

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

**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

我国城市 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康风险及经济损失评价 ..... 李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)

冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响 ..... 孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)

基于区域传输矩阵和 PM<sub>2.5</sub> 达标约束的大气容量计算方法 ..... 李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)

利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征 ..... 温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)

重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征 ..... 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)

杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析 ..... 徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)

城市生活垃圾露天焚烧 PM<sub>2.5</sub> 及其组分排放特征 ..... 王艳, 郝伟伟, 程轲, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)

民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子 ..... 杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)

大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析 ..... 纪德钰 (3535)

“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析 ..... 张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)

浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数 ..... 王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)

有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别 ..... 翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)

基于 MODIS\_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征 ..... 胡俊, 元燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)

基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景 ..... 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)

北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露 ..... 陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)

丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化 ..... 李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)

太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义 ..... 吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)

太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价 ..... 朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)

台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性 ..... 姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)

珠江三角洲高钾地下水赋存环境特征及成因分析 ..... 张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)

有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响 ..... 宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)

澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析 ..... 程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)

碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子 ..... 王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)

浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析 ..... 张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)

人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响 ..... 刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)

外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N<sub>2</sub>O 排放影响 ..... 余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)

雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布 ..... 尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)

水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响 ..... 高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)

Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/BIVO<sub>4</sub> 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A ..... 李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)

海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制 ..... 于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)

磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制 ..... 赵华轩, 郎印海 (3729)

污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证 ..... 陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解 ..... 关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)

阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮 ..... 叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)

普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能 ..... 陈思, 白波, 王洪伦, 索有瑞 (3759)

PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能 ..... 许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕锋, 夏四清 (3767)

苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用 ..... 马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)

反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能 ..... 王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)

好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因 ..... 康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 钊珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)

苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性 ..... 吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)

污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析 ..... 刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)

生物炭对华北农田土壤 N<sub>2</sub>O 通量及相关功能基因丰度的影响 ..... 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)

设施菜田土壤 N<sub>2</sub>O 产生对 O<sub>2</sub> 的响应 ..... 陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)

利用  $\mu$ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性 ..... 孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)

南京市铅锌矿采场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 ..... 李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)

Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果 ..... 杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)

基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移 ..... 李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)

生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程 ..... 赵鹏宇, 李磊, 柴宝峰 (3876)

转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响 ..... 王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)

脱硫石膏对稻田 CH<sub>4</sub> 释放及其功能微生物种群的影响 ..... 胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)

长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征 ..... 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)

黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源镉 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响 ..... 宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)

黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)

氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响 ..... 涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)

有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响 ..... 祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许新 (3937)

中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO<sub>2</sub> 排放 ..... 林婷, 吴焯, 何晓漪, 张少君, 郝吉明 (3946)

气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展 ..... 叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)

《环境科学》征订启事 (3543) 《环境科学》征稿简则 (3570) 信息 (3600, 3728, 3844)

# 太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义

吕伟伟<sup>1</sup>, 姚昕<sup>1,2\*</sup>, 张保华<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:**天然有机质(OM)广泛存在于各类水体, 含有丰富的碳、氮、磷等生源要素, 其形成、转化、归宿及其相伴随的营养盐再生过程是水生态系统营养盐生物地球化学循环的重要环节, 在湖泊蓝藻水华暴发过程中势必也扮演着非常重要的营养盐供给者的角色. 本研究于 2015 年 2 月和 5 月分别在太湖北部湖区采集了 17 个样品, 利用 POM-DOM PARAFAC 三维荧光模型解析春、冬季节颗粒态有机质(POM)和溶解态有机质(DOM)的荧光特征及来源, 并探讨 POM 和 DOM 各荧光组分之间及其与叶绿素 a(Chla)的关系. 结果表明, 春、冬季节太湖北部湖区 POM 和 DOM 的荧光峰、荧光中心位置和荧光强度均存在明显的差别;POM 有着比 DOM 更复杂的组分构成. 综合 POM 和 DOM 的荧光强度和荧光指数可知, 春、冬季节太湖北部湖区 POM 和 DOM 均以自生源为主, 河口区受陆源贡献较大. POM(C1p~C5p)和 DOM(C1d~C5d)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). POM 和 DOM 的荧光组分特征存在明显的差别;春、冬季节 POM 均以类腐殖质荧光 C3 为主, 荧光组分高值区分别集中在梅梁湾区域和湖心区;而 DOM 均以类蛋白组分 C2、C1 和 C5 为主, 荧光组分高值区均分布在竺山湾区域. 相关分析结果显示, 春季 C1d 与 C2d( $P < 0.01$ )、C3d 与 C4d( $P < 0.01$ )、C1p 与 C4p ( $P < 0.05$ )、C2p 与 C5p( $P < 0.01$ )均具有较强的相关性. 值得注意的是, C3d( $P < 0.01$ )、C4d( $P < 0.05$ )与 C3p 均具有较好的相关关系, 表明 POM 与 DOM 在组分、来源上具有某种联系. 与春季类似, 冬季荧光组分 C1d 与 C2d、C3d 与 C4d、C1p 与 C2p、C1d 与 C2p 亦具有极好的相关性( $P < 0.01$ ). 春季 C5d 与 Chla 之间存在正相关关系( $P < 0.01$ ), 而 C2d( $P < 0.05$ )、C3p( $P < 0.01$ )与 Chla 之间具有负相关关系;冬季 C4d 与 Chla 之间也存在负相关关系( $P < 0.05$ ).

**关键词:**POM-DOM PARAFAC 三维荧光模型;天然有机质;颗粒态有机质;溶解态有机质;荧光特征;来源

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3601-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.201801228

## Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter

LÜ Wei-wei<sup>1</sup>, YAO Xin<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Bao-hua<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:** Organic matter (OM), rich in carbon, nitrogen, phosphorus and other biogenic elements, has numerous geochemical and ecological functions in all kinds of water bodies, and is highly valued in ecological studies of both marine and inland environments. The formation, transformation, and fate of OM, and its accompanying nutrient regeneration process are key links in the biogeochemical cycling of nutrients in aquatic ecosystems. Furthermore OM, as a provider of nutrients, also plays a very significant role during the outbreak of algal blooms in inland lakes. Two extensive sampling campaigns were conducted at the same site ( $n = 17$ ) in Lake Taihu in February and May of 2015, and 34 ( $17 \times 2$ ) samples were collected. Excitation-emission matrix (EEM) fluorescence was combined with parallel factor analysis (PARAFAC) to characterize the spatial-temporal variations in the components and sources of particulate (POM) and dissolved (DOM) organic matter. Moreover, the correlations between fluorescence intensity and Chla were studied. Significant differences between the fluorescence peaks, fluorescence positions, and fluorescence intensities of POM and DOM indicated that the components of POM were more complex than those of DOM. Fluorescence intensities and fluorescence indices indicated that POM and DOM possessed endogenous characteristics and that estuaries possessed obvious exogenous characteristics. Five types of fluorophores were present in POM (C1p-C5p) and DOM (C1d-C5d): tyrosine-like fluorophores (C1 and C2), humic-like fluorophores (C3 and C4), and tryptophan-like fluorophores (C5). The fluorescent components of POM and DOM differed significantly. C3p was the dominant fluorophore in POM during spring and winter, and fluorescence intensities of C1p-C5p were higher in the Meiliang Bay and the central part of the lake than in other areas. C2d, C1d, and C5d were the dominant fluorophores in DOM

收稿日期: 2018-01-25; 修订日期: 2018-03-12

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); 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

during spring and winter, and fluorescence intensities of C1d-C5d were higher in the Zhushan Bay than in other areas. In spring, positive correlations were observed between C1d and C2d ( $P < 0.01$ ), C3d and C4d ( $P < 0.01$ ), C1p and C4p ( $P < 0.05$ ), and C2p and C5p ( $P < 0.01$ ). Remarkably, C3p and C3d ( $P < 0.01$ ) and C3p and C4d ( $P < 0.05$ ) were positively correlated, suggesting that these two forms of OM were correlated. Similarly, highly significant, positive correlations were observed between C1d and C2d ( $P < 0.01$ ), C3d and C4d ( $P < 0.01$ ), C1p and C2p ( $P < 0.01$ ), and C1d and C2p ( $P < 0.01$ ) during winter. Furthermore, Chla and C5d were significantly and positively correlated ( $P < 0.01$ ). However, both Chla/C2d and Chla/C3p were negatively correlated in spring. Furthermore, Chla and C4d were negatively correlated in winter.

**Key words:** combined POM-DOM PARAFAC model; organic matter (OM); particulate organic matter (POM); dissolved organic matter (DOM); fluorescence characteristics; sources

天然有机质(organic matter, OM)广泛存在于各类水体,含有丰富的碳、氮、磷等生源要素,其形成、转化、归宿及其相伴随的营养盐再生过程是水生态系统营养盐生物地球化学循环的重要环节,在海洋及内陆水体的生态学研究受到高度重视<sup>[1,2]</sup>,在湖泊蓝藻水华暴发过程中势必也扮演着非常重要的营养盐供给者的角色。

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<sup>[3-6]</sup>。光化学降解、酶解以及细菌降解等这些生物和非生物因素参与的降解转化过程都会使 OM 的存在形态、组分以及化学特征发生改变,将 POM 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,进而参与到湖泊生源要素循环过程中<sup>[7,8]</sup>。因此,深入认识水体中 POM 与 DOM 的组分及其来源差异,很可能成为揭示 POM-DOM 之间转化机制的一个关键环节<sup>[9]</sup>。然而,国内外关于 OM 组分及其来源等方面的研究主要集中在 DOM 方面<sup>[10-13]</sup>,而对 POM 组分及其来源等方面的研究尚处于起步阶段;究其原因主要是 POM 结构复杂及技术手段的限制<sup>[14,15]</sup>。

Osburn 等<sup>[9]</sup>在前人的基础上运用三维荧光光谱技术(three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectra, EEMs)结合平行因子分析法(parallel factor analysis, PARAFAC),总结了 POM-DOM PARAFAC 三维荧光模型,对北卡罗莱纳州 Neuse 河口 POM 和 DOM 两种形态的荧光组分进行了解译,并对 POM 降解转化过程中新生 DOM 以及剩余 POM 的含量及组分变化进行了定性定量的分析,为研究湖泊水体中 OM 特征及其来源提供了新的可能。Brym 等<sup>[16]</sup>结合 POM-DOM PARAFAC 模型分析了在近海沿岸海洋环境中提取的颗粒态有机质的光学和化学特征。Osburn 等<sup>[17]</sup>利用 POM-DOM PARAFAC 模型揭示了在盐沼泽地及其邻近河口之

间交换的溶解态和颗粒态有机质的含量的季节性变化。Larsen 等<sup>[18]</sup>运用 POM-DOM PARAFAC 模型对恢复和未恢复城市河流中有机沉积物的来源进行了示踪。然而,目前为止在中国内陆湖泊, POM 与 DOM 荧光组分及其来源差异等方面的研究程度相对较低,有必要进行系统深入地研究。

湖泊富营养化会导致水体生产力提高,直接后果是水体内源产生的 OM 剧烈增加,而且其来源、组成及循环耦合过程(如:速率、通量、主要过程和机制等)也相应发生着明显的变化<sup>[19]</sup>。例如海洋及河口 POM 有机碳所占比重一般约为干重的 10%~40%,而在一些淡水生态系统中,尤其是水华暴发期,浮游动植物以及水生植物的残体是构成颗粒态有机质的基本成分,使得这一比例甚至可达 66%<sup>[20]</sup>。微囊藻等藻类由于伪空泡的作用漂浮在水面上,并且由于风力作用以及岸边大型水生植物如芦苇等的拦截作用而大量堆积在岸边,这些都使得藻源 POM 接受太阳辐射的机会大大增多<sup>[21]</sup>。而且相比其他 POM 来源,藻源 POM 降解后可快速释放出大量生物活性很高的 DOM 和无机营养盐,供水体中的藻类再次利用,可能对水华的暴发程度和周期产生重要的影响<sup>[20]</sup>。这暗示着,富营养化浅水湖泊中 POM 尤其是藻源等高生物可利用性 POM 的降解转化过程和水华暴发之间可能存在着关联。

孔繁翔等指出<sup>[22]</sup>,蓝藻水华的形成可分为休眠、复苏、生长和上浮聚集这 4 个阶段,其中冬季蓝藻进入休眠阶段,春季蓝藻开始复苏,夏季大量生长,秋季上浮聚集。目前大部分研究都集中在夏季蓝藻暴发期,笔者也调查了夏季颗粒态有机质的荧光特征<sup>[23]</sup>,但是对冬、春蓝藻休眠及复苏季节的相关研究较少。本研究在富营养化浅水湖泊太湖运用 POM-DOM PARAFAC 模型,重点探讨了春季蓝藻复苏和冬季 POM 与 DOM 的荧光特征并对其可能来源进行分析,以期为深刻认识富营养化浅水湖泊中溶解态和颗粒态有机质的生物地球化学循环、及其与蓝藻水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2015年2月26日和5月28日分别在梅梁湾(1~6号、17号)、竺山湾(12号、13号)、贡湖湾(7号、10号、11号、16号)、河口区(9号、14号)和湖心区(8号、15号)进行了采样,分别采集17个样品(图1),采样点位同中国科学院太湖生态系统研究站的常规监测点位(编号不同),南、北部湖区参照 Zhou 等<sup>[24]</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与DOC浓度( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )及POM与DOM三维荧光光谱分析均在采样结束后2~3 d内分析完成。

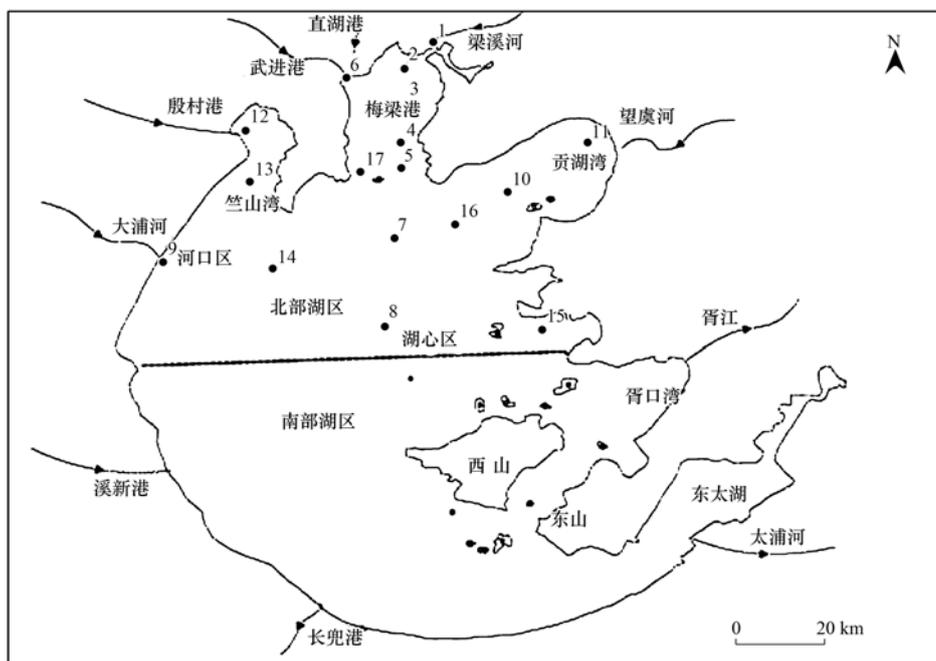


图1 太湖水体采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling sites in Lake Taihu

### 1.2 样品的测定

#### 1.2.1 POM与DOM三维荧光光谱分析

共采集5 L水样,根据水的浑浊程度取100~1000 mL水样过滤到事先经450℃灼烧并称重的0.7  $\mu\text{m}$ 的GF/F滤膜上,滤后水再用0.2  $\mu\text{m}$ 的微孔膜过滤测定DOM的三维荧光;滤膜上的POM荧光物质用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 等<sup>[9]</sup>的方法进行。

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  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 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>[25]</sup>。

#### 1.2.2 三维荧光光谱的平行因子分析法(PARAFAC)及荧光光谱参数

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,它是基于三线理论的一种方法<sup>[26]</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.

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 OM 荧光强度的相对贡献率. 荧光指数(fluorescence index, FI)定义为激发波长为 370 nm 时, 发射波长在 450 nm 与 500 nm 处的荧光强度比值, 这个比值反映了芳香氨基酸与非芳香物对荧光强度的相对贡献率, 因而可以作为物质的来源以及 OM 降解程度的指示指标<sup>[25]</sup>, 陆源和生物来源的  $f_{450/500}$  值分别为 1.4 和 1.9<sup>[27]</sup>.

生物源指数(autochthonous index, BIX)是 310 nm 激发波长下 380 nm 发射波长处荧光强度与 420 ~ 435 nm 区间最大荧光强度的比值, 可以作为 OM 溯源的一个指标, BIX 值越高, 说明新近自生源组分的比例越高, BIX 值越低表示主要来自陆源输入. 有研究认为<sup>[28]</sup>, BIX 在 0.6 ~ 0.7 之间时, 具有较少的自生成分; BIX 在 0.7 ~ 0.8 时具有中度新近自生源特征; 在 0.8 ~ 1.0 之间时, 具有较强自生源特征; 大于 1.0 是为生物细菌活动产生.

腐殖化指数(humification index, HIX)用来表征有机质腐殖化的程度或成熟度, 可以通过激发波长为 254 nm 时, 发射波长从 435 ~ 480 nm 的峰值面积比 300 ~ 345 nm 的荧光峰值面积计算, HIX 值越高, 表明腐殖化程度越高. 有研究认为<sup>[29]</sup>, 当 HIX 小于 4 表示由生物活动产生, 腐殖化程度较弱, 以自生源为主; 当 HIX 值在 4 ~ 6 之间时, 属于较弱腐殖质特征和较强自生源特征; HIX 值大于 6, 属于强腐殖质特征, 陆源贡献较大.

### 1.2.3 其他水质参数的测定

经高温(450℃)灼烧后的 0.7 μm GF/F 滤膜过滤水样, 过滤后的水经 1020 型 TOC 仪测定 DOC 浓度; 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)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[30].

### 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 太湖水体各水质参数的时空分布特征

天然有机质降解过程中大量耗氧, 同时释放出 N、P、C 等有机和无机营养盐, 进而影响各种养分的吸附/解析、相互转化及生物利用等过程<sup>[31]</sup>. TN、TP、Chla、COD、POC 和 DOC 等水质参数的浓度和时空分布分别见表 1 和图 2. 春、冬季节 TP、Chla、COD 和 POC 具有类似的季节变化规律, 春季浓度及其变幅均大于冬季( $t$  检验,  $P < 0.01$ ); 而 TN 冬季的变幅及其浓度均大于春季( $t$  检验,  $P < 0.01$ ), Xu 等<sup>[32]</sup>也获得了类似的结论; 春、冬季节 DOC 浓度及其变幅无显著差异( $t$  检验,  $P > 0.05$ ). 各水质参数的空间分布模式不尽相同, TN、TP、COD 和 DOC 的高值区均分布在竺山湾、梅梁湾及河口区, 呈现出近岸高, 远岸低的分布趋势, 这与 Yao 等<sup>[33]</sup>的研究结果一致; 而 Chla 和 POC 春季高值区集中在梅梁湾区域, 冬季高值区分布在湖心区.

表 1 太湖各水质参数浓度/mg·L<sup>-1</sup>

Table 1 Concentrations of water quality parameters in Lake Taihu/mg·L<sup>-1</sup>

水质参数	春季		冬季	
	浓度范围	均值	浓度范围	均值
TN	2.11 ~ 5.68	3.31 ± 0.27	1.40 ~ 7.63	3.72 ± 0.49
TP	0.04 ~ 0.34	0.14 ± 0.02	0.04 ~ 0.25	0.12 ± 0.01
Chla	6.99 ~ 298.81	53.31 ± 18.43	2.49 ~ 23.45	9.26 ± 1.40
COD	2.86 ~ 17.07	5.35 ± 0.87	2.83 ~ 5.35	4.37 ± 0.17
POC	1.02 ~ 31.11	7.94 ± 2.32	0.93 ~ 3.55	2.09 ± 0.20
DOC	2.76 ~ 5.94	4.03 ± 0.20	2.49 ~ 6.33	4.43 ± 0.24

### 2.2 太湖 OM 荧光特征

荧光特征是描述有机质来源和组成的重要参数<sup>[34, 35]</sup>. 入湖河口区和湖心区典型站点 POM 和 DOM 的荧光特征见图 3. 三维荧光图谱显示, POM 和 DOM 共出现了 6 种类型的荧光峰(图 3), 包括 1 个可见光区的类腐殖质荧光 C 峰, 1 个紫外光区的类腐殖质荧光 A 峰, 1 个海源性类富里酸 M 峰, 以及 3 个类蛋白荧光 B、T 和 D 峰. 一般认为 C、A 峰反映的是外源输入的腐殖酸和富里酸形成的荧光峰值, M 峰代表的是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, 而 B、T、D 峰反映

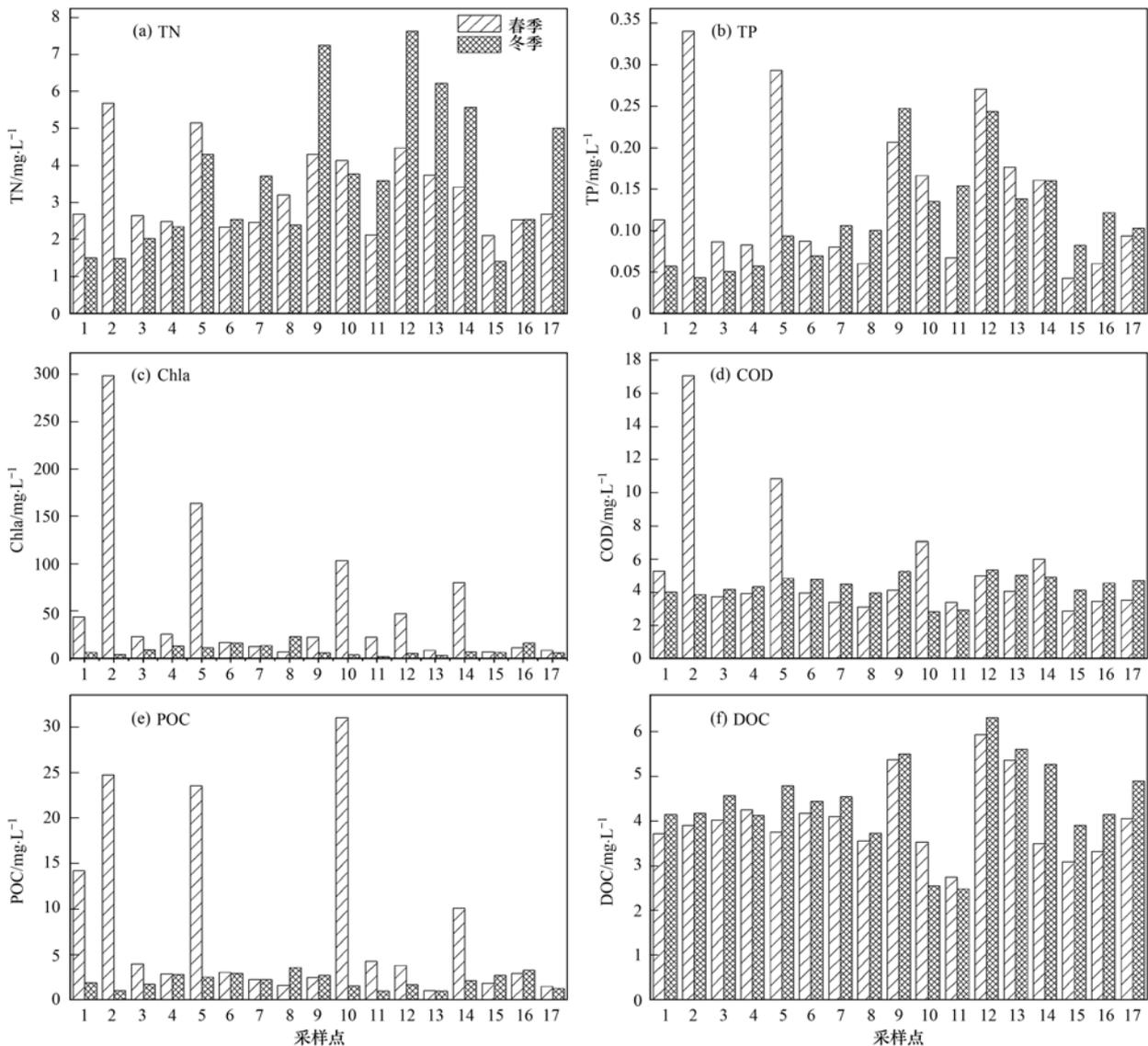


图2 太湖水体各水质参数的时空分布

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

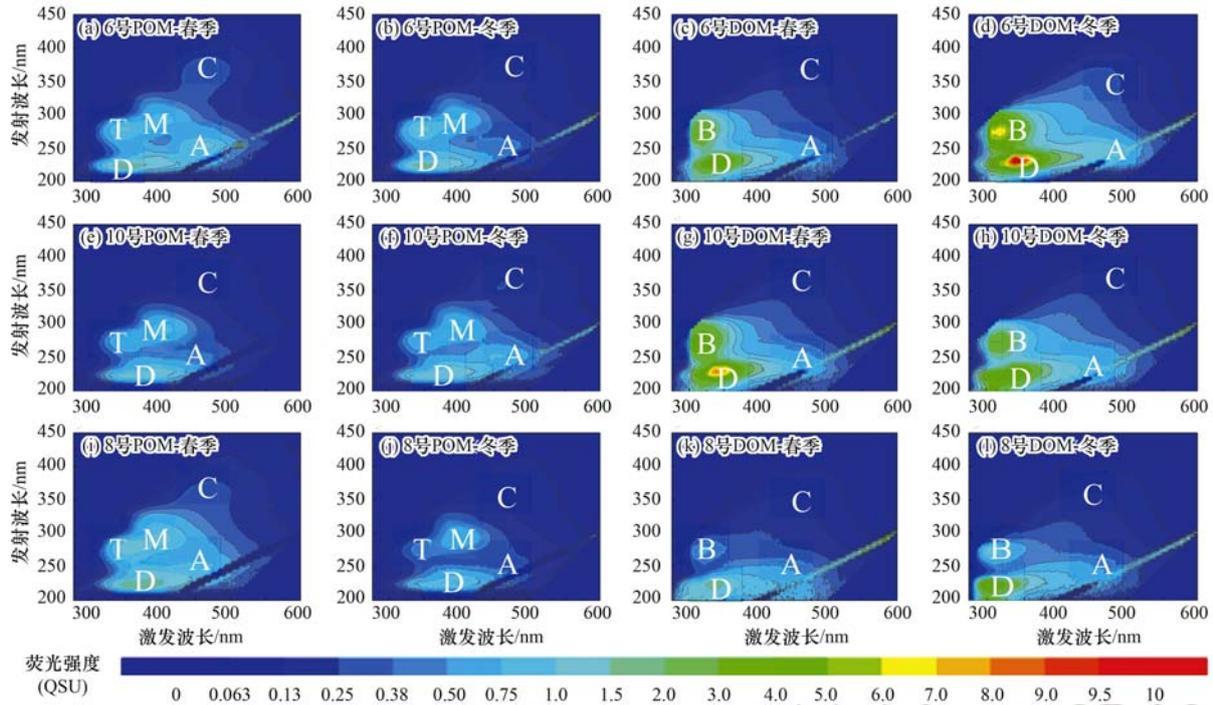
的是生物降解来源的色氨酸和酪氨酸形成的荧光峰值<sup>[36~41]</sup>。但近年来也有部分研究显示浮游植物生长或降解过程中也会产生类腐殖质荧光<sup>[42, 43]</sup>, 而来源于化工厂的污水中可能会含有类蛋白荧光<sup>[44]</sup>。

各个峰的位置及其峰值荧光强度如图3所示。POM和DOM的三维荧光光谱中, 荧光峰、荧光中心位置和荧光强度均存在一定差异。POM的三维荧光光谱中出现了5种类型的荧光峰(T、D、M、A和C峰), 而在DOM的三维荧光光谱中发现了4种类型的荧光峰(B、D、A和C峰), 这说明POM具有更复杂的组分构成; He等<sup>[6]</sup>也获得了类似的结论。有研究表明, 对于同一种荧光峰, 其对应激发波长越大(红移), 所含芳香性越强, 分子量越大, 聚合

度越高<sup>[45]</sup>; POM类酪氨酸荧光峰D峰激发波长为380 nm(DOM三维荧光光谱中D峰激发波长为350 nm), 出现明显的“红移”现象, 说明POM类酪氨酸荧光物质的结构和组成与DOM之间存在差异, 即POM类酪氨酸荧光物质的分子量、缩聚度和芳香度大于DOM。DOM的荧光强度要强于POM; 典型站点的POM和DOM三维荧光光谱特征表明, 由河口区至湖心区的POM和DOM的荧光峰类型相似, 但荧光强度逐渐降低。从季节变化来看, POM春季荧光强度大于冬季, 而DOM冬季荧光强度大于春季。在DOM三维荧光光谱中, 类蛋白荧光强度(B和D峰)明显大于类腐殖质荧光强度(A和C峰)。

### 2.3 太湖OM荧光组分的PARAFAC模型解析

将2015年2月和5月采集的共34个POM和



6号采样点位于梅梁湾入湖河口区;10号采样点位于大浦河口河口区;8号采样点位于湖心区

图3 入湖河口区及湖心区典型站点三维荧光图谱

Fig. 3 Examples of EEM fluorescence spectra of OM from typical sampling sites at the river inflow and in the central part of Lake Taihu

34个DOM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和DOM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4).这5种荧光组分的激发波长和发射波长见表2.由图4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和B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<sup>[36, 37]</sup>;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<sup>[38, 39]</sup>;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<sup>[40, 41]</sup>;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<sup>[36, 40]</sup>.

POM和DOM荧光组分的相对含量见表2. POM 5种荧光组分(C1p~C5p)的相对含量分别在3.44%~24.26%、0.00%~18.55%、15.26%~62.80%、1.21%~40.62%和7.68%~32.07%之间变化,均值分别为 $14.38\% \pm 0.92\%$ 、 $7.39\% \pm 0.91\%$ 、 $43.53\% \pm 2.29\%$ 、 $15.68\% \pm 1.75\%$ 和

$19.02\% \pm 0.86\%$ .春、冬季节太湖北部湖区C1p~C5p的分布存在明显的空间差异;春季C1p~C5p高值区均分布在梅梁湾区域,而冬季C1p~C5p高值区均集中在湖心区.太湖北部湖区春、冬季节POM的季节差异并不明显,均以荧光组分C3p为主.

DOM 5种荧光组分(C1d~C5d)的相对含量分别在16.61%~38.17%、27.80%~48.60%、5.59%~17.86%、2.70%~18.60%和0.00%~37.58%之间变化,均值分别为 $30.64\% \pm 0.91\%$ 、 $39.69\% \pm 0.83\%$ 、 $9.72\% \pm 0.46\%$ 、 $5.04\% \pm 0.49\%$ 和 $14.91\% \pm 1.43\%$ .与POM不同,春、冬季节太湖北部湖区C1d~C5d高值区均分布在竺山湾区域,且均以类蛋白组分C2d、C1d和C5d为主.

#### 2.4 各荧光组分之间及其与各水质参数的关系

如表3所示,建立POM(C1p~C5p)和DOM(C1d~C5d)各荧光组分间的相关关系,以分析各荧光组分间的关系.相关分析显示,春季C1d与C2d、C3d与C4d之间有较强的相关性,且显著正相关( $P < 0.01$ ),说明C1d与C2d这两种类色氨酸在组成及分布上相似,C3d与C4d这两种类腐殖质在组成及分布上亦相似,周永强等<sup>[46]</sup>对洪湖、东湖与梁子湖CDOM组成特征分析中也获得了类似的结论.同理,C1p与C4p( $P < 0.05$ )、C2p与C5p( $P$

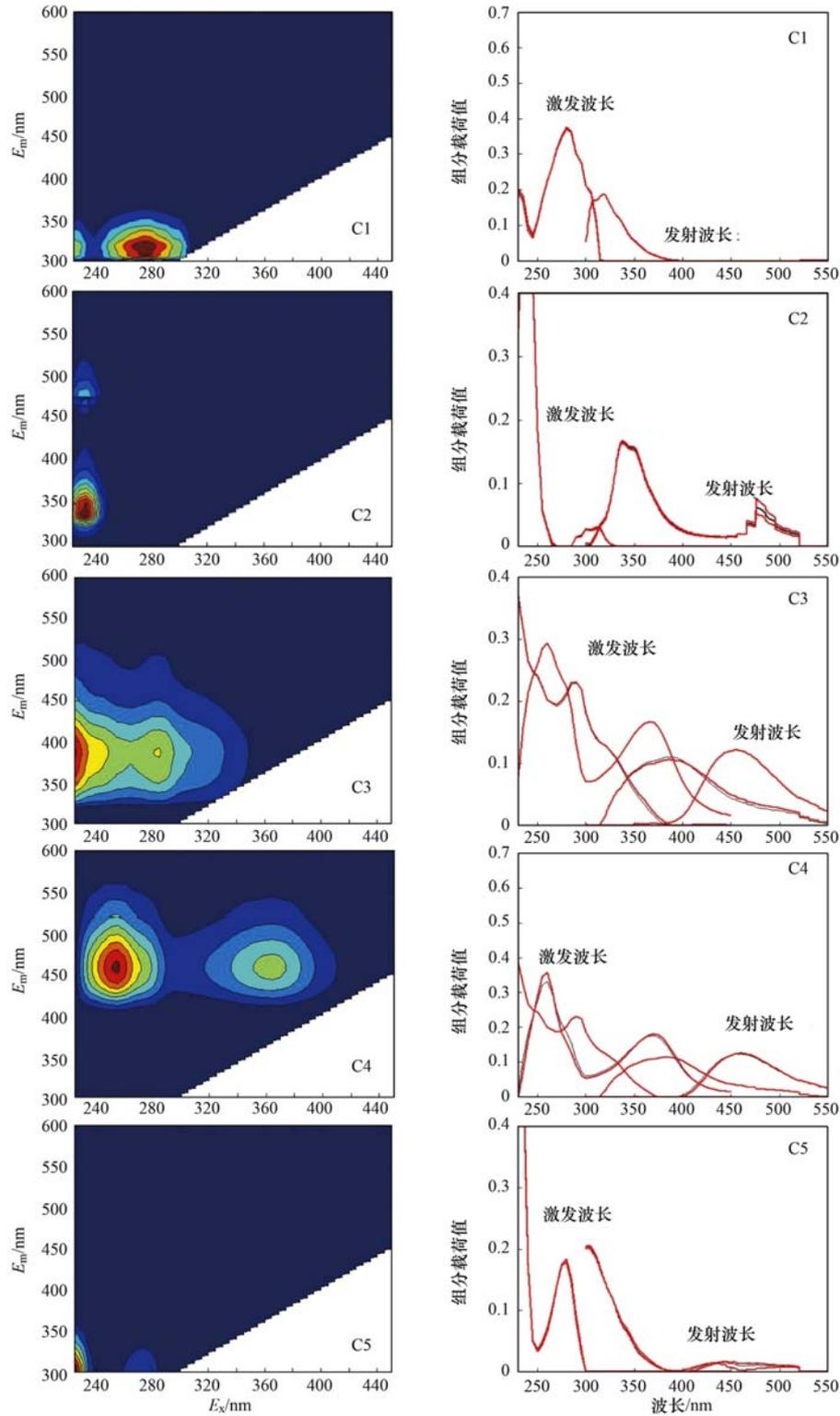


图4 太湖 POM 和 DOM 各荧光组分

Fig. 4 Spectral shapes of the five components identified by PARAFAC

<0.01) 之间也具有较强的相关性, 说明 C1<sub>p</sub> 与 C4<sub>p</sub> 这两种物质在组成和来源上具有某种联系, C2<sub>p</sub> 与 C5<sub>p</sub> 这两种类蛋白质物质之间亦具有某种联系. 值得注意的是, C3<sub>d</sub> ( $P < 0.01$ )、C4<sub>d</sub> ( $P < 0.05$ ) 与 C3<sub>p</sub> 均具有较好的相关关系, 表明 POM 与

DOM 在组分来源上具有某种联系; He 等研究表明<sup>[6]</sup>, POM 与 DOM 之间通过生物因素或非生物因素易发生动态转化. 与春季类似, 冬季荧光组分 C1<sub>d</sub> 与 C2<sub>d</sub>、C3<sub>d</sub> 与 C4<sub>d</sub>、C1<sub>p</sub> 与 C2<sub>p</sub>、C1<sub>d</sub> 与 C2<sub>p</sub> 亦具有极好的相关性 ( $P < 0.01$ ).

表 2 POM 和 DOM 的 5 种荧光组分的相对含量/%

Table 2 Relative concentrations of the five component determined using the combined POM-DOM PARAFAC model/%

荧光组分		C1	C2	C3	C4	C5
$E_x/nm$		275 (<225)	235	<225(285)	255(365)	<225(275)
$E_m/nm$		318	338(476)	385	455	302
POM	春季	8.13 ~ 24.26	0.00 ~ 18.55	15.26 ~ 62.40	7.84 ~ 40.62	7.68 ~ 32.07
	冬季	3.44 ~ 21.29	0.00 ~ 15.75	36.82 ~ 62.80	1.21 ~ 16.25	11.71 ~ 26.51
	均值	14.38 ± 0.92	7.39 ± 0.91	43.53 ± 2.29	15.68 ± 1.75	19.02 ± 0.86
DOM	春季	16.61 ~ 35.31	27.80 ~ 46.33	8.05 ~ 17.86	3.48 ~ 18.60	6.04 ~ 37.58
	冬季	25.05 ~ 38.17	33.78 ~ 48.60	5.59 ~ 13.15	2.70 ~ 8.91	0.00 ~ 27.87
	均值	30.64 ± 0.91	39.69 ± 0.83	9.72 ± 0.46	5.04 ± 0.49	14.91 ± 1.43

表 3 POM(C1p ~ C5p) 和 DOM(C1d ~ C5d) 各组分之间及其与各水质参数的相关分析<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation analysis of the components of POM (C1p-C5p) and DOM (C1d-C5d), and water quality parameters

	C1d	C2d	C3d	C4d	C5d	C1p	C2p	C3p	C4p	C5p
C1d	1									
C2d	0.60*	1								
C3d	-0.74**	0.02	1							
C4d	-0.73**	-0.14	0.84**	1						
C5d	-0.47	-0.93**	-0.21	-0.15	1					
C1p	0.38	0.07	-0.41	-0.30	-0.03	1				
C2p	0.27	-0.19	-0.64**	-0.38	0.31	0.19	1			
春季 C3p	-0.37	0.21	0.69**	0.48*	-0.32	-0.57*	-0.70**	1		
C4p	0.22	-0.29	-0.39	-0.33	0.28	0.58*	0.03	-0.69**	1	
C5p	0.03	0.02	-0.22	-0.12	0.10	-0.40	0.62**	-0.34	-0.29	1
TN	-0.63**	-0.47	0.30	0.35	0.45	-0.27	0.18	-0.20	0.07	0.43
TP	-0.66**	-0.05	0.77**	0.71**	-0.09	-0.28	-0.36	0.64**	-0.55**	-0.19
Chla	-0.26	-0.52*	-0.24	-0.07	0.59**	0.12	0.45	-0.62**	0.39	0.41
COD	-0.28	-0.52*	-0.20	-0.07	0.60*	0.08	0.41	-0.59*	0.40	0.40
POC	-0.12	-0.35	-0.29	-0.15	0.45	0.32	0.62**	-0.75**	0.33	0.52*
DOC	-0.73**	-0.11	0.87**	0.76**	-0.07	-0.61*	-0.54*	0.53*	-0.25	0.00
C1d	1									
C2d	0.89**	1								
C3d	-0.63**	-0.36	1							
C4d	-0.19	0.13	0.61**	1						
C5d	-0.81**	-0.96**	0.15	-0.34	1					
C1p	0.43	0.15	-0.50*	-0.42	-0.09	1				
C2p	0.51**	0.28	-0.46	-0.22	-0.26	0.95**	1			
冬季 C3p	-0.42	-0.19	0.41	0.32	0.15	-0.96**	-0.91**	1		
C4p	-0.01	0.12	0.20	0.24	-0.17	-0.24	-0.34	0.04	1	
C5p	-0.54*	-0.41	0.39	0.05	0.40	-0.70**	-0.68**	0.73**	-0.36	1
TN	0.16	0.33	0.31	0.86**	-0.53*	-0.09	0.11	-0.01	0.26	-0.31
TP	0.01	0.22	0.32	0.89**	-0.41	-0.34	-0.17	0.23	0.37	-0.13
Chla	0.07	-0.26	-0.35	-0.54*	0.32	0.45	0.27	-0.44	0.03	-0.24
COD	-0.22	-0.25	0.45	0.45	0.05	0.32	0.38	-0.43	0.08	-0.25
POC	-0.17	-0.40	-0.05	-0.29	0.39	0.15	-0.02	-0.19	0.27	-0.11
DOC	-0.19	-0.16	0.48*	0.56*	-0.05	0.29	0.41	-0.37	-0.05	-0.22

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

春季 C1d ( $P < 0.01$ ) 和冬季 C4d ( $P < 0.01$ )、C5d ( $P < 0.05$ ) 与 TN 之间存在相关关系, 春季 C1d ( $P < 0.01$ )、C3d ( $P < 0.01$ )、C4d ( $P < 0.01$ )、C3p ( $P < 0.01$ )、C4p ( $P < 0.01$ ) 和冬季 C4d ( $P < 0.01$ ) 与 TP 之间具有极显著相关关系, 表明 OM 与 N、P

元素的迁移转化过程密切相关. 春季 C2d ( $P < 0.05$ )、C5d ( $P < 0.05$ )、C3p ( $P < 0.05$ ) 与 COD 均具有相关性, 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, 季乃云等<sup>[47]</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. 春季 C2p ( $P < 0.01$ )、C3p ( $P < 0.01$ )、C5p ( $P < 0.05$ ) 与 POC 均具有较好的相关关系, 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>[48]</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. 春季 C1d ( $P < 0.01$ )、C3d ( $P < 0.01$ )、C4d ( $P < 0.01$ )、C1p ( $P < 0.05$ )、C2p ( $P < 0.05$ )、C3p ( $P < 0.05$ ) 和冬季 C3d ( $P < 0.05$ )、C4d ( $P < 0.05$ ) 与 DOC 均存在相关关系, 说明类蛋白和类腐殖质是太湖 DOC 的重要组成部分.

富营养化水体中存在大量的浮游植物, 浮游植物量的多少常以叶绿素 a 的浓度反映, 而浮游植物降解是产生荧光物质的重要来源之一<sup>[49]</sup>, 故本研究进一步对叶绿素 a 与荧光组分的相关性进行了分析. 分析结果显示, 春季 C5d 与 Chla 之间存在正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 而 C2d ( $P < 0.05$ )、C3p ( $P < 0.01$ ) 与 Chla 之间具有负相关关系. 冬季 C4d 与 Chla 之间也存在负相关关系 ( $P < 0.05$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 POM 和 DOM 可能来源途径

从图 3 三维荧光图谱可以发现, 河口区和湖心区荧光峰值出现的位置和强度的差异证明两种形态有机质中具有不同的荧光物质, 暗示河口区和湖心区 OM 的来源不一样. 本研究中 6 号和 10 号采样点均位于河流的入湖口, 河流带来了大量的工业废水、生活污水以及土壤成分, 所以在河口区春、冬季节 POM 和 DOM 的来源主要为陆源, 类腐殖质荧光 A 峰和 C 峰比较强, 这与 Baker 等<sup>[44]</sup>对河流中 DOM 三维荧光研究结果类似, 河流中类腐殖质荧光显著大于类蛋白荧光. Baker 等<sup>[44]</sup>在研究受污染河流 DOM 时还发现, 可以用类蛋白荧光来指示河流的受污染程度, 因为在洁净水体中类蛋白荧光峰很少出现, 在纯腐殖质样品的三维荧光图谱中亦没有类蛋白荧光峰. 河口区 6 号和 10 号采样点由于受城市污水中类蛋白荧光的影响, POM 在 T、D 峰的荧光峰值以及 DOM 在 B、D 峰的荧光峰值均较高. 此外, 6 号和 10 号采样点所在的河口区同时位于易暴发蓝藻水华的太湖西、北部, 再加上河口区氮、磷营养盐丰富, 生物活动剧烈, 生物降解的类蛋白应该也会有很大的贡献, 而并非全部来自河流输入.

8 号采样点位于远离河口区的湖心区, 受河流

影响减少, 由于流水的不断稀释, 外源输入的贡献有所降低, 从荧光峰值中也可以看出这一点, 河口区陆源类腐殖质荧光峰值明显强于湖心区, 王志刚等<sup>[50]</sup>在巢湖的研究得出了同样的观点. 在湖心区, 受河流影响减弱, 类腐殖质荧光强度明显降低, 而类蛋白荧光强度却并没有等比例降低, 这表明在湖心区浮游植物的降解作用产生了新的类蛋白组分. 根据傅平青等<sup>[51]</sup>对云南洱海的研究发现, 沉积物孔隙水中有较强的类蛋白荧光组分, 这是由于生物以及微生物残骸中蛋白质成分被分解后进入孔隙水中导致的. Coble 等<sup>[35]</sup>对海洋沉积物孔隙水的研究中也发现了强的类蛋白荧光, 因此太湖北部湖区中类蛋白荧光也有可能是太湖沉积物孔隙水中类蛋白荧光组分的释放.

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 OM 荧光强度的相对贡献率. 本研究中, 春季 DOM 荧光指数 FI、BIX 和 HIX 分别在 1.83 ~ 2.43、0.91 ~ 1.26 和 0.26 ~ 1.96 之间, 均值分别为  $1.97 \pm 0.03$ 、 $1.16 \pm 0.02$  和  $0.50 \pm 0.10$ , 这表明春季 DOM 受内源贡献较大. 冬季 DOM 荧光指数 FI、BIX 和 HIX 分别在 1.65 ~ 2.50、1.00 ~ 1.27 和 0.23 ~ 0.93 之间, 均值分别为  $2.02 \pm 0.05$ 、 $1.19 \pm 0.02$  和  $0.43 \pm 0.04$ , 整体处于较强的自生源特征. 春季 POM 荧光指数 FI、BIX 和 HIX 分别在 1.66 ~ 2.80、0.30 ~ 1.55 和 1.40 ~ 4.81 之间, 均值分别为  $2.26 \pm 0.08$ 、 $1.00 \pm 0.09$  和  $2.92 \pm 0.25$ , 说明春季太湖北部湖区 POM 整体处于弱腐殖质特征, 且以自生源为主. 冬季 POM 荧光指数 FI、BIX 和 HIX 分别在 1.64 ~ 2.16、1.06 ~ 1.35 和 0.69 ~ 1.88 之间, 均值分别为  $1.82 \pm 0.03$ 、 $1.18 \pm 0.02$  和  $1.28 \pm 0.10$ , 这表明冬季 POM 受内源贡献较大. 相比之下, 入湖河流的河口区 (图 5 中圈出部分), 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 OM 来源均具有良好的指示性, 都显示出春、冬季节太湖北部湖区水体 POM 和 DOM 均以自生源为主, 河口区受陆源贡献较大; 江俊武等<sup>[52]</sup>认为太湖水体 DOM 主要为内源贡献, 河口区外源输入相对明显一些. 曾庆飞等<sup>[53]</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.

#### 3.2 春、冬季节各荧光组分和叶绿素 a 的相关性

近年来, 有关浮游植物与类蛋白和类腐殖质荧光强度关系的说法不一. 有报道指出, 高叶绿素 a

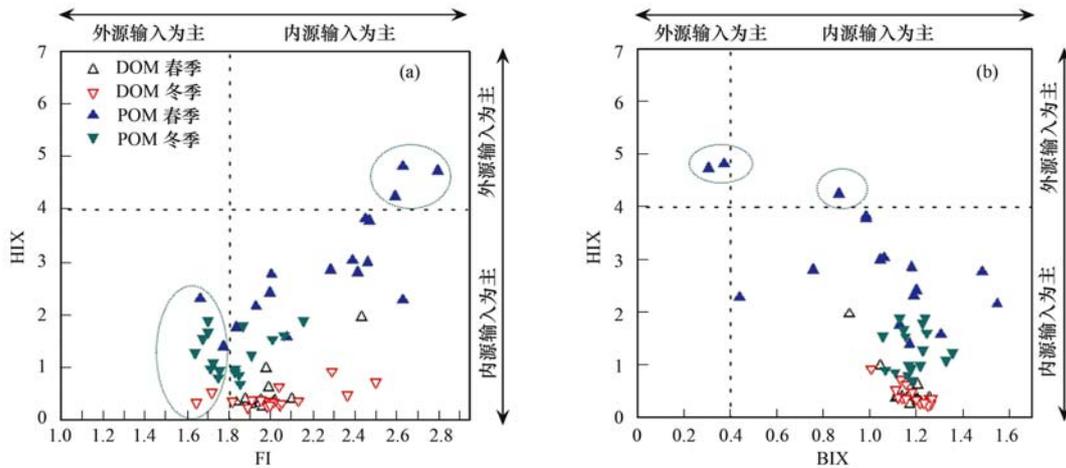


图5 太湖 POM 和 DOM 样品的 FI-HIX and BIX-HIX 分布

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

含量的水域对应着高类蛋白荧光强度<sup>[54-57]</sup>, 高类腐殖质荧光强度对应着高叶绿素 a 含量<sup>[56-59]</sup>. 不过 Mayer 等<sup>[60]</sup>对 Maine 河口的研究表明, 高类蛋白荧光对应着高叶绿素 a 含量, 却也发现有时类蛋白荧光和叶绿素 a 呈负相关; 任保卫等<sup>[61]</sup>通过研究胶州湾围隔实验中溶解有机物三维荧光特征时发现, 类酪氨酸荧光强度与叶绿素 a 浓度呈明显的负相关. 但也有不少研究发现荧光组分与叶绿素 a 之间并没有显著的相关性, 如刘学利等<sup>[62]</sup>在研究东平湖溶解性有机质时发现, 各荧光组分与叶绿素 a 相关性均未达到显著水平; 吕丽莎等<sup>[63]</sup>在研究东海溶解有机物时也发现, 荧光组分与叶绿素 a 之间无明显相关性. 分析其原因, 可能与浮游植物所处的生长阶段有关; Petersen<sup>[64]</sup>在培养球等鞭金藻时发现, 衰老和死亡细胞的破碎降解是有机物类蛋白荧光的一个重要来源; Rochelle-Newall 等<sup>[65]</sup>通过对中肋骨条藻和微小原甲藻等几种海洋微藻培养过程中有机物类腐殖质荧光变化的研究表明, 类腐殖质荧光在微藻进入稳定生长期后才开始逐渐增大, 其主要是来源于浮游植物释放的有机物质经由细菌进一步降解后的产物; 这就表明, 某区域虽然具有相对高的浮游植物生物量, 如果此时正处于浮游植物的指数生长期, 类蛋白和类腐殖质荧光可能会低; 相反, 如果正是浮游植物衰亡期, 叶绿素 a 含量不一定很高, 但可能会具有较高的类蛋白和类腐殖质荧光. 本研究中, 如表 3 所示, 冬季 C4d 与 Chla 之间存在负相关关系; 春季 C5d 与 Chla 之间存在正相关关系, 而 C2d、C3p 与 Chla 之间具有负相关关系.

冬季, 浮游植物进入消亡时期, Chla 含量降低<sup>[22]</sup>, 类腐殖质荧光 C4d 与 Chla 存在负相关性( $P$

$< 0.05$ ), 这可能是因为浮游植物降解过程中产生了难降解的类腐殖质物质, 从而造成了类腐殖质荧光组分 C4d 随着 Chla 浓度的降低而升高的现象; Karner 等<sup>[42]</sup>的研究指出, 浮游植物原位降解产生的 DOM 中包含大约 25% 的类腐殖质荧光.

冬季蓝藻休眠到春季蓝藻复苏的过程中, 浮游植物量增加<sup>[22]</sup>, Chla 浓度升高(图 2), 荧光组分 C2d、C3p 的相对含量呈下降趋势(表 2), 相关分析显示 C2d、C3p 与 Chla 之间均存在负相关关系, C2d、C3p 随着 Chla 浓度的增加而降低, 说明 POM 与 DOM 对蓝藻复苏起着重要的作用; 冯胜等<sup>[66]</sup>的研究指出, 在微生物作用下的微囊藻降解实验进行至 21 d 时, 发现降解瓶上层颜色变绿, 伴随有部分新的浮游藻类产生. C5d 相对含量升高(表 2), C5d 与 Chla 具有正相关关系, C5d 随着 Chla 浓度的增加而增加, 表明浮游植物是 DOM 类酪氨酸组分的重要来源, 与江俊武等<sup>[52]</sup>报道的类蛋白质与 Chla 存在相关性相吻合.

#### 4 结论

(1) 春、冬季节太湖北部湖区 POM 和 DOM 的荧光峰、荧光中心位置和荧光强度均存在明显的差别; POM 有着比 DOM 更复杂的组分构成. 综合 POM 和 DOM 的荧光强度和荧光指数可知, 春、冬季节太湖北部湖区 POM 和 DOM 均以自生源为主, 河口区受陆源贡献较大.

(2) 通过 POM-DOM PARAFAC 三维荧光联合模型得出 POM (C1p ~ C5p) 和 DOM (C1d ~ C5d) 均含有 5 类荧光组分. POM 和 DOM 的荧光组分特征存在明显的差别; 春、冬季节 POM 均以类腐殖质类

光 C3 为主, 高值区分别集中在梅梁湾区域和湖心区; 而 DOM 均以类蛋白组分 C2、C1 和 C5 为主, 高值区均分布在竺山湾区域。

(3) 春季 C1d 与 C2d ( $P < 0.01$ )、C3d 与 C4d ( $P < 0.01$ )、C1p 与 C4p ( $P < 0.05$ )、C2p 与 C5p ( $P < 0.01$ ) 均具有较强的相关性。值得注意的是, C3d ( $P < 0.01$ )、C4d ( $P < 0.05$ ) 与 C3p 均具有较好的相关关系, 表明 POM 与 DOM 在组分来源上具有某种联系。与春季类似, 冬季荧光组分 C1d 与 C2d、C3d 与 C4d、C1p 与 C2p、C1d 与 C2p 亦具有极好的相关性 ( $P < 0.01$ )。相关分析结果显示, 春季 C5d 与 Chla 之间存在正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 而 C2d ( $P < 0.05$ )、C3p ( $P < 0.01$ ) 与 Chla 之间具有负相关关系; 冬季 C4d 与 Chla 之间也存在负相关关系 ( $P < 0.05$ )。

#### 参考文献:

- [1] Simon M, Grossart H P, Schweitzer B, *et al.* Microbial ecology of organic aggregates in aquatic ecosystems [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2002, **28**(2): 175-211.
- [2] Turner J T. Zooplankton fecal pellets, marine snow and sinking phytoplankton blooms [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2002, **27**: 57-102.
- [3] Verdugo P, Alldredge A L, Azam F, *et al.* The oceanic gel phase: a bridge in the DOM-POM continuum [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **92**(1-4): 67-85.
- [4] Roulet N, Moore T R. Environmental chemistry: Browning the waters [J]. *Nature*, 2006, **444**(7117): 283-284.
- [5] Azam F, Malfatti F. Microbial structuring of marine ecosystems [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2007, **5**(10): 782-791.
- [6] He W, Chen M L, Schlautman M A, *et al.* Dynamic exchanges between DOM and POM pools in coastal and inland aquatic ecosystems: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **551-552**: 415-428.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Lou T, Xie H X. Photochemical alteration of the molecular weight of dissolved organic matter [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(11): 2333-2342.
- [11] 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.
- [12] Gondar D, Thacker S A, Tipping E, *et al.* Functional variability of dissolved organic matter from the surface water of a productive lake [J]. *Water Research*, 2008, **42**(1-2): 81-90.
- [13] 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.
- [14] Baker A, Elliott S, Lead J R. Effects of filtration and pH perturbation on freshwater organic matter fluorescence [J]. *Chemosphere*, 2007, **67**(10): 2035-2043.
- [15] Santín C, Yamashita Y, Otero X L, *et al.* Characterizing humic substances from estuarine soils and sediments by excitation-emission matrix spectroscopy and parallel factor analysis [J]. *Biogeochemistry*, 2009, **96**(1-3): 131-147.
- [16] Brym A, Paerl H W, Montgomery M T, *et al.* Optical and chemical characterization of base-extracted particulate organic matter in coastal marine environments [J]. *Marine Chemistry*, 2014, **162**: 96-113.
- [17] Osburn C L, Mikan M P, Etheridge J R, *et al.* Seasonal variation in the quality of dissolved and particulate organic matter exchanged between a salt marsh and its adjacent estuary [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, **120**(7): 1430-1449.
- [18] Larsen L, Harvey J, Skalak K, *et al.* Fluorescence-based source tracking of organic sediment in restored and unrestored urban streams [J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, **60**(4): 1439-1461.
- [19] 吴敬禄, 王苏民. 云南程海富营养化过程的碳氧稳定同位素示踪 [J]. *第四纪研究*, 2003, **23**(5): 557-564.
- Wu J L, Wang S M. Stable isotopic tracing of historical progressive eutrophication from Lake Chenghai, Yunnan in China [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, **23**(5): 557-564.
- [20] Grossart H P. Ecological consequences of bacterioplankton lifestyles: changes in concepts are needed [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2010, **2**(6): 706-714.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- Lv 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.
- [24] 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*, 2018, **44**(1): 1-10.

- Lakes Research, 2015, **41**(2): 597-606.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719.
- [29] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 742-746.
- [30] 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.
- Jin X C, Tu Q Y. The standard methods in lake eutrophication investigation (2nd ed.) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [31] 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.
- [32] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [33] 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.
- [34] Wu F C, Tanoue E. Isolation and partial characterization of dissolved copper-complexing ligands in streamwaters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(18): 3646-3652.
- [35] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Williams C J, Yamashita Y, Wilson H F, *et al.* 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Kramer G D, Herndl G J. Photo- and bioreactivity of chromophoric dissolved organic matter produced by marine bacterioplankton [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2004, **36**: 239-246.
- [43] 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 Scientiarum Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 688-694.
- [44] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of river waters impacted by a tissue mill effluent [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(7): 1377-1382.
- [45] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌. 溶解有机质的三维荧光光谱特征研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2005, **25**(12): 2024-2028.
- Fu P Q, Liu C Q, Wu F C. Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of dissolved organic matter [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(12): 2024-2028.
- [46] 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.
- [47] 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.
- Ji N Y. Fluorescent dissolved organic matter and its relationship with environmental factors in Jiaozhou Bay [D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [48] 方芳, 翟端端, 郭劲松, 等. 三峡水库小江回水区溶解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.
- [49] 李崇明, 黄真理, 张晟, 等. 三峡水库藻类“水华”预测[J]. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(1): 1-6.  
Li C M, Huang Z L, Zhang S, *et al.* Risk forecast of algal bloom in the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, **16**(1): 1-6.
- [50] 王志刚, 刘文清, 李宏斌, 等. 三维荧光光谱法分析巢湖 CDOM 的空间分布及其来源[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(2): 275-279.  
Wang Z G, Liu W Q, Li H B, *et al.* Analysis of CDOM spatial distributions variations in Chaohu Lake and its sources by three dimensional fluorescence excitation-emission matrix [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(2): 275-279.
- [51] 傅平青, 吴丰昌, 刘丛强, 等. 高原湖泊溶解有机质的三维荧光光谱特性初步研究[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(6): 512-520.  
Fu P Q, Wu F C, Liu C Q, *et al.* Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy of dissolved organic matter from Chinese highland lakes [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, **38**(6): 512-520.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] Coble P G, Del Castillo C E, Avril B. Distribution and optical properties of CDOM in the Arabian Sea during the 1995 Southwest Monsoon [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 1998, **45**(10-11): 2195-2223.
- [55] Smart P L, Finlayson B L, Rylands W D, *et al.* The relation of fluorescence to dissolved organic carbon in surface waters [J]. Water Research, 1976, **10**(9): 805-811.
- [56] 季乃云, 赵卫红, 王江涛, 等. 大清河-胶州湾段溶解有机物质腐殖质荧光特征变化[J]. 环境科学, 2006, **27**(6): 1073-1077.  
Ji N Y, Zhao W H, Wang J T, *et al.* Change of humic-like fluorescence characteristics of dissolved organic matter from Dagu River to Jiaozhou Bay [J]. Environmental Science, 2006, **27**(6): 1073-1077.
- [57] 周楠, 赵卫红, 苗辉. 獐子岛附近海域溶解有机物的荧光特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(4): 1007-1011.  
Zhou N, Zhao W H, Miao H. Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in the sea nearby Zhangzi Island [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, **32**(4): 1007-1011.
- [58] 陈锡超, 纪颖琳, 胡青, 等. “引江济太”水系有色溶解有机物的特征与来源[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 63-69.  
Chen X C, Ji Y L, Hu Q, *et al.* Characteristics and sources of CDOM in the drainage system of Water Diversion from Yangtze River to Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(1): 63-69.
- [59] 鲁景亮, 孙松, 张光涛, 等. 2011 年夏季胶州湾表层溶解有机物荧光特征的时空变化[J]. 海洋科学, 2014, **38**(4): 1-6.  
Lu J L, Sun S, Zhang G T, *et al.* Temporal and spatial variation of fluorescence characteristics of dissolved organic matters during summer of 2011 in Jiaozhou Bay [J]. Marine Sciences, 2014, **38**(4): 1-6.
- [60] Mayer L M, Schick L L, Loder III T C. Dissolved protein fluorescence in two Maine estuaries [J]. Marine Chemistry, 1999, **64**(3): 171-179.
- [61] 任保卫, 赵卫红, 王江涛, 等. 胶州湾围隔实验中溶解有机物三维荧光特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 712-718.  
Ren B W, Zhao W H, Wang J T, *et al.* Three-dimensional fluorescence characteristic of dissolved organic matter in marine mesocosm experiment in Jiaozhou Bay, China [J]. Environmental Science, 2007, **28**(4): 712-718.
- [62] 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.  
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.
- [63] 吕丽莎, 赵卫红, 苗辉. 三维荧光结合平行因子分析在东海溶解有机物研究中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(3): 653-658.  
Lü L S, Zhao W H, Miao H. Application of excitation-emission matrix spectrum combined with parallel factor analysis in dissolved organic matter in East China Sea [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, **33**(3): 653-658.
- [64] Petersen H T. Determination of an *Isochrysis galbana* algal bloom by L-tryptophan fluorescence [J]. Marine Pollution Bulletin, 1989, **20**(9): 447-451.
- [65] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Production of chromophoric dissolved organic matter fluorescence in marine and estuarine environments: an investigation into the role of phytoplankton [J]. Marine Chemistry, 2002, **77**(1): 7-21.
- [66] 冯胜, 刘义, 余广彬. 微生物作用下的微囊藻降解试验研究[J]. 现代农业科技, 2009, (1): 253-255.  
Feng S, Liu Y, Yu G B. Microbial degradation test of microcystis [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2009, (1): 253-255.

## CONTENTS

An Assessment of PM <sub>2.5</sub> -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities .....	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River ...	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM <sub>2.5</sub> Concentration Target Constraint .....	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, et al. (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) .....	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, et al. (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing .....	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, et al. (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo .....	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, et al. (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM <sub>2.5</sub> from Open Burning of Municipal Solid Waste .....	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, et al. (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China .....	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, et al. (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian .....	Ji De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period .....	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, et al. (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province .....	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, et al. (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents .....	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, et al. (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006 .....	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, et al. (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow .....	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing .....	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, et al. (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project .....	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, et al. (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter .....	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake .....	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, et al. (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall .....	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, et al. (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta .....	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, et al. (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay .....	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, et al. (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors .....	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, et al. (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors .....	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, et al. (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors .....	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, et al. (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal .....	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, et al. (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N <sub>2</sub> O Emissions in Ditches Under Different Land Uses .....	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, et al. (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments .....	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, et al. (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants .....	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, et al. (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /BiVO <sub>4</sub> Composite Photoanode .....	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, et al. (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II) .....	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, et al. (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar .....	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater .....	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, et al. (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control .....	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, et al. (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal .....	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, et al. (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance .....	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, et al. (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process .....	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, et al. (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, et al. (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process .....	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, et al. (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions .....	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, et al. (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge .....	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, et al. (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge .....	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, et al. (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain .....	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, et al. (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil .....	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, et al. (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure .....	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing .....	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, et al. (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil .....	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, et al. (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique .....	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, et al. (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains .....	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria .....	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, et al. (3885)
Effects of Gypsum on CH <sub>4</sub> Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil .....	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles .....	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, et al. (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta .....	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, et al. (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River .....	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, et al. (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate .....	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, et al. (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance .....	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, et al. (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO <sub>2</sub> Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China .....	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, et al. (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water .....	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, et al. (3954)