

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

**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

|                                                      |                                                                            |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 餐饮行业细颗粒物(PM <sub>2.5</sub> )排放测算方法:以上海市为例            | 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)                            |
| 上海夏季PM <sub>2.5</sub> 中有机物的组分特征、空间分布和来源              | 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)                 |
| 北京南郊区PM <sub>2.5</sub> 中水溶性无机盐季节变化及来源分析              | 高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)                                                        |
| 基于样方法的天津市春季道路扬尘PM <sub>10</sub> 中水溶性离子特征及来源解析        | 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)                                              |
| 广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析                                  | 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)                                |
| 基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径                         | 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)                                  |
| 区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用                               | 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)                                                       |
| 典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征                                    | 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)                                      |
| 多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究                                  | 庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)                                                       |
| 氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源                                | 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)                                              |
| 白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价                                 | 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)                               |
| 太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义                                 | 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)                                              |
| 长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点                               | 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)                                                   |
| 桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征                                    | 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)                                     |
| 青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性                        | 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)                                    |
| 城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性                               | 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)                                             |
| 溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析                            | 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)                                |
| 三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析                         | 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117) |
| 澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析                          | 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)                                               |
| 蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征                             | 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)                               |
| 两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响                               | 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)                                                |
| 于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量                               | 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)                                      |
| 岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征                                  | 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)                                         |
| 农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析                               | 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)                                                  |
| 不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响                      | 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)                                      |
| 真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质                                 | 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)                                                 |
| 石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G                               | 夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)                                         |
| 载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制                               | 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)                                                    |
| DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验                 | 梁雨, 何江涛, 张思 (2219)                                                         |
| 污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征                                    | 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)                                             |
| 低温污水前置强化混凝                                           | 刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)                                                       |
| 印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性                                | 谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)                                         |
| 生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR                          | 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)                                                   |
| 两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化                                 | 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)                                   |
| 铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较                              | 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)                                                   |
| 热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响                                | 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)                                          |
| 曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响                                   | 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)                                           |
| 中国城市污泥中汞含量的时空分布特征                                    | 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)                                           |
| 夏季太湖湖/藻型湖区N <sub>2</sub> O生成与迁移特征及其影响因素              | 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)                                         |
| 太湖藻型湖区CH <sub>4</sub> 、CO <sub>2</sub> 排放特征及其影响因素分析  | 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)                                         |
| 内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> O特征 | 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)                                       |
| 黄土高原成龄苹果园生态系统CO <sub>2</sub> 通量特征                    | 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)                                        |
| 生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响                                 | 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)                                  |
| 不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响                               | 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)                                                 |
| ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征                         | 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)                                               |
| 不同排海方式城市尾水微生物扩散规律                                    | 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)                                             |
| 旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例                     | 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)                                              |
| 不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析                                    | 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)                                    |
| 生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响                                 | 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)                                |
| 铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征                             | 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)                                |
| 湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构                                | 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)                                    |
| 反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制                                    | 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)                                                  |
| 广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价                                   | 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)                                      |
| 三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响                                 | 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)                                          |
| 水稻不同生长时期不同组织中抗砷内生菌的筛选与鉴定                             | 王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)                                                       |
| 汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征                                 | 李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)                                           |
| 华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价                             | 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)                                                |
| 基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM <sub>2.5</sub> 健康效应            | 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)                                             |
| 中国PM <sub>2.5</sub> 污染空间分布的社会经济影响因素分析                | 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)                                                   |



# 太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义

吕伟伟<sup>1</sup>, 姚昕<sup>1,2\*</sup>, 张保华<sup>1</sup>, 刘延龙<sup>1</sup>, 李元鹏<sup>1</sup>

(1. 聊城大学环境与规划学院, 聊城 252000; 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)

**摘要:** 作为水体中有机质分解与营养盐再生的核心载体之一, 颗粒态有机质(POM)是一个潜在的可以被生物利用的重要营养源, 势必对水华的暴发产生重要的影响. 本研究采集了太湖 8 个典型区域 32 个样品, 利用三维荧光技术(EEMs)并结合平行因子分析法(PARAFAC)解析夏季太湖水体 POM 的荧光特征、来源及环境指示意义, 并对 POM 与 DOM 荧光特征的差异性及草、藻型湖区 POM 的差异性进行了分析. 结果表明, 太湖 POM 共有 5 种荧光组分, 分别是类色氨酸(C1 和 C2)、类腐殖质(C3 和 C4)及类酪氨酸(C5); 其中, C1 与 C2、C3 与 C4 两两具有极显著相关关系, C5 与 C3、C4 也具有极好的相关性; 通过与已有文献中的 DOM 荧光特征进行比对发现, 夏季太湖 POM 与 DOM 在组分构成、来源及其与水质参数的相关性上均存在差异性. 夏季太湖 POM 既有外源输入, 也有内源输入, 但其荧光指数(FI、HIX、BIX)取值范围为 1.78~2.35、0.3~2.7、0.8~1.1, 表明内源特性相对强烈. 类腐殖质荧光与 TN、TP、Chla、COD、POC、SS 均呈显著相关性, 表明荧光分析法可以作为营养盐半定量分析的一个重要手段. 藻型湖区 POM 类蛋白物质主要由类色氨酸和类酪氨酸构成, 而草型湖区以类酪氨酸为主, 没有或者有极少的类色氨酸荧光组分; 值得注意的是, 与藻型湖区相比, 草型湖区含有较多的类酪氨酸荧光组分( $t$  检验,  $P < 0.01$ ). 藻型湖区 POM 类蛋白和类腐殖质荧光之间具有显著相关性, 而草型湖区两者相关性不显著; 藻型湖区 POM 类蛋白和类腐殖质荧光均与 Chla 呈显著相关性, 而草型湖区仅类腐殖质荧光与 Chla 具有显著相关关系.

**关键词:** 三维荧光; 平行因子分析法; 颗粒态有机质; 荧光特征; 富营养化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2056-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201709278

## Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China

LÜ Wei-wei<sup>1</sup>, YAO Xin<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Bao-hua<sup>1</sup>, LIU Yan-long<sup>1</sup>, LI Yuan-peng<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Planning, University of Liaocheng, Liaocheng 252000, China; 2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Thirty-two samples were collected from eight typical areas in Lake Taihu. Three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectra (EEMs) and a parallel factor analysis (PARAFAC) were applied to investigate the fluorescence properties, the sources, and environmental significance of particulate organic matter (POM) from the overlying water in Lake Taihu in summer. Differences in fluorescence characteristics between POM and DOM (dissolved organic matter), and that in POM between the grass lake and the algal lake were further examined. There are five kinds of fluorophores in Lake Taihu: tyrosine-like fluorophores (C1 and C2), humic-like fluorophores (C3 and C4), and tryptophan-like fluorophores (C5), among which significant correlations were found between C1 and C2, C3 and C4, and C5 and two humic-like fluorophores (C4, C3). By comparing with the fluorescence characteristics of DOM from earlier studies, it is found that there are differences in compositions, sources, and correlations with water quality between POM and DOM in Lake Taihu in summer. In summer, the contribution of endogenous inputs to POM is greater than that of exogenous inputs in Lake Taihu because the ranges in the fluorescence indices, FI, BIX, and HIX, are 1.78-2.35, 0.3-2.7, and 0.8-1.1, respectively. Significant correlations have been found between humic-like fluorescent components and TN, TP, Chla, COD, POC, and SS, suggesting that fluorescence analysis can be used as an important method for a semi-quantitative analysis of nutrients. The protein-like components of the algal lake mainly consist of tryptophan and tyrosine, while that of the grass lake mainly contain tyrosine and a few tryptophan. It is worth noting that, the grass lake contains more tyrosine relative to the algal lake ( $t$  test,  $P < 0.01$ ). Significant positive correlations between the protein-like and the humic-like fluorescence are found in the algal lake, while it is not significant in the grass lake. Significant positive correlations are found between the fluorescent components (protein-like and humic-like) and chlorophyll-a in the algal lake, while the correlation was only found between humic-like components and chlorophyll-a in the grass lake.

**Key words:** three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectra (EEMs); parallel factor analysis (PARAFAC); particulate organic matter (POM); fluorescent characteristics; eutrophication

收稿日期: 2017-09-29; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41301544); 中国博士后科学基金项目(2015M571831); 岩溶动力学重点实验室基金项目(KDL201506); 山东省自然科学基金项目(ZR2012DQ003)

作者简介: 吕伟伟(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水体天然有机质运移规律, E-mail: 1150948432@qq.com

\* 通信作者, E-mail: yaixin@lcu.edu.cn

太湖是我国第三大淡水湖泊,也是一个大型的富营养化浅水湖泊,近 20 年来流域和周围城市大量氮、磷营养盐输入导致太湖面临着严重的湖泊富营养化和频繁的蓝藻水华暴发。太湖复杂的河网水系、草、藻型等不同的生态类型,夏季频繁的蓝藻水华以及强烈的风浪扰动引起的沉积物再悬浮等,使得水体中天然有机质(organic matter, OM)的分布、来源、组成和变化极为复杂<sup>[1]</sup>。水体中的 OM 一般可分为两个主要的库——溶解态有机质(dissolved organic matter, DOM)和颗粒态有机质(particulate organic matter, POM),通常将能通过 0.45  $\mu\text{m}$  或 0.75  $\mu\text{m}$  玻璃纤维滤膜的有机质定义为溶解态,其余的为颗粒态。

由于天然有机质的重要性及其化学组成、结构和来源的复杂性,一直是国际生物地球化学领域的研究热点和难点之一<sup>[1]</sup>。国际上较多的研究主要集中在 DOM 相关的工作,相对而言, POM 方面的工作开展得较少。但作为水体中有机质分解与营养盐再生的核心载体之一, POM 是一个潜在的可以被生物利用的重要营养源<sup>[2]</sup>。例如 POM 的一个重要组成部分——有机聚集体(organic aggregates, OA),除含有丰富的有机质外,其他各种营养元素也都比周围水体高 2~3 个数量级,被称为是水体中的“微型营养斑块”<sup>[3]</sup>。POM 作为自然水体中最具生物活性的颗粒态有机质,在水体物质循环过程中起着重要作用,在近几年已经逐渐成为水生生态系统研究中的一个热点。例如, Kendall 等<sup>[4]</sup>运用碳氮同位素的方法分析了美国四大水系 POM 来源的时空变化; Bardhan 等<sup>[5]</sup>研究了西印度水库中 POM 同位素的组成,并分析了其对生物地球化学过程的影响;曾庆飞等<sup>[6]</sup>运用稳定同位素技术研究了颗粒态有机物 POM 的来源特征。

目前,学者们较多地运用稳定同位素的方法研究 POM,而对于三维荧光的方法较少涉及。三维荧光光谱可有效区分有机物的组成成分,且操作简便,不对样品造成二次污染; Osburn 等<sup>[7]</sup>在前人的基础上总结了 POM-DOM PARAFAC 三维荧光模型,可以同时 POM 和 DOM 两种形态的荧光组分进行解译,为研究湖泊水体中 OM 特征及其来源提供了新的可能。故本研究首次运用三维荧光技术(three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectra, EEMs)结合平行因子分析法(parallel factor analysis, PARAFAC)对太湖水体 POM 的荧光特征及其与各水质参数之间的关系进行分析,以期加深

认识富营养化浅水湖泊中颗粒态有机质的生物地球化学循环和与藻华暴发之间的因果关系提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与预处理

于 2014 年 8 月 26~28 日,在太湖的 8 个典型区域(竺山湾、梅梁湾、贡湖湾、胥口湾、东太湖、湖心区、西湖区和南太湖)进行了采样,共采集 32 个样品(图 1),采样点位同中科院太湖生态系统研究站的常规监测点位,南、北部湖区参照 Zhou 等<sup>[8]</sup>的方法进行分区,北部湖区夏季易暴发蓝藻水华即藻型湖区,南部湖区为沉水植物覆盖即草型湖区。采集 5 L 水样并置于保温箱中用冰块保存确保低温,所有采样瓶事先均用 10% HCl 溶液浸泡、去离子水清洗及现场水润洗,并于采样结束后直接送至中国科学院南京地理与湖泊研究所实验室放入冰箱内冷藏、冷冻保存。水体温度、水深、浊度等物理指标均在采样现场测定。POC 浓度( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )及 POM 三维荧光光谱分析均在采样结束后 2~3 d 内分析完成。

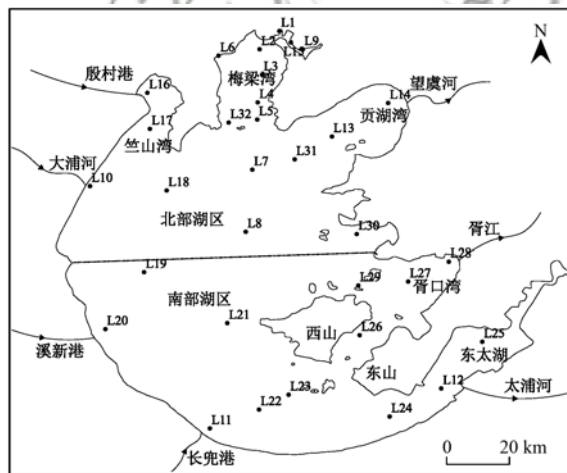


图 1 太湖水体采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in Lake Taihu

### 1.2 样品的测定

#### 1.2.1 POM 三维荧光光谱分析

共采集 5 L 水样,根据水的浑浊程度取 100~1 000 mL 水样过滤到事先经 450℃ 灼烧并称重的 GF/F 滤膜上, GF/F 滤膜用 10 mL 0.1  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的 NaOH 黑暗条件下振荡 24 h,用 HCl 中和后调至 pH 值 >6,经 0.2  $\mu\text{m}$  的微孔膜过滤后的滤液用于测定 POM 的三维荧光,测定方法参照 Osburn<sup>[7]</sup>的 POM 测定方法进行。

三维荧光光谱采用日立 F-7000 FL 分光光度计



测定,激发和发射夹缝宽度为 5 nm,激发波长为 200 ~ 450 nm,间隔为 5 nm,发射波长 250 ~ 600 nm,以 1 nm 间隔得到荧光光谱,减去加酸中和过后的 NaOH 三维荧光光谱以校正水的拉曼散射,同时利用 0.01 mg·L<sup>-1</sup> 硫酸奎宁进行荧光定标,并用吸光度校正三维荧光光谱的内滤效应<sup>[9]</sup>.

1.2.2 POM 三维荧光光谱的平行因子分析法 (PARAFAC)

EEM 是通过波谱形状或波峰数量进行组分个数和类别的假定,而 PARAFAC 法是通过数学统计的方法把 OM 复杂的荧光数据矩阵分离出不同的组分,将所有点位的整个三维荧光数据组分解成 3 个线性项和 1 个残留数组,它是基于三线性理论的一种方法<sup>[10]</sup>. PARAFAC 法计算过程可以称为交替最小二乘 (ALS) 算法:

$$x_{ijk} = \sum_{f=1}^F a_{if} b_{jf} c_{kf} + e_{ijk}$$

$$i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K$$

式中,  $x_{ijk}$  是第  $i$  个样点再激发波长为  $k$ 、发射波长为  $j$  处的荧光强度;  $a_{if}$  是第  $i$  个样点的第  $f$  次分析的

含量;  $b_{jf}$  和  $c_{kf}$  分别是与第  $f$  次分析后激发波长为  $j$ 、发射波长为  $k$  光谱的线性相关.  $e_{ijk}$  为系统残差,是不受模型控制的变量.  $F$  为模型中选择的组分因子数量.

本研究在 MATLAB 中使用 DOMFluor 工具箱运行 PARAFAC 法模型对样点的三维荧光数据进行分析.

1.2.3 其他水质参数的测定

经高温 (450℃) 灼烧后的 GF/F 滤膜过滤水样,留在滤膜上的颗粒物经过冷冻干燥后称重,减去原始滤膜重量,即为 POM 的重量;将冻干后的滤膜用研钵磨碎后送至 EA 3000 的元素分析仪测定 POC 浓度 (mg·L<sup>-1</sup>). 叶绿素  $a$  (Chla)、化学需氧量 COD、总氮 TN、总磷 TP、悬浮质 SS 等水质参数数据均来源于中国科学院太湖生态系统研究站,测定方法参照文献<sup>[11]</sup>.

1.2.4 荧光指数

本研究中使用荧光指数 (FI、BIX、HIX) 来研究和表征物质的来源及不同来源对 POM 荧光强度的相对贡献率,相关荧光参数如表 1 所示.

表 1 荧光指数描述

Table 1 Description of the fluorescence index

| 荧光指数                                | 定义                                                                | 特征描述                                                                                                                       |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FI<br>(fluorescence index, 荧光指数)    | $E_x = 370$ nm, $E_m$ 为 450 nm 与 500 nm 处的荧光强度比值                  | 陆源和生物来源的 $f_{450/500}$ 值分别为 1.4 和 1.9 <sup>[12, 13]</sup>                                                                  |
| BIX<br>(autochthonous index, 生物源指数) | $E_x = 310$ nm, $E_m$ 为 380 nm 与 500 nm 的荧光强度比值                   | 0.6 < BIX < 0.7, 具有较少的自生成分; 0.7 < BIX < 0.8, 具有中度新近自生源特征; 0.8 < BIX < 1.0, 具有较强自生源特征; BIX > 1.0, 为生物细菌活动产生 <sup>[14]</sup> |
| HIX<br>(humification index, 腐殖化指数)  | $E_x = 254$ nm, $E_m$ 为 435 ~ 480 nm 的峰值面积比上 300 ~ 345 nm 的荧光峰值面积 | HIX < 4, 表示以自生源为主; 4 < HIX < 6, 属于较弱腐殖质特征和较强自生源特征; HIX > 6, 属于强腐殖质特征, 陆源贡献较大 <sup>[15]</sup>                               |

1.3 绘图及数据处理

采用 ArcGIS 10.2 软件绘制参数空间分布图与采样点分布,均值、标准差以及相关性等采用 SPSS 21.0 软件分析. 相关分析用来检测变量之间的关系;  $P > 0.05$  表示未达到显著检验水平,  $0.01 < P < 0.05$  为显著水平,  $P < 0.01$  为极显著水平.

2 结果与分析

2.1 太湖水体及颗粒物基本化学性质的分布特征

此次调查的 TN 和 TP 的浓度分别在 0.82 ~ 4.14 mg·L<sup>-1</sup> 和 0.02 ~ 0.34 mg·L<sup>-1</sup> 之间变化,平均值分别为 (1.74 ± 0.15) mg·L<sup>-1</sup> 和 (0.12 ± 0.02) mg·L<sup>-1</sup>. TN 的高值主要分布在竺山湾,低值出现在东太湖,大致表现出由竺山湾向东太湖递减的

趋势[图 2(a)]. TP 呈现和 TN 相似的空间分布特征[图 2(b)]. 与夏季的东平湖、洪湖、东湖和梁子湖相比<sup>[16, 17]</sup>,太湖 Chla 的空间分布表现出更大的空间异质性;均值为 (48.0 ± 7.97) mg·L<sup>-1</sup>,浓度范围为 4.3 ~ 156.2 mg·L<sup>-1</sup>;最小值出现在东太湖,最大值则出现在竺山湾和梅梁湾区域,大体呈现竺山湾 > 梅梁湾 > 河口区 > 湖心区 > 东太湖的趋势[图 2(c)];王震等<sup>[18]</sup>报道太湖 Chla 北部和西北部最高,东部和南部最低. COD 均值为 (4.64 ± 0.30) mg·L<sup>-1</sup>,取值范围为 2.67 ~ 8.26 mg·L<sup>-1</sup>,与 Chla 具有相似的空间分布特征,总体趋势是北部大于南部,西部大于东部[图 2(d)], Yao 等<sup>[1]</sup>在太湖 COD 分析中也获得了类似的结论.

POC 浓度范围为  $0.91 \sim 19.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，均值为  $(4.92 \pm 0.94) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，空间差异比较明显，高值出现在西太湖，低值主要分布在东太湖，大体呈现从西太湖向北向东递减的趋势[图 2(e)]，姜广甲等<sup>[19]</sup>认为太湖西部水域的 POC 浓度高于其他水

域。SS 均值为  $(34.31 \pm 2.98) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，浓度范围为  $11.08 \sim 85.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，高值分布在南太湖，低值出现在东太湖，呈现从南太湖和梅梁湾向湖心区和东太湖递减的趋势[图 2(f)]，这与孔繁翔等<sup>[20]</sup>在太湖的悬浮物分析结果一致。

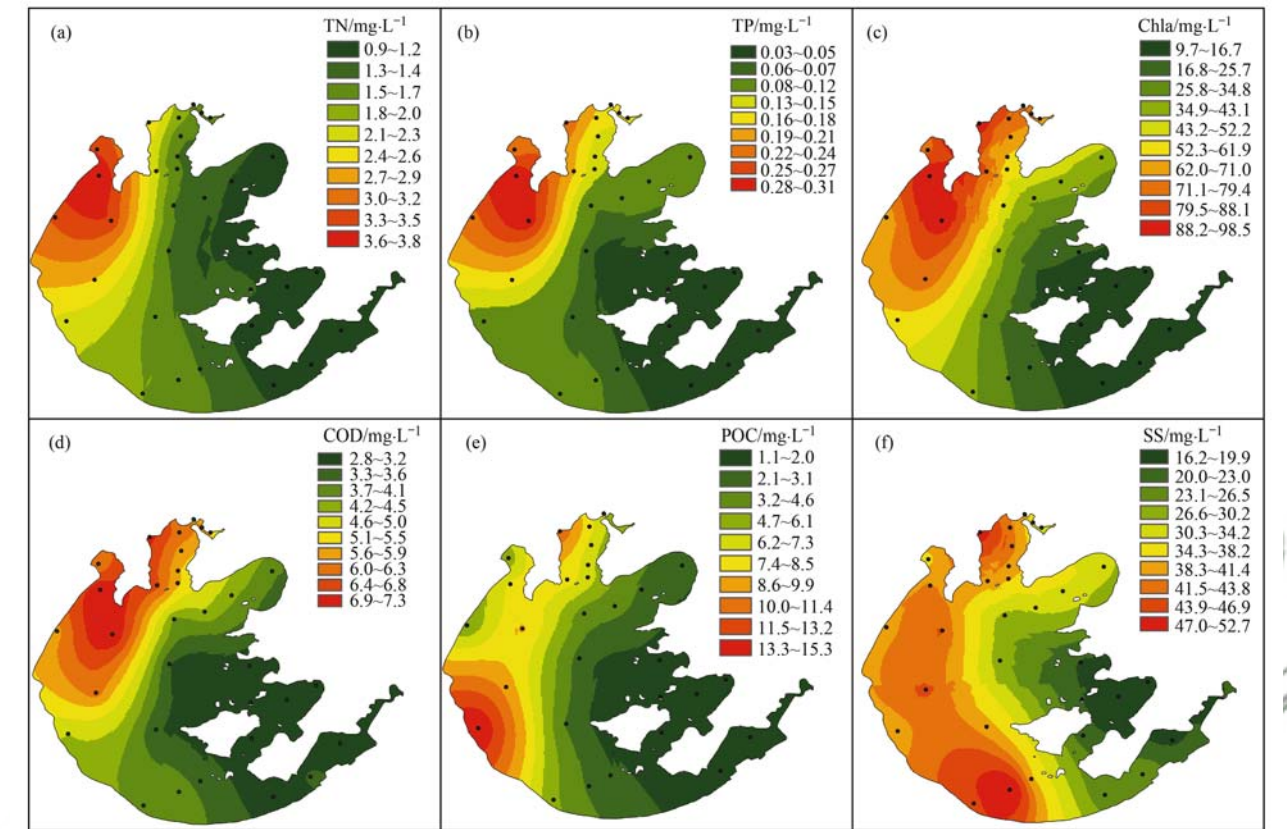


图2 太湖夏季各理化因子的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of water quality parameters in Lake Taihu in summer

2.2 太湖 POM 荧光组分

将 2014 年 8 月的 32 个 POM 三维荧光样品全部放入 PARAFAC 模型中进行计算，一共得到 5 种荧光组分(C1 ~ C5)。太湖 POM 样品平行因子分析 PARAFAC 所得 5 个组分模型对所有 EEMs 数据信息的解释率可达 99.6% 以上，并能很好地通过对半分析检验(图 3)。这五种荧光组分的光谱特征与文献报道的其他水生环境中得到的荧光组分很相似<sup>[21~26]</sup>，各组分的主要特征和荧光类型见表 2。由图 3 和表 2 可知，组分 C1 和 C2 均为类色氨酸物质，对应的是传统意义上的 T 峰，这类组分反映的是生物降解来源形成的荧光峰值，主要由微生物和浮游植物的作用所产生，也受到生活污水和工业废水等外源输入所携带的微生物影响；组分 C3 反映的是海源性类富里酸 M 峰，可能来源于微生物及水中藻类降解或人类活动产生的氧化的类腐殖质物

质；组分 C4 被认为是外源输入的腐殖酸和富里酸形成的荧光峰值，对应的是 A 峰和 C 峰，与类富里酸荧光和腐殖质结构中的羟基及羧基有关；组分 C5 为生物降解来源的类酪氨酸 D 峰，与芳环氨基酸结构有关。

太湖 POM 总荧光强度在  $2.32 \sim 11.87$  之间，平均值为  $5.04 \pm 0.41$ ，整体上呈由梅梁湾向整个太湖递减的趋势(图 4)。其中，类蛋白荧光 C1、C2 荧光强度及其贡献率分别为  $0.04 \pm 0.02$ 、 $0.01 \pm 0.03$  和  $0.57\%$ 、 $0.08\%$ ，最高比重出现在梅梁湾；类腐殖质荧光 C3、C4 荧光强度及其贡献率分别为  $0.38 \pm 0.38$ 、 $1.28 \pm 0.25$  和  $6.71\%$ 、 $20.90\%$ ，高值占比集中在太湖西、北部及南部河流入湖口地区；类蛋白荧光 C5 荧光强度及其贡献率为  $3.38 \pm 0.14$  和  $71.73\%$ ，最高比重出现在东太湖。

由图 4 可见，组分 C1 由藻型湖泊梅梁湾向湖



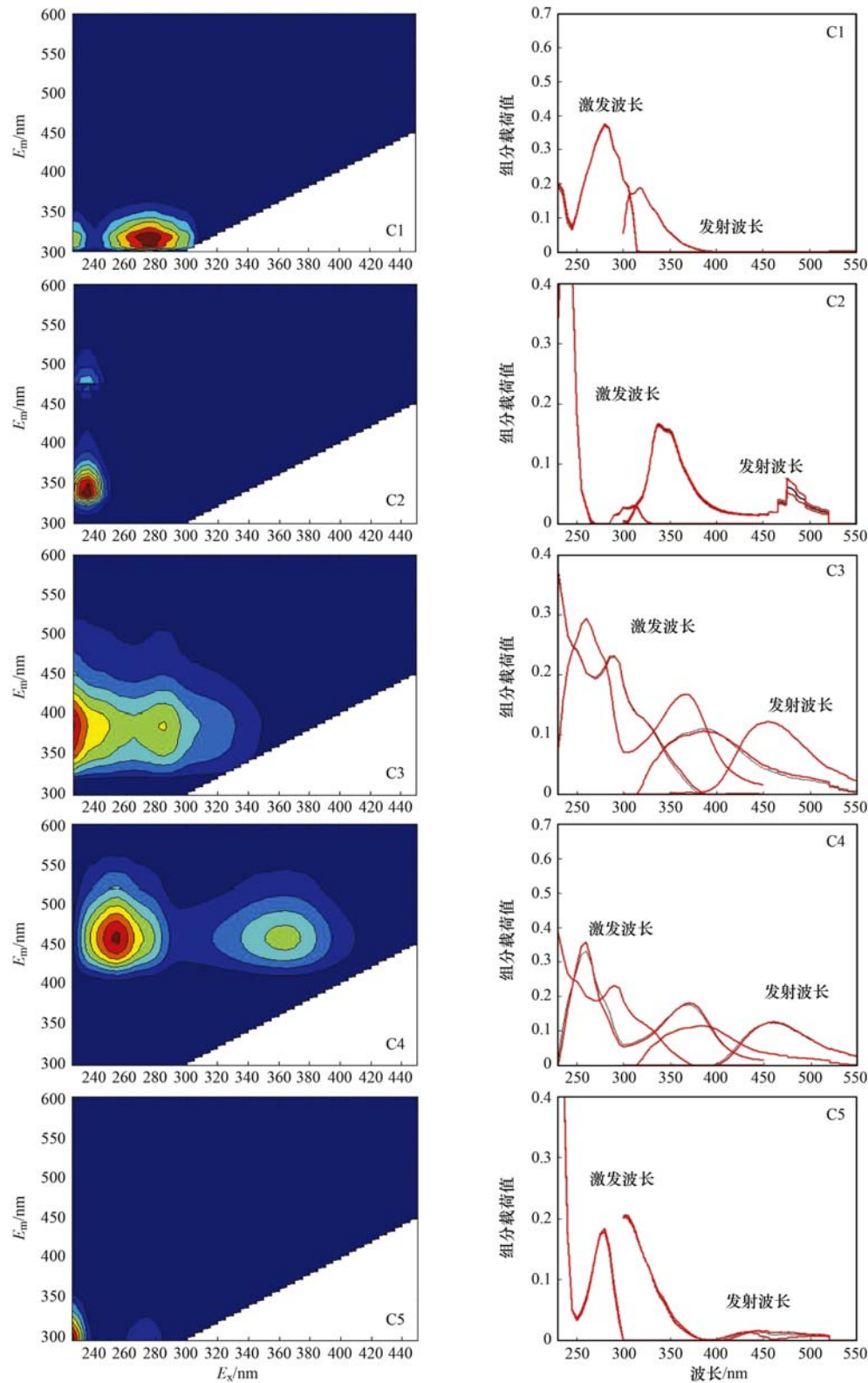


图3 太湖 POM 各荧光组分

Fig. 3 Spectral shapes of the five components identified by PARAFAC

心区和东太湖表现出明显的浓度梯度递减;研究表明,浮游植物降解是太湖藻型湖区内源自生 OM 的重要来源之一<sup>[27]</sup>;富营养化水体中存在大量的浮

游植物,而浮游植物量的多少常以 Chla 的浓度反映<sup>[28]</sup>.相关性分析发现(表3),C1 和 Chla 具有显著相关性;因此,C1可以确定为内源输入;江俊武

表 2 太湖颗粒态有机物 5 种荧光组分特征

| Table 2 Fluorescence feature of the five fluorescent components of POM in Taihu Lake |               |                                                                                          |                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 组分                                                                                   | $E_x/E_m$     | 其他文献对应组分 $E_x/E_m$                                                                       | 性质描述                       |
| C1                                                                                   | 275 < 225/318 | 275/318 <sup>[21]</sup> ; 280/318 <sup>[22]</sup> ; 275/306(338) <sup>[23]</sup>         | 类蛋白质荧光团, 主要为类色氨酸基团         |
| C2                                                                                   | 235/338(476)  | <250/370 <sup>[24]</sup> ; 250/356 <sup>[25]</sup> ; 240(300)/338 <sup>[21]</sup>        | 类蛋白质荧光团, 主要为类色氨酸基团         |
| C3                                                                                   | <225(285)/385 | <250(310)/416 <sup>[25]</sup> ; 325(<260)/385 <sup>[23]</sup> ; 310/414 <sup>[22]</sup>  | 短波陆源腐殖质或海洋类腐殖质             |
| C4                                                                                   | 255(365)/455  | <260(355)/434 <sup>[22]</sup> ; <260/458 <sup>[23]</sup> ; <250(355)/474 <sup>[26]</sup> | 短波类腐殖质, 大分子量的富里酸, A 峰和 C 峰 |
| C5                                                                                   | <225(275)/302 | 275/310 <sup>[22]</sup> ; 275/304 <sup>[26]</sup> ; 270/299 <sup>[23]</sup>              | 类蛋白质荧光团, 主要为类酪氨酸基团         |

等<sup>[29]</sup>研究表明类蛋白组分与 Chla 的相关性相对于类腐殖质组分要更显著, 并推断夏季太湖各水质参数受自生源影响更加显著. 组分 C1 和 C2 呈极显著正相关, 说明内源输入的 C1 与 C2 组成基本相似, 具有较强的同源性, 进而表明 C2 的内源性. 组分 C4 由北部、西部、南部的入湖河口区向东太湖发生浓度梯度递减, 表现出外源特性. 相关性分析显示 C3 和具有外源特性的 C4 具有极显著相关性, 表现为外源输入. 由图 4 还发现, 组分 C5 由东太湖和湖心区向西向北发生浓度梯度递减, 表现出内源性; 同时相关性分析显示 C5 与 C4 具有极显著相关性, 表现出外源性; 由此可见 C5 既与陆源类腐殖质荧光组分有关, 也与内源类蛋白荧光物质有关, 这一结果与 Zhang 等<sup>[27]</sup>在浮游植物降解实验中得出的结果也比较一致.

太湖草、藻型湖区的 POM 均以类蛋白荧光物质为主要成分, 但在类蛋白组分构成上存在差别(图 4). 藻型湖区 POM 类蛋白物质主要由类色氨酸和类酪氨酸构成; 而草型湖区以类酪氨酸为主, 没有或者有极少的类色氨酸荧光组分, 姚昕等<sup>[30]</sup>在研究太湖草、藻来源溶解性有机质中也获得类似的结论. 值得注意的是, 与藻型湖区相比, 草型湖

区含有较多的类酪氨酸荧光组分( $t$  检验,  $P < 0.01$ ).

2.3 相关荧光指数分析

荧光指数(FI、BIX、HIX)通常用来研究和表征物质的来源及不同来源对 POM 荧光强度的相对贡献率. 本研究中, 太湖 FI 值为 1.78 ~ 2.35(图 5), 平均值为  $1.9 \pm 0.02$ , 接近生物来源 FI 值(表 1), 这表明太湖夏季 POM 受内源贡献较大. 太湖水体 BIX 指数在 0.8 ~ 1.1 之间(图 6), 平均为  $1.0 \pm 0.01$ , 说明各采样点整体处于较强的自生源特征, 尤其是湖心区, 平均值达到 1.1. 太湖水体 HIX 值在 0.3 ~ 2.7 之间(图 5), 平均值为  $0.7 \pm 0.1$ , 说明太湖 POM 整体处于弱腐殖质特征, 且以自生源为主. 相比之下, 入湖河流的河口区(大浦河和长兜港采样点), FI 和 BIX 相对较小, HIX 相对较大, 趋近陆源特征, 表明河口区受陆源输入影响相对显著一些. 综上所述, 3 种荧光指数对表征 POM 来源均具有良好的指示性, 都显示出夏季太湖水体 POM 以自生源为主; 曾庆飞等<sup>[6]</sup>使用稳定同位素方法也证实太湖水体中 0.7 ~ 120  $\mu\text{m}$  粒径间的 POM 主要为内源藻类贡献.

2.4 荧光组分与各水质参数之间的关系

如表 3 所示, 分别建立太湖荧光组分与各水质参数之间的相关关系, 以分析 POM 荧光组分与各

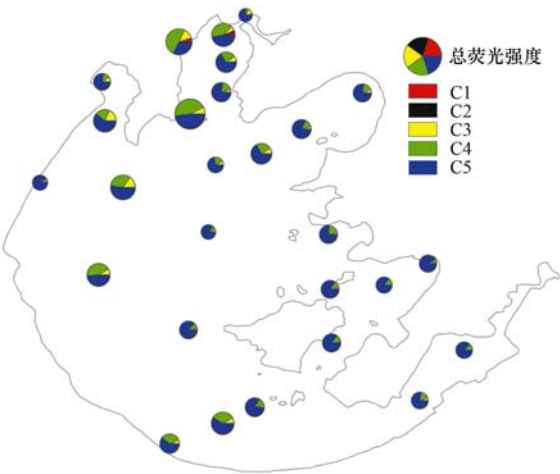


图 4 POM 总荧光强度及各组分占比  
Fig. 4 Total fluorescence intensity and specific gravity of each component of POM

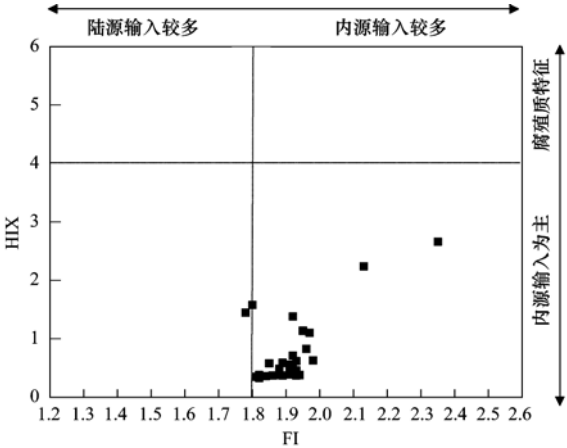


图 5 太湖 POM 样本的 FI-HIX 分布  
Fig. 5 FI-HIX distributions of POM in Lake Taihu



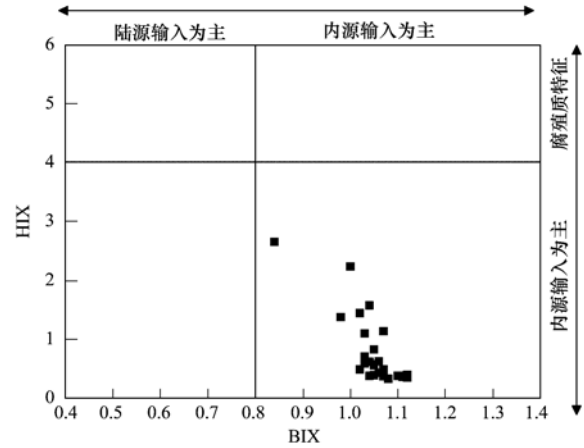


图 6 太湖 POM 样本的 BIX-HIX 分布

Fig. 6 BIX-HIX distributions of POM in Lake Taihu

水质参数之间的关系. 相关分析显示, 荧光组分 C3、C4、C5 与 TN、TP 具有相关关系, 表明 POM 与 N、P 元素的迁移转化过程密切相关. 组分 C3、C4、C5 与 COD 均具有极好的相关性, 证实了荧光强度的分布情况一定程度上可以反映水体中有机物的分布, 季乃云<sup>[31]</sup>在研究大沽河到胶州湾的 DOM 荧光特征变化时也获得了类似的结论. 组分 C1、C3、C4、C5 与 POC 均具有极显著相关性, 这表明类蛋白和类腐殖质是太湖 POC 的重要组成部分, 荧光强度可以作为一个反映水体中 POC 含量的有效参数, 这与方芳等<sup>[28]</sup>在三峡水库小江回水区溶解性有机物三维荧光光谱分析结果一致.

为了进一步了解草、藻型湖区POM空间差异

表 3 POM 组分及各营养盐的相关分析<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation analysis of POM components and nutrients

|      |      | C1      | C2    | C3      | C4      | C5      | TN      | TP      | Chla    | COD     | POC     | SS |
|------|------|---------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----|
| 全太湖  | C1   | 1       |       |         |         |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C2   | 0.50 ** | 1     |         |         |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C3   | 0.52 ** | 0.06  | 1       |         |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C4   | 0.55 ** | 0.24  | 0.86 ** | 1       |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C5   | 0.19    | -0.02 | 0.70 ** | 0.80 ** | 1       |         |         |         |         |         |    |
|      | TN   | 0.22    | 0.02  | 0.66 ** | 0.40 *  | 0.32    | 1       |         |         |         |         |    |
|      | TP   | 0.39    | 0.14  | 0.80 ** | 0.55 ** | 0.46 *  | 0.92 ** | 1       |         |         |         |    |
|      | Chla | 0.48 *  | 0.17  | 0.93 ** | 0.72 ** | 0.57 ** | 0.75 ** | 0.89 ** | 1       |         |         |    |
|      | COD  | 0.43 *  | 0.21  | 0.88 ** | 0.72 ** | 0.60 ** | 0.80 ** | 0.94 ** | 0.93 ** | 1       |         |    |
|      | POC  | 0.66 ** | 0.23  | 0.94 ** | 0.83 ** | 0.60 ** | 0.64 ** | 0.82 ** | 0.95 ** | 0.91 ** | 1       |    |
|      | SS   | 0.36    | 0.06  | 0.61 ** | 0.51 ** | 0.39 *  | 0.47 *  | 0.56 ** | 0.60 ** | 0.66 ** | 0.63 ** | 1  |
| 藻型湖区 | C1   | 1       |       |         |         |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C2   | 0.48    | 1     |         |         |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C3   | 0.51 *  | 0.07  | 1       |         |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C4   | 0.57 *  | 0.26  | 0.84 ** | 1       |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C5   | 0.17    | 0.21  | 0.72 ** | 0.80 ** | 1       |         |         |         |         |         |    |
|      | TN   | 0.15    | -0.04 | 0.60 *  | 0.26    | 0.22    | 1       |         |         |         |         |    |
|      | TP   | 0.30    | 0.07  | 0.75 ** | 0.46    | 0.44    | 0.92 ** | 1       |         |         |         |    |
|      | Chla | 0.48    | 0.13  | 0.92 ** | 0.66 ** | 0.56 *  | 0.68 ** | 0.87 ** | 1       |         |         |    |
|      | COD  | 0.40    | 0.17  | 0.90 ** | 0.67 ** | 0.64 ** | 0.75 *  | 0.93 ** | 0.92 ** | 1       |         |    |
|      | POC  | 0.70 ** | 0.21  | 0.91 ** | 0.80 ** | 0.62 *  | 0.53 *  | 0.76 *  | 0.93 ** | 0.89 ** | 1       |    |
|      | SS   | 0.54 *  | 0.06  | 0.74 ** | 0.57 *  | 0.48    | 0.45    | 0.72 *  | 0.80 ** | 0.84 ** | 0.85 ** | 1  |
| 草型湖区 | C1   | 1       |       |         |         |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C2   | —       | 1     |         |         |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C3   | 0.02    | —     | 1       |         |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C4   | 0.07    | —     | 0.99 ** | 1       |         |         |         |         |         |         |    |
|      | C5   | -0.22   | —     | 0.58    | 0.60    | 1       |         |         |         |         |         |    |
|      | TN   | 0.18    | —     | 0.94 ** | 0.94 ** | 0.64 *  | 1       |         |         |         |         |    |
|      | TP   | 0.26    | —     | 0.96 ** | 0.97 ** | 0.55    | 0.97 ** | 1       |         |         |         |    |
|      | Chla | 0.18    | —     | 0.95 ** | 0.97 ** | 0.54    | 0.92 ** | 0.97 ** | 1       |         |         |    |
|      | COD  | 0.13    | —     | 0.98 ** | 0.98 ** | 0.46    | 0.92 ** | 0.97 ** | 0.97 ** | 1       |         |    |
|      | POC  | 0.26    | —     | 0.94 ** | 0.96 ** | 0.53    | 0.93 ** | 0.98 ** | 0.99 ** | 0.96 ** | 1       |    |
|      | SS   | 0.10    | —     | 0.61 *  | 0.57    | 0.31    | 0.70 *  | 0.62 *  | 0.45    | 0.60    | 0.45    | 1  |

1) \* 表示  $P < 0.05$ ; \*\* 表示  $P < 0.01$

的动力机制, 分别对草、藻型湖区 POM 荧光组分及各水质参数进行相关分析, 结果见表 3. 从中可见,

藻型湖区 C1、C5 与 C3、C4 均具有显著相关性, 宋晓娜等<sup>[32]</sup>对太湖 DOM 各类荧光强度进行了相关性

分析,发现类蛋白组分与类腐殖质组分之间存在显著相关关系;而草型湖区类蛋白与类腐殖质荧光之间不存在相关性.藻型湖区 Chla 与 C3、C4、C5 均具有显著相关关系,江俊武等<sup>[29]</sup>也发现类蛋白和类腐殖质荧光均与 Chla 存在相关性;而草型湖区 Chla 仅与 C3、C4 具有极好的相关性,这与王书航等<sup>[33]</sup>在蠡湖的研究结果类似.结果还发现,草、藻型湖区 POM 各荧光组分与 TN、TP、COD、POC 及 SS 等水质参数之间均具有显著相关关系.

### 3 讨论

#### 3.1 太湖 POM 荧光组分特征及与 DOM 荧光特征的差异性分析

通过与已有研究中的结果进行比对发现,夏季太湖 POM 荧光组分主要有 5 类,分别是类色氨酸荧光组分 C1 和 C2,类腐殖质荧光组分 C3 和 C4,类酪氨酸荧光组分 C5.其中,荧光组分 C1 与 C2 具有极显著相关性,组分 C3 与 C4 亦有极好的相关关系,这意味着类蛋白组分 C1 和 C2 以及类腐殖质组分 C3 和 C4 两两来源相似;组分 C5 与类腐殖质荧光具有极好的相关关系,说明 C5 同时具有内源和外源双重特性.

POM 和 DOM 两种 OM 均由类蛋白质和类腐殖质物质组成<sup>[7]</sup>,但两类组成物质的贡献率却不尽相同.近年来有大量研究对太湖 DOM 的荧光组分特征做了调查分析<sup>[32~35]</sup>,其类蛋白荧光和类腐殖质荧光所占比重大多分布在 34.2%~66% 和 34%~65.8% 之间;而本研究中,POM 类蛋白荧光(C1、C2 和 C5)和类腐殖质荧光(C3 和 C4)所占比重均值分别为 72.27%±3.34% 和 27.61%±2.87%;其中,POM 类蛋白荧光所占比重明显高于太湖 DOM 中类蛋白荧光所占比重,表明太湖 POM 表现出较强的类蛋白荧光组分特征,其生物可利用性也高于 DOM.已有研究表明 POM 表面附着大量的异养微生物,且存在完整的降解有机质的胞外酶系统,其数量及活性均高出周围水体几个数量级以上,使得 POM 比周围水体有更高的细菌降解速率<sup>[36,37]</sup>.POM 通过光化学降解、酶解以及细菌降解等生物和非生物因素转化为更具生物可利用性的溶解态有机质以及无机营养盐,进而参与到湖泊生物地球化学循环过程中<sup>[38,39]</sup>.

一般来讲,自然条件下湖体中的有机质可简单分为内源和外源 2 类,内源有机质与湖体生物活动关系密切,主要来源于湖体微生物或藻类分解,而

外源有机质则来源于陆地土壤和动植物有机质的残体,而这两种来源对 POM 和 DOM 的贡献程度是有差异的.近年来已有大量研究对夏季太湖 DOM 来源做了分析<sup>[29,32]</sup>,大多认为夏季太湖 DOM 以外源输入为主,尤其竺山湾和西部湖区外源贡献更为显著.而本研究荧光指数 FI、BIX 和 HIX 的取值范围分别在 1.78~2.35、0.8~1.1 和 0.3~2.7 之间,表明夏季太湖 POM 以自生源为主.研究表明,内源 OM 比外源 OM 的碳氮比值高,更加富含碳水化合物,也更容易被降解从而参与到微食物网能量传递过程中,对总初级生产力的贡献较大<sup>[40]</sup>.因此,湖泊内源自生 POM 的迁移转化以及伴随的营养物质再生应该是蓝藻水华暴发期间营养盐快速供给的主要“生力军”.

除组分构成和来源差异外,POM 与 DOM 的差异还表现在荧光组分和水化因子的相关性上.本研究中,藻型湖区 POM 类蛋白和类腐殖质荧光强度之间呈显著相关性,而草型湖区两类荧光相关性不显著,这说明藻型湖区 POM 中的类蛋白质和类腐殖质物质在组成上和来源上具有某种联系,而草型湖区两类物质在组成和来源上不尽相同;相关分析还发现,POM 与 TN、TP、Chla、COD、POC、SS 等颗粒态水化因子之间存在显著相关关系.目前,关于 DOM 荧光组分和水质参数的关系已有一些报道,宋晓娜等<sup>[32]</sup>的研究表明,太湖表层及底层水体 4 类峰强度之间均呈显著正相关,说明 DOM 中的类蛋白质与类富里酸物质在组成上和来源上具有某种联系;另外,4 类峰强度与 TN、TP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 等营养盐呈显著正相关关系,说明 DOM 与 N、P 元素的迁移转化行为紧密相连.江俊武等<sup>[29]</sup>利用相关性分析和主成分分析法对各参数指标研究发现,各荧光组分之间存在极显著的相关性,在来源上具有相似性;同时还发现,除 DOC 外,DOM 与 TN、TP、Chla、TSS 之间相关性均较为显著,揭示了 DOM 与 N、P 等元素的迁移转化行为密切相关.

总体来说,夏季太湖水体 POM 与 DOM 在组分构成、来源及其与水质参数的关系上均存在着差异,但由于 POM 和 DOM 组成、来源的复杂性,两者之间具体的差异还需进一步野外调查和室内实验研究进行验证.

#### 3.2 太湖水体 POM 的来源分析

荧光值的大小大致能反映水体的污染程度<sup>[40]</sup>,那么荧光峰强度的区域分布差异也可以反映 POM 在不同湖区的来源差异<sup>[31]</sup>.结合太湖的情况和图 4



中各类荧光强度分布特征,也可以说明太湖 POM 来源的区域差异性。例如,竺山湾水域分别分布有较多的代表内源输入的一类色氨酸组分 C1、陆源类腐殖质荧光组分 C3 和 C4,表明其 POM 来源比较复杂,同时具有陆源和内源两种特征。结合太湖本身及周边情况,一方面,竺山湾属于典型的藻型湖泊,微生物活动比较活跃,藻类死亡分解后会产生大量的类蛋白质<sup>[31]</sup>,成为 POM 的主要内源,竺山湾 Chla 浓度在全太湖表现为最高(图 2)以及类蛋白组分 C1 与 Chla 具有显著相关性(表 3)均证实了这一点;另一方面,竺山湾接纳了武进、宜兴市的污水,在常州市武进区与宜兴市交界的漕桥河是竺山湾的主要入湖河流,而这一带化工、印染产业密集,河水污染严重,河流携带大量的城市陆源 POM 进入湾内<sup>[41]</sup>,这些陆源输入是竺山湾湖区重要的外源 POM,也是导致竺山湾类腐殖质荧光强度在全太湖表现为最高的重要原因。河口区(大浦河)主要分布有陆源类腐殖质荧光组分 C4,说明河口区 POM 表现出外源性;大浦河是太湖的主要入湖河流之一,位于工业排放密集的宜兴市附近,导致携带大量 POM 的工业废水和生活污水进入太湖。虽然太湖 POM 来源具有陆源及内源的双重特性,但这两种来源对 POM 的贡献程度是有区别的。通过对荧光指数(FI、BIX、HIX)的分析研究结果表明,太湖夏季 POM 主要受内源贡献。综上所述,太湖夏季 POM 的来源既有外源输入,也有内源输入;但相对于外界水源补给等的外源输入,浮游植物等的内源释放对 POM 荧光物质的贡献更大。

### 3.3 荧光组分与各水质参数之间的关系

根据表 3 可以看出,荧光组分 C3、C4、C5 与 TN、TP 均具有极显著相关性,表明 POM 与 N、P 元素的迁移转化过程密切相关,可通过光降解或微生物降解过程释放出氮、磷等浮游植物或细菌可直接吸收利用的营养要素。很多研究者致力于探讨荧光与溶解有机碳(DOC)含量的相关性,并试图通过荧光来反演 DOC 的含量<sup>[19]</sup>,而荧光与 POC 相关性的研究较少涉及;本研究中类腐殖质荧光 C3、C4 与 POC 具有极好的相关性,这表明类腐殖质荧光物质是太湖 POC 的重要组成部分,类腐殖质荧光强度可以作为一个反映水体中 POC 含量的有效参数。COD 是反映水中可被氧化剂氧化的有机物含量的指标<sup>[30]</sup>;类腐殖质荧光强度与 COD 存在显著相关性,这说明类腐殖质荧光强度在一定程度上也可以反映被氧化的有机物含量;方芳等<sup>[28]</sup>在研究三峡

水库小江回水区溶解性有机物的三维荧光光谱特征时,也获得了类似的结论。综上所述,可以看出类腐殖质荧光组分与湖区各营养盐浓度均呈显著相关性,表明陆源类腐殖质荧光强度对各营养盐具有较好的指示意义,可以作为表征营养盐浓度高低的指标,故荧光分析法可以作为营养盐半定量分析的一个重要手段。

本研究调查结果显示,草、藻型湖区 POM 各荧光峰之间的相关性存在一定的差异性,藻型湖区 POM 类蛋白和类腐殖质荧光强度之间呈显著相关性,而草型湖区两者相关性不显著,这说明藻型湖区 POM 中的类蛋白质和类腐殖质物质在组成上和来源上具有某种联系,而草型湖区 POM 两者在组成和来源上不尽相同。相关分析还发现,草、藻型湖区 POM 各荧光组分与 Chla 的关系也存在差异性。有关类蛋白和类腐殖质荧光与 Chla 的关系已有一些报道,且说法不一。江俊武等<sup>[29]</sup>发现类蛋白荧光与 Chla 存在显著相关关系,但方芳等<sup>[28]</sup>报道类蛋白荧光与 Chla 的相关性比较差;王书航等<sup>[33]</sup>认为类腐殖质荧光与 Chla 呈显著正相关关系,而季乃云等<sup>[31]</sup>对大沽河-胶州湾段的研究表明,高的类腐殖质荧光强度不一定对应着高的 Chla 含量。本研究中,草、藻型湖区 POM 类蛋白和类腐殖质荧光与 Chla 之间的关系不尽相同,藻型湖区 POM 类蛋白和类腐殖质荧光均与 Chla 存在显著相关关系,而草型湖区 POM 仅类腐殖质荧光与 Chla 具有显著相关关系;这说明浮游植物是藻型湖区 POM 类蛋白和类腐殖质荧光的来源之一,而草型湖区 POM 类腐殖质荧光与 Chla 的相关关系也进一步证实了浮游植物原位降解产生的有机物中包含类腐殖质荧光<sup>[30]</sup>。草、藻型湖区 POM 各荧光组分与 TN、TP、COD、POC 及 SS 等水质参数之间均具有显著相关关系,说明 POM 与水质参数来源上的相似性,同时也揭示了 POM 及其荧光组分与 N、P 等元素的迁移、转化行为紧密相连。

## 4 结论

(1) 夏季太湖水体 POM 荧光组分主要包括一类色氨酸荧光组分(C1 和 C2),类腐殖质荧光组分(C3 和 C4),类酪氨酸荧光组分(C5);其中,C1 与 C2、C3 与 C4 两两具有极显著相关关系,表明 C1 与 C2、C3 与 C4 两两来源相似;C5 与 C3、C4 也具有极好的相关性,说明 C5 同时具有内源和外源双重特性;通过与已有文献中的 DOM 荧光特征进行

比对发现,夏季太湖 POM 与 DOM 在组分构成、来源及其与水质参数的相关性上均存在差异性。

(2) 综合夏季太湖水体 POM 荧光组分、强度、荧光指数,及其与各水质参数的相关性分析可知,夏季太湖 POM 既有外源输入,也有内源输入,且内源输入的贡献大于外源输入。类腐殖质荧光组分与 TN、TP、Chla、COD、POC、SS 均呈显著相关性,表明陆源类腐殖质荧光强度对各营养盐具有较好的指示意义,可以作为表征营养盐浓度高低的指标,故荧光分析法可以作为营养盐半定量分析的一个重要手段。

(3) 藻型湖区 POM 类蛋白质主要由类色氨酸荧光组分和类酪氨酸荧光组分构成,而草型湖区以类酪氨酸为主,没有或者有极少的类色氨酸荧光组分;值得注意的是,与藻型湖区相比,草型湖区含有较多的类酪氨酸荧光组分( $t$  检验,  $P < 0.01$ )。藻型湖区 POM 类蛋白和类腐殖质荧光之间具有显著相关关系,而草型湖区两者相关性不显著;藻型湖区 POM 类蛋白和类腐殖质荧光均与 Chla 存在显著相关关系,而草型湖区 POM 仅类腐殖质荧光与 Chla 具有显著相关关系。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴丰昌, 王立英, 黎文, 等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(1): 1-12.  
Wu F C, Wang L Y, Li W, *et al.* Natural organic matter and its significance in terrestrial surface environment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(1): 1-12.
- [3] Simon M, Grossart H P, Schweitzer B, *et al.* Microbial ecology of organic aggregates in aquatic ecosystems [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2002, **28**(2): 172-211.
- [4] Kendall C, Silva S R, Kelly V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States [J]. *Hydrological Processes*, 2001, **15**(7): 1301-1346.
- [5] Bardhan P, Naqvi S W A, Karapurkar S G, *et al.* Isotopic composition of nitrate and particulate organic matter in a pristine dam reservoir of western India: implications for biogeochemical processes[J]. *Biogeosciences*, 2017, **14**(4): 767-779.
- [6] 曾庆飞, 孔繁翔, 张恩楼, 等. 利用稳定同位素技术研究外源物质输入对太湖微食物链的贡献[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1670-1674.  
Zeng Q F, Kong F X, Zhang E L, *et al.* Effects of anthropogenic organic matter inputs on stable carbon and nitrogen isotopes in organisms from microbial food chain in Taihu lake [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(8): 1670-1674.
- [7] Osburn C L, Handsel L T, Mikan M P, *et al.* Fluorescence tracking of dissolved and particulate organic matter quality in a river-dominated estuary [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(16): 8628-8636.
- [8] 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.
- [9] 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*, 2011, **46**(1): 38-48.
- [10] Yao X, Zhu G W, Cai L L, *et al.* Geochemical characteristics of amino acids in sediments of Lake Taihu, a large, shallow, eutrophic freshwater lake of China[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2012, **18**(3): 263-280.
- [11] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [12] Copy R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in DOM [J]. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [13] Jaffé R, Boyer J N, Lu X, *et al.* Source characterization of dissolved organic matter in a subtropical mangrove-dominated estuary by fluorescence analysis[J]. *Marine Chemistry*, 2004, **84**(3-4): 195-210.
- [14] Huguet A, Vacher L, Relexans S. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719.
- [15] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 742-746.
- [16] 周永强, 张运林, 牛城, 等. 基于 EEMs 及 PARAFAC 的洪湖、东湖与梁子湖 CDOM 组成特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(12): 3286-3292.  
Zhou Y Q, Zhang Y L, Niu C, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Lake Honghu, Lake Donghu and Lake Liangzihu using excitation-emission matrices (EEMs) fluorescence and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(12): 3286-3292.
- [17] 刘学利, 姚昕, 董杰, 等. 东平湖可溶性有机物的荧光特征及环境意义[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, **32**(6): 933-939.
- [18] Liu X L, Yao X, Dong J, *et al.* Fluorescence features of chromophoric dissolved organic matter in Dongping Lake and their environmental significance [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, **32**(6): 933-939.
- [19] 王震, 邹华, 杨桂军, 等. 太湖叶绿素 a 的时空分布特征及其与环境因子的相关关系[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(4): 567-575.  
Wang Z, Zou H, Yang G J, *et al.* Spatial-temporal characteristics of chlorophyll-a and its relationship with environmental factors in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(4): 567-575.
- [19] 姜广甲, 苏文, 马荣华, 等. 富营养化水体颗粒有机碳浓度的遥感估算及动态变化特征[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, **34**(2): 203-210.  
Jiang G J, Su W, Ma R H, *et al.* Remote estimation and temporal-spatial variability of particulate organic carbon concentrations in eutrophic inland water [J]. *Journal of Infrared*



- and Millimeter Waves, 2015, **34**(2): 203-210.
- [20] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 314-328.
- Kong F X, Ma R H, Gao J F, *et al.* The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(3): 314-328.
- [21] Murphy K R, Stedmon C A, Waite T D, *et al.* Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy[J]. Marine Chemistry, 2008, **108**(1-2): 40-58.
- [22] Yamashita Y, Jaffé R, Maie N, *et al.* Assessing the dynamics of dissolved organic matter (DOM) in coastal environments by excitation emission matrix fluorescence and parallel factor analysis (EEM-PARAFAC)[J]. Limnology and Oceanography, 2008, **53**(5): 1900-1908.
- [23] 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.
- [24] Williams C J, Yamashita Y, Wilson H F. Unraveling the role of land use and microbial activity in shaping dissolved organic matter characteristics in stream ecosystems[J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(3): 1159-1171.
- [25] Kowalczyk P, Cooper W J, Durako M J, *et al.* Characterization of dissolved organic matter fluorescence in the south atlantic bight with use of PARAFAC model: relationships between fluorescence and its components, absorption coefficients and organic carbon concentrations[J]. Marine Chemistry, 2010, **118**(1-2): 22-36.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 方芳, 翟端端, 郭劲松, 等. 三峡水库小江回水区溶解性有机物的三维荧光光谱特征[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(3): 323-328.
- Fang F, Zhai D D, Guo J S, *et al.* Three-dimensional fluorescence spectroscopy characterization of dissolved organic matter in Xiaojiang river backwater area, Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, **19**(3): 323-328.
- [29] 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.
- [30] 姚昕, 张运林, 朱广伟, 等. 湖泊草、藻来源溶解性有机质及其微生物降解的差异[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 688-694.
- Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Different degradation mechanism of dissolved organic matter derived from phytoplankton and macrophytes in Lake Taihu, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(3): 688-694.
- [31] 季乃云. 胶州湾荧光溶解有机物及其与环境因子关系的研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2005.
- [32] 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.
- [33] 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蠡湖 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.
- [34] 冯伟莹, 朱元荣, 吴丰昌, 等. 太湖水体溶解性有机质荧光特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 475-482.
- Feng W Y, Zhu Y R, Wu F C, *et al.* The fluorescent characteristics and sources of dissolved organic matter in water of Tai Lake, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 475-482.
- [35] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 基于三维荧光和平行因子分析法的太湖水体 CDOM 组分光学特征[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(3): 375-382.
- Huang C C, Li Y M, Wang Q, *et al.* Components optical property of CDOM in Lake Taihu based on three-dimensional excitation emission matrix fluorescence[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(3): 375-382.
- [36] Grossart H P. Ecological consequences of bacterioplankton lifestyles: changes in concepts are needed[J]. Environmental Microbiology Reports, 2010, **2**(6): 706-714.
- [37] Eiler A, Bertilsson S. Composition of freshwater bacterial communities associated with cyanobacterial blooms in four Swedish lakes[J]. Environmental Microbiology, 2004, **6**(12): 1228-1243.
- [38] McCallister S L, Bauer J E, Ducklow H W, *et al.* Sources of estuarine dissolved and particulate organic matter: a multi-tracer approach[J]. Organic Geochemistry, 2006, **37**(4): 454-468.
- [39] Mayer L M, Schick L L, Hardy K R, *et al.* Photodissolution and other photochemical changes upon irradiation of algal detritus[J]. Limnology and Oceanography, 2009, **54**(5): 1688-1698.
- [40] Maki K, Kim C, Yoshimizu C, *et al.* Autochthonous origin of semi-labile dissolved organic carbon in a large monomictic lake (Lake Biwa): carbon stable isotopic evidence[J]. Limnology, 2010, **11**(2): 143-153.
- [41] 张运林, 秦伯强, 龚志军. 太湖有色可溶性有机物荧光的空间分布及其与吸收的关系[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(5): 1337-1342.
- Zhang Y L, Qin B Q, Gong Z J. Spatial distribution of chromophoric dissolved organic matter fluorescence and its relation with absorption in Lake Taihu[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, **25**(5): 1337-1342.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                  |                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Estimation of Fine Particle ( $PM_{2.5}$ ) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai                                                              | WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)    |
| Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China                         | GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)        |
| Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing                                         | GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)                             |
| Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method      | ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)             |
| HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China                                                                           | TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)        |
| Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes                                                    | HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)                 |
| Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale                                                           | FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)                        |
| Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers                                                              | LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)            |
| Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales                                                                             | PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)                    |
| Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR                                                             | JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)         |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake                                                           | GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)      |
| Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China                                                    | LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)             |
| Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary                                                                          | ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)           |
| Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China                                             | LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)         |
| Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau                        | MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)       |
| Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River                                | LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)     |
| Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors                                     | ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)      |
| Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir                                                  | ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)             |
| Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin                             | WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)           |
| Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR                                            | SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)            |
| Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water                                                     | YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)           |
| Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir                                           | WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)          |
| Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams                                                                                | YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)           |
| Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch                                                                               | LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)              |
| Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions             | XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)           |
| Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate                                                                                                       | SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)                 |
| Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid                                                                             | XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)           |
| Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars                                                                                  | LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)                    |
| Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior     | LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)                              |
| Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant                                                                   | SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)       |
| Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater                                                                                            | LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)                     |
| Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater                                              | TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)        |
| Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR                                                    | FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)             |
| Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes                                                                                             | GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)    |
| Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants                                                                     | WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)        |
| Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge                                                            | DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)             |
| Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules                                                | LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)           |
| Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China                                                                                    | WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)               |
| Characteristics of $N_2O$ Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer                                         | ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)         |
| Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu                                                | JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)                |
| Dynamics of $CO_2$ and $N_2O$ in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia                                                            | LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)                     |
| Characteristics of $CO_2$ Flux in a Mature Apple ( <i>Malus domestica</i> ) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau                                               | YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)     |
| Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil                                                                        | QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)                  |
| Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil                                                   | LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)                     |
| Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing                   | ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)             |
| Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater                                                              | LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)          |
| Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing                                          | LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)        |
| Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology                                 | ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)           |
| Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil                                                       | YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)     |
| Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings                                                                  | FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)              |
| Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments                                                | KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431) |
| Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification | ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)      |
| Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi                                                      | ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)          |
| Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir                                     | CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)            |
| Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues ( <i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages           | WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)                      |
| Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area                                            | LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)                   |
| Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain                                        | XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)                     |
| Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice                                                      | SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)       |
| Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis                                       | DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)   |