

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈葭, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志伟, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

亚热带河口陆基养虾塘水体 CDOM 三维荧光光谱平行因子分析

朱爱菊^{1,2,3}, 孙东耀^{1,2,3}, 谭季^{1,2,3}, 黄佳芳^{1,2,3*}, 罗敏^{4,5}

(1. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007; 2. 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007; 3. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 4. 福州大学环境与资源学院, 福州 350116; 5. 福建师范大学生态学博士后科研流动站, 福州 350007)

摘要: 利用三维荧光光谱平行因子分析(EEMs-PARAFAC)技术, 对我国亚热带地区闽江、木兰溪、九龙江河口滨海陆基养虾塘水体的有色溶解性有机质(CDOM)进行了组分及来源分析. 研究表明从养虾塘水体 CDOM 荧光光谱中解析出 4 个有效 PARAFAC 荧光组分, 包括 2 种类蛋白质物质和 2 种类腐殖酸物质, 其中类蛋白质组分是河口陆基养虾塘水体中 CDOM 的主要组成部分. 水体的荧光指数 FI 和自生源指标 BIX 表明河口区滨海陆基养虾塘水体中 CDOM 的强自生来源贡献. 而腐殖化指标 HIX 表明养殖塘水体具有弱腐殖化特征. 类蛋白质组分与类腐殖质组分之间可能具有相同的来源属性和地化行为, 盐度与 CDOM 呈现极显著负相关, 而 DOC 与 CDOM 中类腐殖质组分(C2、C3)呈现显著正相关. 本研究为进一步揭示养虾塘水体 CDOM 的光化学性质提供了科学依据.

关键词: 有色溶解性有机质(CDOM); 三维荧光光谱(EEMs); 平行因子分析(PARAFAC); 陆基养虾塘; 河口

中图分类号: X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2019)01-0164-08 **DOI:** 10.13227/j.hjkk.201805235

Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary

ZHU Ai-ju^{1,2,3}, SUN Dong-yao^{1,2,3}, TAN Ji^{1,2,3}, HUANG Jia-fang^{1,2,3*}, LUO Min^{4,5}

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-geographical Process of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 4. School of Environment and Resource, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 5. Postdoctoral Research Station of Ecology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Components of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) from eight coastal land-based shrimp ponds in the Minjiang, Mulan, and Jiulong rivers of subtropical southeastern China were determined by fluorescence excitation emission matrix spectroscopy combined with parallel factor analysis (EEMs-PARAFAC). Four separate fluorescence components, including two protein-like components (C1, C4) and two humic-like components (C2, C3), were identified as the dominant components of the CDOM in these shrimp ponds. The fluorescence indices (FI, BIX, and HIX) suggest that the CDOM of shrimp ponds shows low humification and is mainly derived from spontaneous sources. The protein-like and humic-like components have similar sources and exhibit a similar geochemical behavior. The salinity is negatively correlated with all CDOM fractions, whereas the DOC concentrations show only a positive correlation with the humic fractions of the CDOM. This study provides a scientific basis for the photochemical properties of CDOM in shrimp ponds.

Key words: chromophoric dissolved organic matter (CDOM); fluorescence excitation emission matrix spectroscopy (EEMs); parallel factor analysis (PARAFAC); shrimp pond; estuary

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是广泛存在于天然水生环境的有机物质, 对水体的碳循环有重要影响^[1, 2]. 作为水生生态系统中一种重要的化学组分, DOM 不仅与水体污染物质的迁移转化、生物降解等过程密切相关, 同时对水体水质及富营养化的演化等有重要影响^[3, 4]. 有色溶解性有机质(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)作为溶解性有机质(DOM)的最重要组成部分, 可全面揭示水体 DOM 的动态、组分及其来源等^[5].

三维荧光-激发发射矩阵光谱(EEMs)是近年来被广泛应用于 CDOM 来源及动力学特征研究的一种荧光光谱分析技术^[6, 7], 通过平行因子法(parallel factor analysis, PARAFAC)解谱提取荧

收稿日期: 2018-05-28; 修订日期: 2018-07-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671088, 41601102); 福建师范大学校级创新团队项目(IRT1205); 林业科技创新平台运行补助项目(2018-LYPT-DW-048); 福建省科技厅省属公益类科研专项(2015R1101029-7); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601102)

作者简介: 朱爱菊(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态与环境, E-mail: zaijyh@qq.com

* 通信作者, E-mail: wahugeo@fjnu.edu.cn

光特征, 可对不同荧光组分进行定性和定量分析^[8], EEMs-PARAFAC 已成为研究水环境中溶解有机物性质及动力学特征的重要手段^[9, 10]. 近年来, 国内外学者利用 EEMs-PARAFAC 对各种天然水体中 CDOM 的组成及来源开展了一系列研究. Yao 等^[11]研究了太湖及其支流不同成分 CDOM 的来源, 发现存在 2 种色氨酸组分, 2 种腐殖质组分和 1 种酪氨酸样组分, 认为 CDOM 受地质和相关土地利用方式差异的影响. Guo 等^[12]在九龙江河口区通过 5 次流域尺度调查确定了九龙江河口水体 CDOM 的 2 种类腐殖质及 3 种类蛋白质样荧光组分. 肖隆庚等^[13]在中国南海海域 CDOM 的三维荧光峰中只观测到了 1 种类腐殖质及 1 种类蛋白质, 认为 CDOM 为海洋自生来源, 其主要贡献为海洋生物活动. 而对于人工模式下河口陆基养虾塘水体中 CDOM 的组成及来源的研究却鲜见报道.

据联合国粮食及农业组织数据显示, 目前世界水产养殖塘的面积高达 87 500 km²^[14], 中国的水产养殖产量占世界的 70%, 淡水池塘养殖产量占中国水产养殖总量的 41.5%^[15]. 福建省是中国东南沿海虾类的主要养殖区之一, 2014 年养虾塘面积约占全国养殖面积的 7%, 位居全国第 4^[16]. 养殖塘作为一种强人为干扰下的水生生态系统, 其水体污染程度会给水产业及周围环境带来一系列深远的影响. 基于此, 本研究利用 EEMs-PARAFAC 技术对福建省主要河口区滨海陆基养虾塘水体 CDOM 的三维荧光光谱特性进行分析, 考察了其组成成分及来源属性, 通过探究亚热带河口养虾塘水体 CDOM 在养殖塘水生生态系统的环境行为特性, 以期水质状况和水体中营养盐的迁移转换提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以福建省 3 条主要河流入海处作为研究区, 自北向南分别为闽江、木兰溪和九龙江, 河口区内遍布滩涂水产养殖塘. 3 个河口地区均属于亚热带季风气候区, 年均温 19.6 ~ 21℃, 年均降雨量均为 1 300 mm 以上^[17~19]. 在 3 个河口分别选择 3 个具有代表性的陆基养殖塘(图 1), 养殖水均源于附近河水或海水. 养殖塘内的产品为南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*). 该品种于每年 5 月投放虾苗, 10 ~ 11 月将虾全部收获. 采样期为 2017 年 7 月, 采样时间正是对虾生长旺盛的季节, 对虾食量增加, 消化和吸收也相对较快.

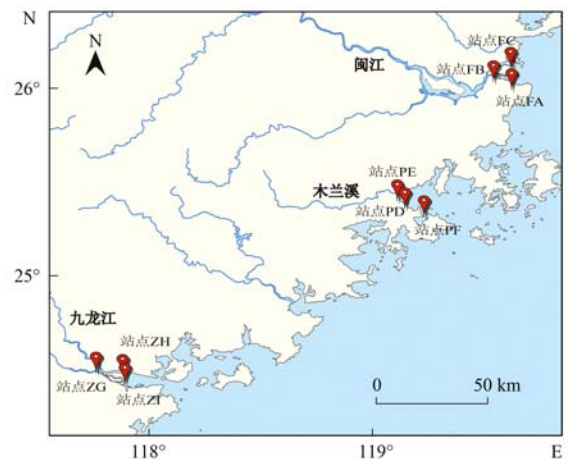


图 1 研究区和采样点分布示意

Fig. 1 Location of the study area and sampling plots

1.2 样品采集与测定

2017 年 7 月 23 ~ 28 日, 在 9 个养虾塘分别采集塘底距离沉积物-水界面 10 cm 水样, 每个养殖塘设置 3 个重复. 水样采集后立即装入预先处理的棕色玻璃瓶中, 并盖上丁基胶塞, 用铝箔箍好瓶盖, 放入装有冰袋的保温箱中冷藏保存并运回实验室. 回到实验室后, 所有水样经 450℃ 灼烧至恒重, 用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜(Whatman® GF/F)过滤后避光 4℃ 冷藏保存备用. 本实验中所用容器预先经稀盐酸浸泡过夜, 并用超纯水洗涤后烘干使用, 实验中所用试剂均为分析纯.

水样中 DOC 浓度使用 TOC-V_{C_{PH}} 总有机碳分析仪(岛津, 日本)测定分析, CDOM 的三维荧光光谱测定在 F-7000 型荧光分光光度计(日立, 日本)上进行, 仪器开机后等待 30 min, 以此来减少由于仪器不稳定带来的误差. 激发与发射狭缝宽度分别为 5 nm 和 10 nm, 扫描波长范围为 E_x 为 220 ~ 450 nm, 步长 5 nm, E_m 为 230 ~ 650 nm, 步长 2 nm. 每次实验均对超纯水进行 3 次拉曼光谱的扫描, 从而监测仪器的稳定性.

1.3 数据处理及分析

利用 MatlabR2016b 软件的 DOMFluor 工具箱对三维荧光光谱进行平行因子法分析. 其次, 由于考虑到信噪比的影响, 所以激发波长 250 nm 和发射波长 300 nm 以下的数据不参与计算^[20], 初步确定荧光组分数并且通过利用折半分析(Split-half analysis)来检验结果的可靠性. 利用三维荧光数据计算得出荧光指数 FI 和自生源指标 BIX 以及腐殖化指标 HIX_a、HIX_b, 各个组分的荧光强度均利用 F_{MAX} (RU) 来表示^[21], 结果见表 1. 养虾塘水体的荧光特征与水质参数间相关关系采用 SPSS 22.0 中 Pearson 进行相关分析, 显著水平设置为 0.05.

表 1 亚热带河口地区养虾塘水体主要性质

Table 1 Parameters in the water of shrimp ponds in the subtropical estuary

采样点	盐度/‰	DOC/mg·L ⁻¹	FI	BIX	HIX _a	HIX _b
FA	2.40 ± 0.01	1.81 ± 0.04	1.58 ± 0.05	1.07 ± 0.05	0.72 ± 0.02	0.42 ± 0.01
FB	1.90 ± 0.01	1.10 ± 0.01	1.66 ± 0.09	1.13 ± 0.05	1.85 ± 0.12	0.65 ± 0.01
FC	4.00 ± 0.01	2.73 ± 0.02	1.71 ± 0.03	1.08 ± 0.04	1.96 ± 0.28	0.66 ± 0.03
PD	17.73 ± 0.11	1.76 ± 0.08	1.77 ± 0.04	1.01 ± 0.01	2.43 ± 0.13	0.71 ± 0.01
PE	24.36 ± 0.06	1.06 ± 0.01	1.66 ± 0.16	1.04 ± 0.02	1.59 ± 0.04	0.61 ± 0.01
PF	35.13 ± 0.03	1.23 ± 0.01	1.53 ± 0.04	1.13 ± 0.01	2.08 ± 0.52	0.66 ± 0.05
ZG	2.10 ± 0.01	2.93 ± 0.07	1.70 ± 0.03	1.06 ± 0.02	2.27 ± 0.09	0.69 ± 0.01
ZH	12.73 ± 0.01	1.78 ± 0.03	1.64 ± 0.02	1.03 ± 0.03	2.21 ± 0.11	0.69 ± 0.01
ZI	17.07 ± 0.03	1.37 ± 0.01	1.57 ± 0.14	1.06 ± 0.03	1.48 ± 0.09	0.60 ± 0.01

2 结果与分析

2.1 养虾塘水体 CDOM 的三维荧光光谱特征

采用 PARAFAC 对本次采样点 27 个 CDOM 样的三维荧光光谱特征进行分析,结果显示亚热带 3

个河口区滨海陆基养虾塘水体荧光特征呈现 4 个荧光组分,包括 2 种类腐殖质和 2 种类蛋白质,荧光团组分和特征见表 2。图 2 和 3 分别为养虾塘水体 CDOM 激发和发射波长及载荷图。

组分 C1 (E_x/E_m , 285 nm/325 nm)、C4 (E_x/E_m ,

表 2 亚热带河口地区养虾塘水体中 CDOM 荧光团组分特征

Table 2 Characteristics of DOM fluorophores in the water of shrimp ponds in the subtropical estuary

组分	E_x/E_m /nm	类型	文献值/nm
C1	285/325	类酪氨酸类蛋白质	270 ~ 280/300 ~ 320 ^[22] ; 270 ~ 290/300 ~ 310 ^[23]
C2	280/453	紫外光类腐殖质	260/400 ~ 460 ^[24] ; 280/460 ^[25]
C3	310/389	海洋类腐殖质	312/380 ~ 420 ^[26] ; 290 ~ 310/370 ~ 410 ^[27]
C4	<250, 285/347	类色氨酸类蛋白质	280/340 ^[1] ; <250, 280/358 ^[20]

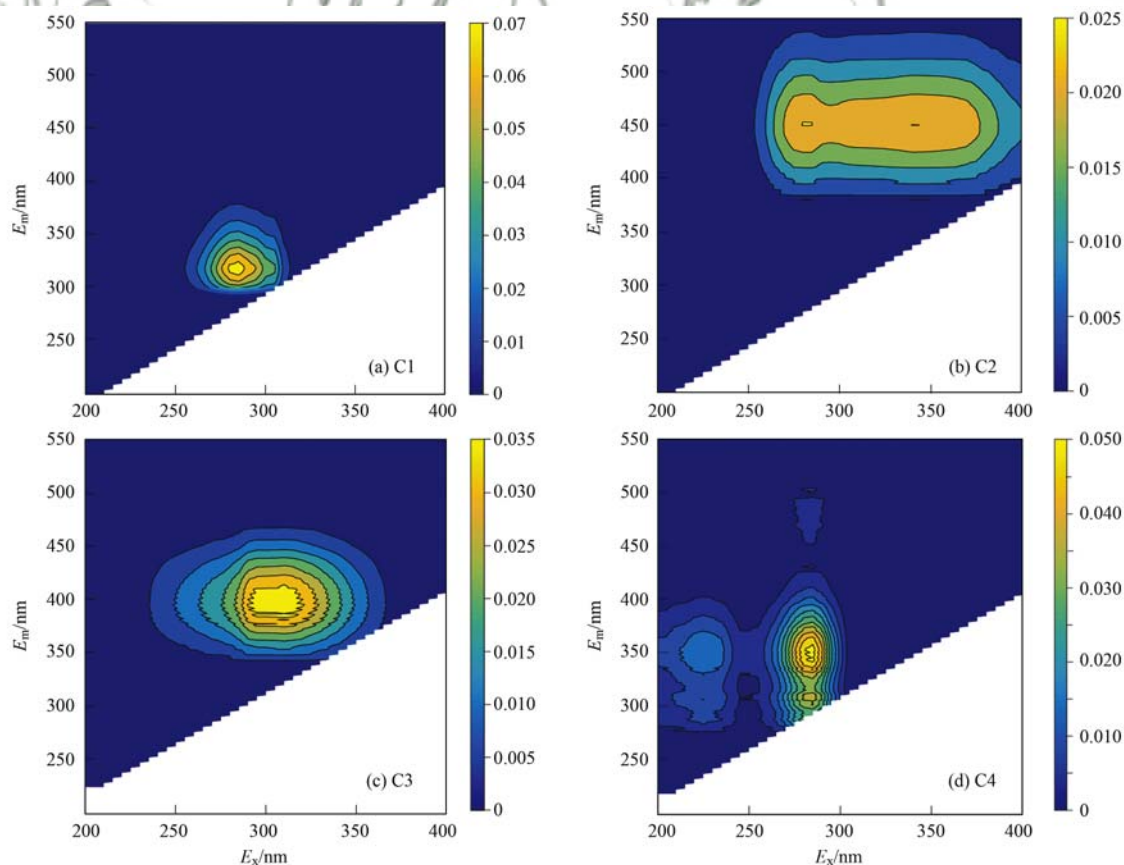


图 2 亚热带河口地区养虾塘水体 CDOM 的 4 个组分 EEMS

Fig. 2 Four components of CDOM in the water of shrimp ponds in the subtropical estuary

<250 nm, 285/347 nm) 均属于类蛋白质荧光组分, 其中 C1 具有一个激发峰和发射峰, 位于传统的 B 峰区域^[22], 主要体现的是类酪氨酸类蛋白质. 组分 C4 具有 2 个激发峰和 1 个发射峰, 其中激发与发射波长与色氨酸单体的荧光峰类似^[20], 短波与长波激发分别对应于传统的 R 峰(225 nm/342 nm)与 T 峰(275 nm/342 nm)^[1, 9], 主要体现的是类色氨酸类蛋白质.

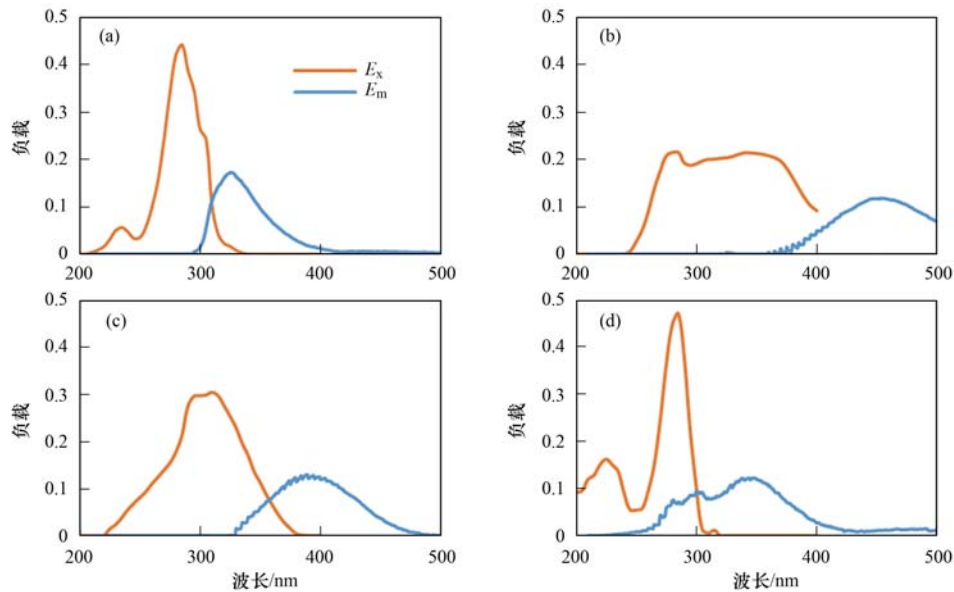


图3 亚热带河口地区养虾塘水体 CDOM 的 4 个组分载荷

Fig. 3 Four component loads of CDOM in the water of shrimp ponds in the subtropical estuary

2.2 养虾塘水体 CDOM 的三维荧光组分比例

对亚热带 3 个河口区滨海陆基养虾塘水体 CDOM 的荧光组分进行分析发现, 养虾塘水体 CDOM 主要成分均为 C1 和 C4 两类蛋白质荧光组分(图 4), 占比例分别为 21.13% ~ 49.02% 和 30.18% ~ 40.05%, 而 C2 和 C3 类腐殖质荧光组分所占比例较小, 占比例分别为 7.94% ~ 20.78% 和 8.24% ~ 30.08%.

2.3 亚热带河口区养殖塘水体 CDOM 的荧光特征参数

荧光指数(FI)是 $E_x = 370$ nm 时, E_m 在 470 nm 和 520 nm 处的荧光强度比值, 常用来表征溶解性有机质中腐殖质的来源^[21]. $FI > 1.9$ 时主要源于水体自身微生物活动, 自生源特征明显; $FI < 1.4$ 时以外源输入为主, 水体自身生产力贡献相对较低^[28, 29]. 自生源指标 BIX 反映了 CDOM 自生源的相对贡献, BIX 的范围在 0.6 ~ 0.8 之间表示自生源贡献较少, 大于 1.0 时说明 CDOM 降解程度高, 其自生源组分特征明显^[30]. 腐殖化指数 HIX (HIX_a 和 HIX_b) 是能够表征有机质腐殖化程度的重要指标 (HIX_b 为消除内滤效应干扰后的改进值), 高 HIX 值表明有机质腐殖化程度较高^[31]. 由图 5 可以看

组分 C2(E_x/E_m , 280 nm/453 nm)、C3(E_x/E_m , 310 nm/389 nm)均属于类腐殖质荧光组分, 其中 C2 具有一个激发峰和发射峰, 位于传统的 A 峰位置, 主要为分子量较大的芳香氨基酸腐殖物质的紫外光类腐殖质. 组分 C3 具有一个激发峰和发射峰, 其主要是和富里酸相类似的海洋类腐殖质, 位于传统的 M 峰(290 ~ 310 nm/370 ~ 410 nm)区域^[1], 一般认为其代表了海洋来源的长波类腐殖质荧光峰^[26].

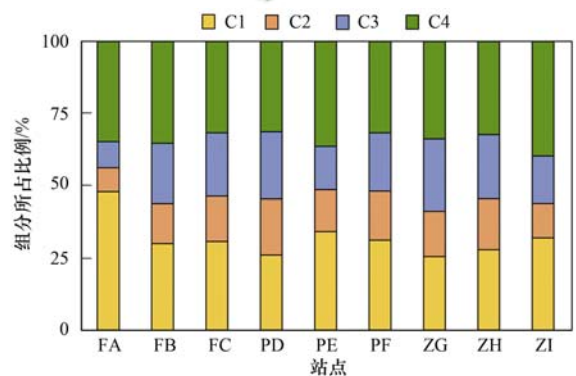


图4 不同养虾塘水体 CDOM 的荧光组分比例

Fig. 4 Fluorescence ratios of CDOM in different shrimp ponds

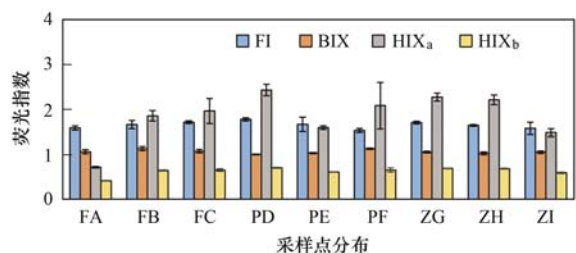


图5 亚热带河口地区养虾塘水体 CDOM 的 3 种荧光指标

Fig. 5 Three fluorescence indicators of CDOM in the water of shrimp ponds in the subtropical estuary

出, 本研究中 3 个河口区养虾塘水体 FI 的范围位于 1.53 ~ 1.78 (均值为 1.65), 自生源指标 BIX 的范围是 1.0 ~ 1.34 (均值为 1.06). 腐殖化指标 HIX_a 在 0.69 ~ 3.10 之间 (均值为 1.84), HIX_b 值在 0.41 ~ 0.71 之间 (均值为 0.63).

2.4 亚热带河口地区养虾塘水体 CDOM 的荧光特征与水质参数的相关性

CDOM 组分和各荧光光谱指标、水体理化性质进行相关性分析 (表 3), 发现类蛋白质组分 (C1、C4) 之间、类腐殖质组分 (C2、C3) 之间均极显著正相关 ($P < 0.01$). 盐度与 CDOM 各组分之间均存在显著的负相关关系 ($P < 0.05$), 腐殖化指数 HIX (HIX_a 、 HIX_b) 与类蛋白质组分 (C1、C4) 均呈现极显著的负相关 ($P < 0.01$).

表 3 亚热带河口地区养虾塘水体的荧光特征与水质参数相关性分析¹⁾

	C1	C2	C3	C4	盐度	DOC	FI	BIX	HIX_a	HIX_b
C1	1.000	0.694 **	0.486 **	0.984 **	-0.477 *	0.142	-0.117	-0.032	-0.696 **	-0.837 **
C2		1.000	0.895 **	0.754 **	-0.661 **	0.528 **	0.238	-0.211	-0.200	-0.321
C3			1.000	0.583 **	-0.811 **	0.682 **	0.335	-0.055	-0.012	-0.097
C4				1.000	-0.588 **	0.217	-0.071	-0.081	-0.676 **	-0.804 **
盐度					1.000	-0.564 **	-0.221	0.017	0.172	0.204
DOC						1.000	0.251	-0.167	0.232	0.178
FI							1.000	-0.162	0.294	0.281
BIX								1.000	-0.031	-0.030
HIX_a									1.000	0.961 **
HIX_b										1.000

1) * * 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关

3 讨论

3.1 养虾塘水体 CDOM 的组分分析

C1 类酪氨酸类蛋白物质主要由微生物降解产生^[32], 它与 CDOM 中的芳环氨基酸结构有关, 在河流和海洋的 CDOM 中均有这类荧光峰的出现^[33]. C4 类色氨酸类蛋白物质被认为是陆生植物或土壤有机质自生源产生过程生成的蛋白质成分或降解较少的缩氨酸^[5, 34]. C2 紫外光类腐殖质被认为与腐殖质结构中的羰基和羧基有关, 来源以陆源为主, 也有自生源, 具有易光降解、生物可利用性差的特点^[1, 5, 33]. C3 一般被认为是长波类腐殖质荧光峰, 但郭卫东等在九龙江河口的研究表明 M 峰并不代表海洋来源的专有特征峰, 在陆地淡水中也发现其存在, 且可能是从陆地输入到海洋中荧光物质的主要组分^[9]. 在流动水体中类腐殖酸荧光峰的形成主要来自外源输入^[35], 既有研究表明闽江及九龙江水体溶解性有机质中主要为类腐殖质 C2 和 C3, 其中类蛋白物质成分较低^[9, 20]. 对本研究区域的养虾塘水体 CDOM 的荧光组分进行分析发现, CDOM 主要成分均为类蛋白荧光组分, 而类腐殖质荧光组分所占比例较小. 造成该现象的原因主要是由于养虾塘这一特殊水体环境, 每个河口区养虾塘养殖水均源于附近河水或海水, 养殖中期为了避免对虾产生应激或者受刺激导致的非正常脱壳情况, 需保持水体生态环境的相对稳定, 实施较为封闭的水环境管理, 并没有与外界水体发生明显交换. 采样时间为

对虾生长旺盛时期, 在高密度养殖量和高饵料投放的模式下, 大量残饵、虾的代谢物等导致水体中有有机质维持在相对较高的水平^[36, 37]. 除此之外, 该时期较高的水温有效提高了水体微生物活性, 促进水体有机物和饵料残体分解^[38, 39]. 这些生物活动形成的有机质在细菌等微生物及生物细胞残留的蛋白酶作用下, 含有的大量蛋白质被水解进而释放出氨基酸组分, 导致水体中类色氨酸及类酪氨酸等类蛋白质荧光组分浓度显著增加^[40].

3.2 养虾塘水体 CDOM 的来源分析

一般认为 CDOM 组分的来源主要分外源和内源, 外源主要是由细菌和真菌降解的流域土壤当中高等动植物残体所形成, 多表现为类腐殖质峰占据绝对优势, 内源主要是指由水体中浮游生物、水生细菌以及藻类等生物活动所产生, 多表现为类蛋白峰占据绝对优势^[41]. 而在本研究中, CDOM 的外源主要来自于养殖饵料的投放输入, 而内源则主要来源于虾的觅食、排泄、死亡等活动. 荧光指数 FI 和自生源指标 BIX 以及腐殖化指标 HIX 是评估水体中 CDOM 来源的重要指标^[42]. 由图 5 所示, FI 的范围位于 1.53 ~ 1.78 (均值为 1.65), 表示既有外源输入又有内源的贡献, 类蛋白质组分占主要优势则进一步说明了内源的贡献. BIX 的范围是 1.0 ~ 1.34 (均值为 1.06) 说明了较强的生物活动来源. HIX_a 值在 0.69 ~ 3.10 之间 (均值为 1.84), HIX_b 值在 0.41 ~ 0.71 之间 (均值为 0.63), 根据 HIX_a 和 HIX_b 的范围, 认为养殖塘水体具有较强的生物来

源属性, 腐殖化程度较低^[43]。根据 3 个指标的意义, 均可推测养虾塘水体中 CDOM 主要由生物活动相互作用产生, 高密度的虾生物量是 CDOM 来源的主要贡献。

类蛋白质组分(C1、C4)之间、类腐殖质组分(C2、C3)之间均极显著正相关($P < 0.01$), 显示了它们的共源性; 类腐殖质组分(C2、C3)与类蛋白组分(C1、C4)之间也呈极显著相关性($P < 0.01$), 刘堰杨等^[5]在川西高原河流水体的研究也表明类腐殖质与类蛋白质之间具有密切的联系。既有研究表明类酪氨酸和类色氨酸可能有相同的来源, 而陆源类腐殖质荧光峰及海洋来源类腐殖质荧光峰由相同荧光团产生^[44]。程远月等^[45]在九龙江河口区研究发现溶解性有机质相对荧光强度随盐度降低而增加, 表现出很好地从海洋到内陆增加的趋势。盐度变化影响水体微生物活性, 从而导致水体 DOC 浓度因有机物分解速率下降而降低^[36]。

在不同水环境中, DOC 与 CDOM 总是能呈现出显著正相关关系^[35, 46]。本研究中 DOC 与 CDOM 中的类腐殖质组分(C2、C3)均呈现极显著的相关性($P < 0.01$)。在大西洋沿岸海域和西地中海, 以及中国长江重庆段的河水中也发现了类似现象^[47, 48]。腐殖酸是广泛存在于天然水体等自然界中的天然高分子聚合物, 分子结构较复杂, 难以被生物降解^[49]。天然腐殖酸是环境污染物的各种络合剂和吸附剂, 对各种污染物的环境行为、毒性和生物有效性有重要的作用^[50]。类腐殖质荧光与 DOC 存在正相关关系表明腐殖酸组分是 DOC 的重要组成成分。养殖塘水体的腐殖酸可能主要来自养殖塘虾类残骸的腐烂分解, 且腐解时间越长, 虾体残骸生物量越大, DOC 分析结构越复杂, 腐殖化程度越高。在光降解、微生物降解等作用影响下, 组分中腐殖酸、富里酸、蛋白类物质以及一些非荧光物质在 DOC 中所占比例不同^[51], 这些都导致荧光强度与 DOC 之间关系存在差异。

4 结论

(1) 亚热带 3 个河口区滨海陆基养殖塘水体 CDOM 主要包括 4 个组分, 即类蛋白质荧光组分 C1 (E_x/E_m , 285 nm/325 nm) 及 C4 (E_x/E_m , <250 nm, 285 nm/347 nm) 及类腐殖质荧光组分 C2 (E_x/E_m , 280 nm/453 nm)、C3 (E_x/E_m , 310 nm/389 nm), 其中类蛋白质组分是养殖塘水体 CDOM 主要组成部分。

(2) 荧光指数 FI、自生源指标 BIX 以及腐殖化指标 HIX 均表明 3 个河口区滨海陆基养虾塘水体

CDOM 中腐殖质含量低, 生物细菌活动较多, 水体中 CDOM 主要来源于高密度的虾生物量及其觅食、排泄、死亡等活动过程。

(3) 类蛋白质组分(C1、C4)与类腐殖质组分(C2、C3)之间均存在着相同的来源。盐度与 CDOM 各组分之间均存在显著的负相关关系, DOC 与 CDOM 中的类腐殖质组分(C2、C3)均呈现极显著的正相关。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Battin T J, Luyssaert S, Kaplan L A, *et al.* The boundless carbon cycle[J]. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(9): 598-600.
- [3] Park J H, Kalbitz K, Matzner E. Resource control on the production of dissolved organic carbon and nitrogen in a deciduous forest floor[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(6): 813-822.
- [4] 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.
- [5] 刘堰杨, 秦纪洪, 刘聚, 等. 基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 720-728.
Liu Y Y, Qin J H, Liu C, *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rivers of western sichuan plateau based on EEM-PARAFAC analysis [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 720-728.
- [6] Wang C, Guo W D, Guo Z R, *et al.* Characterization of dissolved organic matter in groundwater from the coastal Dagu River watershed, China using fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(9): 2460-2465.
- [7] Yamashita Y, Kloeppel B D, Knoepp J, *et al.* Effects of watershed history on dissolved organic matter characteristics in headwater streams[J]. *Ecosystems*, 2011, **14**(7): 1110-1122.
- [8] 陈永娟, 胡玮璇, 庞树江, 等. 北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3017-3025.
Chen Y J, Hu W X, Pang S J, *et al.* Spatial distribution characteristics and source analysis of dissolved organic matter in Beiyun River[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3017-3025.
- [9] 郭卫东, 黄建平, 洪华生, 等. 河口区溶解有机物三维荧光光谱的平行因子分析及其示踪特性[J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1419-1427.
Guo W D, Huang J P, Hong H S, *et al.* Resolving excitation emission matrix Spectroscopy of Estuarine CDOM with parallel factor analysis and its application in organic pollution monitoring [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(6): 1419-1427.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] Guo W D, Yang L Y, Hong H S, *et al.* Assessing the dynamics of chromophoric dissolved organic matter in a subtropical estuary using parallel factor analysis[J]. *Marine Chemistry*, 2011, **124** (1-4): 125-133.
- [13] 肖隆庚, 陈文松, 陈国丰, 等. 中国南海 CDOM 三维荧光光谱特征研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(1): 160-167.
Xiao L G, Chen W S, Chen G F, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy of chromophoric dissolved organic matter in the South China Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 160-167.
- [14] 宋红丽, 刘兴土, 文波龙. 黄河三角洲养殖塘水-气界面 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量特征[J]. *生态环境学报*, 2017, **26** (9): 1554-1561.
Song H L, Liu X T, Wen B L. Greenhouse gases fluxes at water-air interface of aquaculture ponds in the Yellow River Estuary [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(9): 1554-1561.
- [15] 朱林, 车轩, 刘晃, 等. 团头鲂池塘养殖生态系统晒塘阶段温室气体排放通量分析[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(3): 210-215.
Zhu L, Che X, Liu H, *et al.* Greenhouse gas emissions of *Megalobrama amblycephala* culture pond ecosystems during sun drying of pond [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(3): 210-215.
- [16] 陈金玲, 赖秋明, 苏树叶, 等. 精养虾池主要生态因子变化特点与相关性分析[J]. *南方水产科学*, 2012, **8**(4): 49-56.
Chen J L, Lai Q M, Su S Y, *et al.* Study on variation characteristics and correlation analysis of major ecological factors in intensive shrimp ponds[J]. *South China Fisheries Science*, 2012, **8**(4): 49-56.
- [17] Luo M, Zeng C S, Tong C, *et al.* Kinetics of chemical and microbial iron reduction along an inundation gradient in a tidal marsh of the Min River Estuary, southeastern China [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2015, **32**(7): 635-647.
- [18] Zhang J Q, Qi S H, Xing X L, *et al.* Organochlorine pesticides (OCPs) in soils and sediments, southeast China: a case study in Xinghua Bay [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(6): 1270-1275.
- [19] Alongi D M, Pfitzner J, Trott L A, *et al.* Rapid sediment accumulation and microbial mineralization in forests of the mangrove *Kandelia candel* in the Jiulongjiang Estuary, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **63**(4): 605-618.
- [20] 郭卫东, 杨丽阳, 王福利, 等. 水库型河流溶解有机物三维荧光光谱的平行因子分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31**(2): 427-430.
Guo W D, Yang L Y, Wang F L, *et al.* Parallel factor analysis for excitation emission matrix fluorescence spectroscopy of dissolved organic matter from a Reservoir-Type River [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(2): 427-430.
- [21] Cory R M, Miller M P, McKnight D M, *et al.* Effect of instrument-specific response on the analysis of fulvic acid fluorescence spectra [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2010, **8**(2): 67-78.
- [22] Leenheer J A, Croué J P. Peer reviewed: characterizing aquatic dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(1): 18A-26A.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 甘淑钗, 吴莹, 鲍红艳, 等. 长江溶解有机质三维荧光光谱的平行因子分析[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(6): 1045-1052.
Gan S C, Wu Y, Bao H Y, *et al.* Characterization of DOM (dissolved organic matter) in Yangtze River using 3-D fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(6): 1045-1052.
- [26] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [27] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 2003, **82**(3-4): 239-254.
- [28] 卢松, 江韬, 张进忠, 等. 两个水库型湖泊中溶解性有机质三维荧光特征差异[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 516-523.
Lu S, Jiang T, Zhang J Z, *et al.* Three-dimensional fluorescence characteristic differences of dissolved organic matter (DOM) from two typical reservoirs [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 516-523.
- [29] 梁俊, 江韬, 卢松, 等. 淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2496-2505.
Liang J, Jiang T, Lu S, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) releases from soils of typical water-level fluctuation zones of three gorges reservoir Areas: UV-Vis spectrum [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2496-2505.
- [30] Birdwell J E, Engel A S. Characterization of dissolved organic matter in cave and spring waters using UV-Vis absorbance and fluorescence spectroscopy [J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41** (3): 270-280.
- [31] Ohno T, Fernandez I J, Hiradate S, *et al.* Effects of soil acidification and forest type on water soluble soil organic matter properties [J]. *Geoderma*, 2007, **140**(1-2): 176-187.
- [32] Chen J, LeBoeuf E J, Dai S, *et al.* Fluorescence spectroscopic studies of natural organic matter fractions [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(5): 639-647.
- [33] 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.
- [34] Fellman J B, Hood E, Spencer R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: a review [J]. *Limnology and*

- Oceanography, 2010, **55**(6): 2452-2462.
- [35] 邵田田, 李柳阳, 王涛, 等. 辽河流域河流秋季 CDOM 光学特性及影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(4): 1558-1568.
- Shao T T, Li L Y, Wang T, *et al.* CDOM optical characteristics and influences factors affected on them for rivers in Liaoh River watershed in autumn[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(4): 1558-1568.
- [36] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y. The potential use of constructed wetlands in a recirculating aquaculture system for shrimp culture [J]. Environmental Pollution, 2003, **123**(1): 107-113.
- [37] 冯奇飞, 臧维玲, 戴习林, 等. 罗氏沼虾养殖塘底质硫化物含量及其与其他因子关系的研究[J]. 广东农业科学, 2014, **41**(12): 175-182, 188.
- Feng Q F, Zang W L, Dai X L, *et al.* Sulfide content in sediment of *Macrobrachium rosenbergii* culture ponds and relationship between sulfide content and other parameters [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, **41**(12): 175-182, 188.
- [38] 王伟颖, 吕昌伟, 何江, 等. 湖泊水-沉积物界面 DIC 和 DOC 交换通量及耦合关系[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3674-3682.
- Wang W Y, Lü C W, He J, *et al.* Exchange fluxes and coupling relationship of dissolved inorganic carbon and dissolved organic carbon across the water-sediment interface in lakes [J]. Environmental Science, 2015, **36**(10): 3674-3682.
- [39] 杨平, 金宝石, 谭立山, 等. 亚热带河口陆基养虾塘水体溶解性碳浓度及沉积物-水界面碳通量时空动态特征[J]. 生态学报, 2018, **38**(6): 1994-2006.
- Yang P, Jin B S, Tan L S, *et al.* Spatial-temporal variations of water column dissolved carbon concentrations and dissolved carbon flux at the sediment-water interface in the shrimp ponds from two subtropical estuaries[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(6): 1994-2006.
- [40] 韩宇超, 郭卫东. 九龙江河口有色溶解有机物的三维荧光光谱特征[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(3): 641-647.
- Han Y C, Guo W D. The fluorescence excitation emission matrix spectroscopy of chromophoric dissolved organic matter in the Jiulong River Estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(3): 641-647.
- [41] Zhang Y L, Yin Y, Feng L Q, *et al.* Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Tianmuhu and its catchment basin using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis [J]. Water Research, 2011, **45**(16): 5110-5122.
- [42] 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太湖 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.
- [43] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(4): 742-746.
- [44] Zepp R G, Sheldon W M, Moran M A. Dissolved organic fluorophores in southeastern US coastal waters: correction method for eliminating Rayleigh and Raman scattering peaks in excitation-emission matrices[J]. Marine Chemistry, 2004, **89**(1-4): 15-36.
- [45] 程远月, 郭卫东, 胡明辉. 近岸沉积物再悬浮期间所释放溶解有机物的荧光特征[J]. 地球化学, 2008, **37**(1): 51-58.
- Cheng Y Y, Guo W D, Hu M H. Fluorescence characteristics of dissolved organic matter released from estuarine sediments during resuspension[J]. Geochimica, 2008, **37**(1): 51-58.
- [46] Spencer R G M, Butler K D, Aiken G R. Dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter properties of rivers in the USA [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, **117**(G3): G03001.
- [47] Ferrari G M. The relationship between chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in the European Atlantic coastal area and in the West Mediterranean Sea (Gulf of Lions) [J]. Marine Chemistry, 2000, **70**(4): 339-357.
- [48] 蔡文良, 许晓毅, 罗固源, 等. 长江重庆段溶解性有机物的荧光特性分析[J]. 环境化学, 2012, **31**(7): 1003-1008.
- Cai W L, Xu X Y, Luo G Y, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in the Chongqing section of Yangtze River [J]. Environmental Chemistry, 2012, **31**(7): 1003-1008.
- [49] Mladenov N, Zheng Y, Miller M P, *et al.* Dissolved organic matter sources and consequences for iron and arsenic mobilization in Bangladesh aquifers [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(1): 123-128.
- [50] 王亚军, 马军. 水体环境中天然有机质腐殖酸研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(6): 1155-1165.
- Wang Y J, Ma J. Research advances of humic acid in aquatic environments[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21**(6): 1155-1165.
- [51] Moran M A, Zepp R G. Role of photoreactions in the formation of biologically labile compounds from dissolved organic matter[J]. Limnology and Oceanography, 1997, **42**(6): 1307-1316.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)