生态知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

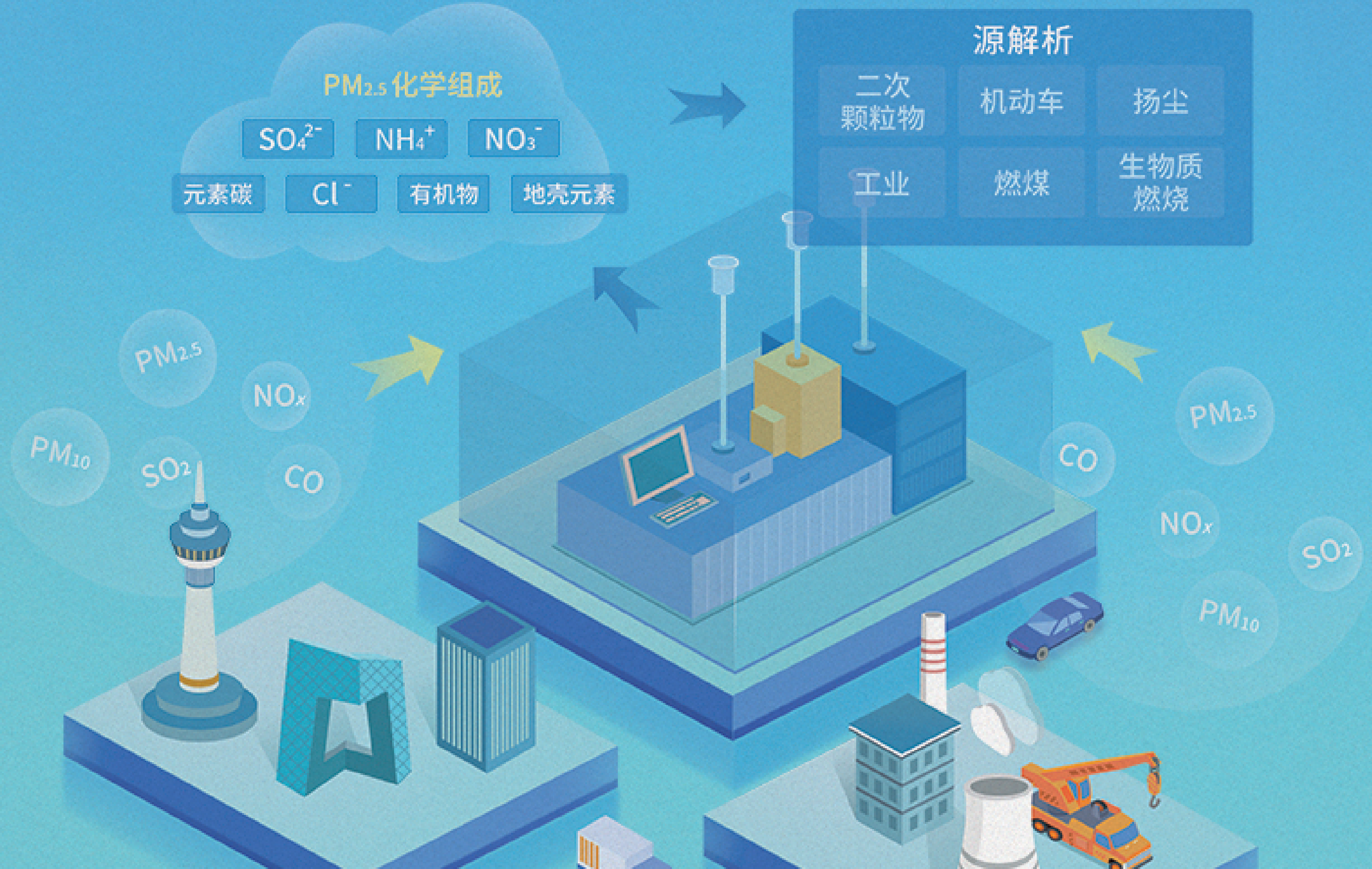
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京城区$PM_{2.5}$各组分污染特征及来源分析

安欣欣，曹阳，王琴，富佳明，王陈婧，景宽，刘保献


$PM_{2.5}$化学组成
SO_4^{2-}
NH_4^+
NO_3^-
元素碳
Cl^-
有机物
地壳元素
源解析
二次颗粒物
机动车
扬尘
工业
燃煤
生物质燃烧
$PM_{2.5}$
NO_x
PM_{10}
SO_2
CO
$PM_{2.5}$
CO
NO_x
SO_2
PM_{10}

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年5月

第43卷 第 5 期
Vol.43 No.5

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 43 卷　第 5 期
2022 年 5 月 15 日

目　次

北京城区 PM$_{2.5}$各组分污染特征及来源分析 …… 安欣欣，曹阳，王琴，富佳明，王陈婧，景宽，刘保献（2251）
基于时空混合效应模型的京津冀 PM$_{2.5}$浓度变化模拟 …… 范丽行，杨晓辉，宋春杰，李梦诗，段继福，王卫，李夫星，李伟妙（2262）
2000 ~ 2018 年京津冀城市群 PM$_{2.5}$时空演变及其与城市扩张的关联 …… 赵安周，相恺政，刘宪锋，张向蕊（2274）
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM$_{2.5}$污染特征与来源解析 …… 庹雄，杨凌霄，张婉，齐安安，王浥铭，王鹏程，黄琦，赵彤，张雄飞，徐鹏，张天琪，王文兴（2284）
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响：上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 …… 张茹涵，张皓然，冯伟航，汤克勤，马亚平，王红丽，黄成，胡建林，张宏亮，李楠（2294）
省会城市不同功能区大气 PM$_{2.5}$化学组分季节变化及来源分析 …… 孙友敏，范晶，徐标，李彦，韩红，张桂芹（2304）
太原市冬季不同污染程度下 PM$_{2.5}$的化学组成、消光特征及氧化潜势 …… 任娇，赵荣荣，王铭，张欢欢，尹诗杰，薛永刚（2317）
郑州市冬季大气 PM$_{2.5}$金属元素来源及健康风险评价 …… 姚森，王乾恒，薛妍，史来文，张俊美，杨书申（2329）
淄博市冬季 PM$_{2.5}$载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析 …… 白雯宇，徐勃，郭丽瑶，殷宝辉，马银红，李丽明，杨文，赵雪艳（2336）
承德市 PM$_{2.5}$中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价 …… 贺博文，聂赛赛，李仪琳，郭睿瑶，姚波，崔建升，冯亚平，王帅，侯晓松（2343）
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 …… 付建平，谢丹平，黄锦琼，杨艳艳，冯桂贤，周长风，廖海婷，青宪，张漫雯，吴明亮，张素坤（2355）
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 …… 张玲，孔少飞，郑煌，胡尧，曾昕，程溢，祁士华（2363）
基于模式过程分析技术天津地区 PM$_{2.5}$污染气象成因分析 …… 郝团，蔡子颖，韩素芹，杨旭，樊文雁，姚青，邱晓滨（2373）
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 …… 陈鹏，张月，邢敏，李珊珊（2383）
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 …… 营娜，陈建华，李冬，王迪，薛志钢（2395）
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 …… 陈天雷，吴敏，潘成珂，常莉敏，李泱，刘鹏，高宏，黄韬，马建民（2403）
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 …… 蔡子颖，唐邈，肖致美，杨旭，朱玉强，韩素芹，徐虹，邱晓滨（2415）
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 …… 石耀鹏，胡京南，褚旸晰，段菁春，胡丙鑫，殷丽娜，吕玲玲（2427）
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 …… 曾景海，王灿（2436）
黄河流域水污染风险分区 …… 周夏飞，曹国志，於方，杨威杉，徐泽升（2448）
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 …… 李雪迎，杨曦，乔琦，刘丹丹，张玥，赵若楠，白璐（2459）
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 …… 王韬轶，潘保柱，韩谞，王雨竹，李晨辉，杜蕾（2467）
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 …… 沈宸宇，闫钰，于瑞莲，胡恭任，崔建勇，颜妍，黄华斌（2476）
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 …… 肖艳春，于会彬，宋永会（2489）
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 …… 胡杰，赵心语，王婷婷，荀奎贤，王春玲（2500）
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 …… 胡斌，王沛芳，张楠楠，包天力，金秋彤（2510）
富营养化驱动下西凉湖百年来生态系统演化轨迹 …… 郑佳楠，徐敏，郑文秀，朱可欣，王荣，张恩楼（2518）
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 …… 马玉珅，朱翔，庞晴晴，孔明，韩天伦，彭福全，谢磊，汪龙眠，徐斌，何斐（2527）
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 …… 张彦，邹磊，梁志杰，窦明，李平，黄仲冬，齐学斌（2537）
鄱阳湖流域水葫芦（*Eichhornia crassipes*）对水体微塑料的吸附截留效应 …… 李文刚，吴希恩，简敏菲，刘淑丽，刘海球，丁惠君（2548）
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价 …… 刘舒娇，丁剑楠，石浚哲，张军毅，庄严，邹华（2557）
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储存量 …… 姚明轩，白雪，徐振佳，李凤杰，陆滢，李畅，华祖林（2566）
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 …… 蔡梅，陆志华，王元元，钱旭（2575）
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 …… 李鹏洋，安启睿，王新皓，孙思宇，李肖乾，郑娜（2586）
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 …… 薛玉琴，徐飞，刘坤和，王佳颖，竹兰萍，朱志豪，张拓（2595）
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 …… 李汶璐，王志超，杨文焕，张博文，李卫平（2606）
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂向分布特征及群落构建 …… 张甜娜，陈召莹，张紫薇，周石磊，孟佳靖，陈哲，张一凡，董宛佳，崔建升（2614）
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 …… 高悦，黄廷林，李楠，齐允之，司凡，杨斌（2624）
鄱阳湖典型区铜锈环棱螺体内微塑料分布特征 …… 江为群，胡启武，简敏菲，邹龙，刘淑丽（2633）
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO$_2$-Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A …… 符远航，刘安迪，黄纬斌，唐柏彬，张进忠（2640）
磁性$Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$@SiO_2催化H_2O_2降解亚甲基蓝效能及机制 …… 徐冬莹，余静，郝旗，杨迎春，方淑红（2650）
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 …… 蒋兰翠，孟昭福，刘贤，刘欣，王新欣，曹雪雯（2662）
AMD 污泥复合材料吸附As(Ⅴ)的机制及其影响因素 …… 张亚辉，张瑞雪，吴攀，陈世万，杨艳，安丽，傅渝然，张予豪（2673）
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 …… 卢英源，董小琦，彭星星，贾晓珊（2685）
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 …… 李笑诺，易诗懿，陈卫平（2699）
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 …… 张雪，孔范龙，姜志翔（2709）
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 …… 陈航，王颖，王澍（2719）
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 …… 周一敏，黄雅媛，刘凯，赵儒乐，李冰玉，雷鸣（2732）
两种油菜配施水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 …… 孟晓飞，郑国砥，陈同斌，杨俊兴，郭俊娒，刘杰（2741）
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 …… 王天齐，李艳玲，杨阳，牛硕，王美娥，陈卫平（2751）
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年际变化特征 …… 徐曼，高明，余泺，朱浩宇，邓华，王子芳（2758）
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 …… 邢莉彬，成洁，耿增超，张宏伟，梁宏旭，王强，孙倩倩，李艳（2770）
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 …… 申书伟，张丹丹，王敏鸽，王旭东（2779）
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 …… 郭怡婷，罗晓琦，王锐，陈海心，冯浩（2788）
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 …… 何中声，王紫薇，朱静，陈佳嘉，谷新光，江蓝，陈博，吴则焰，刘金福，陈文伟（2802）
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 …… 王兴，钟泽坤，简俊楠，张硕宏，杨改河，任成杰，冯永忠，任广鑫，王晓娇，韩新辉（2812）
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 …… 李宇，周德成，闫章美，张良侠（2822）
《环境科学》征订启事（2293）　《环境科学》征稿简则（2426）　信息（2585，2672，2708）

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第5期 2022年5月
Vol.43,No.5 May,2022

洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性

胡斌[1]，王沛芳[1]*，张楠楠[2]，包天力[1]，金秋彤[1]

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室，南京 210024；2. 江苏环保产业技术研究院股份公司，南京 210019)

摘要：水体中溶解态有机质(DOM)能够与重金属络合形成复合化合物，进而影响水环境中重金属的迁移转化、生物可利用性和毒性.通过荧光光谱结合不同的光谱分析方法研究了洪泽湖不同季节水体DOM与重金属汞(Hg)的结合特性.结果表明，春季DOM以类蛋白质为主，秋季则以类腐殖质为主，洪泽湖秋、冬季蓄水导致DOM性质存在显著差异.同步荧光光谱结合二维相关光谱分析结果表明，洪泽湖春季DOM与Hg(Ⅱ)的结合强度依次为：360～425 nm > 290 nm > 300～350 nm，秋季DOM与Hg(Ⅱ)的结合强度依次为：290 nm > 315～355 nm > 365～380 nm > 380～465 nm.三维荧光光谱和荧光淬灭实验表明，洪泽湖水体DOM的5种荧光组分均与Hg(Ⅱ)有不同程度地络合.Ryan-Weber模型拟合结果进一步表明，春季DOM类腐殖质组分与Hg(Ⅱ)结合能力强于类蛋白质，秋季则是类蛋白质组分的结合能力强于类腐殖质.总体而言，洪泽湖秋、冬季蓄水能够显著改变DOM的性质，从而影响DOM与重金属Hg(Ⅱ)的结合特性，可能会增强洪泽湖水体中Hg的生物可利用性和毒性.

关键词：溶解态有机质(DOM)；汞(Hg)；荧光光谱；荧光淬灭；洪泽湖

中图分类号：X142 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2022)05-2510-08 **DOI**：10.13227/j.hjkx.202108186

Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake

HU Bin[1], WANG Pei-fang[1]*, ZHANG Nan-nan[2], BAO Tian-li[1], JIN Qiu-tong[1]

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development of Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Jiangsu Academy of Environmental Industry and Technology Co., Nanjing 210019, China)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) can form complex compounds with heavy metals and then affect the transport, transformation, bioavailability, and toxicity of heavy metals in aquatic environments. Here, fluorescence spectroscopy combined with various spectral analysis methods were conducted to study the binding affinity between heavy metal Hg and seasonal dissolved organic matter in Hongze Lake. DOM was dominated by protein-like substances in spring, whereas DOM in autumn was dominated by humic-like substances. These results indicated that lake impoundment during autumn and winter resulted in significant variations in DOM compositions in Hongze Lake. Two-dimensional correlation spectroscopy analysis of synchronous fluorescence spectra revealed that the binding sequence to Hg(Ⅱ) was 360-425 nm > 290 nm > 300-350 nm for spring DOM and 290 nm > 315-355 nm > 365-380 nm > 380-465 nm for autumn DOM. Fluorescence quenching characteristics showed a relatively different trend for five fluorescent components. The results of the Ryan-Weber model further indicated that the binding affinity with Hg(Ⅱ) for spring humic-like components was higher than that for protein-like components. However, the opposite binding affinity between humic- and protein-like components and Hg(Ⅱ) was observed for autumn DOM. In general, impoundment could significantly alter the DOM composition and the binding affinity between DOM and heavy metal Hg and may eventually increase the bioavailability and toxicity of Hg in Hongze Lake.

Key words: dissolved organic matter (DOM); mercury (Hg); fluorescence spectroscopy; fluorescence quenching; Hongze Lake

溶解态有机质(dissolved organic matter, DOM)是水环境中普遍存在且非常重要的物质之一，其含有丰富的碳、氮和磷等生源要素，不仅是全球碳循环的重要组成之一，也是生态系统中能量和物质循环的重要桥梁[1,2].此外，DOM作为重金属等污染物的载体，能够通过微生物作用、光化学反应、矿化和结合等一系列环境行为，影响污染物的溶解性、生物可利用性、迁移和生物毒性等生物地球化学过程[3～5].因此，DOM具有重要的生态和环境意义，其丰富的环境行为和生态环境效应是水环境领域和生物地球化学的研究热点.

DOM具有丰富的官能团，如羧基和酚羟基等，能够以静电结合和有机络合等方式与水体中的金属离子形成复合化合物，进而影响重金属的毒性和生物有效性等[6～8].国内外学者针对水环境中DOM与重金属的结合开展了一系列的研究[9～11].Xu等[9]的研究结果表明，草型湖泊沉积物有机质对重金属有更多的结合点位和更强的结合能力，相比于藻型湖泊沉积物，能够减弱重金属的生物毒性.Chen等[10]的研究发现，富里酸和亲水性有机酸能够通过络合促进藻类对铜的吸附，进而影响其毒性和生物有效性.由于DOM与重金属离子发生作用后，其结构和光学特征也会发生相应地变化，因此光谱分析方法被广泛地应用，以深入了解DOM与重金属的相互作用机制[12～14].

收稿日期：2021-08-17；**修订日期**：2021-10-01

基金项目：国家自然科学基金项目(42007342，92047201)；中央高校科研基本业务费项目(B200204033)

作者简介：胡斌(1989～)，男，博士，讲师，主要研究方向为有机质地球化学循环，E-mail：hubin@hhu.edu.cn

* 通信作者，E-mail：pfwang2005@hhu.edu.cn

汞(Hg)是一种有毒重金属元素，水环境中的 Hg 可以通过微生物和光化学等过程转化成甲基汞，对人类和水生生物的健康造成严重的危害[15,16]. DOM 的多种活性官能团可以与 Hg 离子结合，影响水环境中 Hg 的赋存形态，进而影响汞的形态转化[17,18]. 此外 DOM 也可通过微生物群落和羟基自由基等间接影响汞的形态转化[19~21]，因此开展 DOM 与 Hg 的相互作用有助于丰富水环境中 Hg 的生物地球化学过程. 本文以大型浅水湖泊洪泽湖 DOM 为研究对象，利用同步荧光光谱法和三维荧光光谱法，结合二维相关光谱分析，分析不同季节洪泽湖 DOM 不同组分与 Hg 的结合特性，以期为进一步了解 DOM 在湖泊重金属毒性和生物有效性方面所起的作用提供一定的科学依据和研究基础.

1　材料与方法

1.1　研究区域概况和样品采集

洪泽湖(33°06′~33°40′ N, 118°10′~118°52′ E)，不仅是我国第四大淡水湖，也是淮河流域最大的湖泊，兼具蓄洪、灌溉、航运、水产养殖、饮用和生态保护等多项功能，同时也是南水北调东线工程重要的调蓄性湖泊，具有明显的水库特征[22,23]. 洪泽湖入湖河流集中在西部，年平均入湖流量 330 亿 m^3，其中淮河为最大入湖河流，入湖水量占总入湖量的 70% 以上. 出湖河流分布在东部，其中入江水道为淮河和洪泽湖的主要泄洪道，60%~70% 的湖水经由入江水道流入长江. 洪泽湖属于过水型湖泊，年均换水率达 11 次之多. 为了更好地调节利用水资源，洪泽湖 3 条主要出湖河流上建设了人工闸门，每年 5~10 月开启闸门以满足防洪排涝和农业灌溉等用水需求，而每年 11 月~次年 4 月则关闭闸门蓄水以满足调水、饮水和航运等需求[11,24].

本研究根据洪泽湖湖盆形态、水文条件和出入湖湖口位置，选择淮河入湖区、西部湖区、南部湖湾区和湖心区 4 个采样点(表 1)，分别在 2016 年 4 月和 11 月使用 Rutter 分层水样采集器采集表层水，采集的水样使用 0.22 μm 聚醚砜树脂滤膜过滤，并置于棕色聚乙烯瓶中冷藏避光保存待测. 使用美国 HACH 多参数水质检测仪现场测定水样的 pH 和溶解氧(dissolved oxygen, DO)，使用德国 Elementar Liqui-TOC 总有机碳分析仪测定溶解态有机碳(dissolved organic carbon, DOC)含量.

表 1　洪泽湖采样点坐标和水样理化性质

Table 1　Location of Hongze Lake sampling sites and physical-chemical properties of samples

点位	点位经纬度		pH		DO/mg·L^{-1}		ρ(DOC)/mg·L^{-1}	
	经度(E)/(°)	纬度(N)/(°)	4 月	11 月	4 月	11 月	4 月	11 月
HZ1	118.454 99	33.216 63	8.55	8.32	9.92	9.46	14.60	25.93
HZ2	118.745 15	33.273 32	8.50	8.13	10.01	9.14	13.61	16.27
HZ3	118.727 60	33.156 53	8.70	8.03	9.75	8.32	13.81	16.43
HZ4	118.616 55	33.220 10	8.62	7.99	9.64	8.07	13.53	16.38

1.2　实验方法与指标测定

1.2.1　重金属结合实验

将不同体积的浓度为 0.025 mol·L^{-1} 的 $Hg(NO_3)_2$ 储备液滴定至滤后水样中，使得水样中 Hg(Ⅱ)最终浓度分别为 0、5、10、15、20、30、40、50、75、100、150、200 和 250 μmol·L^{-1}. 为避免浓度影响每次滴加的量均少于水样的 5%[9]. 在室温条件下恒温避光振荡反应 24 h，实验后立即测定样品的荧光光谱.

1.2.2　荧光光谱的测定与分析

采用日本 Hitachi 公司的 F-7000 荧光光度计测定Hg(Ⅱ)添加前后水样的三维荧光光谱和同步荧光光谱，光源为 150 W 连续输出氙弧灯. 其中三维荧光光谱测定激发波长范围为 230~450 nm，步长 5 nm. 发射波长范围为 325~550 nm，步长 1 nm. 激发和发射波长的夹缝宽均为 5 nm，扫描速度为12 000 nm·min^{-1}. 使用 Milli-Q 超纯水作为空白样品用于消除水拉曼效应造成的荧光光谱拉曼峰. 使用 MATLAB 软件利用平行因子分析法对三维荧光光谱进行解析[25]. 本文采用硫酸奎宁单位(QSE)校准并归一所有三维荧光光谱的荧光强度[15].

同步荧光光谱的测定激发波长为 250~500 nm，设定发射波长与激发波长的恒定间隔为 60 nm. 将重金属浓度作为外扰因素，利用“2D shige”软件建立同步和异步二维荧光相关光谱[26].

1.2.3　荧光淬灭曲线拟合模型

为了综合评估 DOM 不同组分与重金属的结合作用情况，使用 Ryan-Weber 模型对荧光淬灭曲线进行非线性拟合[27]. 该模型假设结合点位与重金属离子按照 1∶1的形式结合成有机金属复合物，从而引起荧光淬灭反应[28]. 拟合方程如下：

$$F = F_0 + (F_{ML} - F_0)\left(\frac{1}{2K_M C_L}\right)\times$$

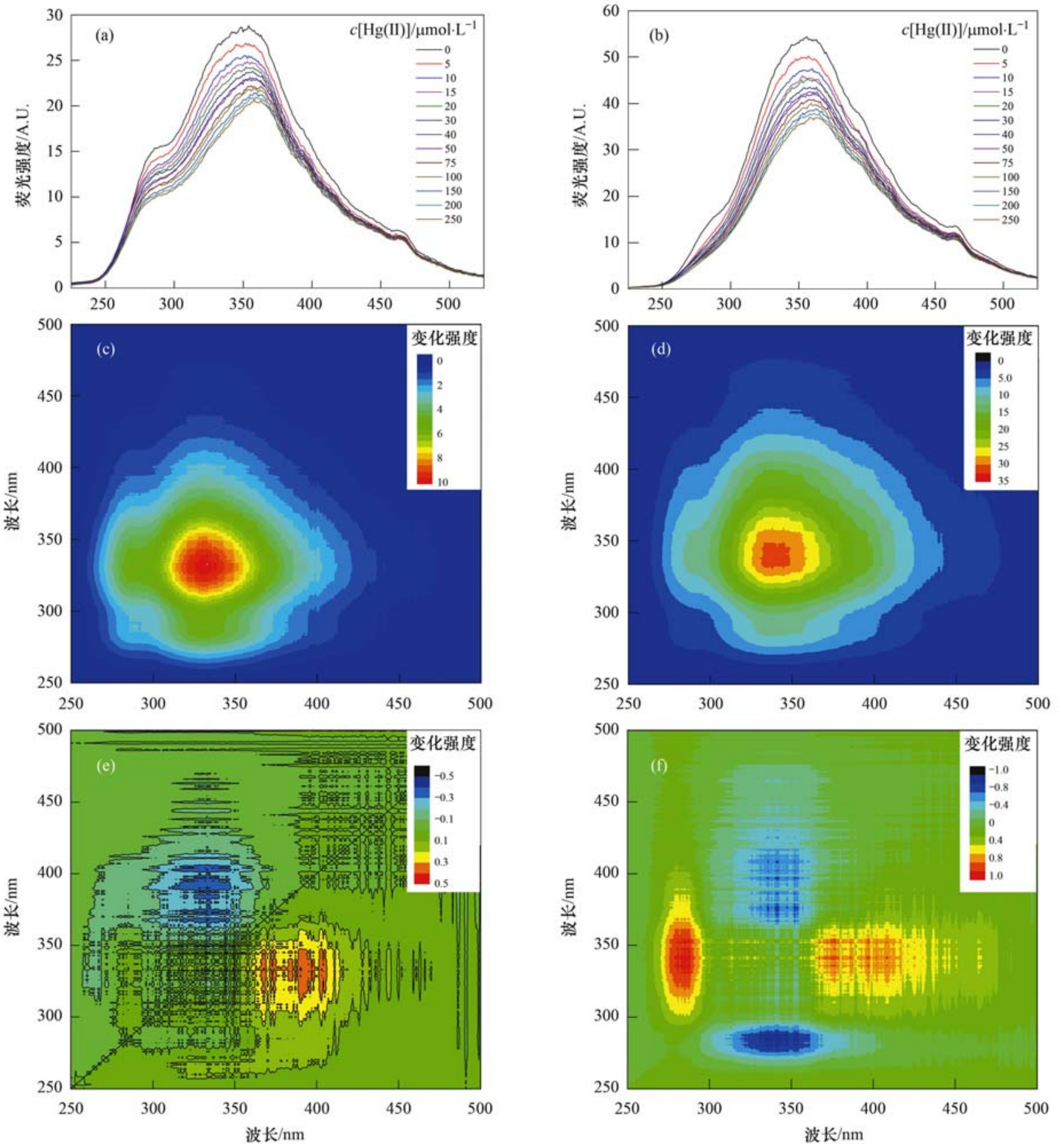
$$[1 + K_M C_L + K_M C_M - \sqrt{(1 + K_M C_L + K_M C_M)^2 - 4K_M^2 C_M C_L}\,]$$

式中，F 为不同重金属浓度 C_M 下的荧光峰强，F_0 为没有加入重金属的初始荧光峰强，F_{ML} 为重金属浓度增大到一定值，荧光峰强不再发生变化的荧光峰限值，K_M 和 C_L 分别为条件稳定常数和最大结合容量. 条件稳定常数($\lg K_M$)用来表征体系中 DOM 与重金属结合潜能的稳定性. 用 C_L 除以 DOC 浓度得到的值($\text{mmol}\cdot\text{g}^{-1}$)即为可表征 DOM 与重金属的结合容量($CC_c$).

2 结果与讨论

2.1 溶解态有机质同步荧光光谱随Hg(Ⅱ)增加的变化

洪泽湖 DOM 的同步荧光光谱荧光强度随 Hg(Ⅱ)浓度增加的变化情况如图 1 所示. 由图 1(a)和 1(b)可以看出，春季(4 月)洪泽湖水体中 DOM 分别在 280 nm 和 350 nm 处存在显著的特征峰，秋季(11 月)水体 DOM 则在 350 nm 存在一个显著的特征峰. 有研究表明，波长在 200 ~ 300 nm 和



(a)同步荧光光谱-4 月，(b)同步荧光光谱-11 月，(c)同步二维相关光谱-4 月，(d)同步二维相关光谱-11 月，(e)异步二维相关光谱-4 月，(f)异步二维相关光谱-11 月

图 1 洪泽湖溶解态有机质同步荧光光谱随Hg(Ⅱ)浓度变化情况和其同步和异步二维相关光谱图

Fig. 1 Changes in the SF spectra of dissolved organic matter from Hongze Lake upon addition of Hg(Ⅱ) and its synchronous and asynchronous 2D-COS maps

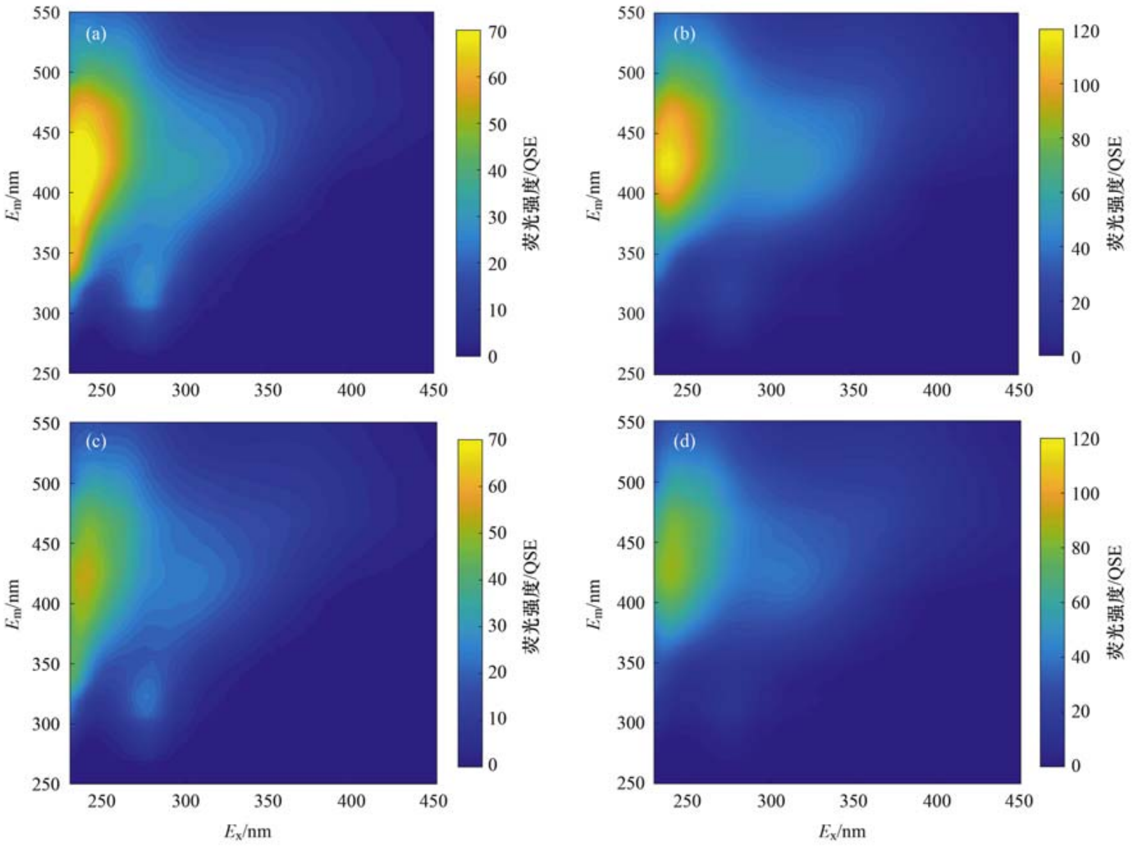
300 nm 以上的特征峰分别归因于类蛋白质和类腐殖质[13,28]. 这表明洪泽湖春季水体 DOM 以类蛋白质和类腐殖质为主，而秋季水体 DOM 则以类腐殖质为主，与已有的研究结果相同[11,29]. 此外，秋季水体 DOM 荧光强度和 DOC 含量均远高于春季水体（表 1 和图 1），这主要是由于夏、秋季上游淮河陆源性 DOM 大量输入造成的[11].

随着 c[Hg(Ⅱ)]从 0 μmol·L^{-1} 增加至 250 μmol·L^{-1}，DOM 不同波长的荧光强度均呈现明显的下降趋势[图 1(a)和 1(b)]. 这一结果表明Hg(Ⅱ)与 DOM 中不同组分都发生了结合作用. 为了进一步掌握 DOM 与重金属 Hg 的结合特性，利用二维相关光谱解析同步荧光光谱以确定Hg(Ⅱ)离子与 DOM 的结合点位和结合顺序，结果如图 1(c)～1(f)所示.

如图 1(c)和 1(d)所示，春、秋季洪泽湖 DOM 同步二维相关光谱图均在 350 nm/350 nm 和 290 nm/290 nm 处存在正值的自峰，在 290 nm/350 nm 存在一个交叉峰. 此外，秋季水体 DOM 的同步二维相关光谱的自峰峰强远高于春季水体，表明，洪泽湖秋季水体 DOM 在滴加Hg(Ⅱ)后荧光光强更容易降低，荧光淬灭效应更加显著. 如图 1(e)和 1(f)所示，异步二维光谱图的峰值呈对角线分布，在对角线下方均存在正值峰和负值峰. 根据 Noda 法则[26]，洪泽湖春季 DOM 与Hg(Ⅱ)的结合强度为：360～425 nm > 290 nm > 300～350 nm，秋季 DOM 与Hg(Ⅱ)的结合强度为：290 nm > 315～355 nm > 365～380 nm > 380～465 nm. 异步二维相关光谱的结果表明，洪泽湖春季 DOM 类腐殖质对Hg(Ⅱ)的亲和力强于类蛋白质，而秋季 DOM 则是类蛋白质的亲和力强于类腐殖质.

2.2　洪泽湖溶解态有机质三维荧光光谱解析

随着 c[Hg(Ⅱ)]浓度由 0 μmol·L^{-1} 逐渐增加至 250 μmol·L^{-1}，春、秋季水体 DOM 不同波长荧光团的荧光峰值均发生了明显地下降（图 2），说明在Hg(Ⅱ)的作用下 DOM 发生了淬灭效应，这一结果与图 1 同步荧光光谱结果相同. 为了进一步了解 DOM 中不同组分与Hg(Ⅱ)的结合特性，利用平行因子方法对三维荧光光谱进行解析，基于残差分析和分半验证结果共解析出 5 个荧光组分. 通过对这 5 个荧光组分的光谱参数和 OpenFluor 在线光谱数据库中公开的 PARAFAC 模型进行比较，发现 Tucker 一致性系数均超过 0.95，认定此次解析结果



(a)4 月，c[Hg(Ⅱ)] = 0 μmol·L^{-1}，(b)11 月，c[Hg(Ⅱ)] = 0 μmol·L^{-1}，(c)4 月，c[Hg(Ⅱ)] = 250 μmol·L^{-1}，(d)11 月，c[Hg(Ⅱ)] = 250 μmol·L^{-1}

图 2　洪泽湖溶解态有机质与Hg(Ⅱ)结合三维荧光光谱图

Fig. 2　Changes in excitation-emission matrix spectroscopy of dissolved organic matter from Hongze Lake binding with Hg(Ⅱ)

是可信的[30,31].

根据光谱特征将5个荧光组分分成两大类,其中3个成分(C1、C2和C3)可归一为类腐殖质荧光成分,而其余2个成分(C4和C5)为类蛋白质荧光成分.其中,C1[E_x/E_m=(230(340) nm/425 nm]和C3[E_x/E_m=260(280) nm/460~500 nm]被普遍认为是陆源类腐殖质成分,具有高芳香性和高分子质量的特点[32~34].C2[E_x/E_m = 245(305) nm/405 nm]的最大激发和发射波长类似于微生物作用产生的海源腐殖质M峰[33~35].C4[E_x/E_m =(230(290) nm/350 nm]和C5[E_x/E_m = 275((230) nm/320 nm]都是典型的类蛋白质荧光成分,其中C4为色氨酸,C5为酪氨酸[36~38].

2.3 洪泽湖溶解态有机质不同组分与Hg(Ⅱ)的结合特性

为了对比研究DOM各组分在不同Hg(Ⅱ)浓度下的淬灭程度,图3分别作出各荧光组分在不同Hg(Ⅱ)浓度作用下的荧光淬灭曲线.从中可见,组分C1和C4在避光条件振荡24 h后呈现明显的淬灭效应,最大荧光强度随着Hg(Ⅱ)浓度的升高而降低,但C2、C3和C5这3种组分受Hg(Ⅱ)的淬灭影响很小,甚至出现荧光强度整体增强的变化趋势.荧光组分强度的增强可能是由于重金属Hg(Ⅱ)与有机质结合,改变了有机质的结构造成的,这一现象与其他研究相类似[19,39].显著差异的淬灭曲线表明,有机质不同组分与重金属Hg(Ⅱ)的结合特性大不相同,这一结果与同步荧光光谱结果相类似.

利用Ryan-Weber模型对Hg(Ⅱ)作用下有机质不同组分的荧光淬灭曲线进行非线性拟合.组分C2、C3和C5虽然整体呈现荧光强度下降的趋势,但3个组分在不同浓度下的荧光强度均波动较大,模型的拟合结果较差.因此,本文对DOM组分C1

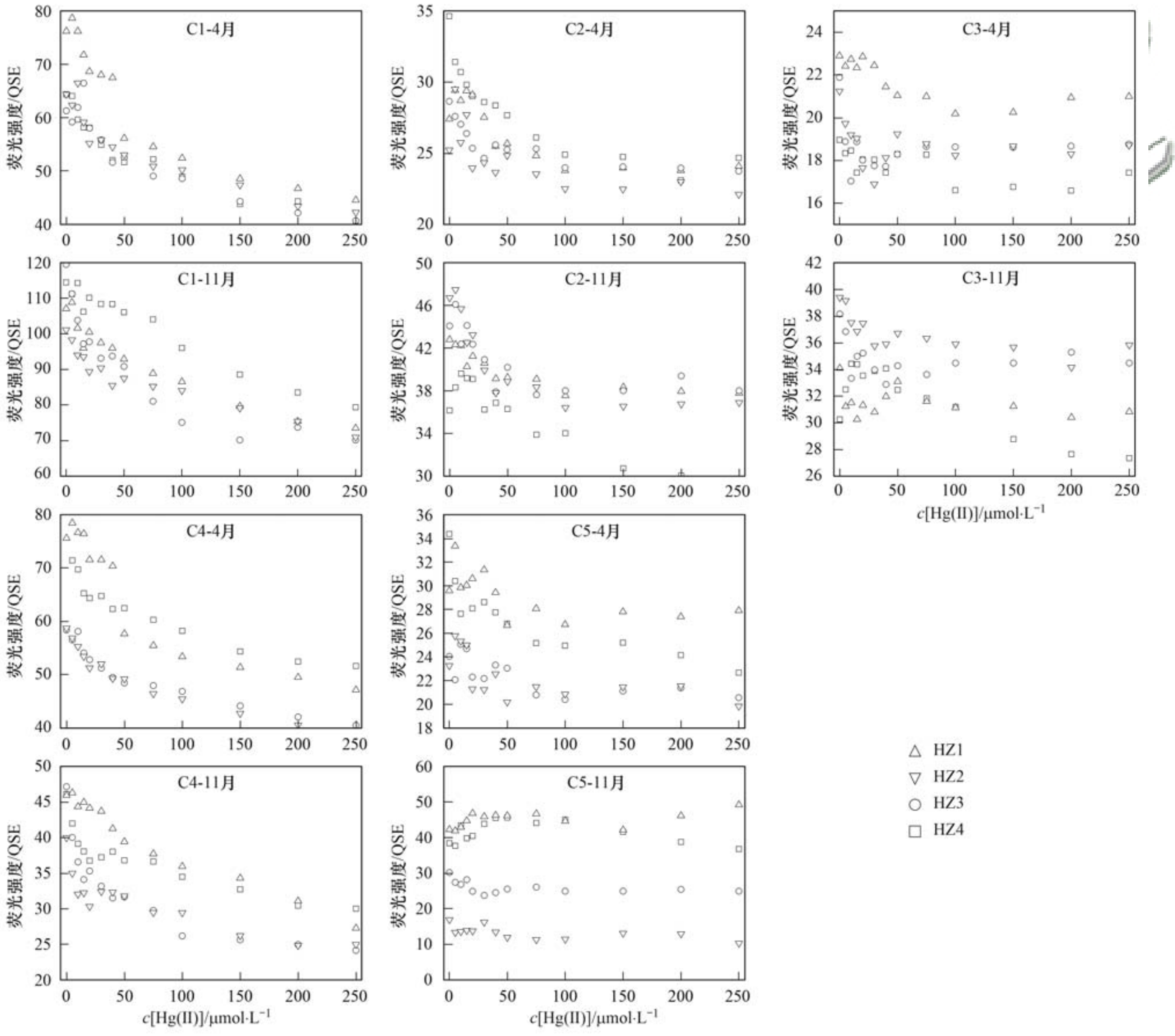


图3 洪泽湖DOM不同组分与Hg(Ⅱ)结合荧光淬灭曲线

Fig. 3 Fluorescence quenching curve between Hg(Ⅱ) and different fluorescence components from Hongze Lake DOM

和 C4 猝灭曲线进行非线性模型拟合，结果如表 2 所示.

表 2　通过 Ryan-Weber 模型确定的荧光组分与Hg(Ⅱ)的结合参数($n=13$)

Table 2　Values of binding parameters for fluorescence components with Hg(Ⅱ) determined by Ryan-Weber model ($n=13$)

荧光组分	采样点	春季(4 月)			秋季(11 月)		
		$\lg K_{\mathrm{M}}$	CC_{c}	R^2	$\lg K_{\mathrm{M}}$	CC_{c}	R^2
C1	HZ1	4.41	2.94	0.97	4.33	1.96	0.95
	HZ2	4.60	1.84	0.95	4.51	1.84	0.91
	HZ3	4.54	2.21	0.95	4.72	1.18	0.95
	HZ4	4.63	2.26	0.96	3.80	14.20	0.97
C4	HZ1	4.32	3.63	0.93	3.98	4.94	0.98
	HZ2	4.47	2.56	0.97	5.10	0.45	0.77
	HZ3	4.48	2.37	0.97	5.02	0.57	0.94
	HZ4	4.58	1.52	0.88	5.10	0.57	0.84

由表 2 可以看出，春秋季洪泽湖 DOM 与Hg(Ⅱ)的结合稳定常数 $\lg K_{\mathrm{M}}$ 范围为 3.80～5.10，与其他研究结果相符[40,41]. 春季水体 DOM 荧光组分 C1 的 $\lg K_{\mathrm{M}}$ 值均要高于荧光组分 C4，表明春季 DOM 中类腐殖质与重金属Hg(Ⅱ)的亲和力要强于类蛋白质. 秋季水体中 DOM 荧光组分 C1 的 $\lg K_{\mathrm{M}}$ 值则低于荧光组分 C4(HZ1 除外)，表明秋季 DOM 中类蛋白质与重金属Hg(Ⅱ)的亲和力要强于类蛋白质. 不同季节 DOM 荧光组分与Hg(Ⅱ)结合稳定常数 $\lg K_{\mathrm{M}}$ 结果与异步二维相关光谱结合顺序结果相符(图 1). 本实验结果进一步表明，二维相关光谱结合荧光光谱能够很好地应用于 DOM 与重金属Hg(Ⅱ)的结合研究中.

DOM 的性质变化对其与重金属的结合有着显著的影响[42～44]. 例如，Li 等[42]的研究发现太湖藻类暴发期间富里酸与 Cu(Ⅱ)的结合能力要远高于非暴发期. 有研究表明，春季洪泽湖陆源 DOM 腐质类组分 C1 在秋季蓄水期间通过微生物和光化学等作用被转化为自生 DOM 蛋白类 C4[11]. 本文结果中春季 DOM 组分 C1 与Hg(Ⅱ)的结合能力($\lg K_{\mathrm{M}}$ 值)大部分高于秋季水体 DOM，而类蛋白质(C4)的结合能力则大部分低于秋季水体(表 2). 与此同时，春季水体中 DOM 组分 C1 和 C4 的结合容量要高于秋季水体. 春、秋季 DOM 与重金属Hg(Ⅱ)显著差异的结合特性表明，洪泽湖秋冬季蓄水期间 DOM 性质的变化可能会影响水体中重金属 Hg 的形态变化，进而影响 Hg 的生物可利用性和毒性. 此外，Lescord 等[45]的研究表明，生物中甲基汞的含量与内源性有机质含量呈显著正相关，Jiang 等[17]的研究认为内源性有机质能够影响微生物群落活性进而刺激环境中甲基汞的形成. 洪泽湖蓄水期间 DOM 性质的变化可能会增强水体中 Hg 的生物可利用性和毒性，因此，蓄水期间应当加强水环境中重金属 Hg 的监测以保障用水安全.

3　结论

(1)春季洪泽湖 DOM 以类蛋白质和类腐殖质物质为主，秋季洪泽湖 DOM 则以类腐殖质物质为主.

(2)洪泽湖春季 DOM 与Hg(Ⅱ)的结合强度依次为：360～425 nm＞290 nm＞300～350 nm，秋季 DOM 与Hg(Ⅱ)的结合强度依次为：290 nm＞315～355 nm＞365～380 nm＞380～465 nm.

(3)洪泽湖水体 DOM 包括 3 种类腐殖质和 2 种类蛋白质荧光组分. 其中春季 DOM 类腐殖质组分 C1 与Hg(Ⅱ)结合能力强于类蛋白质 C4，秋季则是类蛋白质组分 C4 强于类腐殖质 C1.

参考文献：

[1]　Creed I F, Bergström A K, Trick C G, *et al*. Global change-driven effects on dissolved organic matter composition: implications for food webs of northern lakes[J]. Global Change Biology, 2018, **24**(8): 3692-3714.

[2]　Boodoo K S, Fasching C, Battin T J. Sources, transformation, and fate of dissolved organic matter in the gravel bar of a prealpine stream [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2020, **125**(8), doi: 10.1029/2019JG005604.

[3]　施玥, 王沛芳, 胡斌, 等. 太湖和洪泽湖天然有机质与重金属结合特性研究[J]. 水资源保护, 2019, **35**(5): 86-94.
Shi Y, Wang P F, Hu B, *et al*. Study on binding characteristics of natural organic matter and heavy metals in Taihu Lake and Hongze Lake[J]. Water Resources Protection, 2019, **35**(5): 86-94.

[4]　孟永霞, 程艳, 李琳, 等. 新疆匹里青河小流域 DOM 荧光特征及与汞的相互作用[J]. 生态与农村环境学报, 2020, **36**(6): 770-777.
Meng Y X, Cheng Y, Li L, *et al*. Fluorescence characteristics of DOM and its interaction with mercury in Piliqing River watershed in Xinjiang, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, **36**(6): 770-777.

[5]　Zhang H F, Zheng Y C, Wang X C, *et al*. Characterization and biogeochemical implications of dissolved organic matter in aquatic environments[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **294**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113041.

[6]　Cui H Y, Zhang S B, Zhao M Y, *et al*. Parallel faction analysis combined with two-dimensional correlation spectroscopy reveal the

characteristics of mercury-composting-derived dissolved organic matter interactions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **384**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121395.

[7] 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 等. 城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2095-2103.
Liang M Q, Shao M L, Cao C L, *et al*. Characteristics of dissolved organic matter (DOM) and relationship with dissolved heavy metals in a peri-urban and an urban river [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2095-2103.

[8] Pontoni L, La Vecchia C, Boguta P, *et al*. Natural organic matter controls metal speciation and toxicity for marine organisms: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2021, doi: 10.1007/s10311-021-01310-y.

[9] Xu H C, Yu G H, Yang L Y, *et al*. Combination of two-dimensional correlation spectroscopy and parallel factor analysis to characterize the binding of heavy metals with DOM in lake sediments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **263**: 412-421.

[10] Chen X J, Zheng M M, Zhang G X, *et al*. The nature of dissolved organic matter determines the biosorption capacity of Cu by algae [J]. Chemosphere, 2020, **252**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126465.

[11] Hu B, Wang P F, Wang C, *et al*. The effect of anthropogenic impoundment on dissolved organic matter characteristics and copper binding affinity: insights from fluorescence spectroscopy [J]. Chemosphere, 2017, **188**: 424-433.

[12] Huang Y, Tian Y Y, Xie L H, *et al*. The application of two-dimensional correlation spectroscopy for the binding properties of heavy metals onto digestate-derived DOM from anaerobic digestion of chicken manure[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **204**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111129.

[13] Ren H Y, Ma F Y, Yao X, *et al*. Multi-spectroscopic investigation on the spatial distribution and copper binding ability of sediment dissolved organic matter in Nansi Lake, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, **591**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125289.

[14] Fan X J, Liu C, Yu X F, *et al*. Insight into binding characteristics of copper(Ⅱ) with water-soluble organic matter emitted from biomass burning at various pH values using EEM-PARAFAC and two-dimensional correlation spectroscopy analysis [J]. Chemosphere, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130439.

[15] 孙荣国. 三峡水库水体甲基汞光化学降解特征及其作用机制与影响因素[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
Sun R G. Mechanisms and influencing factors of methylmercury photodegradation in the water body of Three Gorges Reservoir, China[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.

[16] 王书平, 宋玉梅, 刘爽, 等. 海水养殖底泥中外源汞甲基化及生物响应研究[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(6): 2871-2880.
Wang S P, Song Y M, Liu S, *et al*. Research of the methylation and biological response of exogenous mercury in mariculture sediments[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(6): 2871-2880.

[17] Jiang T, Bravo A G, Skyllberg U, *et al*. Influence of dissolved organic matter (DOM) characteristics on dissolved mercury (Hg) species composition in sediment porewater of lakes from southwest China[J]. Water Research, 2018, **146**: 146-158.

[18] 卞永荣, 顾宝华, 朱波, 等. 厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5036-5042.
Bian Y R, Gu B H, Zhu B, *et al*. Reduction and oxidation of mercury by dissolved organic matter under anaerobic conditions [J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5036-5042.

[19] Schartup A T, Ndu U, Balcom P H, *et al*. Contrasting effects of marine and terrestrially derived dissolved organic matter on mercury speciation and bioavailability in seawater [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(10): 5965-5972.

[20] 李雨桐, 何鑫龙, 彭一帆, 等. 藻源溶解性有机质对汞甲基化的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, **38**(2): 362-368.
Li Y T, He X L, Peng Y F, *et al*. Influence of algal derived dissolved organic matter on mercury methylation in water[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, **38**(2): 362-368.

[21] Mangal V, Stenzler B R, Poulain A J, *et al*. Aerobic and anaerobic bacterial mercury uptake is driven by algal organic matter composition and molecular weight [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(1): 157-165.

[22] Li S H, Guo W, Mitchell B. Evaluation of water quality and management of Hongze Lake and Gaoyou Lake along the Grand Canal in Eastern China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **176**(1-4): 373-384.

[23] 陈业, 彭凯, 张庆吉, 等. 洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3753-3762.
Chen Y, Peng K, Zhang Q J, *et al*. Spatio-temporal distribution characteristics and driving factors of zooplankton in Hongze Lake [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3753-3762.

[24] Tian C, Pei H Y, Hu W R, *et al*. Variation of phytoplankton functional groups modulated by hydraulic controls in Hongze Lake, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(22): 18163-18175.

[25] Murphy K R, Stedmon C A, Graeber D, *et al*. Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC [J]. Analytical Methods, 2013, **5**(23): 6557-6566.

[26] Noda I. Two-dimensional correlation analysis useful for spectroscopy, chromatography, and other analytical measurements[J]. Analytical Sciences, 2007, **23**(2): 139-146.

[27] Guo X J, Li Y Z, Feng Y H, *et al*. Using fluorescence quenching combined with two-dimensional correlation fluorescence spectroscopy to characterise the binding-site heterogeneity of dissolved organic matter with copper and mercury in lake sediments[J]. Environmental Chemistry, 2017, **14**(2): 91-98.

[28] Zhu Y C, Jin Y, Liu X S, *et al*. Insight into interactions of heavy metals with livestock manure compost-derived dissolved organic matter using EEM-PARAFAC and 2D-FTIR-COS analyses [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **420**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126532.

[29] 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 等. 东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1930-1940.
Chen L L, Xiao Q T, Yu X Q, *et al*. Optical Composition and Potential Driving factors of chromophoric dissolved organic matter in large lakes and reservoirs in the eastern region of China[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1930-1940.

[30] Murphy K R, Stedmon C A, Wenig P, *et al*. OpenFluor- an online spectral library of auto-fluorescence by organic compounds in the environment[J]. Analytical Methods, 2014, **6**(3): 658-661.

[31] Holland A, Stauber J, Wood C M, *et al*. Dissolved organic

matter signatures vary between naturally acidic, circumneutral and groundwater-fed freshwaters in Australia [J]. Water Research, 2018, **137**: 184-192.

[32] Amaral V, Graeber D, Calliari D, *et al*. Strong linkages between DOM optical properties and main clades of aquatic bacteria[J]. Limnology and Oceanography, 2016, **61**(3): 906-918.

[33] Zhou Y Q, Zhang Y L, Jeppesen E, *et al*. Inflow rate-driven changes in the composition and dynamics of chromophoric dissolved organic matter in a large drinking water lake[J]. Water Research, 2016, **100**: 211-221.

[34] 高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 等. 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: 以宁波市小浃江为例[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4009-4017.

Gao F, Shao M L, Tang J F, *et al*. 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[J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4009-4017.

[35] 闫晓寒, 韩璐, 文威, 等. 辽河保护区水体溶解性有机质空间分布与来源解析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1419-1427.

Yan X H, Han L, Wen W, *et al*. Spectral characteristics and spatial distribution of DOM in surface water of Liaohe reservation zone[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(4): 1419-1427.

[36] Cuss C W, Guéguen C. Relationships between molecular weight and fluorescence properties for size-fractionated dissolved organic matter from fresh and aged sources[J]. Water Research, 2015, **68**: 487-497.

[37] 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 等. 太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2056-2066.

Lü W W, Yao X, Zhang B H, *et al*. Fluorescent characteristics and environmental significance of particulate organic matter in Lake Taihu, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2056-2066.

[38] 陈慧敏, 俞晓琴, 朱俊羽, 等. 太湖有色可溶性有机物(CDOM)对 COD 及 BOD_5 的指示意义[J]. 湖泊科学, 2021, **33**(5): 1376-1388.

Chen H M, Yu X Q, Zhu J Y, *et al*. Optical indices of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) as potential indicators tracing the variability of chemical oxygen demand (COD) and biochemical oxygen demand (BOD_5) in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, **33**(5): 1376-1388.

[39] Bao T L, Wang P F, Hu B, *et al*. Investigation on the effects of sediment resuspension on the binding of colloidal organic matter to copper using fluorescence techniques [J]. Chemosphere, 2019, **236**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.07.043.

[40] Yamashita Y, Jaffé R. Characterizing the interactions between trace metals and dissolved organic matter using excitation-emission matrix and parallel factor analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(19): 7374-7379.

[41] Zhang D Y, Pan X L, Mostofa K M G, *et al*. Complexation between Hg(Ⅱ) and biofilm extracellular polymeric substances: an application of fluorescence spectroscopy [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **175**(1-3): 359-365.

[42] Li W W, Zhang F F, Ye Q, *et al*. Composition and copper binding properties of aquatic fulvic acids in eutrophic Taihu Lake, China[J]. Chemosphere, 2017, **172**: 496-504.

[43] 李雅妮, 徐华成, 江和龙. 鄱阳湖水体溶解有机质分子量分布、荧光特征及对重金属分布的影响[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 1029-1040.

Li Y N, Xu H C, Jiang H L. Molecular weight distribution, fluorescence characteristics of dissolved organic matter and their effect on the distribution of heavy metals of Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(4): 1029-1040.

[44] Hu B, Wang P F, Wang C, *et al*. Investigating spectroscopic and copper-binding characteristics of organic matter derived from sediments and suspended particles using EEM-PARAFAC combined with two-dimensional fluorescence/FTIR correlation analyses[J]. Chemosphere, 2019, **219**: 45-53.

[45] Lescord G L, Emilson E J S, Johnston T A, *et al*. Optical properties of dissolved organic matter and their relation to mercury concentrations in water and biota across a remote freshwater drainage basin[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(6): 3344-3353.

HUANJING KEXUE Vol. 43 No. 5
Environmental Science (monthly) May 15, 2022

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Urban Area of Beijing ······ AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, *et al.* (2251)
Modeling of $PM_{2.5}$ Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model ······ FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, *et al.* (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of $PM_{2.5}$ and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018 ······ ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, *et al.* (2274)
Characteristics and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence ······ TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, *et al.* (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem ······ ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, *et al.* (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in $PM_{2.5}$ Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City ······ SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, *et al.* (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of $PM_{2.5}$ Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan ······ REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, *et al.* (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient $PM_{2.5}$ in the Winter of Zhengzhou ······ YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, *et al.* (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in $PM_{2.5}$ During Winter in Zibo City ······ BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, *et al.* (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in $PM_{2.5}$ in Chengde ······ HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, *et al.* (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China ······ FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, *et al.* (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain ······ ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, *et al.* (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology ······ HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, *et al.* (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity ······ CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, *et al.* (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China ······ YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, *et al.* (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030 ······ CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, *et al.* (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation ······ CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, *et al.* (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis ······ SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, *et al.* (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Plolicy During Heavy Air Pollution Alert ······ ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin ······ ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, *et al.* (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin ······ LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, *et al.* (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River ······ WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, *et al.* (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen ······ SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, *et al.* (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments ······ XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City ······ HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, *et al.* (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake ······ HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, *et al.* (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication ······ ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, *et al.* (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology ······ MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, *et al.* (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm ······ ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, *et al.* (2537)
Adsorption and Interception Effects of *Eichhornia crassipes* on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin ······ LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, *et al.* (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake ······ LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, *et al.* (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake ······ YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, *et al.* (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment ······ CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, *et al.* (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River ······ LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, *et al.* (2586)
Non-point Source Pollution (NPSP) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River ······ XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, *et al.* (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments ······ LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, *et al.* (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period ······ ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, *et al.* (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir ······ GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, *et al.* (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in *Bellamya aeruginosa* in Typical Area of Poyang Lake ······ JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, *et al.* (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO_2-Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes ······ FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, *et al.* (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H_2O_2 Catalyzed by Magnetic $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$@SiO_2 ······ XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, *et al.* (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite ······ JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, *et al.* (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(Ⅴ) by AMD Sludge Composite Material ······ ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, *et al.* (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates ······ LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, *et al.* (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors ······ LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions ······ ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area ······ CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil ······ ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, *et al.* (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of *Brassica napus* L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils ······ MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, *et al.* (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem ······ WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, *et al.* (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field ······ XU Man, GAO Ming, YU Luo, *et al.* (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers ······ XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, *et al.* (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil ······ SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, *et al.* (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain ······ GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, *et al.* (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain ······ HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, *et al.* (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland ······ WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, *et al.* (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China ······ LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, *et al.* (2822)