

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息	(4506, 4678, 4741)

白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征

程昕煜^{1,2,3}, 杨丽虎^{1,2,3*}, 宋献方^{1,2,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学中丹学院, 北京 101400; 3. 雄安创新研究院, 雄安 071700)

摘要: 为探究我国白洋淀淡水环境中微塑料的赋存特征, 于 2021 年 10 月通过野外采样、实验室预处理、显微镜观察和激光红外光谱测定等方法鉴定了淀区 10 份上覆水及 10 份沉积物样品中微塑料的丰度分布、形状、粒径和聚合物类型, 并通过 Stokes 沉降公式研究了微塑料在上覆水-沉积物界面的沉降规律, 对其污染特征及潜在来源进行分析。结果表明, 淀区上覆水及沉积物中微塑料丰度范围分别为 $474 \sim 19\,382 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $95.3 \sim 29\,542.5 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $6\,255.4 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $11\,088 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。上覆水中的微塑料主要聚合物为聚对苯二甲酸乙二醇酯 [PET, $(17.20 \pm 0.26)\%$], 沉积物中微塑料以氯化聚乙烯 [CPE, $(46.11 \pm 1.30)\%$] 为主。淀区内微塑料的沉降速度从 $0.0793 \sim 111.7547 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 不等, 粒径大的颗粒沉降速度较高, 易沉降并保留在沉积物中。研究区微塑料污染主要来源为洗涤废水产生的纺织纤维排放, 船舶漆、船舶橡胶和建筑材料磨损等过程。

关键词: 微塑料 (MPs); 上覆水; 沉积物; 污染特征; 白洋淀

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4344-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207093

Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments

CHENG Xin-yu^{1,2,3}, YANG Li-hu^{1,2,3*}, SONG Xian-fang^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China; 3. Xiong'an Institute of Innovation, Xiong'an 071700, China)

Abstract: In order to explore the occurrence characteristics of microplastics in the freshwater environment of Baiyangdian Lake in China, ten overlying water samples and ten sediment samples were collected in Baiyangdian Lake of Hebei Province in October 2021, and the abundance distribution, shape, particle size, and polymer type of microplastics in the samples were identified using laboratory pretreatment, microscope observation, and laser infrared spectroscopy. The sedimentation law of microplastics at the overlying water-sediment interface was studied using the Stokes sedimentation formula, and their pollution characteristics and potential sources were analyzed. The abundances of microplastics in the overlying water and sediments in Baiyangdian Lake ranged from $474 \sim 19\,382 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$ and $95.3 \sim 29\,542.5 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, with an average value of $6\,255.4 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$ and $11\,088 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$. The main polymer of the microplastics in the overlying water was polyethylene terephthalate [PET, $(17.20 \pm 0.26)\%$], and the microplastics in the sediments were mainly chlorinated polyethylene [CPE, $(46.11 \pm 1.30)\%$]. The sedimentation velocities of microplastics in the sedimentation zone ranged from $0.0793 \sim 111.7547 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. The particles with larger particle size had higher sedimentation velocity and easily settled and remained in the sediments. The main sources of microplastic pollution in the study area were the discharge of textile fibers from washing wastewater and the wear and tear of ship paint, ship rubber, and building materials.

Key words: microplastics (MPs); overlying water; sediment; pollution characteristics; Baiyangdian Lake

微塑料 (microplastics, MPs) 是一类新型污染物, 淡水生态系统中微塑料的暴露会对水生生物及淡水环境健康构成潜在威胁^[1]; 首先, 微塑料作为一种污染物, 其本身具有毒性^[2], 被水生动物误食后会危害其生命健康^[3]; 其次, 由于体积小且比表面积大等特征, 微塑料对环境中的抗生素、重金属和有机污染物等多种污染物质^[4,5], 具有较强的吸附能力, 被吸附的污染物又会从微塑料表面解吸至自然环境中, 影响生态系统健康; 此外, 微塑料所含添加剂的浸出也会对环境健康造成威胁^[6]。

近年来国内外对淡水中微塑料污染的报道逐渐增多^[7], 但已有研究多关注表层水体及沉积物介质中的微塑料赋存^[8]。例如, Rakib 等^[9]首次研究了孟加拉国卡纳普利河河口沉积物中的微塑料, 发现其丰度从 $22.29 \sim 59.5 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 不等。作为人口多且密度大的塑料制造大国, 我国已在鄱阳湖、洞庭湖、

洪湖、太湖、淀山湖和巢湖等^[10~15]多个淡水湖泊的表层水及沉积物中检测出微塑料。虽然类似研究有所增加^[16], 但对上覆水-沉积物界面微塑料污染的关注相对较少。微塑料从上覆水向沉积物中的输送是一个重力沉降过程, 其沉降速率的大小决定了沉积物中微塑料的赋存丰度^[17]。已有研究采用 Stokes 沉速公式分析淡水环境中微塑料的沉降过程^[18], Stokes 公式适用于流速较小的封闭水域^[19], 可对微塑料重力沉降速度进行定量研究, 用于分析微塑料在上覆水-沉积物界面的沉降规律。阐明上覆水与沉积物介质中的赋存特征是研究微塑料对淡水环境影响的主要过程。由于湖泊水域流速较缓且相

收稿日期: 2022-07-08; 修订日期: 2022-10-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFA0607102)

作者简介: 程昕煜 (1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为淡水环境微塑料污染, E-mail: Cxydxs1999@163.com

* 通信作者, E-mail: yanglihu@igsnrr.ac.cn

对封闭,表层微塑料颗粒受水动力等条件影响向下沉降,沉积物中赋存的微塑料又通过再悬浮而释放到上覆水中^[20].因此,研究湖泊水域上覆水与沉积物中的微塑料可以为湖泊微塑料污染防治提供科学参考.白洋淀作为雄安新区重要的生态屏障,其水域环境质量得到广泛关注^[21].已有研究表明在白洋淀表层水体、沉积物,甚至鱼类体内检测到微塑料污染,且其丰度较高.周泽妍等^[22]研究了白洋淀-府河入淀口沉积物中的微塑料污染情况,结果表明府河沉积物中微塑料的平均丰度为 $(558.4 \pm 233.3) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,最大丰度值达到 $1049 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$.受湖水水动力条件和上覆水-沉积物界面双向流的影响^[23],需要认识微塑料在上覆水-沉积物界面的赋存特征,目前针对这一区域的污染研究十分有限.为了探明该界面微塑料赋存特征及其垂直分布规律,本研究采集白洋淀上覆水和沉积物样品,分析了上覆水及沉积物中微塑料的丰度分布及聚合物类型等特征,探

明了不同介质中微塑料的潜在来源.本研究对于保障白洋淀环境健康和治理淡水微塑料污染具有双重意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白洋淀地处华北平原中部($38^{\circ}43' \sim 39^{\circ}02' \text{N}$ 、 $115^{\circ}38' \sim 116^{\circ}07' \text{E}$),总面积为 366 km^2 ,淀区平均水深约 2.5 m ,东西长 39.5 km ,南北宽 28.5 km ,是华北平原最大的淡水湖泊^[24](如图1).白洋淀属于海河流域大清河水系,有9条直接汇入淀区的河流,分别为:大清河南支的潞龙河、唐河、府河、漕河、南瀑河、北瀑河、萍河、孝义河和北支的白沟引河^[25].根据白洋淀五大功能分区^[26]均匀布设了10个采样站点.各采样点位置信息见图1:B1属于自然区、B2属于旅游区、B3、B4属于生活区、B5~B7属于养殖区和B8~B10属于河口区.

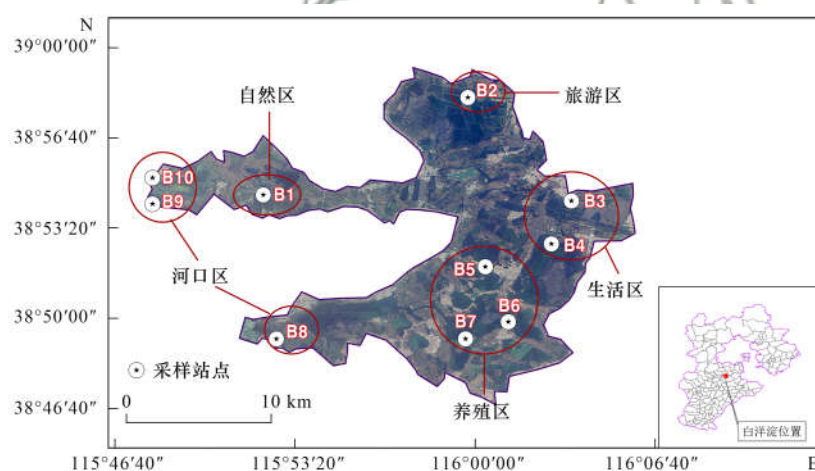


图1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Location of study area

1.2 样品采集

于2021年10月取样研究,每个采样点位分别平行采集3份上覆水及沉积物样品,用GPS定位仪定位并记录周围环境情况.采用过滤法进行水中微塑料样品的采集^[27],使用2 L卡盖式不锈钢柱式采水器采集20 L上覆水(水底以上0~20 cm),将水样通过300目不锈钢筛网过滤,再将筛网上的残余物质用超纯水冲洗转移到250 mL玻璃瓶中.同时,使用2 L不锈钢抓泥斗在各采样点采集表层(0~20 cm)沉积物样品约5 kg,样品置于铝箔袋($21 \times 31 \text{ cm}$)中.所有样品均在 4°C 低温密封保存,以便后续实验室检测.

1.3 样品的分离与提取

上覆水样品:将水样转入500 mL锥形瓶中,加入60 mL H_2O_2 溶液(30%).用锡箔纸遮盖锥形瓶瓶

口,将其置于恒温振荡器中(65°C , $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)振荡2~3 d,静置2 d进行消解.待充分消解后,使用真空抽滤系统对样品进行抽滤,滤膜采用孔径 $10 \mu\text{m}$ 的金属钢膜.将得到的钢膜置于干燥的玻璃培养皿中,贴好标签,以便后续镜检及激光红外测试.

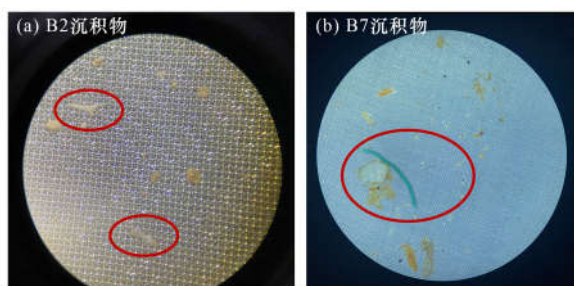
沉积物样品:取2~3 kg沉积物样品自然风干至恒重,碾碎较大块状物,采用不锈钢筛网(1 mm)筛出大粒径杂质.每个点位称取10 g筛下物于500 mL锥形瓶中,加入60 mL H_2O_2 溶液(30%),用锡箔纸遮盖锥形瓶瓶口,静置4~5 d进行消解.待充分消解后,收集上清液于500 mL烧杯中,加入60 mL ZnCl_2 ($1.7 \sim 1.8 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$)溶液进行浮选^[28],使用玻璃棒搅拌均匀后静置24 h.待明显分层后收集上清液于另一洁净的500 mL烧杯中,重复浮选过程2~3次.对上清液进行真空抽滤,后续步骤与上覆水样

品相同。

为保证实验质量,室内实验过程在洁净干燥的实验台上进行,且实验过程需穿着棉质实验服及丁腈手套。所有实验耗材均为玻璃制品,使用前需用超纯水冲洗3次并烘干。

1.4 样品的鉴定分析

将预处理所得到的钢膜置于光学显微镜(上海光学仪器厂,SG-51)下观察疑似微塑料颗粒的数量、颜色、粒径及形态等特征并拍照记录(图2)。上覆水中的微塑料丰度表示为“ $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ ”,沉积物中的微塑料丰度表示为“ $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ”。



显微镜放大倍数:(a)为40倍,(b)为10倍

图2 光学显微镜镜检照片

Fig. 2 Microscopic photo of optical microscope

使用安捷伦 8700 LDIR 激光红外成像仪(安捷伦科技有限公司,8700 LDIR)进行聚合物成分鉴定。利用 Agilent Clarity 软件,1 800 cm^{-1} 处固定波数对选定面积进行快速扫描。在获得颗粒谱图后,软件将自动与谱库中的标准谱图对比,将匹配度高于70%的颗粒鉴定为微塑料颗粒。

实验所得数据均使用 Microsoft Excel 2016 工作表进行初步分析,采用 Origin 2021 (Origin Lab) 软件进行数据统计图表的绘制, ArcMap 10.7 软件用于绘制研究区域概况图。

1.5 沉降速度计算

采用粒子沉降的 Stokes 沉降公式计算微塑料的沉降速度(V_s)^[29],公式为:

$$V_s = \left(\frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \right) g w_* \gamma \quad (1)$$

$$w_* = 1.74 \times 10^{-4} D_*^2 \quad (D_* < 0.05) \quad (2)$$

$$D_* = \left(\frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \right) g D_n^3 / \gamma^2 \quad (3)$$

式中, ρ_p 为塑料的密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), ρ_w 为水的密度 ($1\,000\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), g 为重力加速度 ($9.81\,\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), γ 为水的运动粘度 ($1 \times 10^{-6}\,\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)。无因次沉降速度 w_* 可以通过无因次粒径 D_* ($D_* < 0.05$) 计算得出,无因次粒径 D_* 可由等效球体直径 D_n (m) 计算得到。

根据聚合物的密度将微塑料分为5类:① 830~980 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (PP 和 PE), ② 1 000~1 100 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (PS 和 PU), ③ 1 100~1 300 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [聚碳酸酯(PC)和丙烯酸酯共聚物(ACR)], ④ 1 300~1 400 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [PVC、PET 和聚对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)], ⑤ $> 1\,500\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [聚偏二氟乙烯(PVDF)、聚四氟乙烯(PTFE)和高填充率塑料]。其中第1类PP和PE的密度小于水的密度,颗粒沉降速度为负,故暂不讨论这类塑料的 V_s 。为了便于计算,分别取1 050、1 200、1 350和1 580表示后4类塑料的密度 ρ_p ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。

2 结果与分析

2.1 上覆水中微塑料的赋存特征

所有上覆水样品中均检测出一定丰度的微塑料,平均丰度为 $(6\,255.4 \pm 279.88)\,\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ (图3),介于474~19 382 $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间。通过单因素 ANOVA 检验,发现 B2、B3、B4、B5、B9 和 B10 点上覆水中微塑料丰度的分布上具有显著性差异 ($P < 0.05$),淀区上覆水中微塑料丰度最高点出现在 B5,达到 $(18\,487 \pm 895)\,\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$;丰度次高点为 B2,丰度达到 $(16\,000 \pm 640)\,\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ 。B7 微塑料的丰度最低,仅为 $(500 \pm 24.5)\,\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ 。不同功能区域上覆水中微塑料的丰度有所差异,自然区平均丰度最低 ($550 \pm$

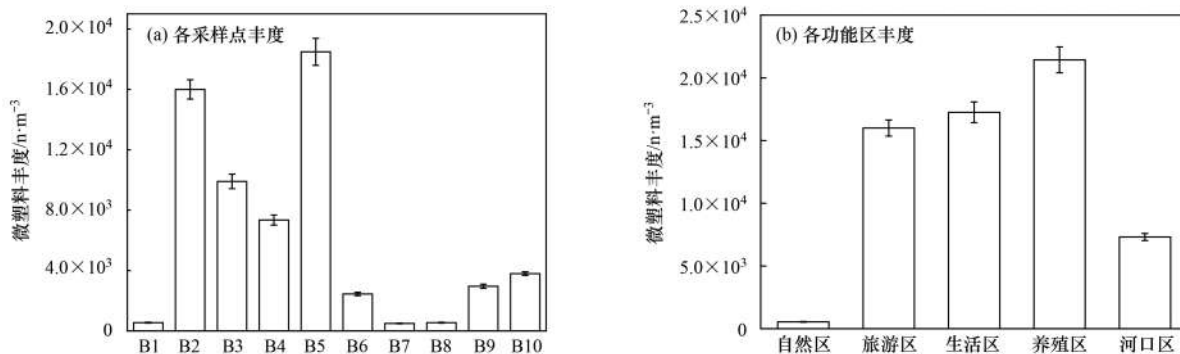


图3 白洋淀上覆水微塑料丰度分布

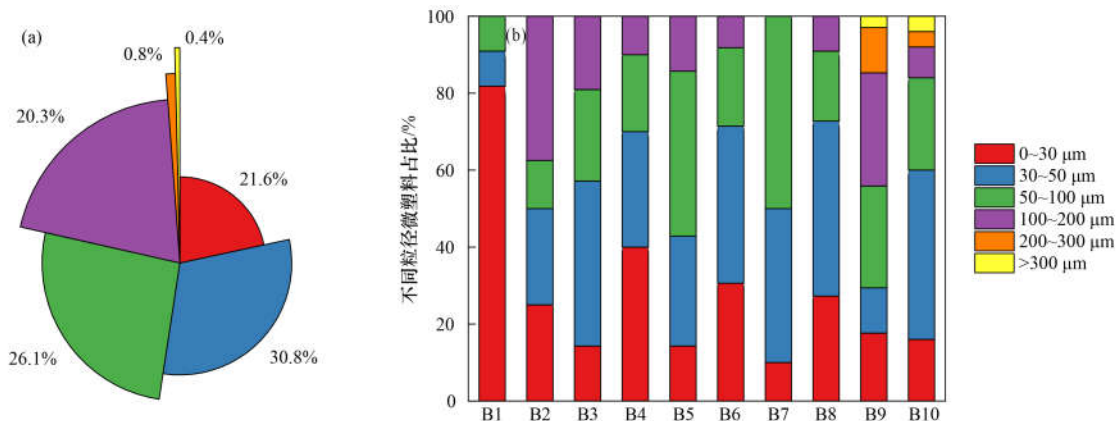
Fig. 3 Abundance distribution of microplastics in the overlying water of Baiyangdian Lake

26) $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$, 养殖区微塑料平均丰度最高 21 437 $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$, 约为自然区的 39 倍.

2.2 上覆水微塑料的形貌特征

按照 0 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 100、100 ~ 200、200 ~ 300 和 >300 μm 这 6 个类别对白洋淀淀区上覆水中微塑料的粒径进行分类(图 4). 由图 4 可得, 白

洋淀淀区上覆水中微塑料在粒径区间 0 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 100、100 ~ 200、200 ~ 300、200 ~ 300 和 >300 μm 占比分别为: $(21.6 \pm 0.88)\%$ 、 $(30.8 \pm 0.94)\%$ 、 $(26.1 \pm 1.13)\%$ 、 $(20.3 \pm 0.95)\%$ 、 $(0.8 \pm 0.03)\%$ 和 $(0.4 \pm 0.01)\%$, 粒径在 30 ~ 50 μm 区间的数量最多, 粒径 >300 μm 占比最小.



(a) 上覆水中微塑料粒径分布, (b) 各采样点微塑料粒径分布

图 4 白洋淀上覆水微塑料粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of microplastics in the overlying water of Baiyangdian Lake

利用安捷伦 8700 LDIR 激光红外成像仪对微塑料样品进行检测, 通过对比样品谱图与标准谱图确定颗粒物组成, 上覆水中微塑料成分分布如图 5 所示. 鉴定结果显示, 淀区水体中微塑料的化学成分主要包括: 聚对苯二甲酸乙二醇酯 [PET, $(17.20 \pm 0.26)\%$]、聚氨酯 [PU, $(15.50 \pm 0.65)\%$]、硅树脂 [silicone, $(11.58 \pm 0.47)\%$]、聚丙烯 [PP, $(9.63 \pm 0.39)\%$]、丙烯酸酯共聚物 [ACR, $(9.56 \pm 0.28)\%$]、氯化聚乙烯 [CPE, $(8.68 \pm 0.33)\%$]、酚醛树脂 [WP-phenol-formaldehyde resin, $(7.10 \pm 0.34)\%$]、氟橡胶 [WP-fluororubber, $(4.52 \pm 0.12)\%$]、乙烯-丙烯酸共聚物 [EAA, $(4.22 \pm$

$0.20)\%$]、乙烯-醋酸乙烯酯共聚物 [EVA, $(3.28 \pm 0.14)\%$]、聚酰亚胺 [PI, $(3.20 \pm 0.06)\%$]、聚乙烯 [PE, $(1.93 \pm 0.08)\%$] 共 12 种(图 5). 其中占比最多的为 PET, 占到微塑料颗粒总量的 $(17.20 \pm 0.26)\%$; 其次为 PU, 占微塑料样品总量的 $(15.50 \pm 0.65)\%$.

2.3 沉积物中微塑料的赋存特征

白洋淀沉积物样品中微塑料的丰度分布如图 6, 其丰度范围从 95.3 ~ 29 542.5 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 不等, 平均丰度为 11 088 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$. 通过单因素 ANOVA 检验, 发现 B1、B2、B3、B6、B7 和 B8 点沉积物中微塑料丰度的分布上具有显著性差异 ($P < 0.05$), 所有沉积物样品中, 微塑料丰度最高的为 B6 点, 其丰度高达 $(28\,231 \pm 1\,311.5) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 丰度最低的站点为 B9, 丰度仅为 $(100 \pm 4.7) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$. 淀区丰度高于 10 000 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的采样点共 5 个 (B2、B3、B6、B7 和 B8). 此外, 不同功能分区的微塑料丰度分布特征表明, 养殖区积累的丰度最高 $(41\,042 \pm 1\,052.1) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而自然区最低 $(5\,858 \pm 290) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$.

2.4 微塑料的粒径分布特征

按照 0 ~ 30、30 ~ 50、50 ~ 100、100 ~ 200、200 ~ 300 和 >300 μm 这 6 个类别对白洋淀淀区沉积物中微塑料的粒径进行分类(图 7).

由图 7 可得, 在 10 个采样点中, 有 6 个采样点的粒径分布范围跨越了 5 个分类区间及以上. 白洋淀淀区沉积物中微塑料粒径分布最广的区间是 0 ~

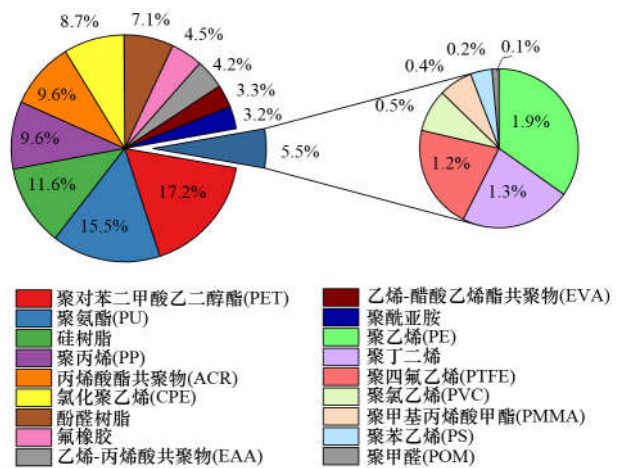


图 5 白洋淀上覆水微塑料构成

Fig. 5 Composition of water microplastics overlying Baiyangdian Lake

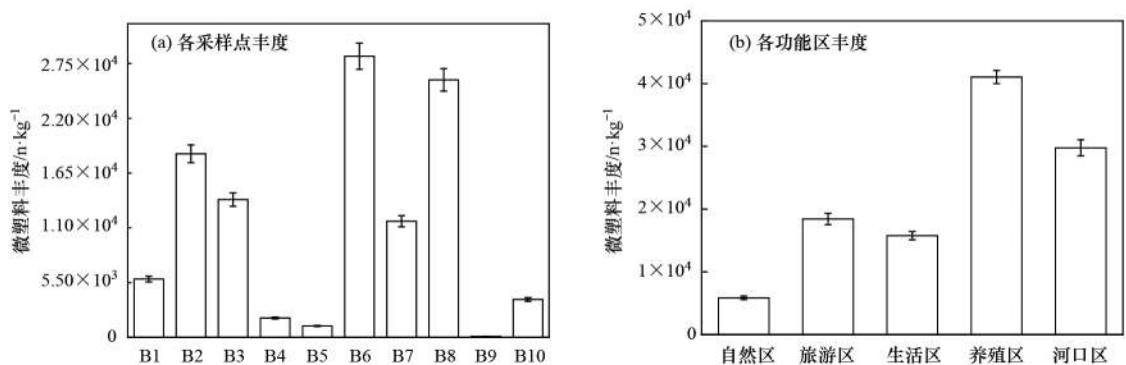
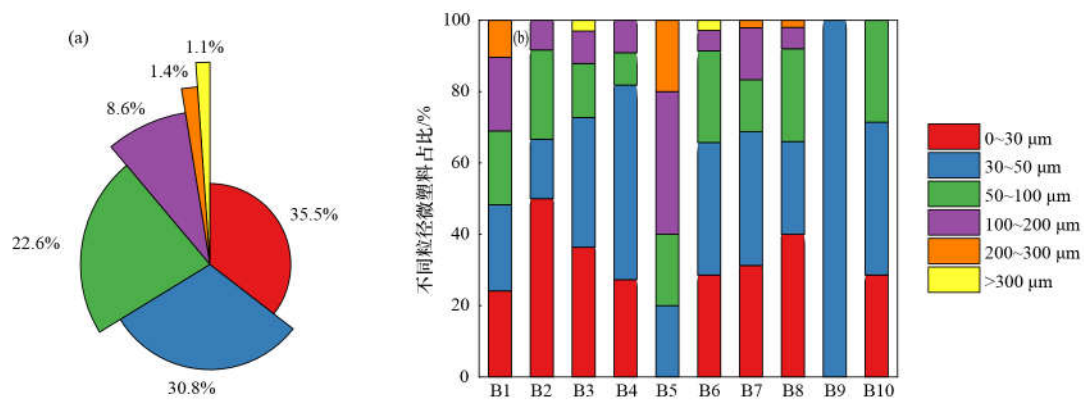


图 6 白洋淀沉积物微塑料丰度分布

Fig. 6 Abundance distribution of microplastics in Baiyangdian Lake sediments



(a) 沉积物中微塑料粒径分布, (b) 各采样点微塑料粒径分布

图 7 白洋淀沉积物微塑料粒径分布

Fig. 7 Particle size distribution of microplastics in Baiyangdian Lake sediments

30 μm 范围, 所占比例达到 $(35.5 \pm 0.97)\%$; 其次为 30~50 μm 范围, 所占比例达 $(30.8 \pm 0.74)\%$; 粒径 >300 μm 的微塑料颗粒占比最少, 仅为 $(1.1 \pm 0.03)\%$; 其余几种粒径类别均有不同程度的分布.

2.5 白洋淀沉积物微塑料聚合物成分分析

通过分析表征结果, 淀区沉积物样品中检测出的微塑料类型主要包括: CPE [$(46.11 \pm 1.30)\%$], ACR [$(10.54 \pm 0.27)\%$], WP-fluororubber [$(7.63 \pm 0.28)\%$], EVA [$(6.57 \pm 0.22)\%$], PU [$(5.31 \pm 0.16)\%$], PP, [$(4.72 \pm 0.13)\%$], WP-phenol-formaldehyde resin [$(4.71 \pm 0.12)\%$] 和 PE [$(4.12 \pm 0.20)\%$] 这 8 种塑料类型, 具体构成分布如图 8 所示.

3 讨论

3.1 上覆水和沉积物微塑料组成差异

综合分析白洋淀上覆水及沉积物介质中微塑料的污染特征可得, 上覆水中微塑料丰度分布特征呈现东北高、西南低的规律, 而沉积物中呈现南北两端较高、中间部分较低的规律. 水-沉积物界面的微塑料污染水平整体偏高, 粒径跨度大, 小粒径丰度

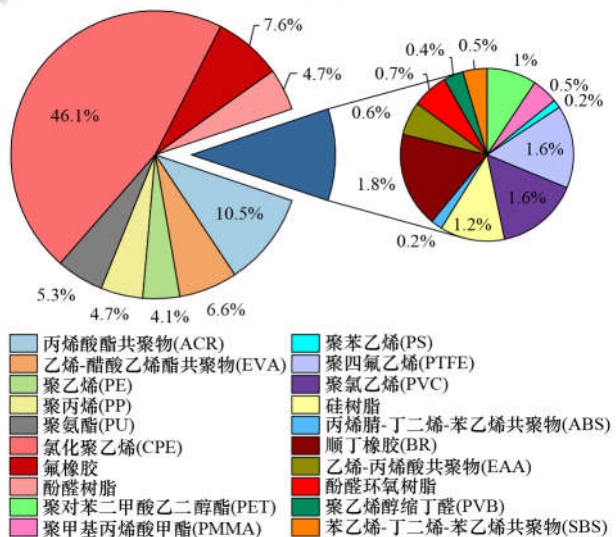


图 8 白洋淀沉积物微塑料构成

Fig. 8 Composition of microplastics in Baiyangdian Lake sediments

高, 且其聚合物类型丰富, 对水域环境及人类健康存在潜在威胁. 对比 10 个采样点上覆水及沉积物中的微塑料丰度、粒径及聚合物类型等数据, 得知污染物在两种介质间的组成差异, 如图 9 和表 1 所示.

由图 9 可知, 沉积物中粒径较大的颗粒 (>300 μm) 丰度也较高, 约为同粒径段上覆水水体中颗粒

表 1 水体和沉积物中微塑料聚合物成分特征对比

Table 1 Comparison of composition characteristics of microplastic polymers in water and sediments

聚合物类型	微塑料丰度	
	上覆水/ $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$	沉积物/ $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$
聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)	10.76 ± 0.51	$1\,065.00 \pm 43.25$
聚氨酯 (PU)	9.69 ± 0.32	$5\,887.00 \pm 194.35$
硅树脂	7.24 ± 0.23	$1\,379.00 \pm 38.95$
聚丙烯 (PP)	6.02 ± 0.21	$5\,233.00 \pm 161.64$
丙烯酸酯共聚物 (ACR)	5.98 ± 0.20	$11\,682.00 \pm 385.10$
氯化聚乙烯 (CPE)	5.43 ± 0.21	$51\,124.00 \pm 1\,023.20$
酚醛树脂	4.44 ± 0.14	$5\,221.00 \pm 140.05$
氟橡胶	2.83 ± 0.10	$8\,462.00 \pm 310.10$
乙烯-丙烯酸共聚物 (EAA)	2.64 ± 0.09	719.00 ± 24.30
乙烯-醋酸乙烯酯共聚物 (EVA)	2.05 ± 0.06	$7\,287.00 \pm 164.30$
聚酰亚胺	2.00 ± 0.04	0.00
聚乙烯 (PE)	1.21 ± 0.01	$4\,573.00 \pm 104.65$
聚丁二烯	0.78 ± 0.01	0.00
聚四氟乙烯 (PTFE)	0.74 ± 0.03	$1\,771.00 \pm 48.45$
聚氯乙烯 (PVC)	0.30 ± 0.01	$1\,765.00 \pm 58.50$
聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)	0.24 ± 0.01	555.00 ± 17.30
聚苯乙烯 (PS)	0.15 ± 0.01	177.00 ± 7.56
聚甲醛 (POM)	0.05 ± 0.01	0.00
丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (ABS)	0.00	243.00 ± 6.40
顺丁橡胶 (BR)	0.00	$2\,033.00 \pm 30.40$
酚醛环氧树脂	0.00	768.00 ± 17.30
聚乙烯醇缩丁醛 (PVB)	0.00	419.00 ± 19.60
苯乙烯-丁二烯-苯乙烯共聚物 (SBS)	0.00	517.00 ± 21.43

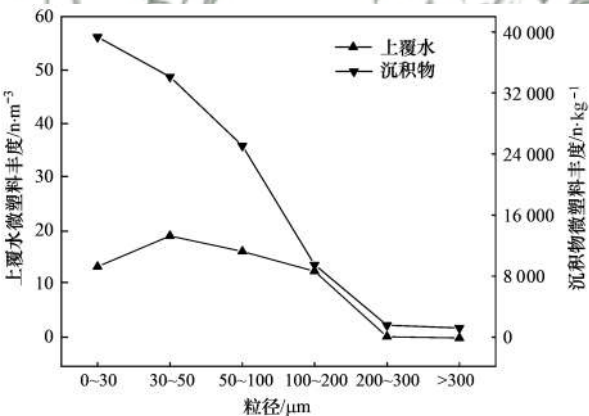


图 9 水体和沉积物中微塑料粒径分布特征对比

Fig. 9 Comparison of particle size distribution characteristics of microplastics in water and sediments

数的5 130倍.表 1 得知沉积物中微塑料丰度较高,且沉积物中所含的各类塑料聚合物丰度均对应显著高于上覆水中微塑料的丰度,其倍数从 $10^2 \sim 10^5$ 不等.由于微塑料单位体积受到的水体阻力有所差异,会出现大粒径颗粒的沉降速率比小粒径颗粒的沉降速率高的现象^[30].颗粒粒径是表征微塑料的一大标准,粒径不同的颗粒通常沉降速率也有所差异,即“粒径”是微塑料迁移沉降过程的一大影响因素^[31].有调查发现,粒径较小的微塑料颗粒能更有效地留存在淡水水体中,其迁移主要是由水动力条件所致,而大片的微塑料颗粒极易沉降并保存至沉积物

中^[32],即在仅考虑粒径大小的情况下,颗粒越大,沉降越快.也有研究表明,由于微塑料的聚集沉积和斯托克斯沉降作用,小粒径的微塑料更易被水体运输而导致颗粒迁移,而较大粒径的微塑料却易被保留下来,沉降到底泥中^[33].

根据 Stokes 沉降公式计算,发现白洋淀淀区内微塑料的沉降速度从 $0.079\,3 \sim 111.754\,7\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 不等(图 10).相比于其他功能分区,河口区的聚合物类型最丰富,而自然区仅含 PET 和 PU 两类微塑料且其沉降速度较低,其中 PET 平均沉降速度为 $0.62\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,PU 平均沉降速度为 $0.35\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.养殖区微塑料的平均沉降速度较高,其中 PET 的平均沉降速度最高,为 $28.82\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,ACR 平均沉降速度次高($3.24\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$).生活区流域中含有 ACR、PET、PTFE、PU 和 PS 等微塑料,其中 PET 沉降速率最高,为 $1.40\,\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,这是由于该区域 PET 塑料粒较大且密度高,沉降到沉积物中的含量较高,符合实验测得的结果.综合分析,人为影响因素较高的功能区微塑料类型丰富且沉降速度高,微塑料的性质(密度和尺寸)会直接影响其沉降速度,粒径大的颗粒沉降速度较高,易沉降并保留在沉积物中.

3.2 上覆水和沉积物微塑料来源及影响因素

人类活动、农业和工业生产是淡水水体中微塑料污染的主要来源^[34].微塑料进入水体环境的污染

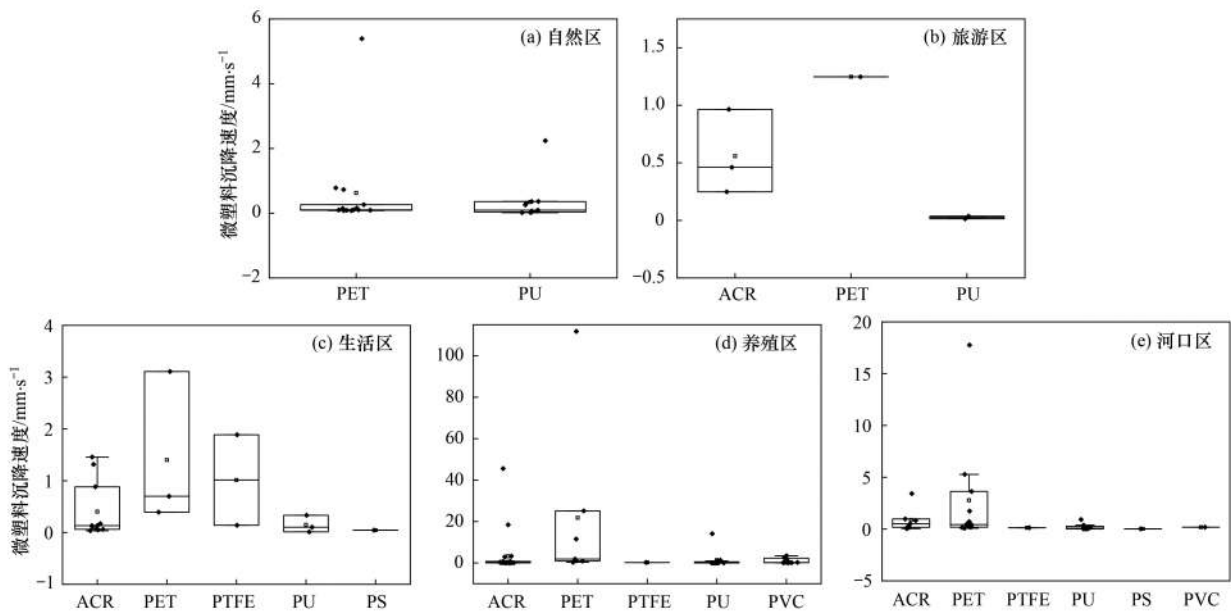


图 10 不同功能分区微塑料沉降速度箱式图

Fig. 10 Box diagram of microplastic sedimentation velocity in different functional zones

途径包括废水排放、地表径流和生活垃圾磨损等方式^[35~37]. 白洋淀流域包含较多淀中村、随着白洋淀资源的开发,淀区内规划有淀中村、旅游景区、水产养殖区和工业生产区等区域,其生产生活产生的塑料废弃物均可能为白洋淀潜流带中微塑料的来源^[38]. 白洋淀上覆水中 PET 含量较高 $[(17.20 \pm 0.26)\%]$,日常生活中,PET 聚合物是纺织纤维的主要成分,其来源通常为洗涤过程中衣物释放的合成纤维^[39]. 由于研究区周围人类活动较为密集,产生的含有纺织纤维颗粒的洗涤废水会排入白洋淀流域,成为 PET 微塑料污染的潜在来源. 其次,白洋淀有传统造船技艺,PU 作为船舶漆、建筑材料的主要材质^[40],极有可能在水力磨损下释放到水体环境中,故上覆水中检测得到的 PU 含量也较高 $[(15.50 \pm 0.65)\%]$. 本研究分析结果表明,白洋淀沉积物中含量最高的微塑料成分为 CPE $[(46.11 \pm 1.30)\%]$. CPE 作为一种新型合成塑料,具有优良的各项性能,常被制成各种用途的橡胶件,如汽车、船舶和机车车辆用橡胶件等^[41]. 由于白洋淀河口区来往船舶较多,在风力、水动力和光照等外界条件共同影响下,船舶橡胶可能会磨损脱落,在此水域的沉积物中大量累积,故以上船舶等交通工具上的橡胶材料可能成为 CPE 微塑料的潜在来源. 此外,大气沉降、地表径流、生活垃圾和污水处理厂污泥输送等途径也均可能为淀区流域微塑料的潜在来源,其对微塑料污染的贡献率有待进一步研究^[42~45].

4 结论

(1) 本研究对白洋淀淀区上覆水及沉积物中微

塑料的污染状况展开研究,探究分析了上覆水及沉积物中微塑料的丰度、形貌特征以及聚合物成分并讨论了白洋淀水体和沉积物中微塑料污染的潜在来源. 结果表明,白洋淀各采样点上覆水及沉积物样品中均有一定丰度的微塑料检出,且存在显著空间丰度差异性. 在统一单位的条件下,沉积物中微塑料平均丰度为 $11\,088\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$,明显高于水体中的平均丰度 $6.26\text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$. 激光红外表征结果表明,白洋淀流域微塑料的粒径范围较广,其中丰度最大的粒径集中在 $0\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 区间,这表明白洋淀小颗粒的微塑料丰度较高,对生态环境及人类健康产生潜在威胁. 由 Stokes 沉速公式计算,得知粒径较大的微塑料颗粒沉降速度更快,更易留存在沉积物中. 洗涤废水造成的纺织纤维排放,船舶漆、船舶橡胶和建筑材料等磨损为白洋淀中微塑料的主要来源.

(2) 本研究选取的 10 个采样点覆盖了白洋淀主要淀区水域,但受时间条件限制只采集了同一时期的样品,缺乏对不同代表性时段上覆水及沉积物中微塑料赋存特征的全面调查. 后续可根据不同时期环境和人类活动的特点制定持续性采样方案,扩大采样范围及采样点的密集程度,并开展野外实验,确保微塑料丰度检测和来源分析的准确性,为后续塑料污染控制提供科学依据.

参考文献:

- [1] Erdoğan S. Microplastic pollution in freshwater ecosystems; a case study from turkey[J]. Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2020, 37(3): 213-221.
- [2] 武芳竹, 曾江宁, 徐晓群, 等. 海洋微塑料污染现状及其对鱼类的生态毒理效应[J]. 海洋学报, 2019, 41(2): 85-98. Wu F Z, Zeng J N, Xu X Q, et al. Status of marine microplastic

- pollution and its ecotoxicological effects on marine fish[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, **41**(2): 85-98.
- [3] Katare Y, Singh P, Sankhla M S, *et al.* Microplastics in aquatic environments: sources, ecotoxicity, detection & remediation[J]. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2022, **12**(3): 3407-3428.
- [4] Shi J Y, Dong Y B, Shi Y Y, *et al.* Groundwater antibiotics and microplastics in a drinking-water source area, northern china: occurrence, spatial distribution, risk assessment, and correlation [J]. *Environmental Research*, 2022, **210**, doi: 10.1016/j.envres.2022.112855.
- [5] Khalid N, Aqeel M, Noman A, *et al.* Interactions and effects of microplastics with heavy metals in aquatic and terrestrial environments[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **290**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118104.
- [6] 郑阳, 王娟, 查旭琼, 等. 微塑料对土壤污染物的吸附行为研究进展[J]. *广州化工*, 2021, **49**(20): 13-15, 44.
Zheng Y, Wang J, Zha X Q, *et al.* Research progress on adsorption of soil pollutants by microplastics [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2021, **49**(20): 13-15, 44.
- [7] 张国珍, 任豪, 周添红, 等. 淡水环境中微塑料的分布及生物毒性研究进展[J]. *给水排水*, 2022, **48**(1): 162-171.
Zhang G Z, Ren H, Zhou T H, *et al.* Research progress on the distribution and biotoxicity of microplastics in freshwater environment[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, **48**(1): 162-171.
- [8] 钱亚茹, 石磊磊, 沈茜, 等. 淡水环境中微塑料污染及毒性效应研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, **12**(4): 1096-1104.
Qian Y R, Shi L L, Shen Q, *et al.* Research progress on pollution and toxic effects of microplastics in freshwater environment [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, **12**(4): 1096-1104.
- [9] Rakib M R J, Hossain M B, Kumar R, *et al.* Spatial distribution and risk assessments due to the microplastics pollution in sediments of Karnaphuli River Estuary, Bangladesh [J]. *Scientific Reports*, 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-022-12296-0.
- [10] 江为群, 胡启武, 简敏菲, 等. 鄱阳湖典型区铜锈环棱螺体内微塑料分布特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2633-2639.
Jiang W Q, Hu Q W, Jian M F, *et al.* Distribution characteristics of microplastics in bellamyia aeruginosa in typical area of Poyang Lake[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2633-2639.
- [11] Yin L S, Wen X F, Du C Y, *et al.* Comparison of the abundance of microplastics between rural and urban areas: a case study from east dongting lake [J]. *Chemosphere*, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125486.
- [12] Wang W F, Yuan W K, Chen Y L, *et al.* Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 539-545.
- [13] Zhang Q J, Liu T, Liu L, *et al.* Distribution and sedimentation of microplastics in taihu lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **795**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148745.
- [14] 周刚, 徐晨烨, 沈忱思, 等. 微塑料在淀山水体环境的污染分布、组成特征和生态风险[J]. *环境科学学报*, 2022, **42**(4): 214-224.
Zhou G, Xu C Y, Shen C S, *et al.* Distribution, composition and ecological risks of microplastics in surface water of the Dianshan Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(4): 214-224.
- [15] Li L, Geng S X, Wu C X, *et al.* Microplastics contamination in different trophic state lakes along the middle and lower reaches of yangtze river basin [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.07.119.
- [16] 李卓然, 季民, 赵迎新, 等. 全球微塑料研究现状及热点可视化剖析[J]. *环境化学*, 2022, **41**(4): 1124-1136.
Li Z R, Ji M, Zhao Y X, *et al.* Visual analysis of global microplastics research status and hotspots [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(4): 1124-1136.
- [17] Ling X, Yan Z H, Lu G H. Vertical transport and retention behavior of polystyrene nanoplastics in simulated hyporheic zone [J]. *Water Research*, 2022, **219**, doi: 10.1016/j.watres.2022.118609.
- [18] Onink V, Wichmann D, Delandmeter P, *et al.* The role of ekman currents, geostrophy, and stokes drift in the accumulation of floating microplastic [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, **124**(3): 1474-1490.
- [19] 王振, 窦明, 任鹏举, 等. 基于沉降实验的微塑料静水沉降公式拟合[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, **54**(8): 687-693.
Wang Z, Dou M, Ren P J, *et al.* Fitting of static water settlement formula of microplastics based on settlement experiment[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, **54**(8): 687-693.
- [20] 张海涵, 王娜, 宗容容, 等. 水动力条件对藻类生理生态学影响的研究进展[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(1): 181-190.
Zhang H H, Wang N, Zong R R, *et al.* Research progress on influence of hydrodynamic conditions on algal physiology and ecology[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(1): 181-190.
- [21] 段茂庆, 许维, 苑飞燕, 等. 白洋淀近 5 年水生态环境质量变化趋势与营养状态分析[J]. *环境化学*, 2022, **41**(6): 1988-2000.
Duan M Q, Xu W, Yuan F Y, *et al.* Analysis on the trend and nutritional status of water environment quality in Baiyangdian Lake in recent 5 years[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(6): 1988-2000.
- [22] 周泽妍, 王思琦, 张盼月, 等. 白洋淀-府河入淀口段沉积物中微塑料的丰度及分布特征[J]. *环境工程学报*, 2021, **15**(1): 360-367.
Zhou Z Y, Wang S Q, Zhang P Y, *et al.* Microplastic abundance and distribution in sediments of Fuhe River estuary into the Baiyangdian Lake [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, **15**(1): 360-367.
- [23] Frei S, Piehl S, Gilfedder B S, *et al.* Occurrence of microplastics in the hyporheic zone of rivers[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-51741-5.
- [24] 赵晓东, 彭杨. 近 30 年白洋淀湿地景观的时空变化特征[J]. *湿地科学与管理*, 2021, **17**(2): 4-8.
- [25] Zhao X D, Peng Y. Spatiotemporal changes of the landscapes of Baiyangdian Wetland during recent 30 Years [J]. *Wetland Science & Management*, 2021, **17**(2): 4-8.
- 廖珍梅, 杨薇, 蔡宴朋, 等. 大清河-白洋淀流域生态功能评价及分区初探[J]. *环境科学学报*, 2022, **42**(1): 131-140.
Liao Z M, Yang W, Cai Y P, *et al.* Assessment and regionalization of ecological functions in the Daqing River-Baiyangdian Lake Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(1): 131-140.

- [26] Zhou S L, Sun Y, Li Z X, *et al.* Characteristics and driving factors of the aerobic denitrifying microbial community in baiyangdian lake, xiong'an new area[J]. *Microorganisms*, 2020, **8**(5), doi: 10.3390/microorganisms8050714.
- [27] 陈薇, 孙瑞瑞, 黄荣, 等. 环境中微塑料的脱除及资源化利用研究进展[J]. *塑料科技*, 2022, **50**(6): 103-108.
Chen W, Sun R R, Huang R, *et al.* Research progress on removal and resource utilization of microplastics in environment[J]. *Plastics Science and Technology*, 2022, **50**(6): 103-108.
- [28] 白水泉, 边佳诚, 王乐园, 等. 水环境微塑料去除技术的研究进展[J]. *中国塑料*, 2022, **36**(8): 166-175.
Bai S Q, Bian J C, Wang L Y, *et al.* Research progress in removal technologies of microplastics in water environment[J]. *China Plastics*, 2022, **36**(8): 166-175.
- [29] Drummond J D, Nel H A, Packman A I, *et al.* Significance of hyporheic exchange for predicting microplastic fate in rivers[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7**(10): 727-732.
- [30] Khatmullina L, Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **114**(2): 871-880.
- [31] Xiong X, Wu C X, Elser J J, *et al.* Occurrence and fate of microplastic debris in middle and lower reaches of the Yangtze River -From inland to the sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 66-73.
- [32] Liu S G, Huang Y F, Luo D H, *et al.* Integrated effects of polymer type, size and shape on the sinking dynamics of biofouled microplastics[J]. *Water Research*, 2022, **220**, doi: 10.1016/j.watres.2022.118656.
- [33] Besseling E, Quik J T K, Sun M Z, *et al.* Fate of nano-and microplastic in freshwater systems: a modeling study[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 540-548.
- [34] Lin L, Pan X, Zhang S, *et al.* Distribution and source of microplastics in china's second largest reservoir-danjiangkou reservoir[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **102**: 74-84.
- [35] 徐晨烨, 顾春节, 倪亦凡, 等. 纤维微塑料在印染废水产排污环节的赋存特征[J]. *纺织学报*, 2021, **42**(6): 26-34.
Xu C Y, Gu C J, Ni Y F, *et al.* Occurrence and release of fibrous microplastic from dyeing and printing wastewater[J]. *Journal of Textile Research*, 2021, **42**(6): 26-34.
- [36] 冯三三, 卢宏玮, 姚天次, 等. 青藏高原典型区微塑料分布特征及来源分析[J]. *地理学报*, 2021, **76**(9): 2130-2141.
- [37] 刘璇, 孙鑫, 朱宏楠, 等. 我国近海漂浮垃圾污染现状及应对建议[J]. *环境卫生工程*, 2021, **29**(5): 23-29.
- Liu X, Sun X, Zhu H N, *et al.* Pollution status and treatment policies of the offshore floating garbage in China[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, **29**(5): 23-29.
- [38] 陈博, 赵立宁, 董四君. 白洋淀生态环境的演变[J]. *中国科学: 生命科学*, 2021, **51**(9): 1274-1286.
- [39] Browne M A, Crump P, Niven S J, *et al.* Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(21): 9175-9179.
- [40] 吴琦, 魏珂瑶, 吉虎, 等. 水性聚氨酯涂料改性研究新进展[J]. *化工新型材料*, 2017, **45**(1): 15-16, 19.
Wu Q, Wei K Y, Ji H, *et al.* New progress in modification of waterborne polyurethane coating[J]. *New Chemical Materials*, 2017, **45**(1): 15-16, 19.
- [41] Liu Y, Wang W Y, Zhang Z X, *et al.* Effects of blend ratio on rheology, morphology, mechanical and oil-resistant properties in chlorinated polyethylene rubber and copolyamide blends[J]. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 2011, **50**(9): 1659-1672.
- [42] 涂晨, 田媛, 刘颖, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1821-1828.
Tu C, Tian Y, Liu Y, *et al.* Occurrence of atmospheric (micro) plastics and the characteristics of the plastic associated biofilms in the coastal zone of Dalian in summer and autumn[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1821-1828.
- [43] 门聪, 李嶙, 左剑恶, 等. 北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3656-3663.
Men C, Li D, Zuo J E, *et al.* Spatial variation and potential sources of microplastics in rivers in Tongzhou District, Beijing[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3656-3663.
- [44] 王志超, 杨帆, 杨文焕, 等. 内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4590-4598.
Wang Z C, Yang F, Yang W H, *et al.* Occurrence characteristics and quality estimation of microplastics in drainage ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4590-4598.
- [45] 谢沅汕, 张清科, 张漓杉, 等. 污水处理厂对漓江桂林市区河段淡水生物中微塑料累积的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4999-5007.
Xie Y S, Zhang Q K, Zhang L S, *et al.* Impact of a sewage treatment plant on the accumulation of microplastics in freshwater organisms in the Lijiang river of the Guilin urban section[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4999-5007.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter ...	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil ...	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)