

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

SO₄²⁻ NH₄⁺ NO₃⁻
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



■ 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

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	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 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, 青亮, 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	菅娜, 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, 李洪, 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	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 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, 韩语, 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, 苟奎贤, 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生态演化轨迹	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	马玉坤, 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, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 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, 石波哲, 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, 李青乾, 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, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直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, 黄伟斌, 唐柏彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O 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, 张子豪 (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)
两种油菜施肥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, 郭俊梅, 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度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 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)	

太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价

刘舒娇¹, 丁剑楠^{1*}, 石浚哲², 张军毅², 庄严², 邹华^{1*}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省无锡环境监测中心, 无锡 214000)

摘要: 为揭示新冠疫情背景下太湖塑料添加剂的时空分布和风险水平, 研究了典型的双酚类、邻苯二甲酸酯类和苯并三唑类等塑料添加剂在太湖表层水体的赋存情况. 对全太湖 19 个监测点位进行 4 个季度的监测, 并评估其潜在的生态风险. 结果表明, 自 2020 年秋季至 2021 年夏季, 双酚 A (BPA)、邻苯二甲酸二乙酯 (DEP)、邻苯二甲酸二(2-甲氧基) 乙酯 (DMEP)、邻苯二甲基丁基苄基酯 (BBP) 和苯并三唑 (UV-328) 在太湖表层水体中均有检出. DEP、DMEP、BBP、BPA 和 UV-328 的检出率分别为 100%、97%、58%、98% 和 7%. 对比近年来的塑料添加剂污染水平可以发现, 太湖的各类塑料添加剂污染水平并未随疫情背景下塑料制品用量的剧增而加重, 反而因人类活动减缓而呈现下降趋势. 太湖塑料添加剂检出浓度有明显的季度差异, 春、夏季平均值高于秋、冬季, 分别是 104.7、100.3、30.7 和 29.9 ng·L⁻¹. 其在空间分布上也具有一定的差异性, 主要表现为高浓度点位聚集在太湖西南沿岸. 生态风险评估结果表明, 太湖塑料添加剂的赋存对藻类存在低风险, 比例达 30%, 秋、冬季风险性高于春、夏季, BPA 和 UV-328 可能是主要风险因子, 应引起重视.

关键词: 太湖; 塑料添加剂; 时空分布; 生态风险; 新冠疫情

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2557-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108309

Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake

LIU Shu-jiao¹, DING Jian-nan^{1*}, SHI Jun-zhe², ZHANG Jun-yi², ZHUANG Yan², ZOU Hua^{1*}

(1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Wuxi Environmental Monitoring Center, Wuxi 214000, China)

Abstract: To reveal the spatiotemporal distribution and risks of plastic additives in Taihu Lake during the COVID-19 pandemic, the occurrences of typical bisphenols, phthalate esters, and benzotriazoles in the surface water of Taihu Lake were investigated. The plastic additives in 19 sites in Taihu Lake were monitored in four seasons, and their potential ecological risks were evaluated. Diethylphthalate (DEP), dimethoxyethyl phthalate (DMEP), benzyl butyl phthalate (BBP), bisphenol A (BPA), and 2-(2H-benzotriazol-2-yl)-4,6-di-tert-pentylphenol (UV-328) were detected, with detection rates of 100%, 97%, 58%, 98%, and 7%, respectively. During the COVID-19 pandemic, the sharply increasing usage of plastic products did not result in a significant increase in the plastic additives pollution in Taihu Lake. Conversely, the pollution of plastic additives showed a decreasing trend due to reduced human activities. There were significant seasonal differences in the concentrations of plastic additives in Taihu Lake. The average concentrations of plastic additives in spring and summer were 104.7 and 100.3 ng·L⁻¹, respectively, which were higher than those in autumn (30.7 ng·L⁻¹) and winter (29.9 ng·L⁻¹). The plastic additive pollution also showed some differences in spatial distribution. The concentrations of plastic additives near the southwest coast of Taihu Lake were higher than those in other monitoring sites. The presence of plastic additives in Taihu Lake showed low risks to algae with the proportion of 30%. The risks in autumn and winter were higher than those in spring and summer. BPA and UV-328 may have been the main risk factors, which should be of concern.

Key words: Taihu Lake; plastic additives; spatiotemporal distribution; ecological risk; COVID-19 pandemic

新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 疫情的暴发使得个人防护装备和物流包装材料等塑料制品的生产和使用量剧增^[1]. 目前, 英国的口罩和防护服等个人防护装备的日消耗量已达到 55 000 个, 而仅在 2020 年 4 月, 泰国的塑料制品用量即较以往 1 a 增长了 62%^[2]. 我国塑料制品的生产使用量在疫情期间同样大幅提升, 2020 年全国塑料制品年产量达到了 76 032.2 kt^[3]. 此外, 全球塑料包装市场规模预计将在 1 a 内增长 5.5%^[1]. 疫情背景下, 对塑料制品的过度使用加剧了水环境污染问题^[4], 这已逐渐引起学界关注^[5,6], 而国内对于这一背景下的污染研究工作还相对滞后.

双酚类 (BPs)、邻苯二甲酸酯类 (PAEs) 和苯并三唑类紫外光稳定剂 (BUVSs) 常作为添加剂, 用于增强塑料制品的可塑性和抗衰老性^[7]. 由于添加剂

分子通常以物理掺杂方式加入塑料制品, 不发生化学键合, 导致其易从塑料制品中浸出, 进入周围环境, 从而造成污染^[7,8]. 目前, 国内外多个湖泊^[9~11]、河流^[12,13] 和城市水体^[14] 中均有 BPs、PAEs 和 BUVSs 检出. 以上物质的长期赋存会对水生生物产生负面效应^[15,16], 并可能通过食物链累积传递, 对水生态系统和人体健康造成潜在风险^[7,17].

太湖作为典型的大型浅水湖泊, 是流域水体交换的中枢. 太湖周边地区高度工业化, 人口密集, 各类塑料制品及其添加剂的生产和排放量较大. 以往的研究也已证实 BPs 和 PAEs 等塑料添加剂类物质

收稿日期: 2021-08-28; 修订日期: 2021-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51809118); 中国博士后科学基金项目 (2019M651704)

作者简介: 刘舒娇 (1997~), 女, 硕士, 主要研究方向为新型污染物的污染特征和环境行为, E-mail: liusj@nwsuaf.edu.cn

* 通信作者, E-mail: djn@jiangnan.edu.cn; zouhua@jiangnan.edu.cn

在太湖流域水环境中的赋存^[18-20].在疫情背景下,塑料制品的用量增多,但同时人类活动大幅度减少,这会对太湖的塑料添加剂赋存状况造成何种影响,目前还未可知.本研究选取典型的 BPs、PAEs 和 BUVSs 等塑料添加剂作为目标污染物,以太湖为研究区域,开展为期 1 a 的季度监测,通过揭示疫情背景下塑料添加剂的污染特征和风险水平,以期为太湖塑料添加剂污染防治提供理论基础和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 监测点位布设

太湖平均水深为 1.9 m,最大深度 - 5 m,因此根据监测垂线监测点布设原则,各监测垂线水面下 0.5 m 处设置一个监测点^[21].如图 1 所示,在太湖湖区设立 19 个监测点,具体点位如下:梅梁湾(梅梁湖心、拖山)、贡湖湾(沙渚南、锡东)、五里湖(五里湖心)、东部沿岸(乌龟山南、漫山、胥湖心)、西部沿岸(大浦口、兰山嘴、大雷山)、南部沿岸(小梅口、新塘港、漾西港)、湖心区(椒山、平台山、十四号灯标)和西山岛周围(泽山、西山西),各监测点依次用 S1~S19 表示.

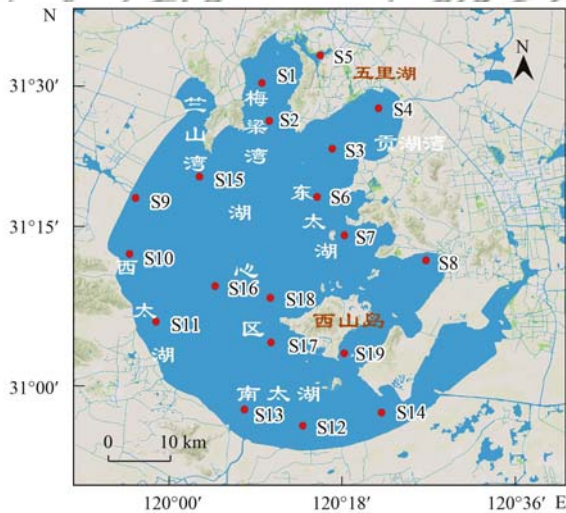


图 1 太湖监测点示意

Fig. 1 Monitoring sites in Taihu Lake

1.2 仪器与试剂

主要仪器:全自动固相萃取浓缩仪(AutoSPE-06D, Reeko 公司,美国); HLB 固相萃取柱(200 mg, 6 mL, Waters 公司,美国);超高效液相色谱串联质谱仪(UPLC/MS/MS, Waters ACQUITY UPLC XevoTQ,美国).

主要试剂:邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯二甲酸二(2-甲氧基)乙酯(DMEP)、邻苯二甲酸二(2-乙氧基)乙酯(DEEP)、邻苯二甲酸丁基苄基酯(BBP)、邻苯二甲酸二苯酯(DPHP)、邻苯二甲酸

二环己酯(DCHP)、邻苯二甲酸二己酯(DHXP)、邻苯二甲酸二(4-甲基-2-戊基)酯(BMPP)和邻苯二甲酸二(2-丁氧基)乙酯(DBEP),均购自 J&K Scientific;双酚 A(BPA)购自 Merck 公司(德国);2-(2-羟基-3-特丁基-5-甲基苯基)-5-氯苯并三唑(UV-326)和2-(2,5'-二叔戊基苯基)苯并三唑(UV-328)购自上海一基实业有限公司;乙腈(色谱纯)和甲醇(色谱纯)均购自 Fisher Scientific(美国).

1.3 样品采集与预处理

在 2020~2021 年间,依次于秋季(2020 年 10 月)、冬季(2020 年 12 月)、春季(2021 年 4 月)和夏季(2021 年 7 月)对太湖水体塑料添加剂浓度进行监测.每次采集所有监测点位样品共需 4 d,通过 GPS 定位到不同监测点进行水样现场采集.采样前,将 1 000 mL 棕色玻璃采样瓶依次用乙醇和去离子水洗涤,再用 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜过滤后的去离子水漂洗 3 次,烘干待用.采样时,利用有机玻璃采样器深入水面以下 0.5 m 处,用准备好的玻璃采样瓶采集 1 L 水样,并向水样中加入适量甲醛以抑制微生物的生长.水样避光低温保存运回实验室,放置于 4℃ 冰箱待测,并在 48 h 以内完成预处理.

采用孔径为 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜对水样进行抽滤,并用固相萃取浓缩仪和 HLB 固相萃取柱对抽滤后的水样进行各类添加剂的分离、萃取和浓缩,萃取过程和相关参数见表 1.萃取液定容至 1 mL 后,转移至棕色色谱瓶,保存于 -20℃ 待测.

表 1 固相萃取参数设置

Table 1 Parameter settings of solid phase extraction

操作	溶剂	流速/mL·min ⁻¹	体积/mL
活化	乙腈	5	5
活化	水	5	5
上样	—	10	1 000
清洗注射泵	乙腈	5	5
洗脱	乙腈	5	5
洗脱	乙腈甲醇	5	5

1.4 塑料添加剂的测定

采用 UPLC/MS/MS(Waters ACQUITY UPLC Xevo TQ)对 12 种目标化合物进行定量分析.色谱条件:在 Waters Acquity BEH C18 柱(100 mm × 2.1 mm × 1.7 μm)上进行层析分离,柱温为 40℃,流动相 A 为体积分数为 2% 的甲醇和 0.1% 的甲酸溶液,流动相 B 为 100% 乙腈,流速设置为 0.4 mL·min⁻¹,每次样品进样体积为 5 μL,具体梯度洗脱参数如表 2 所示.质谱检测的电喷雾电离源(ESI)均为正模式,离子源温度设定为 150℃,锥孔反吹气流量为 50 L·h⁻¹,溶剂脱气温度和流量分别为 500℃ 和 900 L·h⁻¹,各类添加剂质谱条件如表 3 所示.

表 2 各类添加剂洗脱条件参数
Table 2 Mobile phase elution procedures of additives

目标物	时间/min	流速/mL·min ⁻¹	流动相 A 体积分数/%	流动相 B 体积分数/%
BPs	起始	0.4	70	30
	0.25	0.4	70	30
	2.00	0.4	5	95
	3.00	0.4	5	95
	3.01	0.4	70	30
	4.00	0.4	70	30
PAEs 和 BUVSs	起始	0.4	60	40
	0.25	0.4	60	40
	1	0.4	20	80
	4	0.4	5	95
	5	0.4	5	95
	5.01	0.4	60	40

表 3 各类塑料添加剂的质谱条件
Table 3 Mass spectrometry conditions for additives

物质	驻留时间/ms	母离子(<i>m/z</i>)	子离子(<i>m/z</i>)	裂解电压/V	碰撞能量/eV
BPA	0.161	227.1	212	31	17
DEP	0.036	223.168	177.062	14	8
DEMP	0.05	283.232	207.11	18	8
DEEP	0.036	311.204	221.108	20	6
BBP	0.036	313.268	91.05	22	18
DPHP	0.036	310.168	225.065	18	10
DCHP	0.063	331.204	149.014	22	30
DHXP	0.063	335.213	149.007	24	18
BMPP	0.025	335.304	149.015	22	24
DBEP	0.078	367.204	259.118	16	8
UV-326	0.161	316	260	30	25
UV-328	0.161	352.296	282.226	44	26

1.5 质量控制

采用外标法对样品进行定量分析,使用各类目标物标准品配制混合溶液,在优化条件下进行测定,测定结果表明各目标物的标准曲线相关系数 R^2 均大于 0.99. 在 1 L 的空白水样中分别加入 10 ng·L⁻¹ 和 100 ng·L⁻¹ 混合标准品,各设置 3 个平行样,测定各目标物浓度,计算加标回收率. 结果表明,12 种目标物的加标回收率为 86%~120%. 在样品测定时,每 20 个样品中添加 1 个程序空白样品,在程序空白样品中检出了浓度为 1.47 ng·L⁻¹ 的 DEP,并从实际样品的检测结果中扣除该背景值,其余目标物质均未在程序空白样品中检出.

1.6 生态风险评估

根据风险商值(RQ)评估太湖表面水体检测出塑料添加剂的潜在生态风险公式如下:

$$RQ = MEC/PNEC \tag{1}$$

$$PNEC = LC50 = EC50/AF \tag{2}$$

$$RQs = \sum RQi \tag{3}$$

式中,MEC 为环境实测浓度,ng·L⁻¹; PNEC 为预测无效应浓度,ng·L⁻¹; LC50 为半致死浓度,ng·L⁻¹;

EC50 为半最大效应浓度,ng·L⁻¹; AF 为评价因子,一般为1 000; RQ_{sum} 表示不同塑料添加剂 i 叠加的联合生态风险商.

2 结果与讨论

2.1 塑料添加剂在太湖的赋存

本研究在 4 个季度内共采集水样 69 个,对 3 类塑料添加剂进行监测,各添加剂物质的检出频率和浓度如表 4 和图 2 所示. BPA 检出率为 98%,DEP 和 DMEP 检出率分别为 100% 和 97%,BBP 的检出率为 58%,UV-328 检出率仅为 7%,而 DEEP、DPHP、DCHP、DHXP、BMPP、DBEP 和 UV-326 在各点位均未检出. 监测结果表明,太湖水环境中仍存在塑料添加剂的污染. $\sum$ PAEs 在全年各监测点位的总浓度为 4.2 μg·L⁻¹. 其中,DEP 所占质量分数为 58.3%,检出浓度为 2.5 μg·L⁻¹,其次为 DMEP,所占质量分数为 39.5%,检出浓度为 1.7 μg·L⁻¹. 朱冰清等^[22]于 2016~2017 年的研究也表明,DEP 为太湖水环境中质量分数最高的 PAEs 添加剂. DEP 和 DMEP 作为高分子结构助剂,在塑料中的添加量

高达 20% ~ 50%^[23], 且 DEP 和 DMEP 在水环境中具有较长的半衰期^[24], 亲水性强于 BBP 和 BMPP 等同系化合物^[25], 更易于从塑料制品中释放.

表 4 塑料添加剂的检出频率和浓度

添加剂	检出率/%	检出浓度/ng·L ⁻¹		
		平均值	中位值	最大值
BPA	98	9.0	6.5	41.9
DEP	100	35.7	11.1	290.2
DMEP	97	24.9	22.1	118.3
BBP	58	2.9	0.8	22.5
UV-328	7	0.5	0.3	1.2

全年不同监测点位 BPA 的检出浓度范围为 2.7 ~ 41.9 ng·L⁻¹, 检出浓度平均值为 9.0 ng·L⁻¹, 浓度中位值为 6.5 ng·L⁻¹. 陈蓉等^[26]于 2010 年对巢湖水体进行监测, 发现 BPA 的浓度平均值为 77.9 ng·L⁻¹; 2016 年骆马湖水体中 BPA 浓度平均值达到了 86 ng·L⁻¹^[27]. 以上结果表明, 太湖 BPA 污染程度在国内外属于较低水平. 太湖 $\sum$ PAEs 的检出浓度范围为 9.5 ~ 320.7 ng·L⁻¹, 浓度平均值为 63.5 ng·L⁻¹, 浓度中位值为 32.9 ng·L⁻¹. 其中, DEP、DMEP、BBP 和 BMPP 的浓度平均值分别为 35.7、24.9、2.9 和 0.5 ng·L⁻¹. He 等^[28]于 2012 年对巢湖进行监测, 发现 $\sum$ PAEs 的检出浓度范围为 0.37 ~ 13.2 μ g·L⁻¹. 贺小敏^[9]于 2018 年对梁子湖进行

监测, 发现 $\sum$ PAEs 浓度平均值为 0.96 μ g·L⁻¹, 其中 DiBP 和 DEHP 的平均检出浓度最高, 分别为 0.42 μ g·L⁻¹ 和 0.35 μ g·L⁻¹. 相较于国内湖泊, 太湖 PAEs 赋存程度较低. 此外, 艾舜豪^[10]于 2018 ~ 2019 年监测鄱阳湖 PAEs 赋存情况, 发现 DBP 和 DEHP 为 PAEs 的主要赋存种类, 其浓度平均值分别为 0.41 μ g·L⁻¹ 和 0.17 μ g·L⁻¹. 可见, 在不同的水域中 PAEs 的赋存种类和形式也有所差异, 这可能造成不同水体中 PAEs 污染水平和时空分布特征的差异. 太湖 UV-328 浓度范围 0.2 ~ 1.2 ng·L⁻¹, 浓度平均值为 0.48 ng·L⁻¹, 浓度中位值为 0.3 ng·L⁻¹. Zhao 等^[14]在松花江水体中检测到 UV-328 浓度平均值为 0.19 ng·L⁻¹, 低于太湖污染水平. Kameda 等^[29]于 2008 年在日本埼玉县湖水中检出 UV-328, 最高浓度为 246.25 ng·L⁻¹. 在西班牙 Gran Canaria^[30] 和澳大利亚 Bolivar^[31]等地的地表水体中, 均未发现 UV-328 和 UV-326 等 BUVSs 的赋存. 可见, 相较于 BPs 和 PAEs 类添加剂, BUVSs 在地表水中的检出浓度普遍偏低, 这可能是由于该类物质水溶性极低, 在环境中更易赋存于沉积物或被水生生物累积^[32].

对比疫情前后的监测结果发现, COVID-19 疫情暴发对太湖塑料添加剂的赋存造成了明显的影响. 2014 年, Gao 等^[33]的研究发现 $\sum$ PAEs 在太湖水体中浓度为 0.74 ~ 13.00 μ g·L⁻¹. 2016 年, 朱冰

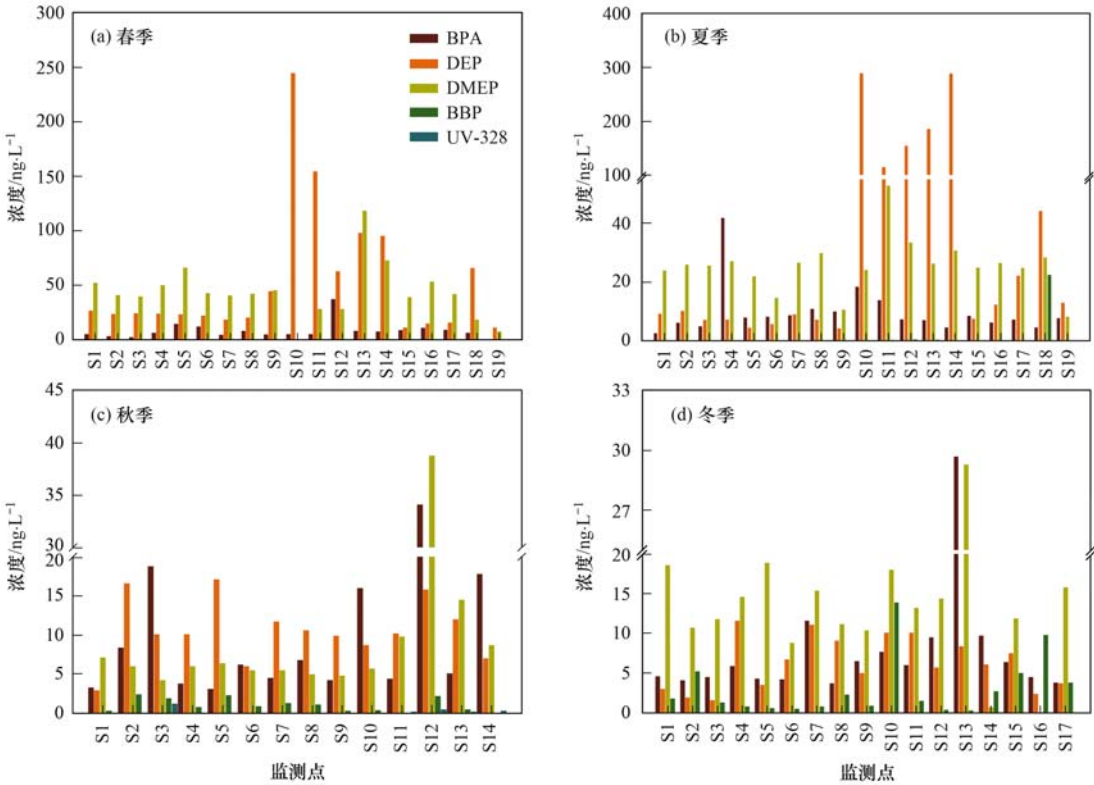


图 2 各时期太湖塑料添加剂检出浓度

Fig. 2 Monitoring concentration of additives in Taihu Lake during different periods

清等^[22]的研究发现 $\sum$ PAEs 浓度范围为 $1.6 \sim 11.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 2019 年, Luo 等^[19]的研究发现太湖 $\sum$ PAEs 浓度范围为 $0 \sim 16.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度平均值为 $2.84 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, DBP 作为 PAEs 的主要赋存形式, 浓度平均值为 $0.66 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 而本研究 $\sum$ PAEs 添加剂浓度范围为 $9.5 \sim 320.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度平均值为 $63.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, DEP 作为主要赋存形式, 浓度平均值为 $35.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 可以看出, PAEs 总量较疫情前下降了 2~3 个数量级, 主要赋存物质的种类与以往有所差异, 检出浓度也呈下降趋势. 太湖 BPA 赋存水平的变化没有 PAEs 显著, 但浓度平均值也从 2018 年的 $13.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[8] 降至目前的 $9.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 对比新冠疫情前后的塑料添加剂污染水平可以发现, 2020~2021 年间, 太湖的塑料添加剂污染水平并未随疫情背景下塑料制品用量的剧增而加重. 由于新冠疫情, 人类活动显著减少可能是导致太湖水体塑料添加剂赋存水平相较往年出现锐减的原因之一. 需要指出的是, 添加剂物质从塑料制品中的释放可能存在迟滞效应, 对太湖塑料添加剂的长期监测十分必要.

2.2 太湖水体塑料添加剂的季度变化

本研究中, 春季、夏季、秋季和冬季太湖塑料添加剂浓度平均值依次为 104.7 、 100.3 、 30.7 和 $29.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 太湖总体塑料添加剂浓度表现出明显的季度差异[图 3(a)]. 本次监测结果显示春、夏季的添加剂浓度明显高于秋、冬季. 春、夏季处于全年降水量较为密集时段^[34]. 大气携带添加剂类物质的颗粒物沉降和地表径流带来的土壤冲刷将污染物

汇聚入湖泊^[35], 引起此时段内污染物浓度升高的现象. 另外, 在夏季太湖水温和光照强度略高于其他季节, 微生物活性较强, 太湖水龄远小于其他季节^[36~38]. 特殊的水力学条件和水质条件导致各类塑料添加剂更容易从塑料制品释放到环境中. 2018 年, 梁子湖水体丰水期监测 $\sum$ PAEs 浓度约为枯水期的 2 倍^[9]. 李婷^[39]在珠江口同样发现, $\sum$ PAEs 在夏季的浓度显著高于冬季. 然而, 陈秋丽等^[40]的研究发现广州河流中 $\sum$ PAEs 在丰水期的总浓度却小于枯水期, 这可能是由于城市河流受人类活动影响较大. 可见, 塑料添加剂类物质在环境中的赋存受人类活动、气候环境和水文条件等多种因素影响, 并非简单的季节性规律变化.

不同塑料添加剂在各个季节的占比也有所差别[图 3(b)], DEP 的检出浓度在夏季最高, 冬季最低, 分别占当季检出总量的 63.2% 和 21.1%. DMEP 的检出浓度在冬季最高, 夏季最低, 分别为 44.0% 和 25.6%. BBP 的检出浓度自夏季的 1.3% 上升到冬季的 10.1%. BBP 属于疏水性物质, 在水环境中易被颗粒物吸附或被水生生物累积, 由于夏季湖水体藻类和浮萍等植物生长旺盛, 吸附和生物累积作用或许是使之在夏季呈现较低检出浓度的原因之一. BPA 在秋季占比最高, 春季最低, 分别占当季检出总量的 31.7% 和 8.0%. UV-328 也只在秋季时被检出, 仅为当季检出总量的 0.56%. BPA 和 UV-328 检出在秋、冬季虽比在春、夏季有所增加, 但从总体来看, 太湖塑料添加剂仍以 DEP 和 DMEP 等 PAEs 类物质为主要赋存类型.

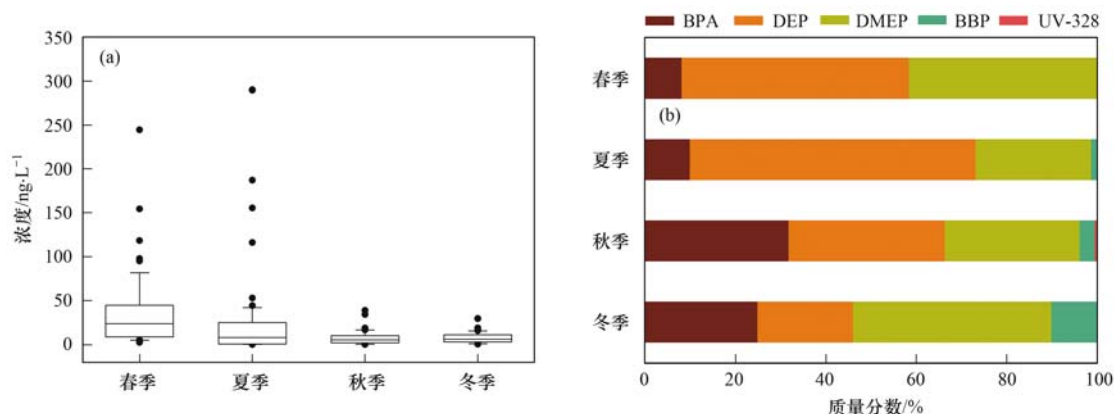


图3 太湖塑料添加剂检出浓度和检出种类的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation in concentration and species of plastic additives in Taihu Lake

2.3 空间分布

如图 4(a) 所示, 各点位塑料添加剂的浓度范围为 $19.9 \sim 153.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 检出浓度最低处为 S19, 最高处为 S10. 通过对各点位季节浓度进行聚类分析,

以评估塑料添加剂在太湖水体中的空间分布. 由图 4(b) 可知, 全湖区 19 个点位被分为 2 类. 其中, S10、S11、S12、S13 和 S14 属于浓度较高一类, 浓度平均值为 $82.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 均处于太湖西南部沿岸地

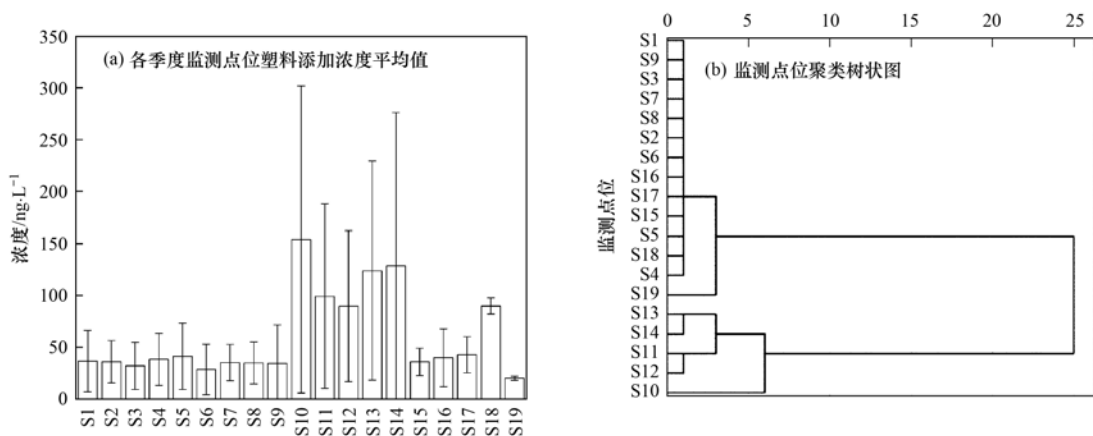


图4 太湖表层水体塑料添加剂空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of plastic additives in surface water of Taihu Lake

区.除此之外其余点位同属一类,浓度平均值为 $38.87 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 丁剑楠等^[41]研究太湖抗生素类物质的空间分布发现,抗生素类药物因其亲水性较强而在太湖的分布较为均匀,但相较于抗生素,塑料添加剂疏水性较高,更可能呈现出空间分布差异.另外,塑料添加剂等污染物在太湖水体中的分布与风浪和水力学扰动等自然因素密不可分^[42],在湖流和地形的影响下可能会出现污染物在特殊点位的汇聚或分散.韩景^[43]模拟计算出在风力影响下,太湖湖流的流场分布受地形、风速、风向和出入湖流的共同影响,形成以西南部为中心的主回流场和湖湾内若干副回流场.太湖西南侧和东侧均有一个环流,两个环流的“齿合”处正是太湖东南侧沿岸地区(S11、S12、S13和S14).由此可以推测两个环流“齿合”处可能使其他各处的污染物在环流作用下汇聚,因而显示出此地带塑料添加剂水平较高.

塑料添加剂的空间分布受人类活动和自然因素共同作用.此前的研究普遍表明,太湖北部污染高于南部^[44].因为太湖北部竺山湖、梅梁湖和贡湖邻岸城市和景区较多,污染程度受人类活动影响较大.但本研究中北部太湖添加剂检出浓度并未高于其他区域.可能因疫情下人类活动减少,使得自然因素对添加剂的空间分布成为主要影响因素.故在水力和湖流的作用下添加剂物质聚集在太湖西南沿岸.

通过分析各点位塑料添加剂物质的质量分数发现,S1~S9和S15~S17点位的塑料添加剂赋存均以DMEP为主(图5).浓度平均值为 $86.4 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,质量分数平均值为53.1%.DEP广泛存在于太湖水体,在S10~S14、S18和S19质量分数较高,可达83.5%,浓度平均值为 $274.6 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.与聚类分析的结果相吻合,这些点位相对集中在太湖西南沿岸.相较于PAEs,BPA在太湖水环境中分布较为均匀,可能是由于其水溶性较高($\lg K_{ow} = 3.32$),更易随湖流

扩散.UV-328仅在S3和S11~S14检出,且质量分数较低,这可能与周边地区产业结构有关.另外,上文提到,UV-328等典型BUVSs水溶性普遍较低,地表水可能不是该类物质赋存的主要环境介质.总体来说,太湖西南部沿岸塑料添加剂的主要赋存形式为DEP,在太湖北部和东部地区则是以DMEP为主,其余添加剂在全太湖的分布相对均匀.

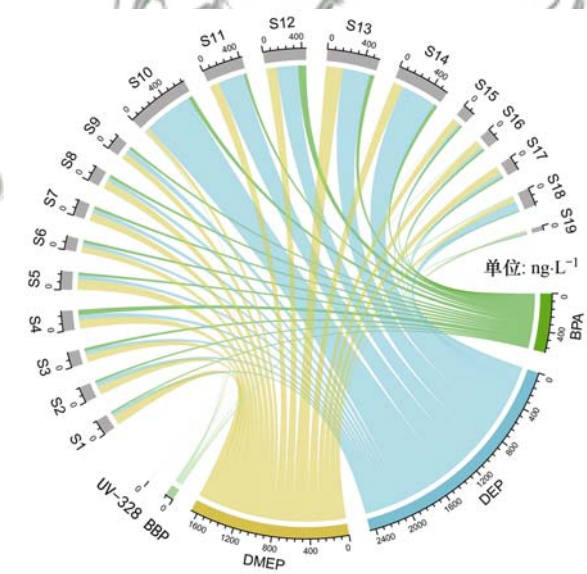


图5 监测点位塑料添加剂各种类质量分数

Fig. 5 Percentage of plastic additives at the monitoring point

2.4 生态风险评估

本研究根据目标添加剂对不同营养级水生生物的EC50和LC50值计算RQs值(表5),评估塑料添加剂对鱼类、水蚤类和藻类的生态风险并予以评级,分别设为无风险($RQs < 0.01$)、低风险($0.01 < RQs \leq 0.1$)、中风险($0.1 < RQs \leq 1$)和高风险($RQs > 1$)。

如图6所示,目前塑料添加剂检出浓度对太湖鱼类和溞类水生生物基本无风险($RQs < 0.01$),而对于藻类则具有一定的生态风险.全年太湖塑料添

剂对藻类的低风险($0.01 < RQs \leq 0.1$) 比例为 30%. 太湖主要的赋存物质 DEP 和 DMEP 对藻类的 PNEC 较高,所以大部分为无风险. 其中,春季、夏季、秋季和冬季的低风险地区($0.01 < RQs \leq 0.1$) 比例分别为 10%、16%、50% 和 47%. 可见,在秋、冬季节,添加剂对太湖藻类生物更具有风险性. 可能是因为 BPA 和 UV-328 的检出浓度在秋、冬季节占比较大,而藻类对于 BPA 和 UV-328 的胁迫更加敏感,具有较低的 PNEC^[45,46]. 有研究表明,UV-328 对于莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*) 的氧化防御系统有潜在的影响^[47]. BPA 也会抑制小球藻(*Chlorella vulgaris*) 等其他藻类的生长^[45]. 而春、夏季正是太湖蓝藻水华最为严重时期,大量藻细胞会

吸附疏水性小分子物质而降低其在水体中的浓度,可能导致添加剂风险的低估. 需进一步关注 BPA 和 UV-328 等其他塑料添加剂的生态风险.

表 5 塑料添加剂对水生生物的 EC50、LC50 值¹⁾/mg·L⁻¹

物质	EC50 藻类	LC50	
		溞类	鱼类
BPA	1.33	3.9	4.7
DEP	85.6	86	16.7
DMEP	139	284	124
BBP	0.4	1.0	0.82
UV-328	0.02	0.006 9	0.03

1) EC50 和 LC50 值参考美国国家环保署 ECOSARv2.0 数据库

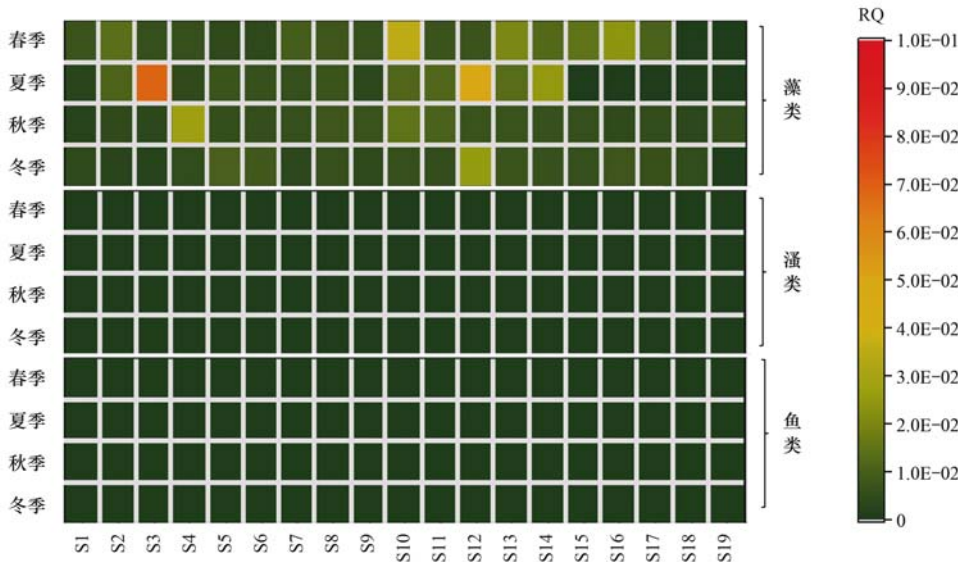


图 6 太湖塑料添加剂对藻类、溞类和鱼类的 RQ 值

Fig. 6 RQ values of plastics additives for algae, daphnia, and fish in Taihu Lake

3 结论

(1) 全年共采集水样 69 个, PAEs 以 DEP、DMEP 和 BBP 为主,是塑料添加剂在太湖水体赋存的主要形式,其次为 BPA 和 UV-328. $\sum$ PAEs 检出浓度范围为 $9.5 \sim 320.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度平均值为 $63.5 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度中位值为 $32.90 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 对比太湖疫情前后塑料添加剂赋存浓度发现,各类塑料添加剂浓度因人类社会活动减缓而呈现下降趋势.

(2) 太湖塑料添加剂总体检出浓度具有明显的季节差异,春季、夏季的浓度平均值略高于秋、冬季. 从空间分布来说,在太湖西南部沿岸点位 DEP 浓度显著高于其他点位,在太湖北部和东部地区则是以 DMEP 为主. 其他点位各物质浓度差距较小,空间部分较为均匀.

(3) 通过对不同水生生物进行生态风险评估发现,太湖塑料添加剂对藻类存在低风险,比例达

30%. 秋、冬季节添加剂浓度较低,风险性却高于春、秋季,可以推测出 BPA 和 UV-328 为主要风险因子.

参考文献:

[1] Adyel T M. Accumulation of plastic waste during COVID-19 [J]. Science, 2020, **369**(6509): 1314-1315.

[2] Liu J L, Yang Y F, An L H, et al. The value of China's legislation on plastic pollution prevention in 2020[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, doi: 10.1007/s00128-021-03366-6.

[3] Parashar N, Hait S. Plastics in the time of COVID-19 pandemic: protector or polluter? [J]. Science of the Total Environment, 2021, **759**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144274.

[4] De-La-Torre G E, Aragaw T A. What we need to know about PPE associated with the COVID-19 pandemic in the marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, **163**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111879.

[5] Liu J L, Vethaak A D, An L H, et al. An environmental dilemma for China during the COVID-19 pandemic: the explosion of disposable plastic wastes [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, **106**(2): 237-240.

- [6] Silva A L P, Prata J C, Walker T R, *et al.* Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: challenges and recommendations [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, **405**, doi: 10.1016/j.cej.2020.126683.
- [7] Chen Y K, Shi Y M, Liu X T, *et al.* The high complexity of plastic additives in hand wipes [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2021, **8**(8): 639-644.
- [8] Shinohara N, Uchino K. Diethylhexyl phthalate (DEHP) emission to indoor air and transfer to house dust from a PVC sheet [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **711**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134573.
- [9] 贺小敏, 施敏芳. 梁子湖水体和沉积物中邻苯二甲酸酯分布特征及生态健康风险评价[J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(2): 115-127.
- He X M, Shi M F. Distribution characteristics and ecological and health risk assessment of phthalic acid esters in surface water and sediment of Liangzi Lake, China [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(2): 115-127.
- [10] 艾舜豪. 鄱阳湖邻苯二甲酸酯的水质基准研究与风险评价[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- Ai S H. Water quality criteria and risk assessment of phthalate esters in Poyang Lake [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [11] Li R L, Liang J, Gong Z B, *et al.* Occurrence, spatial distribution, historical trend and ecological risk of phthalate esters in the Jiulong River, Southeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 388-397.
- [12] Wan Y J, Xia W, Yang S Y, *et al.* Spatial distribution of bisphenol S in surface water and human serum from Yangtze River watershed, China: Implications for exposure through drinking water [J]. *Chemosphere*, 2018, **199**: 595-602.
- [13] Li T, Yin P H, Zhao L, *et al.* Spatial-temporal distribution of phthalate esters from riverine outlets of Pearl River Delta in China [J]. *Water Science & Technology*, 2015, **71**(2): 183-190.
- [14] Zhao X, Zhang Z F, Xu L, *et al.* Occurrence and fate of benzotriazoles UV filters in a typical residential wastewater treatment plant in Harbin, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 215-222.
- [15] Saillenfait A M, Sabaté J P, Gallissot F. Effects of *in utero* exposure to di-*n*-hexyl phthalate on the reproductive development of the male rat [J]. *Reproductive Toxicology*, 2009, **28**(4): 468-476.
- [16] Lu Z, De Silva A O, Peart T E, *et al.* Distribution, partitioning and bioaccumulation of substituted diphenylamine antioxidants and benzotriazole UV stabilizers in an urban creek in Canada [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(17): 9089-9097.
- [17] Wick A, Jacobs B, Kunkel U, *et al.* Benzotriazole UV stabilizers in sediments, suspended particulate matter and fish of German rivers: new insights into occurrence, time trends and persistency [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **212**: 401-412.
- [18] Liu R, Luo X, Shu S, *et al.* Impact of rainfall on the occurrence, spatiotemporal distribution, and partition trend of micropollutants in Taihu Lake, China: bisphenol A and 4-nonylphenol as examples [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **204**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111064.
- [19] Luo X, Shu S, Feng H, *et al.* Seasonal distribution and ecological risks of phthalic acid esters in surface water of Taihu Lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **768**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144517.
- [20] Liu J, Zhang L, Lu G, *et al.* Occurrence, toxicity and ecological risk of Bisphenol A analogues in aquatic environment-A review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111481.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] 朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 等. 太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3614-3621.
- Zhu B Q, Gao Z Q, Hu G J, *et al.* Contamination levels and ecological risk assessment of phthalate esters (PAEs) in the aquatic environment of key areas of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3614-3621.
- [23] 陈永山, 骆永明, 章海波, 等. 设施菜地土壤酞酸酯污染的初步研究 [J]. *土壤学报*, 2011, **48**(3): 516-523.
- Chen Y S, Luo Y M, Zhang H B, *et al.* Preliminary study on pesticides pollution of greenhouse soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(3): 516-523.
- [24] Staples C A, Peterson D R, Parkerton T F, *et al.* The environmental fate of phthalate esters: a literature review [J]. *Chemosphere*, 1997, **35**(4): 667-749.
- [25] 隆兴兴, 牛军峰, 史姝琼. 邻苯二甲酸酯类化合物正辛醇-水分配系数的 QSPR 研究 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(11): 2318-2322.
- Long X X, Niu J F, Shi S Q. Research on quantitative structure-property relationships for *n*-octanol/water partition coefficients of phthalic acid esters [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(11): 2318-2322.
- [26] 陈蓉, 刘华英, 黄斌, 等. 滇池水域双酚 A 的环境多介质迁移和归趋模拟 [J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(6): 1093-1100.
- Chen R, Liu H Y, Huang B, *et al.* Simulation of multimedia transfer and fate of Bisphenol A in Lake Dianchi [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(6): 1093-1100.
- [27] Yan Z Y, Liu Y H, Yan K, *et al.* Bisphenol analogues in surface water and sediment from the shallow Chinese freshwater lakes: occurrence, distribution, source apportionment, and ecological and human health risk [J]. *Chemosphere*, 2017, **184**: 318-328.
- [28] He Y, Wang Q M, He W, *et al.* The occurrence, composition and partitioning of phthalate esters (PAEs) in the water-suspended particulate matter (SPM) system of Lake Chaohu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **661**: 285-293.
- [29] Kameda Y, Kimura K, Miyazaki M. Occurrence and profiles of organic sun-blocking agents in surface waters and sediments in Japanese rivers and lakes [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(6): 1570-1576.
- [30] Montesdeoca-Esponda S, Sosa-Ferrera Z, Santana-Rodríguez J J. On-line solid-phase extraction coupled to ultra-performance liquid chromatography with tandem mass spectrometry detection for the determination of benzotriazole UV stabilizers in coastal marine and wastewater samples [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, **403**(3): 867-876.
- [31] Liu Y S, Ying G G, Shareef A, *et al.* Simultaneous determination of benzotriazoles and ultraviolet filters in ground water, effluent and biosolid samples using gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2011, **1218**(31): 5328-5335.
- [32] 李雯镜, 李志彤, 梁雪芳. 苯并三唑类紫外稳定剂在环境中的检测、分布及其毒性效应 [J]. *生态毒理学报*, 2018, **13**(1): 89-105.
- Li W J, Li Z T, Liang X F. Detection, distribution and

- toxicological effects of benzotriazole UV stabilizers [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, **13**(1): 89-105.
- [33] Gao X Y, Li J, Wang X N, *et al.* Exposure and ecological risk of phthalate esters in the Taihu Lake basin, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **171**: 564-570.
- [34] 刘鑫, 顾乐雨, 王屏, 等. 近 30 年太湖流域极端降水特征分析[J]. *水电能源科学*, 2015, **33**(9): 1-4.
Liu X, Gu L Y, Wang P, *et al.* Characteristics analysis of extreme precipitation in Taihu Lake basin in the last 30 years [J]. *Water Resources and Power*, 2015, **33**(9): 1-4.
- [35] 李霞, 王东红, 王金生, 等. 北京市枯水季和丰水季水源水中持久性有机污染物的水平分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 437-442.
Li X, Wang D H, Wang J S, *et al.* Analysis of persistent organic pollutants (POPs) levels in dry and wet seasons in source water of municipal waterworks in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 437-442.
- [36] 黄春琳, 李熙, 孙永远. 太湖水龄分布特征及“引江济太”工程对其的影响[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(1): 22-31.
Huang C L, Li X, Sun Y Y. Water age distribution of the Lake Taihu and impact of the Yangtze River to Lake Taihu Water transfer project on the water age [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(1): 22-31.
- [37] 胥瑞晨, 逢勇, 胡祉冰, 等. 太湖水龄与水力停留时间关系及参数敏感性[J]. *水资源保护*, 2020, **36**(3): 34-39.
Xu R C, Pang Y, Hu Z B, *et al.* Relationship between water age and hydraulic residence time in Taihu Lake and parameter sensitivity [J]. *Water Resources Protection*, 2020, **36**(3): 34-39.
- [38] Yan C X, Yang Y, Zhou J L, *et al.* Antibiotics in the surface water of the Yangtze Estuary: occurrence, distribution and risk assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **175**: 22-29.
- [39] 李婷. 珠江河口水体和沉积物中 6 种邻苯二甲酸酯污染及初步风险评价[D]. 广州: 暨南大学, 2014.
Li T. Pollution levels and risk assessment of 6 priority phthalate esters in water and sediments from estuaries of the Pearl River delta [D]. Guangzhou: Jī'nán University, 2014.
- [40] 陈秋丽, 刘宇君, 戴超威, 等. 广州市地表水源水中邻苯二甲酸酯的调查及其健康风险评价[J]. *广东化工*, 2021, **48**(4): 82-83, 99.
Chen Q L, Liu Y J, Dai C W, *et al.* Investigation and health risk assessment of phthalates in surface water sources in Guangzhou [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, **48**(4): 82-83, 99.
- [41] 丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 等. 太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1811-1819.
Ding J N, Liu S J, Zou J M, *et al.* Spatiotemporal distributions and ecological risk assessments of typical antibiotics in surface water of Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1811-1819.
- [42] Zhu G W, Qin B Q, Gao G, *et al.* Effects of hydrodynamics on phosphorus concentrations in water of Lake Taihu, a large, shallow, eutrophic lake of China [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 53-61.
- [43] 韩景. 太湖竺山湖湖流和水体迁移规律研究[J]. *水利规划与设计*, 2020, (7): 59-64, 123.
Han J. Study on regularities of water flow and water body migration of Zhushan lake, Taihu Lake [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2020, (7): 59-64, 123.
- [44] Su L, Xue Y G, Li L Y, *et al.* Microplastics in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 711-719.
- [45] Li D, Bi R, Chen H X, *et al.* The acute toxicity of bisphenol A and lignin-derived bisphenol in algae, daphnids, and Japanese medaka [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(30): 23872-23879.
- [46] Ding T D, Li W, Yang M T, *et al.* Toxicity and biotransformation of bisphenol S in freshwater green alga *Chlorella vulgaris* [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **747**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141144.
- [47] Giraudo M, Cottin G, Esperanza M, *et al.* Transcriptional and cellular effects of benzotriazole UV stabilizers UV-234 and UV-328 in the freshwater invertebrates *Chlamydomonas reinhardtii* and *Daphnia magna* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2017, **36**(12): 3333-3342.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy 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, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)