

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

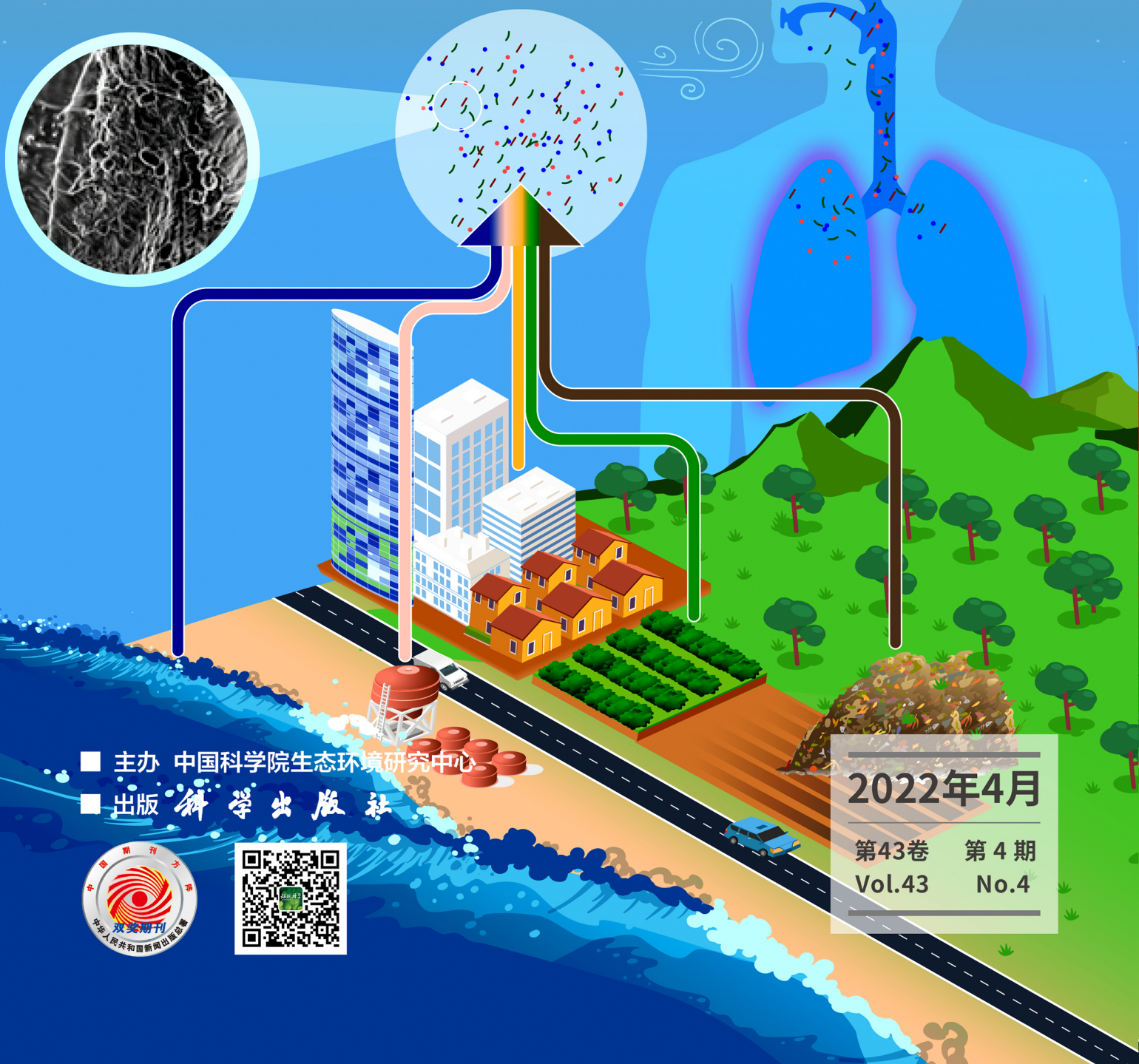
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
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	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性

程云轩^{1,2}, 赵可¹, 张越^{2,3}, 张渝婷^{2,3}, 焦立新^{2,3*}

(1. 吉林建筑大学松辽流域水环境教育部重点实验室, 长春 130000; 2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 中国环境科学研究院, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012)

摘要: 溶解性有机质(DOM)对于湖泊的主要污染指标(如 COD 等)有着较大的影响,而沉积物亦是湖泊污染的主要来源,因此沉积物 DOM 荧光光谱特性的研究对进一步揭示湖泊污染本质有重要意义。采集了松花湖 20 个点位的沉积物,利用激发发射矩阵光谱-平行因子分析(EEM-PARAFAC)技术对沉积物中的 DOM 组分进行了解析,从光谱学角度明确沉积物 DOM 的特性,并对 DOM 与水体富营养化水平之间的关系进行了初步探索。结果表明,从松花湖沉积物 DOM 中分离出 4 个组分:类腐殖质 C1(330/415 nm)、C2(255/440 nm)、C3(365/470 nm)和类蛋白 C4(280/355 nm)。较高的 HIX 和低 BIX 表明沉积物 DOM 的来源以陆源为主,包含一部分生物源。4 个组分的荧光强度存在关联,空间分布较为相似,均表现为上游(S1~S7)荧光强度高于下游(S8~S20)。而辉发河、松花江和蛟河这 3 条主要入湖河流携带的悬浮颗粒物(SPM)在入湖段大量沉积是导致这种空间分布的主要原因。松花湖水体中富营养化状况(上游富营养化水平高于下游)与沉积物 DOM 的荧光强度分布状况相似,同时松花湖下游水体富营养化水平与沉积物 DOM 荧光强度存在较强相关性。

关键词: 松花湖; 激发发射矩阵光谱-平行因子分析(EEM-PARAFAC); 沉积物; 溶解性有机物(DOM); 富营养化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1941-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108136

Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment

CHENG Yun-xuan^{1,2}, ZHAO Ke¹, ZHANG Yue^{2,3}, ZHANG Yu-ting^{2,3}, JIAO Li-xin^{2,3*}

(1. Key Laboratory of Songliao Aquatic Environment, Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, Changchun 130000, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Dissolved organic matter (DOM) has a significant impact on the main pollution indicators of the lake (e. g., COD), and sediment is the main source of pollution in the lake. Research on the fluorescence spectral characteristics of DOM in sediments is important to reveal the mechanism of lake pollution. In this study, sediments were collected from 20 sites in Songhua Lake. The DOM components in the sediment were analyzed using the excitation emission matrix-parallel factor analysis (EEM-PARAFAC) technique, and the properties of the sediment DOM were clarified via spectroscopy. Additionally, the relationship between DOM and eutrophication of the water column was explored. The results showed that four components were identified from the sediment DOM of Songhua Lake: humic-like C1 (330/415 nm), C2 (255/440 nm), C3 (365/470 nm), and protein-like C4 (280/355 nm). The high HIX and low BIX indicated that the source of sediment DOM was mainly terrestrial and included some biological sources. The spatial distribution of the fluorescence intensity of the four components was relatively similar, showing that the fluorescence intensity was higher in the upstream (S1-S7) than that in the downstream (S8-S20). The massive deposition of suspended particulate matter (SPM) carried by the three rivers (Huifa River, Songhua River, and Jiao River) was the main reason for this spatial distribution. Eutrophication status in the water column of Songhua Lake was similar to the fluorescence intensity distribution of sediment DOM. Meanwhile, there was a strong correlation between eutrophication level and sediment DOM fluorescence intensity in the downstream water column of Songhua Lake.

Key words: Songhua Lake; excitation emission matrix-parallel factor analysis (EEM-PARAFAC); sediment; dissolved organic matter (DOM); eutrophication

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是由不同官能团和分子结构组成的复杂有机混合物^[1],通常包括腐殖质、碳水化合物、蛋白类物质,并且在全球碳循环中扮演了重要的角色^[2]。天然水体中 DOM 的来源可能由水生生物释放出的植物性物质和胞外物质被微生物分解产生,亦或是由河流和地下水输送来自周围陆地环境的降解有机物质^[3]。

沉积物中汇集了包括 DOM 在内的多种污染物,是天然水体中污染物的主要来源^[4]。DOM 通过沉积物颗粒的吸附和释放过程以及微生物的分解,从沉积物颗粒进入上覆水中^[5]。因此 DOM 是将污

染物从沉积物转移到上覆水的关键一环^[6,7]。同时有研究表明沉积物中 DOM 含量和组成的变化影响着湖泊生态系统中氮和磷的循环^[8]。而氮和磷是决定湖泊富营养化程度的主要因素^[9]。

湖泊的富营养化一直是湖泊污染治理的重中之重,松花湖作为高纬度地区的典型湖泊自 2008 年以来富营养化已成为其最严重的问题^[10]。虽然与中部

收稿日期: 2021-08-13; 修订日期: 2021-09-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0605202); 国家自然科学基金项目(41103070); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102-004)

作者简介: 程云轩(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为湖泊水体污染治理, E-mail: 244937163@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiaolx@caes. org. cn

地区巢湖和太湖这些高度富营养化的湖泊相比,松花湖由富营养化引起的臭味问题风险较小^[11],因此无法像典型的富营养化湖泊一样受到较多的关注.但有研究表明,松花湖部分区域有向轻度或中度富营养状态转化的趋势^[12].此前关于松花湖富营养化的研究已有许多,但大多围绕各种外源输入的原因进行讨论,并未对松花湖湖内部营养物质循环的问题导致富营养化的趋势展开研究.外源输入尚可可通过限制营养物质的排放来解决,但内部营养物质循环所导致的富营养化才是湖泊污染控制中亟待解决的问题.

自 20 世纪 90 年代初以来,激发-发射矩阵光谱(EEM)已经能够在激发和发射波长范围内进行荧光测量,并将荧光强度以三维轮廓的方式呈现,通过使物质在相同波长下吸收但在不同光谱区域发射,有效地提高了光学上的分辨率^[13].因此本文选择了在中国东北地区的松花湖作为研究对象,通过 EEM-PARAFAC 技术对沉积物 DOM 的荧光特性和组成进行分析,揭示了 DOM 污染来源和分布规律,首次对松花湖沉积物中 DOM 与水体富营养化之间的关系进行了探索,对控制高纬度湖泊的污染有着重大的意义.

1 材料与方法

1.1 研究区域及水样采集

选取东北地区松花湖作为研究对象,松花湖位于中国吉林省中部,地处东北腹地长白山脉向松嫩平原过渡地带的松花江畔,流经桦甸市、蛟河市和吉林市,是中国第 3 大人工湖泊,也是东北地区最大的人工湖泊.于 2017 年 7 月在松花湖进行采样,采样点分布如图 1 所示.选取 20 个采样点,使用 VG-mini 彼得逊采泥器(最大取样深度 30 m)对表层沉积物(0~10 cm)进行采集.将采泥器采集的样品直接装入塑封袋(20 cm×15 cm).将沉积物样品和水样保存在-4℃冷藏箱中,运回实验室进行冷冻并等待后续处理.同时对每个点位水样(50 cm)进行采集,装入 1L 塑料瓶中,样品采集后取出 500 mL 立即用 GF/F 膜(Whatman, 0.45 μm)进行低压抽滤,过滤后将滤膜放置于-20℃冷冻保存.

1.2 沉积物中 DOM 的提取

将采集的沉积物样品进行冷冻干燥(-80℃, 6 d),然后研磨过 100 目筛.称取 40 g 过筛样品以水:土=10:1(质量比)的比例混合(混合后体积 400 mL),放入恒温振荡箱(20℃, 220 r·min⁻¹, 16 h),振荡后进行离心(4℃, 12 000 r·min⁻¹, 20 min).最后进行过滤,所用滤膜(GF/F, Whatman, 0.45 μm)

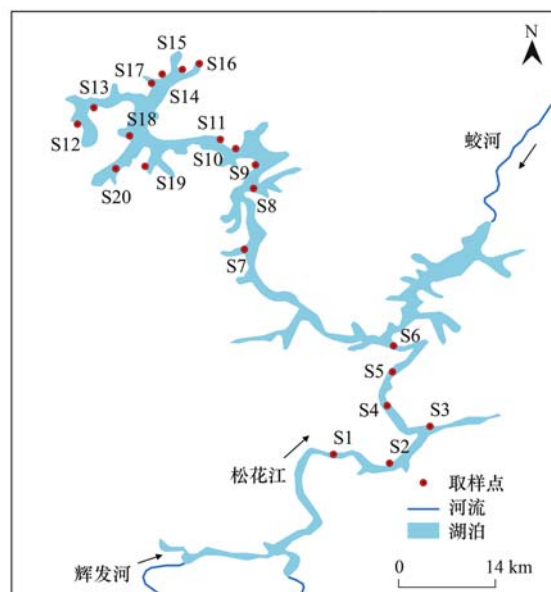


图 1 湖泊及采样点示意

Fig. 1 Schematic distribution of lakes and sampling sites

预先经 450℃灼烧 4 h 处理,所得滤液用于后续荧光测量.提取方法参考文献[14].

1.3 激发-发射矩阵光谱(EEM)测量和指数计算

使用荧光分光光度计(F7000, Hitachi)和 1 cm 光程的石英比色皿在室温下对 20 个样品进行测量.荧光光谱的扫描发射波长(E_m)为 250~550 nm,间隔 5 nm;激发波长(E_x)为 250~450 nm,间隔 5 nm. E_x 和 E_m 的狭缝宽度均设置为 5 nm,光谱的扫描速度设置为 2 400 nm·min⁻¹,PMT voltage 设为 700 V.并基于先前的研究,对内滤效应进行了修正^[15].

选取 HIX(humification index)和 BIX(biological index)两个荧光指数来研究沉积物中 DOM 特征,HIX 表示腐殖化程度,是 E_x 在 255 nm 时扫描出的两个光谱区域面积的比值($H/L + H$),这两块区域面积中 H 为 E_m 范围在 435 nm~480 nm 荧光强度之和,L 为 E_m 范围在 300 nm~345 nm 荧光强度之和^[16].BIX 反映了生物活性特征,是 E_x 在 310 nm 处时, E_m 在 380 nm 和 430 nm 的荧光强度比值(I_{380}/I_{430})^[17].

1.4 平行因子分析(PARAFAC)

PARAFAC 分析使用 Matlab(2020)和 DOMflour(Ver. 1.7)工具箱完成,该过程涉及的公式以及相关参数解释参考文献[18].对 PARAFAC 模型中 3~5 个组分进行了模拟,所有模型均采用非负约束和拉曼归一化处理.为了确保结果的准确,需对样品中的拉曼(Raman)和瑞利(Rayleigh)散射进行处理,首先每个样品的 EEM 要减去对应 Milli-Q 水的空白 EEM,这一步可以去除大部分的散射;接着对无荧光的区域要赋 0 值^[19];最后在 DOMFluor 工具

箱中剪除剩余的拉曼和瑞利散射峰. 散射的去除有助于 PARAFAC 模型的建立, 也避免了最后的结果中产生假峰. 而最大荧光强度 (F_{Max}) 则代表了 PARAFAC 组分的相对浓度或强度^[20]. 平行因子分析的结果通常由 OpenFluor (<https://openfluor.lablicate.com/>) 确定, OpenFluor 是有机荧光光谱的在线数据库, 通过对数据库中测量或模拟 (PARAFAC) 光谱的访问, 可以与任何一组未知光谱进行匹配^[21].

1.5 水体富营养化评价方法

1.5.1 营养状态指数 (TLI)

中国环境监测中心根据中国湖泊和水库的自然特征推荐使用 TLI 来评估湖泊富营养化状态. TLI 是基于 Chla 和其他物质之间的相关性的一个加权总和, 其计算方法如下:

$$\text{TLI} = \sum_{i=1}^m W_j \times \text{TLI}_j, \quad W_j = r_{ij}^2 / \sum_{i=1}^m r_{ij}^2$$

式中, TLI_j 为第 j 个水质指标的 TLI 值, m 为参与评估水质指标的数量, W_j 为第 j 个水质指标在 TLI 中的权重, r_{ij} 为 Chla 与其他参数 j 之间的关系 [总氮 (TN): 0.82、总磷 (TP): 0.84 和叶绿素 a (Chla): 1]^[22], 尽管使用了不同的评价参数, 但 TN、TP 和 Chla 被认为是最重要的 3 个参数^[23]. Chla、TP 和 TN 的 TLI 值计算如下^[24]:

$$\text{TLI}(\text{TN}) = 10 \times (5.453 + 1.694 \ln \text{TN})$$

$$\text{TLI}(\text{TP}) = 10 \times (9.436 + 1.624 \ln \text{TP})$$

$$\text{TLI}(\text{Chla}) = 10 \times (2.5 + 1.086 \ln \text{Chla})$$

式中, TN 和 TP 的单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Chla 的单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

湖泊营养状态分为 5 个等级, 贫营养 ($\text{TLI} < 30$), 中营养 ($30 \leq \text{TLI} \leq 50$), 轻度富营养 ($50 < \text{TLI} \leq 60$), 中度富营养 ($60 < \text{TLI} \leq 70$) 和重度富营养 ($\text{TLI} > 70$).

1.5.2 参数测定

总氮 (TN) 采用碱性过硫酸钾氧化法测定, 总磷 (TP) 采用钼酸铵分光光度法测定, Chla 采用丙酮-分光光度法测定 (14 d 内, 避光保存). 具体检测方法见文献^[24].

2 结果与讨论

2.1 PARAFAC 结果

对采集的沉积物样品光谱进行建模并加以分析. 从荧光光谱中分离出 4 个不同的组分, 各组分在光谱中的位置如图 2 所示, 残差分析和拆半检验结果如图 3 所示, 在残差分析中 4 组分到 5 组分的拟合度提升不明显, 而 3 组分到 4 组分的拟合度提升较大, 同时拆半检验显示 4 组分模型的 E_x 和 E_m 荧光载荷有良好的对应关系, 因此选用 4 组分模型较为合理. 4 个组分在光谱中的位置 (E_x/E_m) 分别是: C1, 330/415 nm; C2, 255/440 nm; C3, 365/470 nm; C4, 280/355 nm. 将结果上传至 OpenFluor 与其他研究对比, 设定 Tucker Congruence Coefficients >

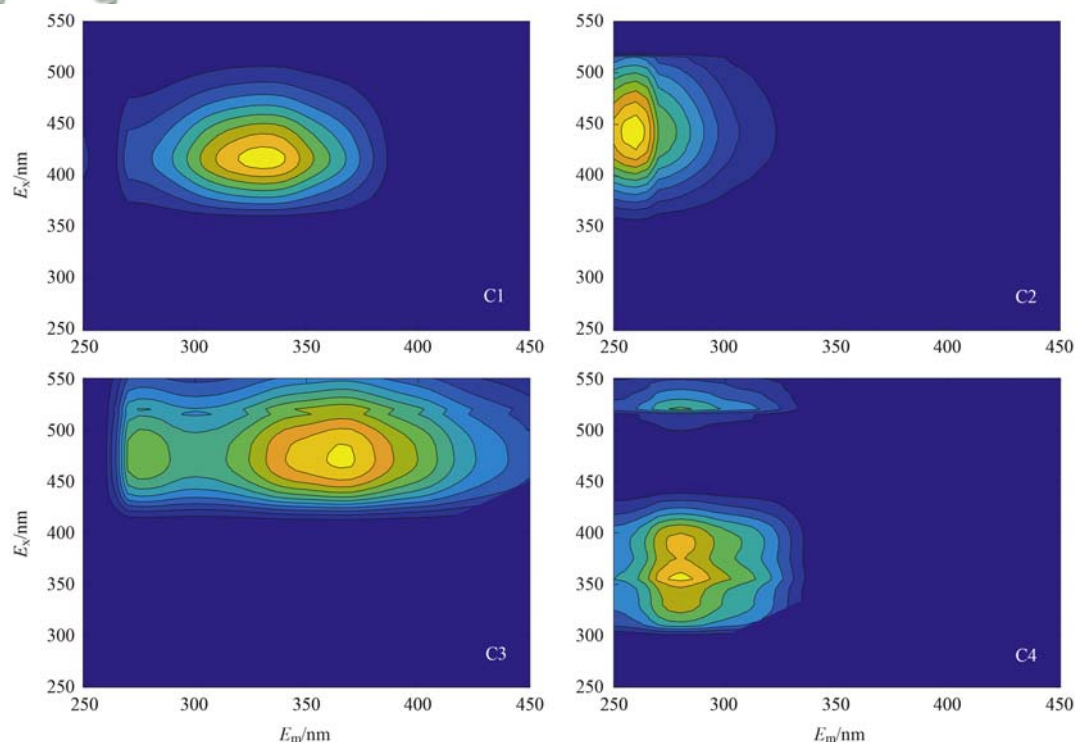


图 2 PARAFAC 组分 (C1 ~ C4) 在光谱中的位置

Fig. 2 PARAFAC components (C1 ~ C4) in the spectrum

0.95(TCC)为匹配条件,TCC 通常被用来比较不同 PARAFAC 模型之间成分的相似程度^[25]. C1 ~ C3 与 Database 中样本进行对比确定为类腐殖质; C4 则确定为类蛋白,可能为色氨酸类物质,具体情况在表 1 中展示.

东北地区的湖泊和水库沉积物中 DOM 组成主要为类腐殖质和类蛋白,其中以类腐殖质为主,符合

表 1 松花湖荧光光谱特征

Table 1 Fluorescence characteristics of Songhua Lake EEMs			
组分	$E_x/E_m/\text{nm}$	物质	文献
C1	330/415	类腐殖质	[26]
C2	255/440	陆源类腐殖质	[27]
C3	365/470	陆源类腐殖质	[28]
C4	280/355	类蛋白	[29]

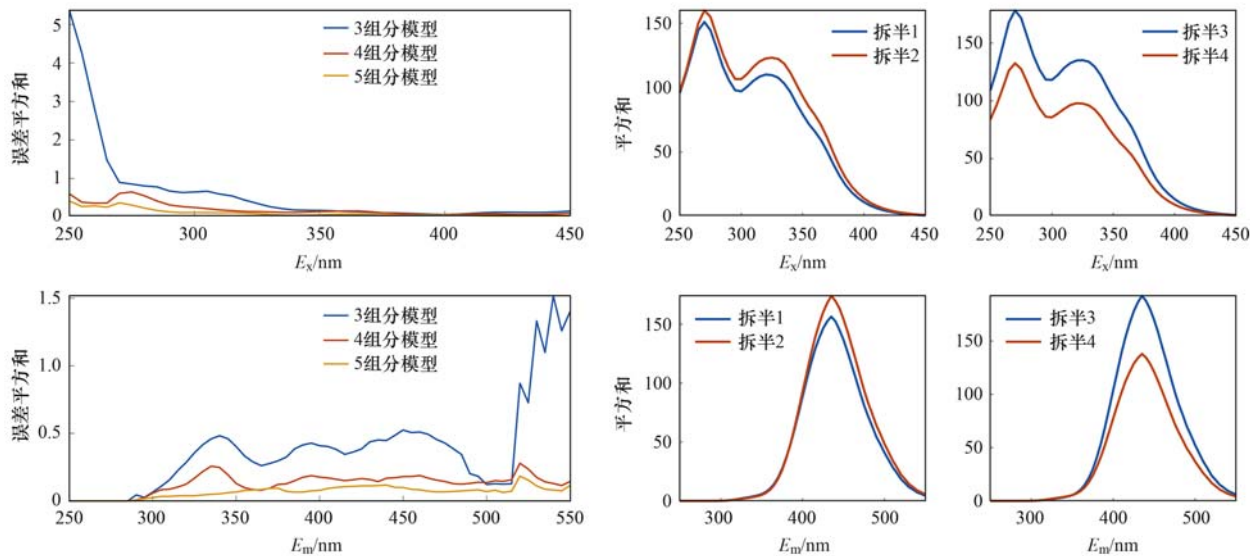


图 3 残差分析和拆半检验结果
Fig. 3 Residual analysis and split-half validation results

沉积物 DOM 的一般特性. 对 C1 ~ C3 组分的荧光强度 F_{Max} 进行线性拟合(图 4), C1 与 C2 ($R^2 = 0.90$, $P < 0.05$)、C1 与 C3 ($R^2 = 0.96$, $P < 0.05$)和 C1 与 C4 ($R^2 = 0.70$, $P < 0.05$)之间均呈现线性关系,C1 与 C2、C3 的线性关系显著,C1 与 C4 关系稍弱. 可

能由于 C1、C2 和 C3 是类腐殖质而具有相似性. C4 作为类蛋白组分,更多来源于环境中污染物的输入,根据 Wang 等^[30]的研究发现不同来源的类蛋白与类腐殖质之间存在很强关联性. 因此 C1 与 C4 虽然是不同的物质,依然具有一定的相关性.

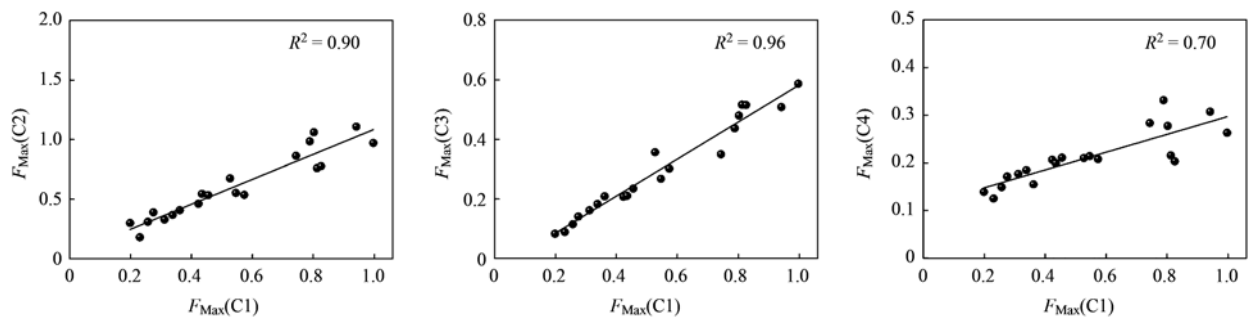


图 4 PARAFAC 组分(C1 与 C2 ~ C4)之间 F_{Max} 线性关系
Fig. 4 Linear relationships between F_{Max} of PARAFAC components(C1 vs. C2-C4)

2.2 松花湖沉积物 DOM 分布特征

根据每个组分的 F_{Max} , 绘制如图 5 所示空间分布. C1 ~ C3 为类腐殖质,分布规律几乎一致. C4 为类蛋白,与类腐殖质荧光强度有较强线性关系,因此整体分布规律也相似. 荧光强度的分布呈现区域性特点,即将湖体以 S7 附近为界,西北部沉积物 F_{Max} 较低,东南部沉积物 F_{Max} 较高. 东南部沉积物 F_{Max} 在

S1 ~ S3、S6 和 S7 处较高,而西北部沉积物 F_{Max} 在 S11 和 S14 处较高. 根据吴计生等^[31]的研究,将松花湖主要划分为 3 个区域,S1 ~ S7 为松花湖三湖保护区实验区,S7 西北方向区域则为丰满水库主库区,同时也是松花湖风景区,蛟河至 S6 则为蛟河回水区. 本研究将松花湖三湖保护区实验区视作松花湖上游(S1 ~ S7),而丰满水库主库区视为下游

(S8 ~ S20). 图 1 显示松花湖有三条主要的入湖河流:辉发河、松花江和蛟河,松花湖 S1 ~ S3 湖段与辉发河和松花江紧邻,这两条汇入松花湖的河流带来了大量的陆源有机物,而河流和地表径流带来的陆源有机物是湖泊沉积物中 DOM 的重要来源. 同时根据 Liu 等^[32]的研究,水体中悬浮颗粒物 (SPM) 还可以吸附 DOM 然后一起沉降至沉积物中. 与之类似的还有蛟河回水区,蛟河经过蛟河市,是蛟河市主要的排水河流,生活污水等大部分

污染物排入其中^[33],因此沉积物中各组分的 F_{Max} 也会偏高. 此外,蛟河回水区两岸的土地主要为耕作用地^[34],高强度的土地利用会导致水土流失的加重,大量陆源有机物会通过地表径流等方式进入水体. 因此上游区域内所有组分的 F_{Max} 会相对较高,而下游整体的 F_{Max} 要低于上游. 下游 S11 和 S14 附近有 F_{Max} 较高的情况出现,推测下游部分区域作为松花湖风景区,会存在旅游开发和人类活动造成点源污染的情况.

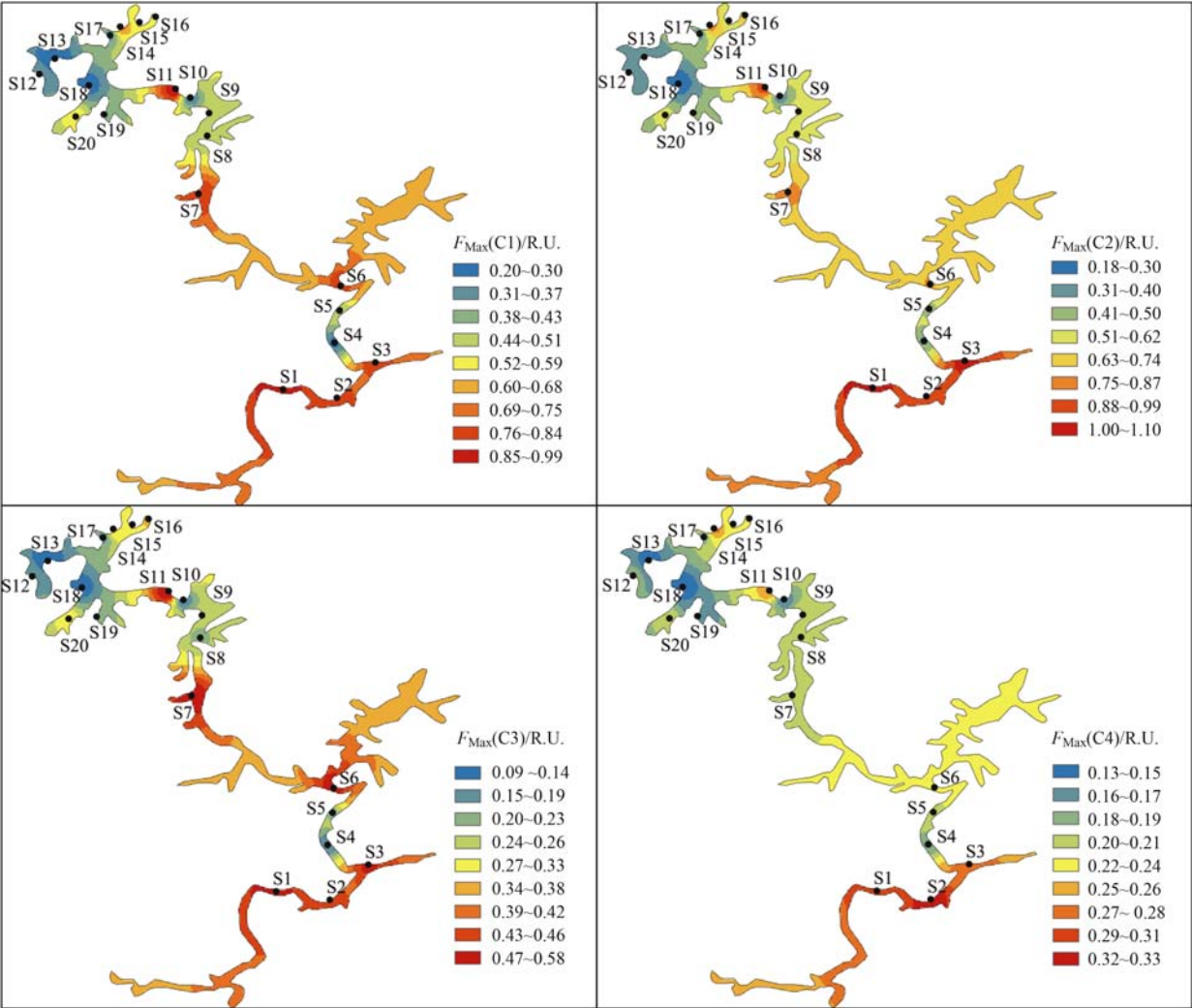


图 5 最大荧光强度空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of F_{Max}

松花湖的荧光指数如图 6 所示. HIX 反映了 DOM 的腐殖化程度,与类腐殖质的含量密切相关. 可以发现 S4 和 S5 的 HIX 较低, S11 和 S14 的 HIX 较高,与类腐殖质的 F_{Max} 分布规律基本一致. 总体而言,松花湖 20 个采样点的腐殖化程度较高,除 S18 点位外其余点位 HIX 均在 0.7 以上. 较高的 HIX 也反映了 DOM 的陆源输入贡献很大.

BIX 则反映了水中自生生物的活动特征, BIX 在 0.6 ~ 0.7 之间代表 DOM 中自生成分很少, BIX

在 0.7 ~ 0.8 则代表 DOM 含有一部分自生成分, BIX 在 0.8 ~ 1 之间表明 DOM 的自生成分很多,当 BIX 大于 1 时,说明 DOM 为生物和水生细菌来源^[17]. 松花湖的沉积物 BIX 整体较低,相当一部分点位的 BIX 在 0.6 以下,部分点位在 0.6 ~ 0.7 之间,说明松花湖大部分点位沉积物 DOM 的自生成分含量很低. S10、S13 和 S18 的 BIX 在 0.7 ~ 0.8 范围内,表明这几个点位的 DOM 自生成分稍多. 而这几个点位的 F_{Max} 较低,可能由于外源物质干扰的减

少,生物和水生细菌产生的 DOM 组分占比上升. Kellerman 等^[35]的研究发现,陆源物质的输入会使得湖泊内累积的脂肪族成分降解,而当陆源物质的输入受限制时这些脂肪族成分的化学丰度又会提高,表明自生成分会受到外源输入物质的影响.

综合 HIX 和 BIX,可以明确松花湖沉积物中的 DOM 主要来源为陆源. 松花江、辉发河和蛟河以及蛟河回水区周边耕地为松花湖沉积物提供了大量的陆源类腐殖质. 罗燕清等^[36]的研究表明,受外源输入影响较大的区域沉积物 DOM 会表现出较高的腐殖化程度,而外源输入影响较小的区域则沉积物 DOM 自生源特性较强,这与本研究的结论类似.

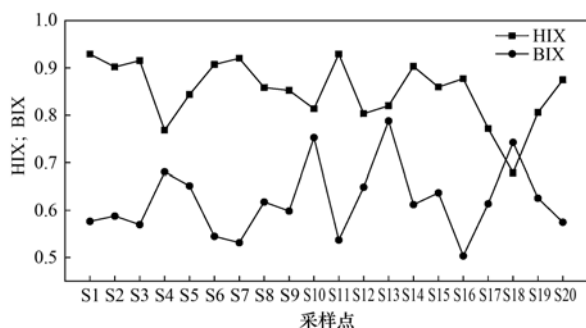


图 6 松花湖荧光指数

Fig. 6 Songhua Lake fluorescence indices

2.3 松花湖沉积物 DOM 与水体富营养化的关系

对松花湖营养状态评价的参数如表 2,空间分布如图 7 所示. 全湖范围内 TN 浓度差距不大,并处于较高水平,在上游入湖段和下游部分区域 TN 浓度较高,表明松花湖的氮污染较为严重. 而不同点位之间 TP 和 Chla 的差距不明显,大部分水域 TP 和 Chla 浓度相对较低,仅在下游部分区域浓度偏高. 表明松花湖 TN 污染是广泛的,而 TP 和 Chla 污染仅在个别点位较严重.

表 2 松花湖 TLI 评价参数

Table 2 TLI evaluation parameters of Songhua Lake

评价参数	最小值	最大值	平均值
TN/mg·L ⁻¹	2.03	3.14	2.50
TP/mg·L ⁻¹	0.05	0.74	0.19
Chla/mg·m ⁻³	0.11	7.66	2.15

根据这些参数,对松花湖 TLI 进行评价(图 7). 可以发现上游大部分区域处于轻度富营养化水平,部分区域处于中营养水平. 下游大部分区域处于中营养向轻度富营养化过渡的状态,而中营养水平的区域较少. 整体来看上游富营养化水平比下游高,造成这种现象的原因可能是上游靠近松花江和辉发河的区域周边存在大量农业用地,外源输入的营养物质对水体富营养化可能有较强影响^[23]. 同时也造成了上游区域内沉积物 DOM 荧光强度与 TLI 空间分

布规律相差较大,而下游区域内沉积物 DOM 荧光强度与 TLI 空间分布状况大致相同,因此对下游区域沉积物 DOM 和水体富营养化之间的关系展开讨论.

有研究表明水体中 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 等各种形式的氮都可能与沉积物中 DOM 结合^[37]. 水体中磷与 DOM 的含量也高度相关,但在部分生活污水排放较多的区域,磷与 DOM 的相关性并不显著^[38]. 而 Zhang 等^[39]对云南 38 个湖泊的研究表明,Chla 与 DOM 中两种类腐殖质组分显著相关. 因此松花湖的 4 个组分也应与 TN、TP 和 Chla 存在一定联系(图 8). 4 个组分与 TN 的相关性(r)为 0.23 ~ 0.33,其中 C1 和 C4 与 TN 相关性更强,表明沉积物中一种类腐殖质和类蛋白组分与氮的联系较为紧密. TP 与 4 个组分之间相关性不强(r 为 0.084 ~ 0.18),可能由于进入松花湖的河流包含了较多的生活污水,削弱了水体中磷的存在. Chla 与 C1 ~ C4 都有较强的相关性(r 为 0.27 ~ 0.41),有研究发现在夏季 DOM 与 Chla 呈显著正相关,表明浮游植物的累积和分解是 DOM 的重要来源^[40]. 并且 C1 和 C4 与 Chla 相关性更强,即浮游植物对 C1 和 C4 来源的贡献更大.

松花湖下游沉积物中 4 个组分的荧光强度与作为评价水体 TLI 的主要参数 TN、TP 和 Chla 之间存在相关性,因此与下游水体富营养化状况也有联系. C3($r = 0.3$)与 TLI 之间相关性较弱, C1($r = 0.4$)和 C2($r = 0.47$)与 TLI 相关性较强, C4($r = 0.6$, $P < 0.05$)则与 TLI 呈显著正相关. Lyu 等^[41]的研究表明,在流域中随着营养物质和人为活动影响的增加,DOM 会从类腐殖质转变为类蛋白. 表明对于松花湖下游水体富营养化状况起到关键作用的是类蛋白组分,当类蛋白组分 C4 浓度增加时, TN 和 Chla 的浓度也会增加,使松花湖水体向轻度富营养化转变.

针对松花湖整体的富营养化情况而言,上游区域的富营养化主要与周边不合理的农业用地有关,与沉积物中 DOM 线性相关性不大,大量外源氮磷的输入使得上游大部分区域为轻度富营养化并有向中度富营养化转变的趋势. 并且水体中的氮磷最终会通过沉降进入沉积物中造成污染. 而下游区域为旅游风景区,在没有大量外源污染物输入的情况下,只是部分区域污染相对较重. 此时沉积物中 DOM 成为了影响水体中氮磷等污染物浓度的主要因素,因而可以发现类腐殖质和类蛋白与水体富营养化水平密切相关,其中类蛋白组分是影响水体富营养化的重要因素. 类蛋白组分的出现通常与人为活动有

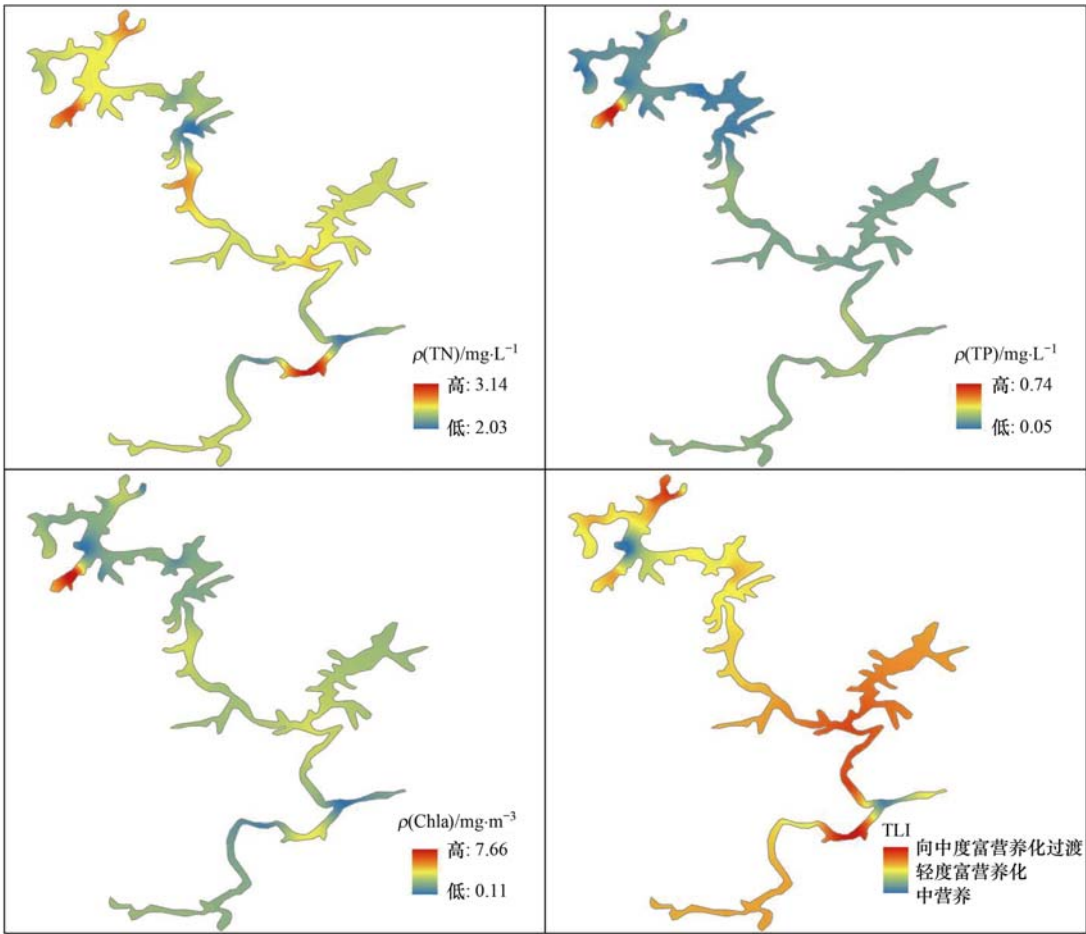


图 7 松花湖总氮、总磷、叶绿素 a 和营养状态指数空间分布
Fig. 7 Spatial distribution of TN, TP, Chla, and TLI in Songhua Lake

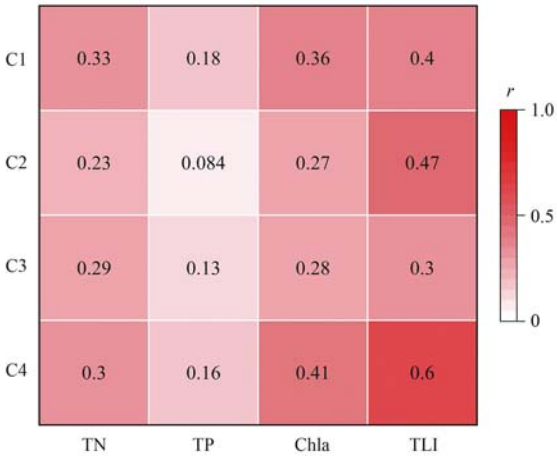


图 8 松花湖荧光强度与水体营养化的相关关系
Fig. 8 Relationship between fluorescence intensity and eutrophication in Songhua Lake

关, 荧光光谱中表现出高类蛋白特征已经被认为是水域受到污染的典型标志^[42]. 虽然下游富营养化状况好于上游, 但很多区域处于中营养向轻度富营养化过渡的状态, 污染程度不容小觑, 并且松花湖下游的污染可能是人为活动造成.

面对水体富营养化, 现阶段多采用限制营养物质输入的方法, 但仅限制外源营养物质的输入可能

并不能达到控制水体富营养化的目的. 典型的富营养化湖泊滇池近年来实行了严格的排放限制, 但水质依旧没有明显改善, 每年都会有蓝藻水华等现象出现^[43]. 表明单一的限制外源输入方法并不适用于所有湖泊, 解决湖泊内部营养物质的循环也是必不可少的手段. 因为 DOM 不仅会在外源输入较多氮磷等污染物时与之结合, 而且会在外源输入减少时释放氮磷等物质^[44], 形成淡水系统中完整的营养循环. 这种营养循环会导致湖泊持久的富营养化, 并与外源输入结合形成难以解决富营养化体系. 尽管松花湖大部分区域还处于中营养和轻度富营养化状态, 但为了预防富营养化情况加重, 还需对重点区域的内部营养循环部分予以更多关注.

3 结论

- (1) 从松花湖沉积物荧光光谱中分离出 4 个组分, C1 (330/415 nm)、C2 (255/440 nm) 和 C3 (365/470 nm) 为类腐殖质, C4 (280/355 nm) 为类蛋白.
- (2) 松花湖 4 个组分的荧光强度空间分布存在一定相似性, 表现为上游高于下游, 较高的 HIX 和偏低的 BIX 值说明松花湖沉积物 DOM 主要来源为

陆源,自生成分较少。

(3)松花湖上游区域富营养化水平高于下游区域,并且下游区域中沉积物 DOM 与水体富营养化水平高度相关。4 个组分与 TN 和 Chla 有较强相关性,与 TP 相关性不强。C3 对下游富营养化水平影响最小,而 C4 与下游富营养化水平影响最大。

参考文献:

- [1] Rizzuto S, Jones K C, Zhang H, *et al.* Critical assessment of an equilibrium-based method to study the binding of waterborne organic contaminants to natural dissolved organic matter (DOM) [J]. *Chemosphere*, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131524.
- [2] Xiao Y, Li W J, Yang S F. Hydrodynamic-sediment transport response to waterway depth in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, **14**(9), doi: 10.1007/s12517-021-07090-7.
- [3] Song F H, Wu F C, Feng W Y, *et al.* Depth-dependent variations of dissolved organic matter composition and humification in a plateau lake using fluorescence spectroscopy [J]. *Chemosphere*, 2019, **225**: 507-516.
- [4] Lu W, Chen N, Feng C P, *et al.* Treatment of polluted river sediment by electrochemical oxidation: changes of hydrophilicity and acute cytotoxicity of dissolved organic matter [J]. *Chemosphere*, 2020, **243**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125283.
- [5] Jiang T, Bravo A G, Skjellberg 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.
- [6] Ziegelgruber K L, Zeng T, Arnold W A, *et al.* Sources and composition of sediment pore-water dissolved organic matter in prairie pothole lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2013, **58**(3): 1136-1146.
- [7] Abbott A N, Haley B A, McManus J, *et al.* The sedimentary flux of dissolved rare earth elements to the ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, **154**: 186-200.
- [8] Wang S R, Jiao L X, Yang S W, *et al.* Organic matter compositions and DOM release from the sediments of the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River region, China [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(8): 1458-1463.
- [9] Le Moal M, Gascuel-Oudoux C, Ménesguen A, *et al.* Eutrophication: a new wine in an old bottle? [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 1-11.
- [10] Zhao X Y, Zhao Y, Xi B D, *et al.* Seasonal population changes in the ammonia-oxidizing bacteria community structure of Songhua Lake, China [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2016, **104**: 523-530.
- [11] Zhang R, Qi F, Liu C, *et al.* Cyanobacteria derived taste and odor characteristics in various lakes in China: Songhua Lake, Chaohu Lake and Taihu Lake [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **181**: 499-507.
- [12] 丁洋, 赵进勇, 张晶, 等. 松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2232-2239.
- [13] Ding Y, Zhao J Y, Zhang J, *et al.* Spatial differences in water quality and spatial autocorrelation analysis of eutrophication in Songhua Lake [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2232-2239.
- [14] Li Y P, Wang S R, Zhang L, *et al.* Composition and spectroscopic characteristics of dissolved organic matter extracted from the sediment of Erhai Lake in China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, **14**(9): 1599-1611.
- [15] 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.
- [16] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 742-746.
- [17] 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.
- [18] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, **6**(11): 572-579.
- [19] Wang X J, Chen G H, Wang S Y, *et al.* Temperature sensitivity of different soil carbon pools under biochar addition [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(4): 4130-4140.
- [20] Song F H, Wu F C, Guo F, *et al.* Interactions between stepwise-eluted sub-fractions of fulvic acids and protons revealed by fluorescence titration combined with EEM-PARAFAC [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **605-606**: 58-65.
- [21] 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.
- [22] Wang J L, Fu Z S, Qiao H X, *et al.* Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 1392-1402.
- [23] Ding Y, Zhao J Y, Peng W Q, *et al.* Stochastic trophic level index model: a new method for evaluating eutrophication state [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **280**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111826.
- [24] 刘鑫, 史斌, 孟晶, 等. 白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2127-2136.
- [25] Liu X, Shi B, Meng J, *et al.* Spatio-temporal variations in the characteristics of water eutrophication and sediment pollution in Baiyangdian Lake [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2127-2136.
- [26] Zhang Y X, Liang X Q, Wang Z B, *et al.* A novel approach combining self-organizing map and parallel factor analysis for monitoring water quality of watersheds under non-point source pollution [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep16079.
- [27] Ren W X, Wu X D, Ge X G, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter in lakes with different eutrophic levels in southeastern Hubei Province, China [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2021, **39**(4): 1256-1276.
- [28] Chen M L, Park M, Kim J H, *et al.* Exploring pore water biogeochemical characteristics as environmental monitoring proxies for a CO₂ storage project in Pohang Basin, South Korea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **137**: 331-338.
- [29] Liu C, Du Y H, Yin H B, *et al.* Exchanges of nitrogen and phosphorus across the sediment-water interface influenced by the external suspended particulate matter and the residual matter after

- dredging[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 207-216.
- [29] Amaral V, Ortega T, Romera-Castillo C, *et al.* Linkages between greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , and N_2O) and dissolved organic matter composition in a shallow estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **788**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147863.
- [30] Wang Z G, Cao J, Meng F G. Interactions between protein-like and humic-like components in dissolved organic matter revealed by fluorescence quenching[J]. *Water Research*, 2015, **68**: 404-413.
- [31] 吴计生, 吕军, 刘洪超, 等. 松花湖生态健康评估[J]. *中国水土保持*, 2019, (9): 65-69.
Wu J S, Lyu J, Liu H C, *et al.* Evaluation on ecosystem health of Songhua Lake[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019, (9): 65-69.
- [32] Liu C, Chen K N, Wang Z D, *et al.* Nitrogen exchange across the sediment-water interface after dredging: the influence of contaminated riverine suspended particulate matter [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **229**: 879-886.
- [33] 耿郁, 刘富裕. 蛟河市城区水资源状况浅析[J]. *吉林水利*, 2010, (10): 12-14.
- [34] 高化雨, 韩会玲, 张晶, 等. 基于生态脆弱性评价的松花湖湖滨带功能区划研究[J]. *水生态学杂志*, 2019, **40**(6): 1-7.
Gao H Y, Han H L, Zhang J, *et al.* Lakeside function division of Songhua Lake based on ecological vulnerability evaluation[J]. *Journal of Hydroecology*, 2019, **40**(6): 1-7.
- [35] 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.
- [36] 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 等. 鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 847-858.
Luo Y Q, Wan Z W, Yan C X, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in sediments from Poyang Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 847-858.
- [37] Li S D, Lu L F, Wu Y F, *et al.* Investigation on depth-dependent properties and benthic effluxes of dissolved organic matter (DOM) in pore water from plateau lake sediments[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107500.
- [38] Dong Y R, Li Y, Kong F L, *et al.* Source, structural characteristics and ecological indication of dissolved organic matter extracted from sediments in the primary tributaries of the Dagu River[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **109**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105776.
- [39] 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.
- [40] Zhang Y L, Yin Y, Liu X H, *et al.* Spatial-seasonal dynamics of chromophoric dissolved organic matter in Lake Taihu, a large eutrophic, shallow lake in China[J]. *Organic Geochemistry*, 2011, **42**(5): 510-519.
- [41] Lyu L L, Liu G, Shang Y X, *et al.* Characterization of dissolved organic matter (DOM) in an urbanized watershed using spectroscopic analysis[J]. *Chemosphere*, 2021, **277**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130210.
- [42] Chen M L, Price R M, Yamashita Y, *et al.* Comparative study of dissolved organic matter from groundwater and surface water in the Florida coastal Everglades using multi-dimensional spectrofluorometry combined with multivariate statistics [J]. *Applied Geochemistry*, 2010, **25**(6): 872-880.
- [43] Xie F Z, Dai Z L, Zhu Y R, *et al.* Adsorption of phosphate by sediments in a eutrophic lake: isotherms, kinetics, thermodynamics and the influence of dissolved organic matter [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, **562**: 16-25.
- [44] Roth V N, Lange M, Simon C, *et al.* Persistence of dissolved organic matter explained by molecular changes during its passage through soil[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(9): 755-761.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)