

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

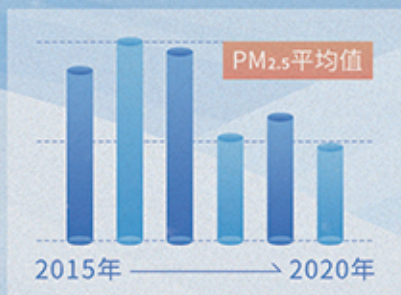
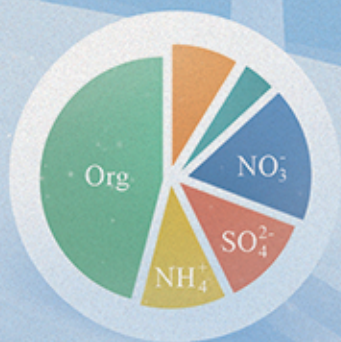
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析

杜瑛珣¹, 戴家如^{1,2}, 张巧颖^{1,3}, 刘静静^{1,3}, 黄秀琳^{1,4}, 安世林^{1,3}, 文帅龙^{1,3}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 南京工业大学环境科学与工程学院, 南京 211816; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 重庆三峡学院环境与化学工程学院, 重庆 404020)

摘要: 草型湖泊(区)和藻型湖泊(区)是浅水湖泊的两种典型状态,两种湖泊中有机质(OM)的来源和转化存在明显差异. 有机质在沉积物上的埋藏是湖泊碳汇功能的重要体现. 沉积物中的有机质可能发生后续的转化,影响湖泊碳汇功能;其转化过程与其固有的性质密切相关. 目前为止,有关草型和藻型湖泊沉积物中有机质的组成,特别是分子结构差异的信息较少. 为此,采集太湖草型湖区(东太湖)和藻型湖区(梅梁湾)沉积物,提取和纯化沉积物中的水溶性有机质(分别记为 M-WSOM 和 A-WSOM),并采用紫外-可见吸收光谱、三维荧光光谱、傅立叶红外光谱和傅里叶变换-离子回旋共振-质谱(FT-ICR MS)对 WSOM 性质组成和分子结构进行详尽的表征与分析. 结果表明:①M-WSOM 的相对分子质量比 A-WSOM 的($E_2:E_3$ 指标)稍大; FT-ICR MS 的数据显示, M-WSOM 和 A-WSOM 的相对分子质量分别为 388.9 和 379.9. ②M-WSOM 的芳香性略高于 A-WSOM 的($SUVA_{254}$ 和 HIX 指标); 同样地, FT-ICR MS 的结果显示, M-WSOM 中稠环芳烃(6.3%, 强度加权平均占比,下同)、芳香类物质(7.7%)的含量高于 A-WSOM(分别为 1.1% 和 4.4%); ③荧光组分结果表明 A-WSOM 中类蛋白质组分的含量大于 M-WSOM; FT-ICR MS 的结果与之对应, A-WSOM 的多肽含量(35.5%)高于 M-WSOM 的(15.6%); ④质谱数据展示了高分辨的分子信息: M-WSOM 和 A-WSOM 中,沉积物中含杂原子的分子分别占 82.9% 和 91.7%; 其中含氮元素的分子占比高达 53.5% 和 78.5%; 含磷元素分子占 30.4% 和 41.4%, M-WSOM 磷元素主要分布在脂肪烃和高度不饱和和低氧物质中,而 A-WSOM 则主要分布在多肽中. 揭示了浅水湖泊两种典型状态沉积物 OM 的组成和分子结构; 有助于研究湖泊沉积物的温室气体排放,及碳、氮、磷元素的生物地球化学过程.

关键词: 吸收光谱; 三维荧光光谱; 红外光谱; 傅里叶变换-离子回旋质谱; 水溶性有机质(WSOM)

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)08-4108-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202112137

Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake

DU Ying-xun¹, DAI Jia-ru^{1,2}, ZHANG Qiao-ying^{1,3}, LIU Jing-jing^{1,3}, HUANG Xiu-lin^{1,4}, AN Shi-lin^{1,3}, WEN Shuai-long^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 4. College of Environmental and Chemical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404020, China)

Abstract: Macrophyte- and algae-dominated lakes (zones) are the two typical states of shallow lakes, where the source and composition of organic matter are distinct. The burial of organic matter (OM) in the sediment supports the role of lakes as carbon sinks. However, organic matter in the sediments could be further processed, influencing the carbon cycle. The post-burial metabolism of the sedimentary OM relates closely to its composition. However, information on the differences in composition remains limited, especially the molecular composition of organic matter from sediments in the macrophyte-dominated and algae-dominated lakes. In this study, sediments were collected from the macrophyte-dominated and algae-dominated zones of Taihu Lake (East Taihu Lake and Meiliang Bay, respectively), and the active pool of sedimentary OM (water soluble organic matter, WSOM) was extracted and purified. The composition of the WSOM was characterized in detail via absorption spectroscopy, fluorescent spectroscopy, infrared spectroscopy, and Fourier transform-ion cyclotron resonance mass spectrometry (FT-ICR MS). The optical index of $E_2:E_3$ showed that the molecular size of WSOM in the macrophyte-dominated zone (M-WSOM) was slightly larger than that in the algae-dominated zone (A-WSOM). Consistently, the intensity-weighted molecular weights were identified as 388.9 and 379.9, respectively, via FT-ICR MS analysis. M-WSOM was more humified than A-WSOM, as evidenced by the $SUVA_{254}$ and HIX values. The FT-ICR MS results showed that the relative abundance of the condensed aromatic substance and the aromatics were 6.3% (intensity-weighted) and 7.7% for M-WSOM and 1.1% and 4.4% for A-WSOM, respectively. The excitation-emission matrix fluorescence-parallel factor analysis (EEM-PARAFAC) suggested that the protein-like component was more in A-WSOM than that in M-WSOM, and the FT-ICR MS results showed that the intensity-weighted relative abundances of peptides were 35.6% and 15.6% for A-WSOM and M-WSOM, respectively. The FT-ICR MS results further showed that the heteroatom-containing molecules were abundant in the sedimentary WSOM, i. e., 82.9% and 91.7% for M-WSOM and A-WSOM, respectively. The nitrogen-containing molecules dominated, contributing to 53.5% and 78.5% of M-WSOM and A-WSOM, respectively. There were 30.4% and 41.4% phosphorus-containing molecules in M-WSOM and A-WSOM, respectively. The phosphorus-containing molecules in M-WSOM were mainly aliphatics and highly unsaturated structures with low oxygen, whereas those in A-WSOM were mainly peptides. This study elucidated the detailed molecular composition of WSOM in the macrophyte-dominated and algae-dominated zones of Taihu Lake, which aids understanding of the carbon, nitrogen, and phosphorus biogeochemical cycles in lakes.

Key words: absorption spectroscopy; fluorescent spectroscopy; infrared spectroscopy; Fourier transform-ion cyclotron resonance mass spectrometry; water soluble organic matter (WSOM)

收稿日期: 2021-12-14; 修订日期: 2022-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971139, 41930760, 41671099)

作者简介: 杜瑛珣(1980~),女,博士,副研究员,主要研究方向为湖泊有机质生物地球化学过程, E-mail: yxdu@niglas.ac.cn

浅水湖泊存在着两种典型的状态:以沉水植物为主要初级生产者的清水态湖泊和以浮游植物为主要初级生产者的浊水态湖泊。随着外源营养盐负荷的不断增加,浮游植物异常繁殖,水体透明度降低,沉水植物减少消失,湖泊生态系统从清水态(草型)转换为浊水态(藻型),即稳态转换^[1-3]。湖泊状态的转换使湖泊有机质的来源、转化过程发生改变,必将使湖泊有机质的结构组成产生差异,进一步影响有机碳的归趋。

湖泊在碳循环过程中起重要作用^[4],有机质在沉积物上的埋藏是湖泊的碳汇功能的重要体现^[5,6]。但需要注意的是,有机质沉积后会发生进一步的代谢,特别是水溶性有机质容易参与反应。沉积物中的有机质(OM)在早期的成岩过程中可能被微生物代谢,部分被矿化为 CO_2 或 CH_4 ^[7,8]。另外,OM在沉积物上的输入还会影响金属物质的循环。例如:有机质与沉积物中Cd的络合作用导致藻华暴发期间水体中Cd浓度的大幅度增加^[9]。

草、藻湖区中,沉水植物和浮游植物来源的OM组成性质有较大的差异:从元素组成来看,沉水植物和浮游植物的C/N范围分别为10~30和3~8;碳13同位素($\delta^{13}\text{C}$)值的范围为 -28‰ ~ -18‰ 和 -24‰ ~ -42‰ ^[10,11]。从物质组成来看,藻类来源的有机质含有较多的多糖物质,而沉水植物来源的有机质含有较多的多酚物质,芳香性较强^[12,13]。姚昕等^[14]采用三维荧光光谱-平行因子分析法对太湖草(马来眼子菜)和藻(蓝藻)来源的溶解性有机质(DOM)进行表征,结果发现藻源DOM以类色氨酸组分为主,而草源DOM的荧光物质则主要以类络氨酸组分为主。OM的组成决定了其归趋:C/N较低的有机质更容易被微生物利用^[15];含苯环或芳香性结构的物质更容易和铁(氢)氧化物等矿物结合^[16],但也有研究说明,蛋白质能通过和矿物的结合在沉积物中保存下来^[17]。目前为止,有关草型和藻型湖泊沉积物中有机质的组成,特别是分子结构还没有得到系统地研究。

本文选取东太湖(草型湖区)和梅梁湾(藻型湖区)为研究地点,采集两个湖区沉积物,进行水溶性有机质(water soluble organic matter, WSOM)的提取和纯化,并采用紫外-可见光谱、三维荧光光谱、傅立叶红外光谱和傅里叶变换离子回旋共振质谱(FT-ICR MS)对提取的WSOM的组成和分子结构进行详尽的分析。近年来发展的FT-ICR MS具有超高分辨率,能精确判定物质的准确分子式,是研究水体有机质结构组成的重要手段^[18-20]。本研究通过揭示浅水湖泊两种典型状态沉积物OM的组成结构,以期

为湖泊沉积物的温室气体排放和有机质参与的其他物质的生物地球化学过程提供依据。

1 材料与方法

1.1 沉积物采集

于2019年5月25日,在太湖典型草型湖区(东太湖, $31^{\circ}02'03''\text{N}$, $120^{\circ}25'47''\text{E}$,可见生长的水草)和藻型湖区(梅梁湾, $31^{\circ}26'03''\text{N}$, $120^{\circ}11'18''\text{E}$,水华暴发初期)用抓泥器各抓取沉积物(0~10 cm),放入保温箱带回实验室分批进行冷冻干燥。将冷冻干燥后的沉积物样品进行混合研磨,过400目筛备用。

1.2 WSOM 提取和纯化

WSOM提取:将草、藻湖泊沉积物和水以1:10的比例(100 g:1 000 mL)混合置于1 L烧杯中(烧杯外用锡箔纸包裹以消除光照影响),搅拌24 h后离心,上清液过0.22 μm 膜(Millex-GP),即得草、藻型湖区沉积物水溶性有机质(分别记为M-WSOM和A-WSOM)。

采用PPL柱子固相萃取法对上述得到的DOM溶液进行纯化^[21-23]:将WSOM水溶液按5 mL $\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度通过柱子,用甲醇洗脱固相萃取柱中吸附的有机质,得到的洗脱液经氮吹后得到固体M-WSOM和A-WSOM样品。将M-WSOM和A-WSOM固体配置成DOC浓度为6 mg $\cdot\text{L}^{-1}$ 的水溶液样品,进行紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱分析;固体样品进行红外光谱分析;少量样品溶于甲醇:水=1:1(体积比)溶液中,进行FT-ICR MS分析。

1.3 DOM 性质和组成分析

(1)DOC浓度的测定 依托南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,采用总有机碳分析仪(Torch,TELEDYNE TEKMAR公司)进行测定。

(2)三维荧光光谱(EEM) 利用日立F-7000荧光光谱仪(Hitachi High-Technologies)进行测定。激发波长设置为200到450 nm,设置间隔5 nm;发射波长设置为250~550 nm,设置间隔1 nm。依据日立F-7000说明书对仪器进行校正^[24]。首先对需要测定的三维荧光光谱进行校正:①利用紫外-可见吸收光谱获得的数据进行内滤效应修正^[25];②用Milli-Q纯水进行空白扣除;③利用Milli-Q水的拉曼单位归一化(Raman unit, R. U.)来校准日常的荧光强度的变化。本研究的样品个数有限,结合基于这两种WSOM和Fe(III)、P共沉淀反应得到的上清液的EEM(总样品数75个,该实验研究OM组成对OM与Fe、P共沉淀反应的影响)^[26],进行平行因子分析:通过DOMFluor工具箱在软件MATLAB

R2008a 中得到 4 种荧光组分模型(C1 ~ C4),利用折半分析(split-half analysis)与随机初始化(random initialization)方法进行验证.

(3) 紫外-可见光全波扫描光谱(UV-Vis Spectra) 使用 Lambda 35(Perkin Elmer)紫外可见分光光度计测定,测试范围为 200 ~ 800 nm,参比为 Milli-Q 水.根据式(1)和(2),通过一定波长下的吸光度计算得到该波长下的吸收系数^[27].

$$a'(\lambda) = 2.303 \times A(\lambda) / r \quad (1)$$

式中, $a'(\lambda)$ 为波长 λ 下未校正的吸收系数(m^{-1}); $A(\lambda)$ 为吸光度; λ 为波长(nm); r 为光程路径(0.01 m).由于过滤清液可能残留细小颗粒会引起散射,为此作如下散射效应订正^[15]:

$$a(\lambda) = a'(\lambda) - a'(750) \times \lambda / 750 \quad (2)$$

式中, $a(\lambda)$ 为校正后波长 λ 下的吸收系数(m^{-1}).

利用 $\text{SUVA}_{254} [A_{254} / \text{DOC}, \text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}]$ 表征 DOM 中芳香烃结构复杂度^[28],其数值与 DOM 的腐殖性正相关; $E_2 : E_3 (a_{250} : a_{365})$ 表征有机质的芳香性、相对分子质量大小和腐殖化程度^[29]. HIX (humification index) 为腐殖化指数,是激发波长为 254 nm,发射波长 435 ~ 480 nm 范围荧光强度的平均值与 300 ~ 345 nm 范围荧光强度平均值的比值^[30]; FI 为荧光指数,是激发波长为 370 nm,发射波长 520 nm 荧光强度与 470 nm 荧光强度的比值^[31]; 自生源指数(BIX),是激发波长为 310 nm,发射波长 380 nm 荧光强度与 430 nm 荧光强度的比值^[31].

(4) 傅里叶变换红外光谱 依托南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,采用傅里叶变换红外光谱仪(iS50, Thermo Fisher)进行测定.

(5) 傅里叶变换-离子回旋共振-质谱 采用的高分辨质谱为美国布鲁克(Bruker)公司的 Solarix 9.4T FT-ICR MS; ESI 电离源为 Apollo II ESI 电离源(负离子模式).

根据修正的芳香性指数 $[AI_{\text{mod}}, \text{式}(3)]$ ^[32]和分子式的化学计量特征,将得到的分子式分成以下几大类:稠环芳烃(CAS, $AI_{\text{mod}} > 0.67$),芳香类物质

(AS, $0.5 < AI_{\text{mod}} \leq 0.67$), 不饱和低氧类物质(HUSLO, $AI_{\text{mod}} < 0.5$, $H/C < 1.5$, $O/C < 0.5$), 不饱和高氧类物质(HUSHO, $AI_{\text{mod}} < 0.5$, $H/C < 1.5$, $0.5 \leq O/C \leq 0.9$), 脂肪烃($1.5 \leq H/C \leq 2$, $O/C < 0.9$, $N = 0$), 多肽类($1.5 \leq H/C \leq 2$, $O/C < 0.9$, $N > 0$), 糖类($O/C > 0.9$)^[19,33,34].

$$AI_{\text{mod}} = \frac{1 + C - \frac{1}{2}O - S - \frac{1}{2}(N + P + H)}{C - \frac{1}{2}O - N - S - P} \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 草、藻湖区沉积物元素组成比较

草型湖区沉积物样品中 $\omega(C)$ 、 $\omega(N)$ 和 $\omega(P)$ 分别是 3.26%、0.43% 和 0.061%; 藻型湖区沉积物样品中 $\omega(C)$ 、 $\omega(N)$ 和 $\omega(P)$ 为 1.8%、0.28% 和 0.046%. 草、藻湖区沉积物样品的 C:N 分别为 7.58 和 6.42.

2.2 草、藻湖区沉积物 WSOM 的吸收光谱和荧光光谱分析

草、藻湖区沉积物 WSOM 样品的光谱指标见表 1. 草、藻湖区沉积物 WSOM 的 SUVA_{254} 分别是 3.58 和 3.20; 说明东太湖 WSOM 的芳香化程度略高于梅梁湾,而腐殖化指数 HIX 分别为 2.16 和 1.78,也印证了东太湖 WSOM 的芳香化程度较高.

东太湖和梅梁湾的沉积物 WSOM 的 $E_2 : E_3$ 值分别为 4.57 和 4.80,也说明了东太湖沉积物 WSOM 的相对分子量比梅梁湾的高.但两者均大于 3.5,说明提取的 WSOM 以富里酸为主^[35].

东太湖和梅梁湾湖区沉积物样品 WSOM 的 BIX 值分别为 0.86 与 0.97,说明两个湖区沉积物 WSOM 均有明显的自生源特征,生物可利用性较高,其中梅梁湾沉积物 WSOM 的自生源特征更强.东太湖和梅梁湾沉积物样品 WSOM 的 FI 值分别为 2.12 和 2.17,都大于 1.9,说明两个湖区沉积物 WSOM 的主要来源为微生物产生,与 BIX 指标的结论一致.

表 1 东太湖(草型湖区)和梅梁湾(藻型湖区)沉积物 WSOM 的光谱指标

Table 1 Optical index of WSOM samples from sediments of East Taihu Lake (macrophyte-dominated zone) and Meiliang Bay (algae-dominated zone)

湖区	SUVA_{254}	$E_2 : E_3$	FI	BIX	HIX	% C1	% C2	% C3	% C4
东太湖	1.55	4.57	2.12	0.86	2.16	34.2	28.2	19.9	17.7
梅梁湾	1.39	4.80	2.17	0.97	1.78	29.5	33.3	17.5	19.7

PARAFAC 模型鉴定出 4 种荧光组分(图 1): C1(component 1)组分出现一个激发波长峰值($E_x =$

295 nm),其对应相同的发射波长峰值为 $E_m = 410$ nm,推断是 UVA 类腐殖质,该类腐殖质分子量比较

低,海洋中较常见并与生物活动有关,但在废水、湿地和农业环境中也有发现^[36]; C2 (component 2) 组分出现一个荧光峰值,所对应的激发波长和发射波长分别为 $E_x = 275$ nm、 $E_m = 346$ nm,荧光特征类似于游离或结合在蛋白质中的色氨酸,推测为类色氨酸物质;与传统的 T 峰对应^[37]. C3 (component 3) 出现两个激发波长峰值(E_x 为 265 nm 和 365 nm),对应的发射波长峰值为 $E_m = 458$

nm,推断为类腐殖质;其中,265 nm 激发峰对应传统的 A 峰,365 nm 激发峰对应传统的 C 峰,分别指示紫外光区和可见光区的类富里酸荧光^[37]. C4 (component 4) 在 $E_x = 270$ nm、 $E_m = 306$ nm 处出现一个较强的荧光峰,在 $E_x = 270$ nm、 $E_m = 416$ nm 附近出现一个小峰,荧光特征更类似于游离或结合在蛋白质中的酪氨酸,因此推测其为类酪氨酸物质^[36,38].

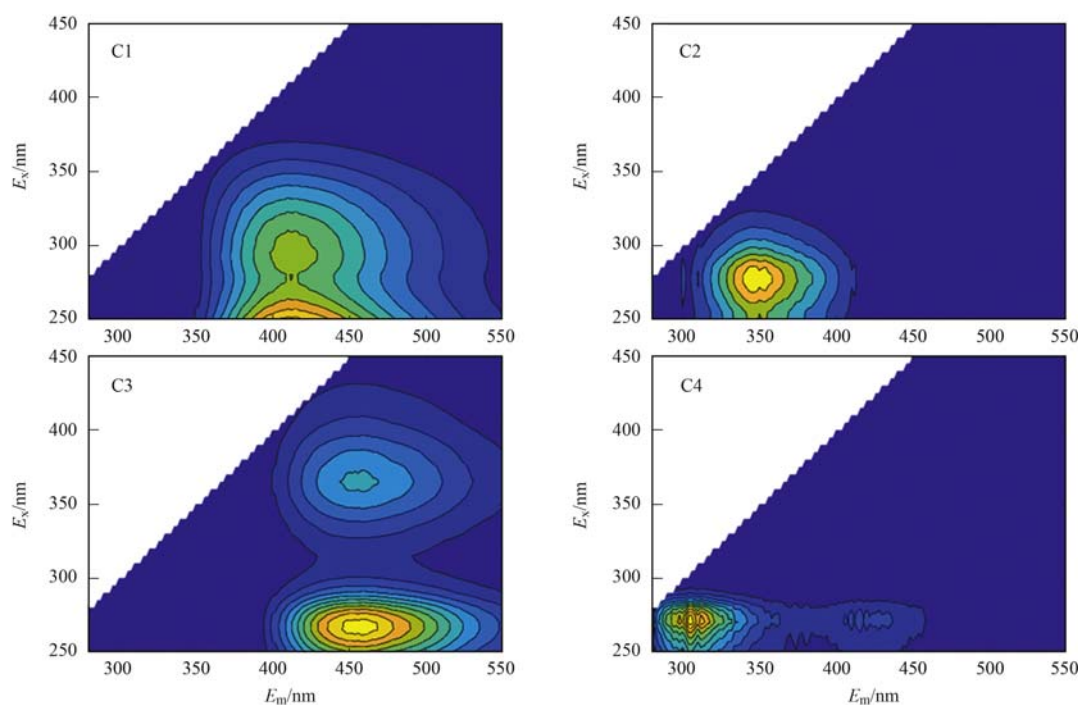


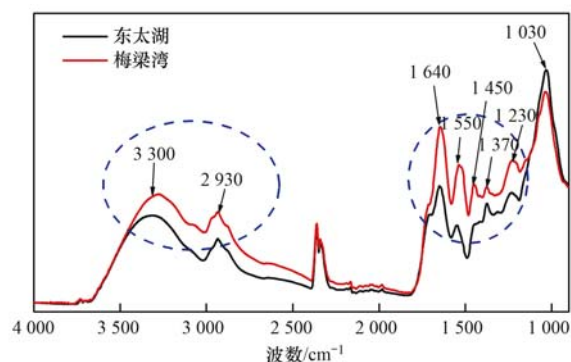
图1 东太湖(草型湖区)和梅梁湾(藻型湖区)WSOM 中 EEM-PARAFAC 组分(C1~C4)激发-发射光谱特征

Fig. 1 Excitation-emission spectra of the four PARAFAC components in WSOM samples from sediments of East Taihu Lake (macrophyte-dominated zone) and Meiliang Bay (algae-dominated zone)

草型湖泊沉积物提取的 WSOM 溶液 [$\rho(\text{DOC}) = 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$] 中 C1~C4 的荧光强度分别为 0.79、0.65、0.46 和 0.41 R. U., 各组分对总荧光强度的贡献率分别为 34.2%、28.2%、19.9% 和 17.7% (表 1); 类腐殖质(C1 和 C3)贡献率(54.06%)略高于类蛋白质(C2 和 C4)的(45.94%). 藻型湖区沉积物提取的 WSOM 溶液 [$\rho(\text{DOC}) = 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$] 中 C1~C4 的荧光强度分别为 0.73、0.83、0.44 和 0.49 R. U., 各组分对总荧光强度的贡献率分别为 29.48%、33.27%、17.49% 和 19.76%; 与东太湖沉积物 WSOM 相反,梅梁湾沉积物 WSOM 类腐殖质贡献率(46.97%)略低于类蛋白质的(53.03%).

2.3 傅里叶红外光谱分析

图 2 为东太湖(草型湖区)和梅梁湾(藻型湖区)沉积物样品中 WSOM 的红外光谱图,两个湖区沉积物 WSOM 的吸收峰位置接近,包括 1030、1230、1370、1450、1550、1640、2930 和 3300



蓝色虚线框表示草型湖区和藻型湖区沉积物 WSOM 红外光谱差异较大之处

图2 东太湖(草型湖区)和梅梁湾(藻型湖区)沉积物 WSOM 的红外光谱特征

Fig. 2 Infrared spectra characteristics of WSOM samples from sediments of East Taihu Lake (macrophyte-dominated zone) and Meiliang Bay (algae-dominated zone)

cm^{-1} . 这些峰可能对应的基团和物质见表 2. 由此可见,两个湖区沉积物中均含有醇、酚、脂肪类物质、

芳香族物质和蛋白质. 对比两个湖区沉积物 WSOM 的红外光谱,发现两个波长范围(图 2 蓝色椭圆)相近波数处的峰强度存在较大的差异,特别地,A-

WSOM 中 $1\,640\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,550\text{ cm}^{-1}$ 的峰较 M-WSOM 更为明显,推测 A-WSOM 中可能含有更多的含羧基物质和蛋白质.

表 2 东太湖(草型湖区)和梅梁湾(藻型湖区)沉积物 WSOM 红外光谱特征峰指征

Table 2 Assignment of infrared spectra characteristic peaks for WSOM samples from sediments of East Taihu Lake and Meiliang Bay

波数/ cm^{-1}	基团类型	可能物质
3 270 ~ 3 400	羟基 O—H 伸缩	纤维素 ^[39,40]
2 920 ~ 2 940	脂肪族 CH_2 的 C—H 伸缩	脂肪、蜡和脂质 ^[39,40]
1 640 ~ 1 650	芳香 C=C 伸缩或 COO—中的不对称 C—O 伸缩	含羧基物质 ^[40,41]
1 540 ~ 1 550	酰胺中的 N—H 伸缩	蛋白质 ^[42,43]
1 447 ~ 1 452, 1 370 ~ 1 380	C—H 变形	木质素和脂肪族结构 ^[44]
1 225 ~ 1 238	酚羟基或芳基甲基醚的 C—O 伸缩	木质素主干 ^[39,41,42]
1 030 ~ 1 040	C—O 伸缩和 O—H 变形结合	多糖 ^[39,45]

2.4 傅里叶变换-离子回旋共振-质谱(FT-ICR MS)

草、藻湖区沉积物 WSOM 分子的范式图[O/C vs. H/C,并按所含 N 原子的个数(0~4)进行划分]显示(图 3),草型湖区沉积物 WSOM 的分子数更多;草、藻湖区沉积物 WSOM 中分子数分别为3 276 和1 476.表 3 列出了草、藻湖区沉积物 WSOM 中的各种组分和不同元素组成分子的强度加权平均占比

和分子数占比.草、藻湖区沉积物中,仅含 C、H 和 O 这 3 种元素的分子数少,按分子数平均来看,仅分别占了 19.1% 和 20.1%;而大部分分子中含有 N 元素,M-WSOM 和 A-WSOM 中分别有 64.5% 和 66.9% (分子数占比),或 53.5% 和 78.5% (强度加权平均占比);而含 P 和 S 杂原子的分子数也占到 20% 左右.

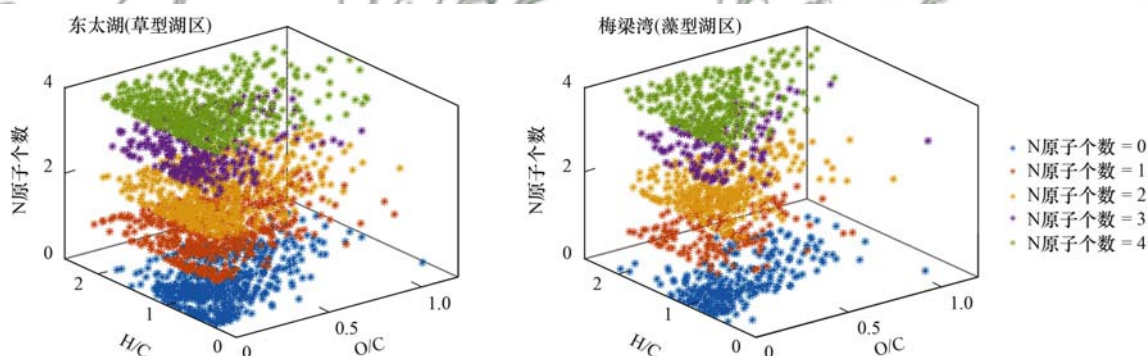


图 3 东太湖(草型湖区)和梅梁湾(藻型湖区)沉积物 WSOM 分子的范式图

Fig. 3 Van Krevelen diagrams of WSOM samples from sediments of East Taihu Lake (macrophyte-dominated zone) and Meiliang Bay (algae-dominated zone)

从物质的组成(强度加权平均)看,两个湖区沉积物 WSOM 中物质占比最高的为 HUSLO 物质(高度不饱和,低氧物质;M-WSOM 和 A-WSOM 分别为 33.7% 和 38.8%);随后,依次是脂肪烃(23.6% 和 12.3%)和多肽(15.6% 和 35.5%).对比两个湖区

沉积物 WSOM,M-WSOM 含有更多的含苯环物质:稠环芳烃(6.3% vs. 1.1%)、芳香类物质(7.7% vs. 4.4%)和更多的脂肪烃(23.6% vs. 12.3%),更少的多肽(15.6% vs. 35.5%)和 HUSLO (33.7% vs. 38.8%).

表 3 东太湖(草型湖区)和梅梁湾(藻型湖区)沉积物 WSOM 分子元素组成和物质组成占比

Table 3 Percentage of molecular composition of WSOM from sediments of East Taihu (macrophyte-dominated zone) and Meiliang Bay (algae-dominated zone)

项目	湖区	分子数	相对分子质量	仅含 CHO /%	含 N /%	含 S /%	含 P /%	稠环芳烃 /%	芳香类 /%	不饱和和低氧类 /%	不饱和和高氧类 /%	脂肪烃 /%	多肽类 /%	糖类 /%
强度加权平均占比	东太湖	3 276	388.9	17.1	53.5	22.2	30.4	6.3	7.7	33.7	5.7	23.6	15.6	2.4
	梅梁湾	1 476	379.9	8.3	78.5	15.9	41.4	1.1	4.4	38.8	1.4	12.3	35.5	0.6
分子式占比	东太湖			19.1	64.5	19.5	23.2	9.8	11.5	27.3	9.3	10.9	19.8	4.5
	梅梁湾			20.1	66.9	20.5	22.5	4.6	9.4	33.9	6	11.5	24.9	3.1

由于含有杂原子的分子较多,笔者对含不同元素的分子(分别是仅含 C、H 和 O 原子的分子、含 1~4 个 N 原子的分子、含 P 原子的分子和含 S 原子的分子)进行组分判定,并计算各组分的强度加权平均百分比,结果见图 4 和表 4. 在仅含 CHO 的分子中,HUSLO 的占比最大,M-WSOM 和 A-WSOM 分别为 49.8% 和 62.4%,其次为脂肪烃(14.2% 和 15.8%)和芳香烃(12.6% 和 11.8%). 含有 N 元素的物质主要是多肽和 HUSLO;其中含 1~3 个 N 原子的物质中多肽物质占主导. 对于 M-WSOM,含 1~3 个 N 原子物质中,多肽占比分别是 39.2%、31.3% 和 32.3%;而 A-WSOM 含 1~3 个 N 原子物质中,多肽占比更高,达到 54.4%、74.6% 和 53.6%. 而对于含 4 个 N 原子的物质中,HUSLO 占比最高;M-WSOM 和 A-WSOM 两种样品含 4 个 N 原子物质中 HUSLO 占比分别是 55.8% 和 69.0%.

P 原子在草藻湖区沉积物 WSOM 各物质中的分布出现了较大的差异:在 A-WSOM 中,P 主要是分布在多肽和 HUSLO 中,分别占有含 P 物质的 67.8% 和 16.3%. 而在 M-WSOM 中,P 主要分布在脂肪烃、HUSLO 和多肽中,分别占有含 P 物质的 30.5%、27.1% 和 23.0%. 含硫元素的分子主要分布在脂肪烃中,M-WSOM 和 A-WSOM 中含 S 的脂肪烃占有含 S 分子的 56.3% 和 65.2%,其次为多肽(9.8%, 15.2%)和 HUSLO(14.2% 和 8.8%). 值得注意的是,稠环芳烃中含有部分 N、P 和 S. 与黑碳(black carbon)对应,这部分的 N、P 和 S 被认为是黑氮、黑磷和黑硫(black nitrogen, black phosphorus 和 black sulfur). 其中 M-WSOM 中黑氮、黑磷和黑硫分别占含 N、P 和 S 分子的 6.9%、3.9% 和 2.4%;而在 A-WSOM 中则分别占 2.0%、0.7% 和 0.3%.

表 4 东太湖(草型湖区)和梅梁湾(藻型湖区)沉积物 WSOM 物质组成强度加权平均占比¹⁾
Table 4 Intensity-weighted percentage of molecular composition of WSOM from sediments of East Taihu Lake (macrophyte-dominated zone) and Meiliang Bay (algae-dominated zone)

湖区	类别	分子数	稠环芳烃 /%	芳香类 /%	不饱和和低氧类 /%	不饱和和高氧类 /%	脂肪烃 /%	多肽类 /%	糖类 /%
东太湖	整体	3 280	6.3	7.7	33.7	5.7	23.6	15.6	2.4
	仅含 C、H 和 O 原子	626	13.8	12.6	49.8	7.2	14.2	0.0	2.0
	含 1 个 N 原子	603	9.9	8.4	18.8	8.4	0.0	39.2	3.8
	含 2 个 N 原子	599	8.3	12.5	33.4	5.1	0.0	31.3	4.7
	含 3 个 N 原子	331	4.3	10.2	27.8	8.5	0.0	32.2	3.5
	含 4 个 N 原子	580	5.2	9.0	55.8	3.2	0.0	22.2	1.2
	含 S 原子	640	3.9	0.6	14.2	4.4	56.3	9.8	1.5
	含 P 原子	761	2.4	1.5	27.1	3.9	30.5	23.0	1.6
梅梁湾	整体	1 480	1.1	4.4	38.8	1.4	12.3	35.5	0.6
	仅含 C、H 和 O 原子	297	1.6	11.8	62.4	6.9	15.8	0.0	1.4
	含 1 个 N 原子	174	1.9	3.4	28.0	4.1	0.0	54.4	1.5
	含 2 个 N 原子	334	0.6	1.2	20.6	0.6	0.0	74.6	0.4
	含 3 个 N 原子	143	4.0	6.9	28.0	2.0	0.0	53.6	2.0
	含 4 个 N 原子	336	1.4	7.7	69.0	0.4	0.0	8.6	0.4
	含 S 原子	302	0.7	0.5	8.8	1.9	65.2	15.2	1.1
	含 P 原子	332	0.3	0.8	16.3	0.4	2.4	67.8	0.2

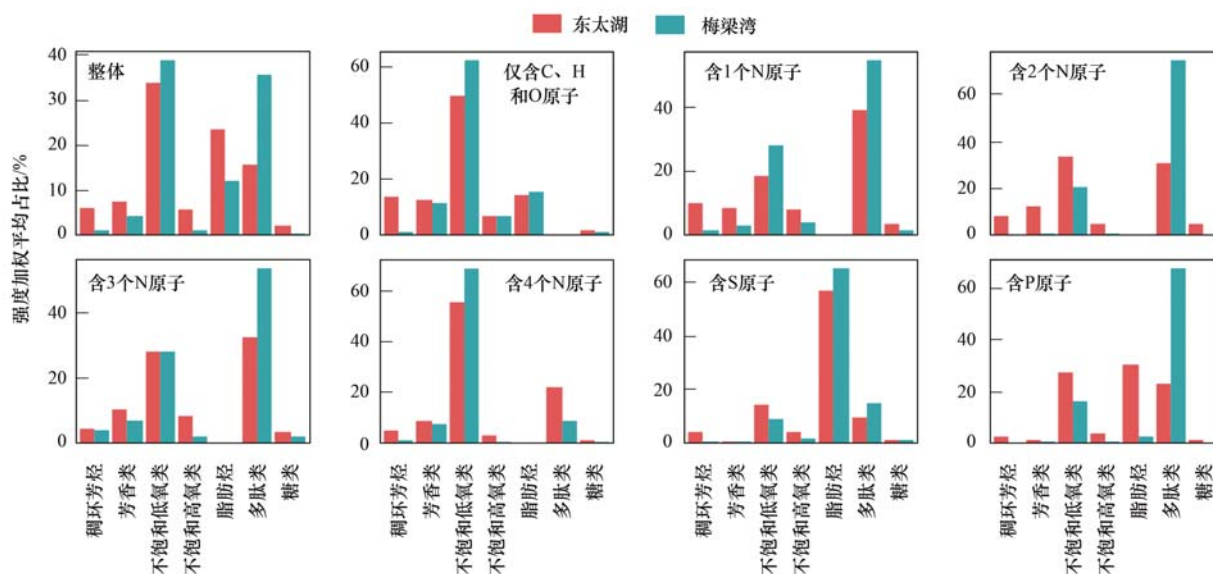
1) 按不同元素组成划分: 所有分子、仅含 C、H、O 原子的分子、含 1~4 个 N 原子的分子、含 P 原子的分子和含 S 原子的分子

沉积物 WSOM 的吸收光谱、三维荧光光谱、红外光谱和 FT-ICR MS 互相印证,结果统一. ①吸收光谱指标 $E_2:E_3$ 说明 M-WSOM 比 A-WSOM 的相对分子量稍大,FT-ICR MS 的数据也显示,M-WSOM 和 A-WSOM 的相对分子量分别为 388.9 和 379.9,印证了吸收光谱表征的结果;②M-WSOM 的芳香性略高于 A-WSOM 的(SUVA₂₅₄ 和 HIX 指标),同样地,FT-ICR MS 的结果也显示,M-WSOM 中稠环芳烃和芳香烃物质的含量高于 A-WSOM;③PARAFAC 组分结果表明 A-WSOM 中类蛋白质组分的含量大于 M-WSOM 的,FT-ICR MS 的结果与之对应,A-WSOM 中多肽含量大于 M-WSOM,A-WSOM 中含 N 元素的

物质高于 M-WSOM;④红外光谱显示,A-WSOM 中含有更多的蛋白质类,这与荧光光谱结果和 FT-ICR MS 结果一致.

3 讨论

湖泊有机质的来源包括外源(流域输入)和内源(湖泊中浮游植物、沉水植物和微生物等各生物体生长衰亡过程产生). 与金属矿物的结合使水体中 DOM 沉降到沉积物. 另外,一些有机碎屑在沉积物上的沉降和后续分解也是沉积物 OM 的一个来源. 草藻湖区中内源有机质存在着明显的差异:对太湖中沉水植物(马来眼子菜)和藻类(蓝藻)衰亡



按不同元素组成划分: 所有分子、仅含 C、H、O 原子的分子、含 1~4 个 N 原子的分子、含 P 原子的分子和含 S 原子的分子

图4 东太湖(草型湖区)和梅梁湾(藻型湖区)沉积物 WSOM 物质组成强度加权平均占比

Fig. 4 Intensity-weighted percentage of molecular composition of WSOM from sediments of East Taihu Lake (macrophyte-dominated zone) and Meiliang Bay

(部分经微生物改造)的 DOM 的研究表明,马来眼子菜产生的 OM 分子量较大^[13],藻源 DOM 以类色氨酸组分为主,而草源 DOM 的荧光物质则主要以类酪氨酸组分为主^[14,46],且藻源 DOM 更容易被生物降解;相对于蓝藻,沉水植物产生的有机质含有更多的苯环类物质^[47].其次,草藻湖区中生物群落和生物多样性的差异,也可能导致两个湖区有机质性质的不同.在高等水生植物为主的湖泊中,属于 β 变形菌门的细菌占有优势;而在微囊藻占优势的湖泊(湖区)中,占优势的为放线菌门的浮游细菌^[48].不同微生物对有机质的利用转化可能导致有机质性质的差异.

FT-ICR MS 的数据显示,草型沉积物 WSOM 中含有比藻型沉积物 WSOM 更多的分子数(分别为 3 280 和 1 480),这可能与两个湖区中的生物多样性有关:草型湖区的生物多样性高于藻型湖区^[49];其次,FT-ICR MS 测试的前处理和测试方法也需要考虑:本研究采用的负电离模式的测定更有利于含羧基和酚羟基基团的分子,而对含 NH_2 基团物质的检出不利^[18].

本研究的结果显示,两个湖区沉积物 WSOM 中高度不饱和和低氧物质(HUSLO)均具有很大的丰度.有研究报道,随着 DOM 被改造时间的延长,还原性(O/C 比例低)的物质丰度增加,这可能与高 O/C 比物质更容易被生物降解有关^[50].He 等^[33]研究的河流沉积物有机质的组成也以高度不饱和物质为主,含量接近一半,其中低氧物质占优势.从元素组成来看,本研究的沉积物 WSOM 中仅含 CHO 的物质含

量较低(草型:17.1%;藻型:8.3%);大部分(53.5%和78.5%)含有 N 元素;这与一些淡水水体的 OM 中仅含 CHO 分子百分比较高不同,例如,Champlain 湖的湖湾中含 60%~70% 的 CHO^[51],西藏地区冰川和湖泊 DOM 含 40% 左右的 CHO 分子^[52].相对于水体,沉积物 OM 可能含有更多的杂原子;She 等^[53]研究了一个深水湖泊中 DOM 的分层分布,发现较表层水,底层水 OM 含杂原子的丰度较大,并认为是由于底层水和沉积物的物质交换引起的;沉积物样品中含有较多的含 N 分子可能是沉积物-水界面微生物活动引起的^[54].本研究结果显示,藻型湖泊中含 1~3 个 N 原子分子有 50%~70% 是多肽类;这类物质(C/N 比例较低)较容易被微生物利用,且处于沉积物厌氧环境,可增强温室气体 CH_4 的释放^[55,56].

太湖草藻湖区沉积物 WSOM 分子中含 S 元素的分子占比达到 22.2% (草型湖区)和 15.9% (藻型湖区);相对于水中的 DOM,沉积物中 S 的含量较大,可能是在缺氧的沉积物中,微生物利用 S 为电子受体^[57,58],产生了含硫有机物.与文献报道的河流沉积物中碱提的 OM 相似^[33],脂肪烃中较其他物质富含 S 原子,这些物质可能含有一些硫基团如磺酸、噻吩和砜类.值得注意的是,太湖草藻湖区沉积物 WSOM 中,稠环芳烃中含有 N 和 S,说明了有黑氮(black nitrogen)和黑硫(black sulfur)的存在;这些物质不容易被利用,因此,它们可能被用来指示物质的来源和相应元素的归趋^[33,50].由于内源磷负荷是富营养化湖泊修复的主要障碍,有机磷通常被认

为是具有活性的磷,是内源磷负荷的组成部分.本研究的结果表明,藻型湖泊沉积物 WSOM 中含 P 元素多数为多肽物质,这些物质容易被微生物利用,可能加速磷物质的循环.而相对地,草型湖区沉积物 WSOM 中 P 更多集中在脂肪烃和 HUSLO;这两类物质相对来讲不容易被循环利用,有利于减少草型湖区的内源磷负荷.

4 结论

(1) 较 A-WSOM 而言, M-WSOM 相对分子量 ($E_2:E_3$ 指标) 更大, 芳香性 ($SUVA_{254}$ 和 HIX 指标) 更高; EEM-PARAFAC 组分组成表明, M-WSOM 中, 类腐殖质组分占比 (54.06%) 略高于类蛋白质组分的占比 (45.94%); 而 A-WSOM 中, 类腐殖质组分和类蛋白组分的占比分别是 46.97% 和 53.09%.

(2) 红外光谱表明, 两个湖区沉积物 WSOM 中含有的基团较类似, 均含有醇、酚、脂肪类物质、芳香族物质和蛋白质, 但 A-WSOM 中含羧基物质和蛋白质略高于 M-WSOM.

(3) FT-ICR MS 结果提供了详细的、高分辨的分子组成信息: 草、藻湖区沉积物 WSOM 的相对分子量分别为 388.8 和 379.9, M-WSOM 中稠环芳烃 (6.3%, 强度加权平均百分比, 下同) 和芳香类物质 (7.7%) 的含量高于 A-WSOM 的 (1.1% 和 4.4%), 印证了吸收光谱的表征; A-WSOM 多肽含量 (15.2%) 大于 M-WSOM (9.8%), 与三维荧光表征结果相对应.

(4) 值得注意的是, 草、藻湖区沉积物 WSOM 中含杂原子的分子分别占 82.9% 和 91.7%; 其中含 N 分子占比高达 53.5% 和 78.5%; 含 P 分子占 30.4% 和 41.4%, M-WSOM 中 P 元素主要分布在脂肪烃和高度不饱和和低氧物质中, 而 A-WSOM 中主要分布在多肽中. 草、藻湖区中 P 元素存在形式的不同预示着藻型湖区沉积物中内源有机磷的利用性较强, 容易被利用循环, 可能对湖泊富营养化产生正反馈.

参考文献:

[1] Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, *et al.* Catastrophic shifts in ecosystems[J]. *Nature*, 2001, **413**(6856): 591-596.

[2] Scheffer M, Hosper S H, Meijer M L, *et al.* Alternative equilibria in shallow lakes[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1993, **8**(8): 275-279.

[3] 张晨雪, 徐敏, 董一凡, 等. 硅藻群落指示的近 50 年来大理西湖湖泊生态系统演变规律[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4572-4580.

Zhang C X, Xu M, Dong Y F, *et al.* Sedimentary diatom records reveal the succession of ecosystem in Lake Xihu, Dali over the past 50 years[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4572-4580.

[4] Tranvik L J, Cole J J, Prairie Y T. The study of carbon in inland waters—from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, **3**(3): 41-48.

[5] Dean W E, Gorham E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands[J]. *Geology*, 1998, **26**(6): 535-538.

[6] Drake T W, Raymond P A, Spencer R G M. Terrestrial carbon inputs to inland waters: a current synthesis of estimates and uncertainty[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, **3**(3): 132-142.

[7] Burdige D J. Preservation of organic matter in marine sediments: controls, mechanisms, and an imbalance in sediment organic carbon budgets? [J]. *Chemical Reviews*, 2007, **107**(2): 467-485.

[8] Gudas C, Bastviken D, Premke K, *et al.* Constrained microbial processing of allochthonous organic carbon in boreal lake sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 2012, **57**(1): 163-175.

[9] Chen M S, Ding S M, Li C, *et al.* High cadmium pollution from sediments in a eutrophic lake caused by dissolved organic matter complexation and reduction of manganese oxide [J]. *Water Research*, 2021, **190**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116711.

[10] Lamb A L, Wilson G P, Leng M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}C$ and C/N ratios in organic material [J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, **75**(1-4): 29-57.

[11] Meyers P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**(2): 261-289.

[12] Torremorell A, Pérez G, Lagomarsino L, *et al.* Microbial pelagic metabolism and CDOM characterization in a phytoplankton-dominated versus a macrophyte-dominated shallow lake [J]. *Hydrobiologia*, 2015, **752**(1): 203-221.

[13] Zhang Y L, Liu X H, Wang M Z, *et al.* Compositional differences of chromophoric dissolved organic matter derived from phytoplankton and macrophytes [J]. *Organic Geochemistry*, 2013, **55**: 26-37.

[14] 姚昕, 张运林, 朱广伟, 等. 湖泊草、藻来源溶解性有机质及其微生物降解的差异[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(3): 688-694.

Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Different degradation mechanism of dissolved organic matter derived from phytoplankton and macrophytes in Lake Taihu, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(3): 688-694.

[15] Schallenberg M, Kalff J. The ecology of sediment bacteria in lakes and comparisons with other aquatic ecosystems [J]. *Ecology*, 1993, **74**(3): 919-934.

[16] Sowers T D, Holden K L, Coward E K, *et al.* Dissolved organic matter sorption and molecular fractionation by naturally occurring bacteriogenic iron (oxyhydr)oxides [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(8): 4295-4304.

[17] Kleber M, Sollins P, Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **85**(1): 9-24.

[18] Kim S, Kim D, Jung M J, *et al.* Analysis of environmental organic matters by ultrahigh-resolution mass spectrometry-A review on the development of analytical methods [J]. *Mass Spectrometry Reviews*, 2021, doi: 10.1002/mas.21684.

- [19] Kellerman A M, Dittmar T, Kothawala D N, *et al.* Chemodiversity of dissolved organic matter in lakes driven by climate and hydrology[J]. *Nature Communications*, 2014, **5**, doi: 10.1038/ncomms4804.
- [20] Koch B P, Dittmar T. From mass to structure: an aromaticity index for high-resolution mass data of natural organic matter[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2006, **20** (5): 926-932.
- [21] Dittmar T, Koch B, Hertkorn N, *et al.* A simple and efficient method for the solid-phase extraction of dissolved organic matter (SPE-DOM) from seawater[J]. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2008, **6**(6): 230-235.
- [22] 王威, 窦文渊, 何晨, 等. 多步洗脱固相萃取-傅立叶变换离子回旋共振质谱表征地表水可溶有机质[J]. *分析试验室*, 2020, **39**(5): 521-526.
Wang W, Dou W Y, He C, *et al.* Characterization of surface water dissolved organic matter by stepwise elution solid phase extraction followed by fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2020, **39**(5): 521-526.
- [23] Zhou L, Zhou Y Q, Yao X L, *et al.* Decreasing diversity of rare bacterial subcommunities relates to dissolved organic matter along permafrost thawing gradients [J]. *Environment International*, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105330.
- [24] 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.
- [25] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(1): 38-48.
- [26] 张巧颖. 草/藻湖区可溶性有机质和铁、磷的共沉淀作用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [27] Del Vecchio R, Blough N V. Photobleaching of chromophoric dissolved organic matter in natural waters: kinetics and modeling [J]. *Marine Chemistry*, 2002, **78**(4): 231-253.
- [28] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37** (20): 4702-4708.
- [29] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, **337**(2): 133-149.
- [30] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, *et al.* Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying[J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(1): 45-50.
- [31] 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 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.
- [32] Koch B P, Dittmar T. From mass to structure: an aromaticity index for high-resolution mass data of natural organic matter[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2016, **30** (1): 250.
- [33] He W, Chen M L, Park J E, *et al.* Molecular diversity of riverine alkaline-extractable sediment organic matter and its linkages with spectral indicators and molecular size distributions [J]. *Water Research*, 2016, **100**: 222-231.
- [34] Lu Y H, Li X P, Mesfioui R, *et al.* Use of ESI-FTICR-MS to characterize dissolved organic matter in headwater streams draining forest-dominated and pasture-dominated watersheds[J]. *PLoS One*, 2015, **10** (12), doi: 10.1371/journal.pone.0145639.
- [35] Strobel B W, Hansen H C B, Borggaard O K, *et al.* Composition and reactivity of DOC in forest floor soil solutions in relation to tree species and soil type[J]. *Biogeochemistry*, 2001, **56**(1): 1-26.
- [36] 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.
- [37] 黄健, 凌玲, 张华, 等. ASBR 处理食品废水中 DOM 转化过程的荧光光谱[J]. *中国环境科学*, 2016, **36** (6): 1746-1751.
Huang J, Ling L, Zhang H, *et al.* Fluorescence spectra of dissolved organic matter in food wastewater treatment by ASBR process[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1746-1751.
- [38] Murphy K R, Hambly A, Singh S, *et al.* Organic matter fluorescence in municipal water recycling schemes: toward a unified PARAFAC model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(7): 2909-2916.
- [39] Artz R R E, Chapman S J, Robertson A H J, *et al.* FTIR spectroscopy can be used as a screening tool for organic matter quality in regenerating cutover peatlands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(2): 515-527.
- [40] Coccozza C, D'Orazio V, Miano T M, *et al.* Characterization of solid and aqueous phases of a peat bog profile using molecular fluorescence spectroscopy, ESR and FT-IR, and comparison with physical properties[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, **34**(1): 49-60.
- [41] Niemeyer J, Chen Y, Bollag J M. Characterization of humic acids, composts, and peat by diffuse reflectance fourier-transform infrared spectroscopy [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, **56**(1): 135-140.
- [42] Ibarra J V, Muñoz E, Moliner R. FTIR study of the evolution of coal structure during the coalification process [J]. *Organic Geochemistry*, 1996, **24**(6-7): 725-735.
- [43] Zaccheo P, Cabassi G, Ricca G, *et al.* Decomposition of organic residues in soil: experimental technique and spectroscopic approach[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(3): 327-345.
- [44] Parker F S. Applications of infrared spectroscopy in biochemistry, biology, and medicine [M]. London: Adam Hilger, 1971.
- [45] Grube M, Lin J G, Lee P H, *et al.* Evaluation of sewage sludge-based compost by FT-IR spectroscopy [J]. *Geoderma*, 2006, **130**(3-4): 324-333.
- [46] 章奇, 居琪, 李健欣, 等. 针铁矿对湖泊草、藻来源可溶有机质的非均质吸附[J]. *湖泊科学*, 2020, **32** (4): 1041-1049.
Zhang Q, Ju Q, Li J X, *et al.* Heterogeneous adsorption of macrophyte-and algae-derived dissolved organic matter on goethite in freshwater lakes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32** (4): 1041-1049.
- [47] Riedel T, Zak D, Biester H, *et al.* Iron traps terrestrially derived dissolved organic matter at redox interfaces[J]. *Proceedings of*

- the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, **110**(25): 10101-10105.
- [48] 吴庆龙, 邢鹏, 李化炳, 等. 草藻型稳态转换对湖泊微生物结构及其碳循环功能的影响[J]. 微生物学通报, 2013, **40**(1): 87-97.
- Wu Q L, Xing P, Li H B, *et al.* Impacts of regime shift between phytoplankton and macrophyte on the microbial community structure and its carbon cycling in lakes [J]. Microbiology China, 2013, **40**(1): 87-97.
- [49] 陈美军, 孔繁翔, 陈非洲, 等. 太湖不同湖区真核微型浮游生物基因多样性的研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 769-775.
- Chen M J, Kong F X, Chen F Z, *et al.* Genetic diversity of eukaryotic microplankton in different areas of Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2008, **29**(3): 769-775.
- [50] Chen M L, Li C L, Zeng C, *et al.* Immobilization of relic anthropogenic dissolved organic matter from alpine rivers in the Himalayan-Tibetan Plateau in winter [J]. Water Research, 2019, **160**: 97-106.
- [51] Kurek M R, Harir M, Shukle J T, *et al.* Seasonal transformations of dissolved organic matter and organic phosphorus in a polymictic basin: implications for redox-driven eutrophication [J]. Chemical Geology, 2021, **573**, doi: 10.1016/J.CHEMGEO.2021.120212.
- [52] Spencer R G M, Guo W D, Raymond P A, *et al.* Source and biolability of ancient dissolved organic matter in glacier and lake ecosystems on the Tibetan Plateau [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, **142**: 64-74.
- [53] She Z X, Wang J, He C, *et al.* The stratified distribution of dissolved organic matter in an AMD Lake revealed by multi-sample evaluation procedure [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(12): 8401-8409.
- [54] Wagner S, Jaffé R, Cawley K, *et al.* Associations between the molecular and optical properties of dissolved organic matter in the florida everglades, a model coastal wetland system [J]. Frontiers in Chemistry, 2015, **3**, doi: 10.3389/fchem.2015.00066.
- [55] Praetzel L S E, Plenter N, Schilling S, *et al.* Organic matter and sediment properties determine in-lake variability of sediment CO₂ and CH₄ production and emissions of a small and shallow lake [J]. Biogeosciences, 2020, **17**(20): 5057-5078.
- [56] Zhou Y W, Song K, Han R M, *et al.* Nonlinear response of methane release to increased trophic state levels coupled with microbial processes in shallow lakes [J]. Environmental Pollution, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114919.
- [57] Hodgkins S B, Tfaily M M, Podgorski D C, *et al.* Elemental composition and optical properties reveal changes in dissolved organic matter along a permafrost thaw chronosequence in a subarctic peatland [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2016, **187**: 123-140.
- [58] Yekta S S, Gonsior M, Schmitt-Kopplin P, *et al.* Characterization of dissolved organic matter in full scale continuous stirred tank biogas reactors using ultrahigh resolution mass spectrometry: a qualitative overview [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(22): 12711-12719.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)