

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.9

第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浞江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征	罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素：以宁波市小浞江为例

高凤^{1,2,3}, 邵美玲¹, 唐剑锋^{2,3,4*}, 曹昌丽^{2,3}, 易辉^{2,3}

(1. 安徽师范大学生命科学学院, 安徽省高校生物环境与生态安全省级重点实验室, 芜湖 241000; 2. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 3. 中国科学院宁波城市环境观测研究站, 宁波 315830; 4. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 我国快速城镇化过程对流域水体和沉积物的溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)含量和成分产生了重要影响, 探究水体-沉积物中DOM的分布特性及影响因素具有重要意义. 本研究选取长三角典型城镇地区宁波市北仑区小浞江流域为研究对象, 利用三维荧光光谱技术, 结合PARAFAC(平行因子分析)模型及相关性分析, 对小浞江流域水体及沉积物DOM光谱特性进行研究, 分析DOM荧光组分特征及来源. 结果表明: ①小浞江水体-沉积物DOM主要包括4种组分: C1、C2、C3和C4, 其中C1为陆源类腐殖质, 分子量较大; C2为陆源类腐殖质, 由生物降解产生, 分子量较小; C3为类蛋白质, 包括类色氨酸, 对微环境的变化敏感; C4为陆源类腐殖质. ②小浞江水体DOM受新生内源和陆源输入共同影响, 腐殖化程度较弱, 腐殖质含量较低. 沉积物以陆源或土壤源输入为主, 内源贡献较小, DOM具有一定的腐殖化特征, 腐殖质的浓度水平高于水体中腐殖质含量. ③冗余分析(redundancy analysis, RDA)表明, 水体DOM各组分相关性较高的环境因子主要为农田、城镇; 而沉积物DOM各组分相关性较高的环境因子为城镇、农田、湿地. 其中, 城镇对沉积物中类腐殖质C4和类腐殖质的浓度参数Fn(355)影响最大.

关键词: 小浞江; 水体; 沉积物; 溶解性有机质(DOM); 三维荧光光谱; 平行因子分析法(PARAFAC)

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4009-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201902118

Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City

GAO Feng^{1,2,3}, SHAO Mei-ling¹, TANG Jian-feng^{2,3,4*}, CAO Chang-li^{2,3}, YI Hui^{2,3}

(1. Key Laboratory of Biotic Environment and Ecological Safety in Anhui Province, College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 2. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3. Ningbo Urban Environment Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315830, China; 4. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Rapid urbanization has a significant impact on dissolved organic matter (DOM) in water and sediment; thus, it is important to explore the distribution characteristics and influencing factors of DOM in watersheds. Xiaojia River is a typical urban area in Beilun District of Ningbo City, Yangtze River Delta. The spectral characteristics of DOM in the water and sediment in this river were studied to examine their sources and characteristics. The DOM was analyzed by three-dimensional fluorescence spectroscopy (EEM) coupled with the parallel factor analysis (PARAFAC) model. The following results were noted. ① Four fluorescence DOM components were derived by EEM-PARAFAC: C1 represents terrestrial humus with a high molecular weight; C2 represents terrestrial humus with a low molecular weight, which was produced by biodegradation; C3 represents protein-like substances that were sensitive in a microenvironment; and C4 is terrestrial humus. ② Both new-born endogenous and terrestrial sources have large impacts on DOM components. The humification degree was very weak with a low concentration of humus. The DOM in the sediments was derived mainly from terrestrial or soil sources with small endogenous contribution with high humification. The concentration of humus in the sediments was significantly higher than that in water. ③ Redundancy analysis (RDA) showed that farmland and urban land use were the dominant environmental factors and had relatively high correlation with the water indicators. Construction land, farmland, and wetland land use positively correlated with the sediment components. Among them, urban land use had the greatest influence on the concentration parameter Fn(355) of humus-like substance C4 and the humus-like substance in sediments.

Key words: Xiaojia River; water; sediment; dissolved organic matter(DOM); three-dimensional fluorescence spectra; parallel factor analysis(PARAFAC)

收稿日期: 2019-02-27; 修订日期: 2019-04-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0119000); 城市与区域生态国家重点实验室开放课题项目(SKLURE2019-2-4)

作者简介: 高凤(1990~), 女, 硕士, 主要研究方向为水环境与流域生态学, E-mail: gao_feng1886@163.com

* 通信作者, E-mail: jftang@iue.ac.cn

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是普遍存在于自然环境中的生物降解产物,包括亲水性类腐殖酸、类蛋白、类氨基酸及碳水化合物等^[1]. DOM 组成结构复杂,且成分之间存在交互作用和转化,其表征行为和环境效应十分丰富,可作为异养微生物的碳源与能量供应物,与有机或无机环境污染物发生物化反应,使其稳定性、生物有效性等发生变化^[2]. 另外,DOM 还与多种营养物质存在耦合效应,影响着其它污染物在水环境中的归趋^[3]. DOM 的组分变化可反映水体的污染特征,揭示污染来源,对流域水体污染的评价和修复具有重要意义^[4].

通过三维荧光光谱法(three-dimensional excitation emission matrix spectra, 3DEEMs)可对 DOM 组分含量进行定量表征. 3DEEMs 是由激发、发射波长及荧光强度三维数据组成的光谱矩阵,通过对矩阵的处理能区分流域水体或沉积物中的 DOM 含量及组成结构. 这种方法具有灵敏度高、样品用量少、重复性好且不损坏样品的特点^[2]. EEMs 已广泛应用于水体 DOM 荧光特性表征和污染评价. 如鲁宗杰等^[5]对江汉平原地表水和浅层地下水进行三维荧光光谱分析,使用平行因子分析法处理荧光数据,分析了水体中 DOM 组成结构、功能特点和荧光特性,发现其荧光组分与地下水中砷、铁关系密切;沈烁等^[2]采用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱分析方法,并结合 PARAFAC 模型对沉积物中 DOM 的荧光组分和来源进行了解析,验证了 3DEEMs 表征城市河道不同排口污染源强度的可行性;冯伟莹等^[6]采用 3DEEMs 研究了乌梁素海沉积物 DOM 的结构组成特征,并解析出 6 种荧光峰,发现不同湖区沉积物 DOM 结构组成具有一定的差异.

近年来,随着我国城镇化的快速发展,城市化对水质的影响越来越受到人们的重视,地表水、地下水污染问题变得尤为突出^[7]. 快速的城镇化过程直接影响到流域水环境的 DOM 的含量和性质,现有的研究主要集中在水体 DOM 的表征上,对流域水体-沉积物介质中 DOM 之间的关联机制还不清楚. 因此,本研究选取东南沿海快速城镇化典型流域——宁波市北仑区小浞江为例,应用三维荧光-平行因子分析法等手段,分析城镇流域水体-沉积物中 DOM 的组成结构特征,揭示其空间分布规律,阐述城镇化背景下流域水体-沉积物 DOM 的污染特征.

1 研究区域概况

小浞江流域(29°46′~29°58′N, 121°38′~121°46′E)是宁波市北仑区最为重要的流域之一,其贯穿于北仑区的商业区、规模化工业区及部分农

业区,主河道长约 28.4 km,宽 30~50 m,正常水位 3.35 m,流域汇水面积为 53.2 km²,干流最终汇集至北部流入东海. 流域周边有 38 个行政村和 14 个社区,人口有 15.4 万,其中外来人口达 9.2 万. 该区域内工业化程度较高,以机械制造、制笔文体、电线电缆和纺织服装等为主的四大类. 前期已经研究了小浞江流域氮磷污染特征及影响因素,发现建设用地中的面源污染是小浞江流域氮磷污染的主要来源和可能存在的点源污染^[8],在此基础上进行小浞江流域 DOM 的污染特征分析.

2 材料与方法

2.1 现场调查与样品采集

根据小浞江流域分布状况和土地利用类型等因素,在上中下游布设 12 个采样点. 采样点位置和土地利用类型如图 1 所示. 其中 1~4 号采样点位于流域上游,5~8 号位于流域中游,9~12 号位于流域下游. 1 号点位周边位于动物园附近,2 号周边为水库,有部分农田和林地;3、7、8 和 10 号以汽车、电器制造及服饰加工和球类制造的工业区;4、6、9 和 12 号采样点处于居民区;5 号是以种植业为

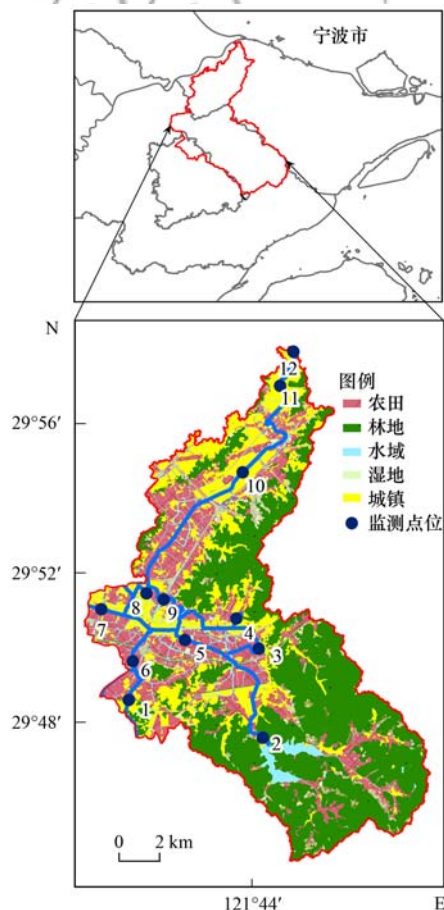


图 1 小浞江采样点分布及土地利用类型状况
Fig. 1 Sampling sites distribution in the Xiaojia River and land use structures

主的农业区; 11 和 12 号以商业区为主, 其中 12 号采样点位于小浞江浞水大闸控制断面. 利用 GIS-MAP 获取了流域内整体的空间分布特征, 统计了采样点周边 100 m 缓冲区林地、农田、城镇和湿地各种土地利用状况. 表 1 列出了小浞江流域上中下游土地利用结构概况及计算的土地利用占比.

表 1 小浞江流域土地利用结构

Table 1 Land-use structures in the Xiaojia River		
采样区域	采样点	土地利用类型占比(100 m 缓冲区)
上游	1、2、3、4	林地 3%, 农田 62%, 城镇 18%, 湿地 17%
中游	5、6、7、8	林地 5.5%, 农田 21%, 水域 10.5%, 城镇 63%
下游	9、10、11、12	林地 3%, 农田 28%, 水域 22%, 城镇 31%, 湿地 16%

2.2 水质指标的分析检测

在采样现场使用多参数数字化分析仪(美国哈希, HQ40D)实时测定水样的温度、盐度、pH、溶解氧等理化指标. 水样用 4 L 棕色样品瓶采集, 置于低温环境保存, 并立即运回实验室进行其它指标的分析.

2.3 沉积物样品处理

表层沉积物使用实验室彼得森抓斗采样器, 将取得的样品立即装入聚乙烯自封袋中, 放于保温箱中冷藏, 带回实验室后放 -20℃ 冰箱冷藏. 用冷冻干燥机在 -80℃ 条件下低温干燥 48 h 以上, 将干燥好的样品用研钵研磨, 过 100 目筛, 将处理好的样品装入聚乙烯袋中保存备用.

2.4 DOM 的提取

2.4.1 水体

将采集到的水样直接用 0.45 μm 醋酸纤维滤

膜过滤, 滤液装于棕色瓶子, 存放于 4℃ 冰箱中用于 DOM 测定.

2.4.2 沉积物

沉积物 DOM 的提取参照 He 等^[9]的方法, 20℃ 黑暗环境下, 将沉积物样品按固液比 1: 10, 用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液浸提. 样品在 180 r·min⁻¹ 的速度振荡 24 h; 然后样品在 4℃ 条件下, 以 10 000 r·min⁻¹ 转速高速离心 10 min; 上清液用 0.45 μm 滤膜过滤, 用 0.1 mol·L⁻¹ HCl 溶液调节滤液 pH 至 7 左右; 测定其 DOC 和荧光光谱.

2.5 荧光光谱检测

以超纯水 (Milli-Q, $R < 18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$) 为实验空白, 采用荧光分光光度计(日立 F-4600)测得水样及沉积物提取样品 DOM 的三维荧光光谱数据. 主要程序为: 设置狭缝宽度为 5 nm, 激发波长(E_x) 220 ~ 450 nm, 扫描间隔为 5 nm; 扫描发射波长(E_m) 范围为 260 ~ 600 nm, 间隔 1 nm, 扫描速度为 2400 nm·min⁻¹^[10].

2.6 数据分析

2.6.1 荧光光谱参数处理

水体及沉积物样品荧光指数(FI)的计算采用 370 nm 激发波长下, 470 nm 与 520 nm 的发射波长荧光强度的比值. 内源指数(BIX)采用 310 nm 激发波长下, 380 nm 与 430 nm 的发射波长处荧光强度的比值. 腐殖化指数(HIX)采用 255 nm 激发波长下, 435 ~ 480 nm 发射波长处荧光强度积分值和 300 ~ 345 nm 荧光积分值之比. 类腐殖质浓度水平 $F_n(355)$ 采用 355 nm 激发波长下, 发射波长在 440 ~ 470 nm 之间的荧光强度最大值. 4 个参数的含义列于表 2.

表 2 水体-沉积物样品三维荧光光谱特征参数含义

Table 2 Implications of characteristic parameters of three-dimensional fluorescence spectra for water and sediment samples		
参数	特征描述	文献
荧光指数(FI)	作为 DOM 组分的来源以及 DOM 的降解程度的指示指标; 小于 1.4 表示陆地或土壤源输入为主; 大于 1.9 表示微生物活动引起的内源	[5, 11, 12]
自生源指数(BIX)	用来反映 DOM 溯源及自生贡献比例的指标; 大于 1 为新近生物或细菌引起的自生来源为主; 0.8 ~ 1.0 之间表示存在新生的内源较多; 介于 0.6 ~ 0.8 之间表示内源贡献较少, 受陆源输入或人类活动影响	[13, 14]
腐殖化指数(HIX)	用来反映水体 DOM 的腐殖化程度; $HIX < 1.5$ 属于生物或水生细菌来源; $1.5 < HIX < 3$ 具有弱腐殖质特征和重要的新近自生源; $3 < HIX < 6$ 属于强腐殖质特征, 具有微弱的新近自生源; $HIX > 6$ 属于强腐殖质特征和重要的陆源贡献	[15]
$F_n(355)$	代表类腐殖质浓度水平; 值越大, 表示类腐殖质含量越高	[12]

2.6.2 DOM 组分分析

使用 MATLAB 软件的溶解有机物工具箱 (DOMFluor Toolbox, 版本 1.7) 对样品的三维荧光光谱数据进行平行因子分析 (PARAFAC), 采用 IMP 和 RIP 剔除原始数据的异常值^[16], 确定最终 DOM 组分个数^[17]. PARAFAC 其本质是一种分解算

法, 利用核心一致度检验得到最合适的组分数^[18]. 将扫描所得的多个激发-发射-荧光强度三维数据矩阵 (EEM) 分解成 3 个二维矩阵的乘积, 组分数则代表三维荧光光谱的独立荧光基团^[19]. 通过对半检验法 (split-half analysis)^[20] 验证模型的可靠性, 并确定最终的组分个数. 处理公式如(1).

$$X_{ijk} = \sum_{f=1}^F a_{if} \cdot b_{if} \cdot c_{kf} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

式中, F 代表模型的组分数; X_{ijk} 表示第 i 个样品在发射波长为 j , 激发波长为 k 的条件下荧光强度; a_{if} 代表在第 i 个样品中第 f 个荧光组分的相对浓度; b_{if} 和 c_{kf} 指第 f 个荧光组分的发射和激发矩阵载荷值; ε_{ijk} 代表模型的误差项. 最后的结果在 OpenFluor 网站(<http://www.openfluor.org>)在线光谱库进行对比, 并且系数 θ 大于 0.95 时识别出的

类似的光谱峰有效.

3 结果与讨论

3.1 小浹江水体-沉积物 DOM 荧光组分特征及空间分布

利用平行因子分析法 (parallel factor analysis, PARAFAC) 对小浹江流域 DOM 的三维荧光光谱矩阵数据进行分析, 得到 4 种 DOM 荧光组分 (C1、C2、C3 和 C4), 见图 2. 与同类研究结果比对见表 3.

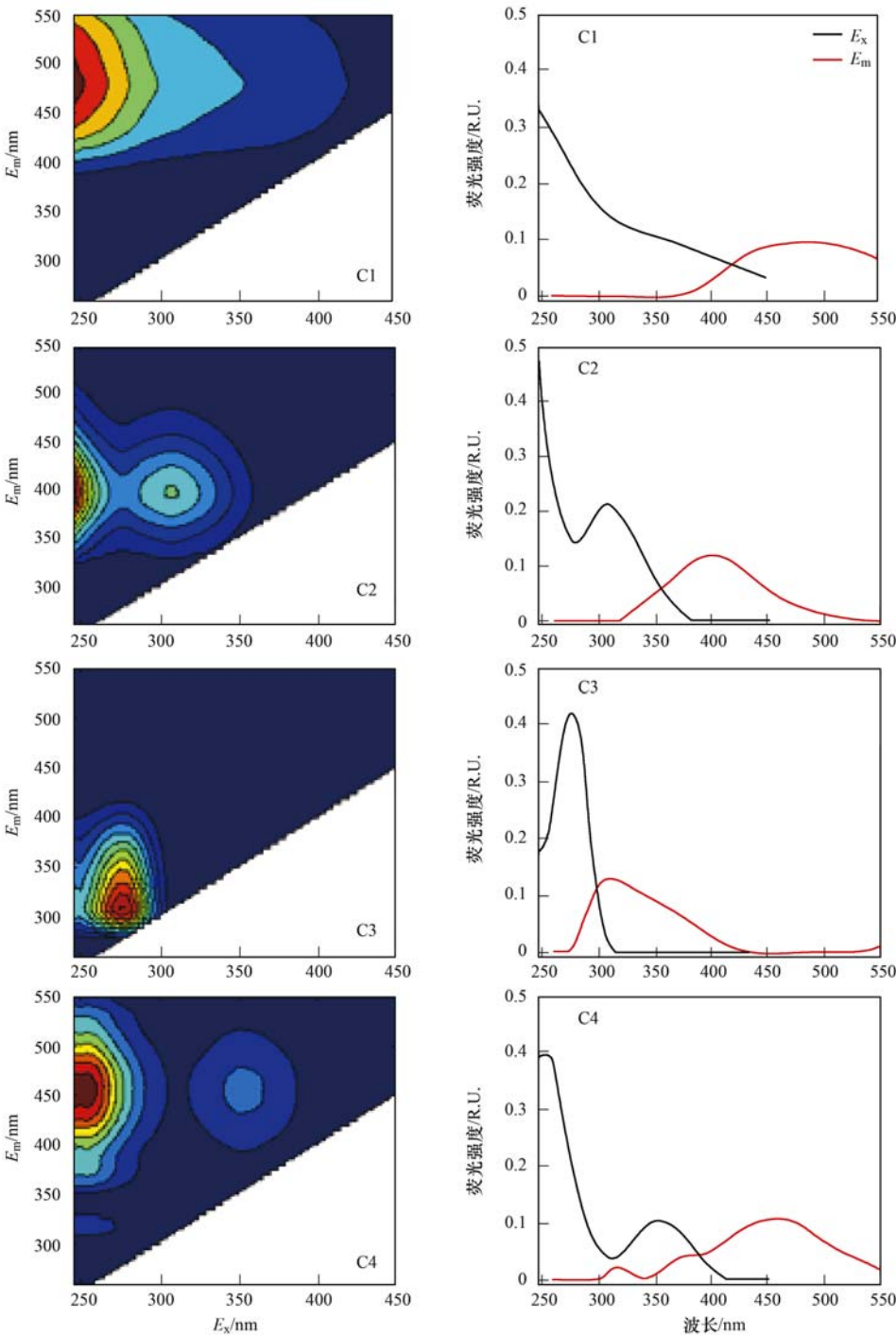


图 2 小浹江水体-沉积物 DOM 4 种组分的三维荧光光谱及最大激发/发射波长分布

Fig. 2 Three-dimensional fluorescence spectra and maximum excitation/emission wavelength distribution of four components of DOM in Xiaojia River Basin

表 3 小浞江水体-沉积物 DOM 的 4 种荧光组分特征及与同类组分的对比

Table 3 Descriptions of the four-component PARAFAC model of E_x/E_m wavelengths data

and comparison with previously identified components in Xiaojia River excitation-emission matrix contours

组分	E_x/nm	E_m/nm	类型(可能来源)	OpenFluor 匹配数目	同类研究比较/ nm
C1	<245	480	类腐殖质, 分子量大, 易与金属离子络合; 陆源类, 生物降解.	39	245(340)/460~480 ^[5] 225(330)/460 ^[21] <250/448 ^[22]
C2	<245(310)	400	生物降解过程中产生的小分子腐殖质; 陆源植物、土壤有机质.	47	250(325)/420 ^[5] 225(330)/410 ^[21]
C3	275	310	类蛋白质, 类色氨酸, 对微环境的变化敏感; 内源类, 生物降解.	33	240(250)/340 ^[5] 225(275)/350 ^[21] 275/308 ^[23]
C4	<245(355)	455	生物降解相关的类腐殖质; 陆源类.	15	225(340)/434 ^[24]

C1 普遍存在于水体环境中, 具有较高的相对分子量(>1 000)并以陆源为主^[5, 21, 25]. C2 是生物降解过程中产生的小分子腐殖质(<665), 以陆源输入为主^[5, 21, 25, 26]. C3 为微生物降解产生的类蛋白质, 包括类色氨酸、类酪氨酸, 属于内源类 DOM^[5, 21, 23]. C4 主要是陆源植物和土壤微生物降解产生的类腐殖质^[24].

小浞江流域水体及沉积物 4 种 DOM 荧光组分相对含量在上中下游的分布如图 3 所示. 流域水体 C1、C2、C3 和 C4 组分占比(质量分数)分别为 16%、43%、23% 和 18%. 水体 DOM 中由陆源输入的小分子腐殖质 C2 组分(<665)占比最大, 其次为 C3 和 C4 组分, C1 最小. 表明水体中的 DOM 主要为陆源腐殖质贡献, 内源微生物降解产生的类蛋白质也有一定的贡献; 沉积物中 C1、C2 组分占比最高且相等(36%), 其次为 C3(26%), 最低为 C4

(0.3%). 与水体相似, 沉积物 DOM 主要是由陆源贡献的类腐殖质, 但 C1 和 C3 的比例高于水体, C4 组分的比例却很低.

各组分相对含量的空间分布结果表明, 水体中 C3 和沉积物中 C1 从上游到下游逐渐升高; 水样中 C1 组分和沉积物的 C4 组分在中游相对含量最高, 水体中的 C2、C4 和沉积物中的 C2、C3 在上游的相对含量最高. 研究表明, DOM 各组分空间分布与土地利用类型密切相关^[14]. 小浞江上游位于远郊区, 以农田、林地等为主, 陆源植物凋落形成大量的腐殖质造成土壤有机质丰富^[27], 通过地表径流进入流域, 使流域水体中的 C2、C4 和沉积物中的 C2、C3 的相对含量在上游较高. 中游主要流经工业区, 水体富营养化严重区域, 污染来源较广, 既有内源微生物降解, 又包括部分陆源输入, 类腐殖质含量高, 使水样中 C1 组分和沉积物的 C4 组分的相对含

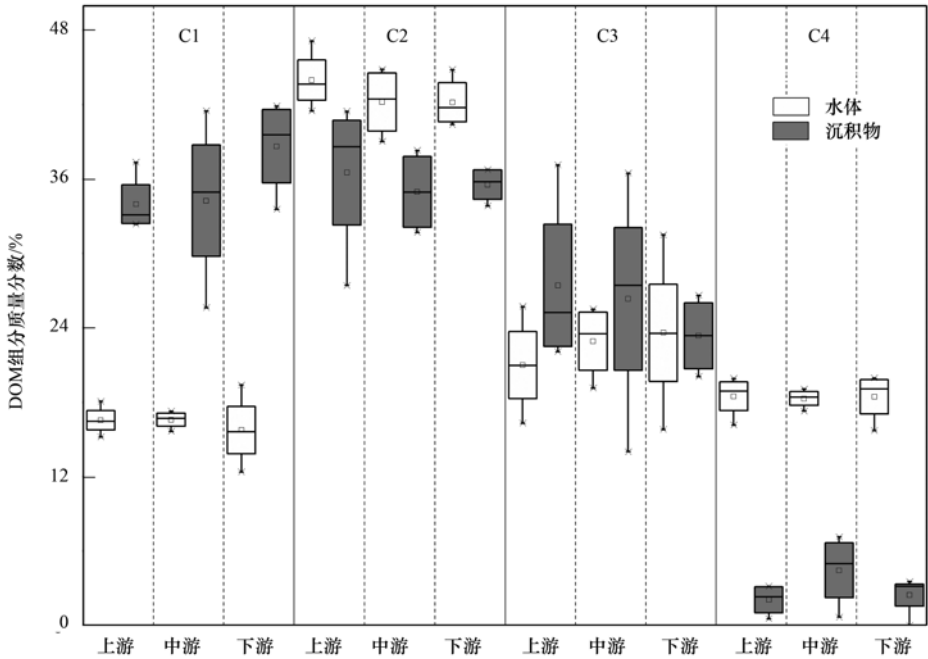


图 3 小浞江水体及沉积物中 4 种 DOM 组分质量分数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of mass fraction of four DOM components in water and sediment of Xiaojia River

量在中游最高。

3.2 小汉江流域水体及沉积物的 DOM 荧光光谱特征及来源

流域 DOM 的主要来源分为陆源和内源两种^[28]。陆源主要是指陆地细菌、真菌降解或者土壤中动植物残体腐烂产生的类腐殖质；内源是指水体中微生物降解形成的类蛋白等^[29, 30]。类腐殖质包括类胡敏酸和类富里酸，其中类富里酸又分为紫外类富里酸和可见富里酸^[31]。类蛋白主要由类酪氨酸、类色氨酸或衍生物组成，鲜见类苯氨酸。类酪氨酸随环境变化小，而类色氨酸可随环境变化而发生蓝移。可用荧光光谱特征参数[FI、BIX、HIX 和 Fn(355)]示踪 DOM 来源^[14]。

FI 值范围在 1.64 ~ 1.75 之间，均值为 1.70，表明水体 DOM 来源于陆源与水体内部源的共同作用。沉积物中 FI 值范围为 1.16 ~ 1.51 之间，均值为 1.33；沉积物除 2、10 号采样点外，其余采样点 FI 值均小于 1.4，表明小汉江沉积物以陆源输入为主，内源贡献较小。沉积物的 DOM 初始于水体中 DOM 的迁移沉积，两者通过 FI 值呈现出不同来源，表明内源产出的类蛋白成分在沉积物中可能发生进一步降解，导致 FI 值下降，进而呈现出不同的 DOM 来源。

BIX 在 0.75 ~ 0.92 之间，均值为 0.87，表明水体 DOM 以新生内源为主。沉积物 BIX 值在 0.53 ~ 0.71 之间，均值为 0.61，表明沉积物中 DOM 内源贡献较少，而以陆源输入或人为输送为主^[14]。

HIX 主要表征 DOM 中由陆源产生的类腐殖质的腐殖化程度。有研究表明，HIX 值越高，DOM 腐殖化程度越大^[12~14, 32, 33]。小汉江流域水体中各采样点的 HIX 值在 1.59 ~ 3.99 之间，均值为 2.71；除 6、10 号采样点外，其余各点 HIX 均在 1.5 ~ 3.0 范围内，属于弱腐殖质特征，具备重要的新近自生

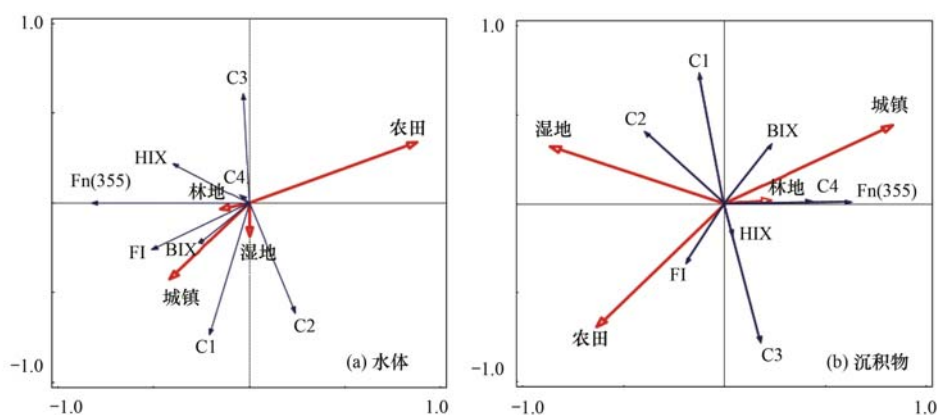
源特征。沉积物各样点的 HIX 值在 1.77 ~ 5.67 之间，平均值为 3.61。除 2、9 和 10 号采样点 HIX 在 1.5 ~ 3.0 范围内，其余各点 HIX 值均在 3 ~ 6 之间，具有强腐殖质特征，属于微弱的新近自生源。

Fn(355)可反映腐殖质的浓度水平，其值越大，腐殖质物质含量越高^[34]。小汉江流域水体中 Fn(355)范围为 38.49 ~ 194.19，平均值为 115.24，沉积物中 Fn(355)值范围为 109.66 ~ 225.95，均值为 160.28。除 10 号采样点外，水体 Fn(355)值显著低于沉积物 Fn(355)值($P < 0.05$)。因此，腐殖质在沉积物中的浓度显著高于水体。

整体而言，小汉江水体 DOM 来源于陆源与水体内部源的共同作用，受新生内源和陆源输入共同影响，腐殖化程度较弱，腐殖质含量较低。沉积物以陆源或土壤源输入为主，内源贡献较小，DOM 具有一定的腐殖质特征，腐殖质的浓度水平高于水体中腐殖质含量。分析其原因，由于上游周边主要为农田、林地，部分湿地覆盖，陆地植物及土地有机质丰富^[27]，地表径流把陆源腐殖质物质汇入流域，使得上游流域中腐殖质含量较高，沉积物对水体中的物质有吸附作用^[2]，故沉积物腐殖质化指数相对水体较高。中游地区为工业园区，汽车、家具和钢铁机械等加工制造业较多，人为干扰较大，有机物质输入途径多，增加了流域腐殖质量。下游特别是 12 号位于小港街道，居住区、商业区布局，人口密集，外源污染物较多，腐殖质含量较其它样点高。

3.3 水体-沉积物 DOM 组分及荧光特征参数与环境因子冗余分析(RDA)

环境因子冗余分析 (redundancy analysis, RDA)，是一种排序方法，将样点投射到两条排序轴构成的二维平面上，通过样点的散集形态、在象限的分布等来反映研究区的特点。如图 4 所示，对小汉江流域水体-沉积物 DOM 各组分及荧光特征参



红线表示:环境因子;蓝线表示:DOM 指标

图 4 小汉江水体-沉积物指标与环境因子的 RDA 排序

Fig. 4 RDA graph between indicators and environmental factors in Xiaojia River for water and sediment

数与流域 100 m 缓冲区环境因子进行 RDA 排序分析, 排序结果显示环境因子对水体中各组分的解释量高于沉积物的解释量。其中, 环境因子对水体的解释量为 68.1%, 对沉积物的解释量为 40.8%。从各环境因子箭头连线长短可以看出, 与水体各组分相关性较高的环境因子主要为农田、城镇。从水体 RDA 图中发现, 城镇与 BIX 呈正相关, 而农田与 BIX 呈负相关关系, 相关性较大, 说明内源贡献的 DOM 与建设用地和耕地具有密切关系。

$F_n(355)$ 表示类腐殖质浓度水平, 其值越大, 表示类腐殖质含量越高。水体中与 $F_n(355)$ 呈高度正相关的环境因子为城镇和林地, 而农田与其呈负相关关系。已有研究成果发现农田对水质的影响具有不确定性^[35], 农业活动中, 农药、化肥随地表径流汇入流域会使水体营养盐浓度增加, 但小浞江耕地处于休耕状态, 地表植被对污染物具有一定的吸附、拦截作用, 会对水质呈现一定程度的负效应。水体中 DOM 内源类生物降解产生的类蛋白物质组分 C3, 对微环境的变化敏感, 与其呈正相关的主要环境因子为农田, 而城镇、湿地与之呈负相关关系。

沉积物 DOM 组分及荧光特征参数相关性较高的主要环境因子为城镇、农田和湿地。与水体类似, 农田与沉积物中 BIX 呈负相关关系, 说明农田对 DOM 陆源输入具有削减作用。C4 和 $F_n(355)$ 均表示类腐殖质的浓度水平, 在沉积物 RDA 中两者均处于同一方向, 两者具有密切联系, 与它们呈正相关的主要环境因子为城镇、林地。其中, 城镇的相关性较高, 而林地的线段长度较小, 相关性较小。与沉积物中类蛋白组分 C3 呈正相关的环境因子主要为农田, 而湿地、城镇与其呈负相关关系。

在沉积物中 BIX 值均低于 0.8, 表明 DOM 的内源贡献较少, 受陆源输入或人类活动影响。从 RDA 结果中发现受人类活动影响最大的城镇是 BIX 的主要影响因素, 呈现正相关关系, 反映出城镇用地对沉积物 DOM 累积的重要性。考虑到宁波市大部分城市生活污水与工业废水已经截污纳管, 输入污水处理厂进行后再排放, 小浞江的 DOM 污染来源可能是由于城市面源污染造成。已有研究发现, 当城市化达到一定水平时, 路面径流对 DOM 的输入具有较大的贡献^[36]。另一方面, 城乡结合区域污水收集处理设施不完善, 使采样点周边可能存在的少量工厂偷排造成的点源污染, 进入流域, 造成 DOM 上升^[36], 并且污水处理厂处理后的水对流域 DOM 也可能产生一定影响。

4 结论

(1) 利用平行因子分析法分析 DOM 三维荧光光谱矩阵识别出小浞江水体-沉积物 DOM 的 4 种组分: C1、C2、C3 和 C4, 其中 C1 为陆源类腐殖质, 分子量较大; C2 为陆源类腐殖质, 是生物降解产生的, 分子量较小; C3 为类蛋白物质, 包括类色氨酸, 对微环境的变化敏感; C4 为陆源类腐殖质。其中, 类腐殖质 C4 在水体与沉积物中的比值在上中下游有较大变化, 与 C1、C2 和 C3 的分布比例具有较大差异。

(2) 小浞江水体 DOM 来源于陆源与水体内源的共同作用, 受新生内源和陆源输入共同影响, 腐殖化程度较弱, 腐殖质含量较低。沉积物以陆源或土壤源输入为主, 内源贡献较小, DOM 具有一定的腐殖质特征, 腐殖质的浓度水平高于水体中腐殖质含量。

(3) RDA 分析表明与水体各组分相关性较高的环境因子主要为农田、城镇; 而与沉积物相关性较高的环境因子为城镇、农田和湿地。沉积物中城镇对类腐殖质 C4 和类腐殖质的浓度 $F_n(355)$ 具有很大相关性。

致谢: 感谢宁波大学于旭彪老师在 DOM 的三维荧光表征方面的帮助, 感谢中国科学院城市环境研究所徐耀阳研究员在论文写作中给予的帮助和指导。

参考文献:

- [1] Wu F C, Tanoue E, Liu C Q. Fluorescence and amino acid characteristics of molecular size fractions of DOM in the waters of Lake Biwa[J]. *Biogeochemistry*, 2003, **65**(2): 245-257.
- [2] 沈烁, 王育来, 杨长明, 等. 南淝河不同排口表层沉积物 DOM 光谱特征[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(9): 2351-2361.
- [3] Shen S, Wang Y L, Yang C M, *et al.* Spectral characteristic of dissolved organic matter (DOM) in the surface sediments from different discharging points along the Nanfei River in Hefei City, Anhui Province[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(9): 2351-2361.
- [4] Aiken G R, Heileen H K, Ryan J N. Influence of dissolved organic matter on the environmental fate of metals, nanoparticles, and colloids[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(8): 3196-3201.
- [5] Liu E F, Shen J, Liu X Q, *et al.* Variation characteristics of heavy metals and nutrients in the core sediments of Taihu Lake and their pollution history[J]. *Science in China Series D*, 2006, **49**(1): 82-91.
- [6] 鲁宗杰, 邓娅敏, 杜尧, 等. 江汉平原高碑地下水中 DOM 三维荧光特征及其指示意义[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2017, **42**(5): 771-782.
- [7] Lu Z J, Deng Y M, Du Y, *et al.* EEMs characteristics of dissolved organic matter and their implication in high arsenic groundwater of Jiangnan Plain[J]. *Earth Science-Journal of*

- China University of Geosciences, 2017, **42**(5): 771-782.
- [6] 冯伟莹, 焦立新, 张生, 等. 乌梁素海沉积物溶解性有机质荧光光谱特性[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(6): 1068-1074.
- Feng W Y, Jiao L X, Zhang S, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in the sediments of Wuliangsu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(6): 1068-1074.
- [7] 杨丽萍. 浙江省两个典型流域水体污染特征及污染源解析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. 6-20.
- Yang L P. Water pollution characteristics and source apportionment in two representative watersheds in Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. 6-20.
- [8] 高凤, 邵美玲, 曹昌丽, 等. 城镇化流域氮、磷污染特征及影响因素——以宁波北仑区小浞江为例[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 689-699.
- Gao F, Shao M L, Cao C L, *et al.* Nitrogen and phosphorus pollution characteristics and influencing factors in urbanized watershed: a case study of Xiaojia River, Ningbo City [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(3): 689-699.
- [9] He W, Lee J H, Hur J. Anthropogenic signature of sediment organic matter probed by UV-Visible and fluorescence spectroscopy and the association with heavy metal enrichment [J]. *Chemosphere*, 2016, **150**: 184-193.
- [10] 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 等. 城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1560-1567.
- Cao C L, Liang M Q, He G Y, *et al.* Fluorescent dissolved organic matter and its correlation with water quality in a urban river: a case study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1560-1567.
- [11] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [12] 范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 等. 岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4530-4538.
- Fan S Y, Qin J H, Liu Y Y, *et al.* Seasonal variations of DOM spectral characteristics in the surface water of the upstream Minjiang River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4530-4538.
- [13] 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.
- [14] 陈俊伊, 王书航, 姜霞, 等. 蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 70-77.
- Chen J Y, Wang S H, Jiang X, *et al.* Fluorescence spectral characteristics of fluorescent dissolved organic matter (FDOM) in the surface sediments from Lihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 70-77.
- [15] 张欢, 崔康平, 张强, 等. 派河水体中 DOM 的光谱分析及其来源解析[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(2): 227-234.
- Zhang H, Cui K P, Zhang Q, *et al.* Spectral analysis and source analysis of dissolved organic matter in Pai River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(2): 227-234.
- [16] Riu J, Bro R. Jack-knife technique for outlier detection and estimation of standard errors in PARAFAC models [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2003, **65**(1): 35-49.
- [17] Andersen C M, Bro R. Practical aspects of PARAFAC modeling of fluorescence excitation-emission data [J]. *Journal of Chemometrics*, 2003, **17**(4): 200-215.
- [18] Bro R, Kiers H A L. A new efficient method for determining the number of components in PARAFAC models [J]. *Journal of Chemometrics*, 2003, **17**(5): 274-286.
- [19] 赵芸. 溶解性天然有机质的光谱研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2013. 12-36.
- Zhao Y. Spectroscopic study of dissolved natural organic matter [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2013. 12-36.
- [20] 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.
- [21] Carstee E M, Baker A, Bieroza M, *et al.* Characterisation of dissolved organic matter fluorescence properties by PARAFAC analysis and thermal quenching [J]. *Water Research*, 2014, **61**: 152-161.
- [22] 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.
- [23] Yamashita Y, Boyer J N, Jaffé R. Evaluating the distribution of terrestrial dissolved organic matter in a complex coastal ecosystem using fluorescence spectroscopy [J]. *Continental Shelf Research*, 2013, **66**: 136-144.
- [24] Derrien M, Kim M S, Ock G, *et al.* Estimation of different source contributions to sediment organic matter in an agricultural-forested watershed using end member mixing analyses based on stable isotope ratios and fluorescence spectroscopy [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 569-578.
- [25] Yamashita Y, Cory R M, Nishioka J, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in the deep waters of the Okhotsk Sea and the northwestern North Pacific Ocean [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, **57**(16): 1478-1485.
- [26] 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.
- [27] Zsolnay Á. Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions [J]. *Geoderma*, 2003, **113**(3-4): 187-209.
- [28] Miller M P, McKnight D M. Comparison of seasonal changes in fluorescent dissolved organic matter among aquatic lake and stream sites in the Green Lakes Valley [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, **115**(G1): G00F12.
- [29] Kamjunke N, von Tümpling W, Hertkorn N, *et al.* A new approach for evaluating transformations of dissolved organic matter (DOM) via high-resolution mass spectrometry and relating it to bacterial activity [J]. *Water Research*, 2017, **123**: 513-523.
- [30] Zheng L C, Song Z F, Meng P P, *et al.* Seasonal characterization and identification of dissolved organic matter (DOM) in the Pearl River, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(8): 7462-7469.
- [31] 蒋榆林, 黄清辉, 李建华. 水体有色溶解有机质的研究进展 [J]. 江苏环境科技, 2008, **21**(2): 57-59, 63.
- Jiang Y L, Huang Q H, Li J H. Research progress of chromophoric dissolved organic matter in nature water [J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2008, **21**(2): 57-59, 63.
- [32] 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.
- [33] Zhang Y L, Zhang E L, Yin Y, *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55** (6): 2645-2659.
- [34] 梁俭, 江韬, 魏世强, 等. 夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 888-897.
- Liang J, Jiang T, Wei S Q, *et al.* Absorption and fluorescence characteristics of dissolved organic matter (DOM) in Rainwater and sources analysis in summer and winter season [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 888-897.
- [35] 张大伟, 李杨帆, 孙翔, 等. 入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1775-1783.
- Zhang D W, Li Y F, Sun X, *et al.* Relationship between landscape pattern and river water quality in Wujingang Region, Taihu Lake watershed [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1775-1783.
- [36] 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 等. 溶解性有机物 (DOM) 与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析 (EEM-PARAFAC) [J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1751-1759.
- Li Y, Wei H J, Wang K, *et al.* Analysis of the relationship between dissolved organic matter (DOM) and watershed land-use based on three-dimensional fluorescence-parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1751-1759.



CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jin-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)