓝藻水华导致类富里酸和类腐殖质占比的增加与类蛋白物质的占比降低,因为蓝藻水华在一定程度上会改变水体 DOC 的组成和反应性[41],这就意味着 CDOM 的成分也会随之发生较大的变化. 有研究证实了在富营养化湖泊中类蛋白质成分与浮游植物密切相关,氮磷可以通过影响浮游植物,进而促进 DOM 转化[27]. 总的来说,太湖水华前 CDOM 组成以类蛋白物质(类色氨酸与类酪氨酸)为主,新冠疫情下太湖表层水 CDOM 组分中类蛋白物质占比达到历史最高水平,为 88.75%. Duan 等[44]在 2020 年 1 月进行采样分析也发现类蛋白物质占比高于暴发期,为 CDOM 主要组分. 这可能是由于疫情管控下来自生产生活的氮磷污染输入减少抑制了浮游植物的生长,削弱了 CDOM 的转化过程.

表 1 近年来相关研究中太湖 CDOM 荧光组分1)/%

Table 1 Studies on fluorescence components of CDOM in Taihu Lake in recent years/%

采样日期(年-月)	类酪氨酸	类色氨酸	类富里酸		类腐殖质		文献
			紫外区	可见光区	微生物源	陆地源	
2009-09	36.20	28.70	22.70	12.40	—	—	[39]
2012-11	26.60	45.30	19.90	8.20	—	—	[42]
2013-04	23.10	50.60	—	—	15.30	11.00	[24]
2017-08	30.20	26.90	18.50	10.30	14.10	—	[45]
2020-01	51.80	32.60	—	—	—	15.60	[44]
2021-04	47.05	41.70	11.25	—	—	—	本研究

1)"—"表示文献中无相关数据

3 结论

(1)太湖表层水中 a_{355}、$SUVA_{254}$ 和 a_{250}/a_{365} 参数表明太湖东部贡湖湾与东太湖等区域 CDOM 呈现高浓度、高芳香性和低相对分子量特征,北部竺山湾与梅梁湾区域则以低浓度、低芳香性和高相对分子量的 CDOM 为主. 不同湖区表层水中 CDOM 来源存在差异,梅梁湾 CDOM 以内源为主,而贡湖湾、东太湖湾和西太湖区域 CDOM 兼具内源与陆源的双重特征.

(2)太湖表层水中 CDOM 组分有 4 类:类酪氨酸 C1、类色氨酸 C2、类富里酸 C3 和类色氨酸 C4,类蛋白与类腐殖质物质呈现较强的相关性. 总体来说,新冠疫情下太湖水华前 CDOM 中类蛋白物质为主要组分,腐殖化程度较低,以自生源为主且生物可利用性较高.

参考文献:

[1] Bao Y, Huang T, Ning C W, *et al*. Changes of DOM and its correlation with internal nutrient release during cyanobacterial growth and decline in Lake Chaohu, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, **124**: 769-781.

[2] Guéguen C, Burns D C, Mcdonald A, *et al*. Structural and optical characterization of dissolved organic matter from the lower Athabasca River, Canada[J]. Chemosphere, 2012, **87**(8): 932-937.

[3] Li D B, Pan B Z, Zheng X, *et al*. CDOM in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers, China: optical properties, possible sources, and their relationships with environmental variables[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(26): 32856-32873.

[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] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 基于三维荧光光谱—平行因子分析技术的滆湖 CDOM 分布特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(2): 517-524.
Wang S H, Wang W W, Jiang X, *et al*. Distribution of chromophoric dissolved organic matter in Lihu Lake using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(2): 517-524.

[6] 李莹杰, 吴易雯, 张列宇, 等. 基于平行因子法分析湖泊沉积物间隙水中 DOM 的三维荧光光谱[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2015, **28**(4): 507-512.
Li Y J, Wu Y W, Zhang L Y, *et al*. The analysis for 3-D fluorescence spectra of dissolve organic matter in lakes' sediment pore water based on parallel factor method[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2015, **28**(4): 507-512.

[7] Lyu L L, Liu G, Shang Y X, *et al*. Characterization of dissolved organic matter (DOM) in an urbanized watershed using spectroscopic analysis[J]. Chemosphere, 2021, **277**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130210.

[8] 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.

[9] Feng L K, Zhang J, Fan J L, *et al*. Tracing dissolved organic matter in inflowing rivers of Nansi Lake as a storage reservoir: implications for water-quality control[J]. Chemosphere, 2022, **286**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131624.

[10] Cortés-Francisco N, Harir M, Lucio M, *et al*. High-field FT-ICR mass spectrometry and NMR spectroscopy to characterize DOM removal through a nanofiltration pilot plant[J]. Water Research,

2014, **67**: 154-165.

[11] 杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 等. 太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 4108-4117.
Du Y X, Dai J R, Zhang Q Y, *et al*. Spectroscopic and molecular characterization of water soluble organic matter from sediments in the macrophyte-dominated and algae-dominated zones of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 4108-4117.

[12] 江苏省生态环境厅. 2021 年上半年度太湖水质藻情情况[EB/OL]. http://sthjt.jiangsu.gov.cn/art/2021/8/4/art_83587_10106879.html, 2021-08-04.

[13] Shen J, Liu C Y, Lv Q, *et al*. Novel insights into impacts of the COVID-19 pandemic on aquatic environment of Beijing-Hangzhou Grand Canal in southern Jiangsu region[J]. Water Research, 2021, **193**, doi: 10.1016/j.watres.2021.116873.

[14] 罗敏纳, 孙蓓丽, 朱冰川, 等. 太湖流域浮游植物功能类群分布特征及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1471-1488.
Luo M N, Sun B L, Zhu B C, *et al*. Distribution characteristics of phytoplankton functional groups and their relationship with environmental factors in Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, **34**(5): 1471-1488.

[15] Qin B Q, Paerl H W, Brookes J D, *et al*. Why Lake Taihu continues to be plagued with cyanobacterial blooms through 10 years (2007-2017) efforts[J]. Science Bulletin, 2019, **64**(6): 354-356.

[16] 张广彩, 于会彬, 徐泽华, 等. 基于三维荧光光谱结合平行因子法的蘑菇湖上覆水溶解性有机质特征分析[J]. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(7): 933-939.
Zhang G C, Yu H B, Xu Z H, *et al*. The characteristics of dissolved organic matter in the overlying water of Moguhu Lake based on three dimensional fluorescence spectrum and parallel factor method[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, **35**(7): 933-939.

[17] 王爽, 王三秀, 黄清辉. 太湖流域南白荡表层水中溶解有机质赋存特征与来源[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(11): 139-148.
Wang S, Wang S X, Huang Q H. Characteristics and sources of dissolved organic matter in the surface water of Nanbaidang Lake in the Taihu Lake Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(11): 139-148.

[18] 程云轩, 赵可, 张越, 等. 松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1941-1949.
Cheng Y X, Zhao K, Zhang Y, *et al*. Fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter in Songhua Lake sediment[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1941-1949.

[19] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al*. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(20): 4702-4708.

[20] 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 等. 太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2056-2066.
Lü W W, Yao X, Zhang B H, *et al*. Fluorescent characteristics and environmental significance of particulate organic matter in Lake Taihu, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2056-2066.

[21] 石玉, 周永强, 张运林, 等. 太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4915-4924.
Shi Y, Zhou Y Q, Zhang Y L, *et al*. Response of chromophoric dissolved organic matter composition to different hydrological scenarios in large eutrophic Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4915-4924.

[22] He W, Hur J. Conservative behavior of fluorescence EEM-PARAFAC components in resin fractionation processes and its applicability for characterizing dissolved organic matter[J]. Water Research, 2015, **83**: 217-226.

[23] Xu H C, Cai H Y, Yu G H, *et al*. Insights into extracellular polymeric substances of cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* using fractionation procedure and parallel factor analysis[J]. Water Research, 2013, **47**(6): 2005-2014.

[24] 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.

[25] Garcia R D, del Carmen Diéguez M, Gerea M, *et al*. Characterisation and reactivity continuum of dissolved organic matter in forested headwater catchments of Andean Patagonia[J]. Freshwater Biology, 2018, **63**(9): 1049-1062.

[26] Jiang T, Chen X S, Wang D Y, *et al*. Dynamics of dissolved organic matter (DOM) in a typical inland lake of the Three Gorges Reservoir area: fluorescent properties and their implications for dissolved mercury species[J]. Journal of Environmental Management, 2018, **206**: 418-429.

[27] Zhao Y Q, Shen J, Feng J M, *et al*. Relative contributions of different sources to DOM in Erhai Lake as revealed by PLS-PM[J]. Chemosphere, 2022, **299**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134377.

[28] He J, Wu X, Zhi G Q, *et al*. Fluorescence characteristics of DOM and its influence on water quality of rivers and lakes in the Dianchi Lake basin[J]. Ecological Indicators, 2022, **142**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109088.

[29] Song X Y, Zhao M Y, Chen A Q, *et al*. Effects of input of terrestrial materials on photodegradation and biodegradation of DOM in rivers: the case of Heilongjiang River[J]. Journal of Hydrology, 2022, **609**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127792.

[30] 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.

[31] Wang Z G, Cao J, Meng F G. Interactions between protein-like and humic-like components in dissolved organic matter revealed by fluorescence quenching[J]. Water Research, 2015, **68**: 404-413.

[32] 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.

[33] Bittar T B, Vieira A A H, Stubbins A, *et al*. Competition between photochemical and biological degradation of dissolved organic matter from the cyanobacteria *Microcystis aeruginosa*[J]. Limnology and Oceanography, 2015, **60**(4): 1172-1194.

[34] 张虎军, 宋挺, 朱冰川, 等. 太湖蓝藻水华暴发程度年度预测[J]. 中国环境监测, 2022, **38**(1): 157-164.
Zhang H J, Song T, Zhu B C, *et al*. Annual forecast of the extent of cyanobacteria bloom in Taihu Lake[J]. Environmental Monitoring in China, 2022, **38**(1): 157-164.

[35] Gao J K, Liu G L, Li X W, *et al*. Organic carbon quantity and composition jointly modulate the differentiation of nitrate

reduction pathways in sediments of the Chinese eutrophic lake, Lake Chaohu[J]. Water Research, 2022, **220**, doi: 10.1016/j.watres.2022.118720.

[36] Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al*. Resolving the variability of CDOM fluorescence to differentiate the sources and fate of DOM in Lake Taihu and its tributaries[J]. Chemosphere, 2011, **82**(2): 145-155.

[37] 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.

[38] 秦伯强. 太湖生态与环境若干问题的研究进展及其展望[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(4): 445-455.
Qin B Q. Progress and prospect on the eco-environmental research of Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(4): 445-455.

[39] 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.

[40] Zhou Y Q, Yao X L, Zhang Y L, *et al*. Response of dissolved organic matter optical properties to net inflow runoff in a large fluvial plain lake and the connecting channels[J]. Science of the Total Environment, 2018, **639**: 876-887.

[41] Zhang X K, Li B L, Deng J M, *et al*. Regional-scale investigation of dissolved organic matter and lead binding in a large impacted lake with a focus on environmental risk assessment[J]. Water Research, 2020, **172**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115478.

[42] 胡琼丹, 王华静, 李锦, 等. 太湖秋季入湖水源中 DOM 的光谱学特征及通量[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(3): 152-158.
Hu Q D, Wang H J, Li J, *et al*. Various inflows to Taihu Lake in autumn: spectroscopy characteristics and DOM flux[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **38**(3): 152-158.

[43] Qin B Q, Li W, Zhu G W, *et al*. Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **287**: 356-363.

[44] Duan Z P, Tan X, Ali I, *et al*. Comparison of organic matter (OM) pools in water, suspended particulate matter, and sediments in eutrophic Lake Taihu, China: implication for dissolved OM tracking, assessment, and management[J]. Science of the Total Environment, 2022, **845**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157257.

[45] Zhang W, Zhou Y Q, Jeppesen E, *et al*. Linking heterotrophic bacterioplankton community composition to the optical dynamics of dissolved organic matter in a large eutrophic Chinese lake[J]. Science of the Total Environment, 2019, **679**: 136-147.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 9

Sep. 15, 2023

CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities ····· ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, *et al.* (4775)

Temporal and Spatial Distributions of O_3 Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring ····· LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, *et al.* (4785)

Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island ····· FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, *et al.* (4799)

Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O_3 and Precursors HCHO and NO_2 in East China ····· WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, *et al.* (4809)

Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020 ····· MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, *et al.* (4819)

VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo ····· HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, *et al.* (4832)

Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM_{10} and $PM_{2.5}$ of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an ····· SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, *et al.* (4843)

Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin ····· GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, *et al.* (4853)

Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin ····· PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, *et al.* (4863)

Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment ····· TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, *et al.* (4874)

Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain ··· CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, *et al.* (4884)

Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province ····· ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, *et al.* (4896)

Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming ····· WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, *et al.* (4906)

Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake ····· LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, *et al.* (4915)

Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake ····· SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, *et al.* (4927)

Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River ····· LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qiu, *et al.* (4941)

Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang ····· YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, *et al.* (4954)

Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels ····· ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, *et al.* (4965)

Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China ····· LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, *et al.* (4977)

Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir ····· XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, *et al.* (4985)

Action Mechanism of *Bacillus* on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater ····· ZHAO Zhi-rui, MA Chao, YAN Jia-chen, *et al.* (4996)

Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium *Glutamicibacter* sp. WS1 for Various Nitrogen Sources at Low Temperature ····· WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, *et al.* (5006)

Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism ····· CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, *et al.* (5017)

Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost ····· JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, *et al.* (5025)

Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin ····· ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, *et al.* (5036)

Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland ····· GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, *et al.* (5046)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan ····· MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, *et al.* (5055)

Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake ····· ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, *et al.* (5063)

Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of *Pseudomonas aeruginosa* Biofilm ····· TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, *et al.* (5071)

Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (*Brassica chinensis* L.) ····· GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, *et al.* (5080)

Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean ····· ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, *et al.* (5092)

Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide ····· ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, *et al.* (5102)

Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone ····· XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)

Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis ····· LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, *et al.* (5125)

Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope ····· ZHANG Gao-ning, XU Qi-wen, HE Bing-hui, *et al.* (5135)

Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals ····· LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, *et al.* (5145)

Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability ····· LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, *et al.* (5154)

Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain ····· ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, *et al.* (5164)

Effect of High-volume Straw Returning and Applying *Bacillus* on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil ····· NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, *et al.* (5176)

Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials ····· TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, *et al.* (5186)

Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce ····· ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, *et al.* (5196)

Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of *Brassica chinensis* L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress ····· WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, *et al.* (5204)

Distribution and Biotoxicity of Endogenous Pollutants in *Pennisetum* sp. Biochar from Different Polluted Areas ····· LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, *et al.* (5214)

Adsorption Characteristics of Tetracycline by $CuFeO_2$-modified Biochar ····· LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, *et al.* (5222)

Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis ····· LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, *et al.* (5231)

Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model ····· ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, *et al.* (5242)

Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI ····· ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, *et al.* (5253)

Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing ··· MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, *et al.* (5264)

Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province ····· JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, *et al.* (5275)

Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province ····· YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, *et al.* (5288)

Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil ····· ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)

Analysis of Carbon Storage Potential of CO_2 Foamed Concrete ····· ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, *et al.* (5308)

Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling ····· CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)