

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)

基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素 高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)

餐饮源有机颗粒物排放特征 李源逵, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)

华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM_{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)

艾比湖地区气溶胶光学特性分析 张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)

天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟贇, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)

郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)

长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单 朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)

北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性 许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)

广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)

泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)

有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)

西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)

超低排放高湿度气态颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)

厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)

基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)

基于无人机电光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨根晖, 杜晓晨 (3591)

不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)

城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)

上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)

过氧化钙 (CaO₂) 联合生物炭对河道底泥的修复 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)

基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)

三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷 严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)

高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)

Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附 赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)

微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)

多孔填料特性对生物膜形成影响 江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)

硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS 李初, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)

单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)

间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)

基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)

基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 刘晓雷, 李安婕 (3725)

零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)

基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝婷, 张瑞良, 何欣昱 (3740)

亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)

四环素胁迫对 *Shigella flexneri* 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)

羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)

高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)

微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)

三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)

臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)

改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)

有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N₂O 排放的影响 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)

原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)

羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)

滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)

棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)

不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)

螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)

种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)

《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)

城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为

赵昕¹, 陈浩², 贾其隆², 沈忱思¹, 朱弈¹, 李磊¹, 聂云汉¹, 叶建锋^{2*}

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要: 河流是微塑料从陆地向海洋传输的关键路径, 在近年来得到了越来越多的研究重视. 但实际上, 目前关于城市不同区域河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状及污染行为研究仍十分有限, 相关问题依然不甚清晰. 本文以上海市中心城区及郊区城镇区域的 8 条河道作为研究对象, 共采集 16 个河道表层水及沉积物样品, 采用高速摄像机和傅立叶红外变换光谱仪鉴定样品中微塑料的丰度、尺寸、颜色、形状和类型等特征. 结果表明, 上海市城市河道表层水中微塑料的平均丰度为 (7.5 ± 2.8) 个·L⁻¹, 而沉积物中微塑料的平均丰度(以湿重计)则达到了 $(1\ 575.5 \pm 758.4)$ 个·kg⁻¹. 微塑料尺寸越小丰度越高. 其中, 低于 500 μm、纤维状、透明色和聚酯类的微塑料始终在上海市城市河道中占据主导地位, 但沉积物中的微塑料分布更具多样性. 相对于国内外其他城市河道中的微塑料污染, 上海市城市河道中的微塑料污染较为严重. 不同城市河道中, 微塑料的形状和聚合物类型分布受到来源(主要为洗衣废水、个人护理产品和塑料废弃物等)、水动力学条件和本身理化性质等各种因素的较大影响. 还进一步讨论了城市河道中微塑料的污染行为(来源、传输与归趋), 并解析了各种环境因子对其造成的潜在影响.

关键词: 微塑料; 城市河道; 污染丰度; 形状分布; 聚合物组成; 污染行为

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3612-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912236

Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers

ZHAO Xin¹, CHEN Hao², JIA Qi-long², SHEN Chen-si¹, ZHU Yi¹, LI Lei¹, NIE Yun-han¹, YE Jian-feng^{2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: Rivers have been a subject of great concern in recent years as they have been found to be the critical path for the transmission of microplastics from terrestrial land to the ocean. However, the pollution status of microplastics and their behavior in the surface waters and sediments of urban rivers located in different urban areas remain unclear. In this study, 16 samples of surface water and sediment from eight rivers in the central and suburban areas of Shanghai Megacity were obtained and analyzed. High-speed cameras and Fourier transform infrared spectrometers were used to identify the abundance, size, color, shape, type, and other characteristics of microplastics in these samples. The results showed that the average abundance of microplastics in the surface waters of urban rivers in Shanghai Megacity was (7.5 ± 2.8) pieces·L⁻¹, while the corresponding average abundance in the sediment reached $(1\ 575.5 \pm 758.4)$ pieces·kg⁻¹ (wet weight). The abundance of microplastics was found to increase with the decreasing particle diameter. Among which, microplastics with a size of less than 500 μm, as well as the fibrous shape, transparent color, and Polyester composition, have always dominated in the urban rivers in Shanghai megacity. Comparably, microplastics in the sediments were more diverse in their morphology features and polymer compositions. Microplastic pollution in the urban rivers in Shanghai megacity was severe in comparison to that in other urban rivers worldwide. Among various urban rivers, the distribution of microplastics with different morphology features and polymer compositions is greatly influenced by a number of factors including the source (e. g., mainly laundry wastewater, personal care products, and refuse plastic waste), hydrodynamic conditions, and the physical and chemical properties of plastics. Furthermore, the pollution behavior (i. e., source, transmission, and fate) of microplastics occurring in urban rivers is discussed, and the potential impacts of various environmental factors are explained.

Key words: microplastics; urban rivers; pollution abundance; shape distribution; polymer composition; pollution behavior

近年来,微塑料(直径小于 5 mm 的塑料颗粒)作为一种新兴污染物获得了广泛的研究和关注. 已有的研究表明,微塑料污染如今已遍布全球海洋环境^[1]. 2018 年, Morgana 等^[2]甚至在偏远北极地区的海洋表层水中也发现了微塑料的存在. 微塑料兼具的非极性载体作用能够不断吸附周围环境中的有机物^[3]和金属^[4]等污染物,加之塑料聚合物本身的难降解性,使其更易于通过食物链传递并将吸附污

染物转移到生物体中,从而对生物体的生理代谢和

收稿日期: 2019-12-27; 修订日期: 2020-03-11

基金项目: 上海市自然科学基金项目(19ZR1443800, 19ZR1443700); 国家重点研发计划项目(2018YFD1100502-02, 2017YFE0135500); 上海市科研计划项目(19DZ1204500); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07207001-02); 上海市生态环境局科研项目(HHK 2019-6, HHK 2018-1); 国家自然科学基金项目(51908355)

作者简介: 赵昕(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为城市河道中微塑料的分布特征, E-mail: zhao_xin0904@163.com

* 通信作者, E-mail: yej199@gmail.com

生长发育造成毒害^[5,6],形成生态威胁.因此,微塑料污染在当前已经成为严峻的环境问题.

有研究表明,海洋环境中的微塑料主要来自于陆域源微塑料的输入,而河流是陆域向海洋传输微塑料的重要途径^[7,8].在此背景下,德国莱茵河^[9]、英国泰晤士河^[10]及中国长江^[11]等世界主要河流均发现了不同丰度水平的微塑料污染.值得注意的是,受人类活动影响较大的城市河流往往显示出更高的微塑料赋存水平与污染风险. Moore 等^[12]在 2011 年的研究中指出,水体环境中微塑料的污染丰度与城市中心距离之间具有空间相关性.对武汉市表层水中的微塑料污染调查表明,靠近市中心的北湖中微塑料污染丰度最高 $[(8\ 925 \pm 1\ 591)\text{个}\cdot\text{m}^{-3}]$,而远离市中心的武湖中微塑料污染丰度最低 $[(1\ 660.0 \pm 639.1)\text{个}\cdot\text{m}^{-3}]$ ^[13]. Luo 等^[14]的研究也进一步指出上海市市域内水体中的微塑料丰度 $(6.11\text{个}\cdot\text{L}^{-1})$ 明显高于长江口 $[(4\ 137.3 \pm 246.5)\text{个}\cdot\text{m}^{-3}]$ 及东海近海水体 $[(0.167 \pm 0.138)\text{个}\cdot\text{m}^{-3}]$ ^[11].由此可知,城市河流所面临的微塑料污染更为严峻.然而,相比于大量的海洋微塑料研究,目前关于城市河流微塑料污染的研究仍然非常欠缺,区域间微塑料污染差异的对比调查及微塑料污染行为分析更是十分有限.进一步研究城市不同区域河流的微塑料污染状况,既能够补充城市河流微塑料分布案例,也能够为后续针对微塑料污染的削减管控提供科学依据.

上海市地处长江入海口,是我国最发达的城市之一.该地区人口密度大,排污总量大,塑料制品流

通及使用量也居于全国前列,这些因素都将造成市域内巨大的微塑料污染风险.在另一方面,上海市城乡跨度较大,不同区域内的河道水质会因城市化发展进程、区域下垫面使用规划、流域污染管控政策力度及人口密度等原因形成显著差异性,从而进一步造成市域内不同河道水体及沉积物中微塑料水平及分布的差异.以上海市河流水体为研究对象来解析城市河道中微塑料的污染状况将更具代表性,同时也可以更为清晰地解析河岸下垫面污染源对水体微塑料所造成的影响.

本文以上海市不同区域的 8 条城市河道为研究对象,检测了河道表层水及沉积物中微塑料的丰度、尺寸、颜色、形状和聚合物类型.在此基础上,进一步讨论了上海市城市河道中微塑料的污染现状及污染行为.

1 材料与方法

1.1 采样点布置及样品采集

本文选取上海市不同区域的 8 条城市河道作为研究对象,见图 1.其中,采样点 C1~C5 位于上海市市郊城镇河网水系,采样点 C6~C8 位于上海市中心城区河网水系.在旱天条件下,分别采集 C1~C8 点位的表层水及沉积物样品.采样船开至河道中央后,分别使用不锈钢采水器和抓斗式采泥器采集河面下 1 m 处的表层水和河底表层沉积物.样品采集好后放置在洗净的玻璃瓶中,并尽快运回实验室置于 4℃ 冰箱内保存.所有分析工作在采样后的 7 d 内完成.

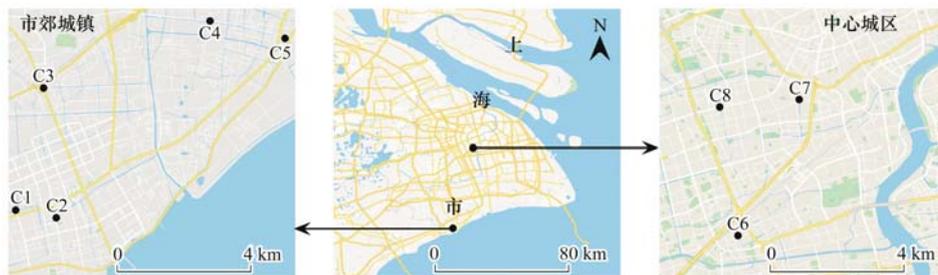


图 1 上海市不同区域内城市河道的采样点

Fig. 1 Sampling points of urban rivers in different regions of Shanghai

1.2 表层水及沉积物样品的预处理

每升水样中加入 40 g 氢氧化钠并搅拌至完全溶解,室温下静置 8 h,以去除微塑料表面黏附的有机物,避免后续实验中对微塑料的红外鉴定造成干扰^[15].消解结束后,使用真空抽滤泵将样品抽滤到 0.45 μm 孔径的尼龙滤膜(Whatman)上,并保存在干净的玻璃培养皿中.

使用 1 mm 孔径不锈钢筛网将 500 g 沉积物样品分离.对于筛上沉积物,直接用蒸馏水将样品表面

洗净并转移至不锈钢托盘内,在室温下干燥并直接进行目检,挑选出疑似微塑料;对于筛下沉积物,称取 5 g(湿重)样品,用饱和氯化钠溶液(密度为 1.2 g·cm⁻³)分多次转移至浮选装置内进行密度分离^[16],静置 8 h 后取上清液重复上述表层水的预处理步骤即可.

1.3 微塑料的筛分与鉴定

使用高速摄像仪(keyenceVHX6000)在放大 100 倍下对滤膜进行目检,挑选出疑似微塑料,然后利用

傅立叶红外显微成像光谱仪(Nicolet In10 MX)鉴定其主要官能团类型^[17],并将其红外谱图与标准谱图进行相似度匹配,根据匹配结果($\geq 70\%$)判定其是否为微塑料,以及其聚合物类型。

1.4 数据分析

在本研究中,表层水中微塑料的丰度单位以“个·L⁻¹”计,沉积物中微塑料的丰度(以湿重计)单位以“个·kg⁻¹”计。针对各采样点间的数据,进行了均值计算及其标准偏差核算,并使用 Origin2018 绘制了相关结果图。此外,在 0.05 的显著性水平下,通过 *t* 检验分析了各组间的差异。

1.5 质量控制

为避免实验检测过程中空气沉降、衣物合成纤维等带来的数据失真问题,采取以下防范措施:在采样过程中,避免使用一切塑料制品;在实验过程中,均穿着纯棉衣物;在样品预处理过程中,始终使用锡箔纸覆盖住开口;微塑料的提取与鉴定步骤均在无尘室中进行;在分析滤纸时,设置空白实验,即用超纯水作为样品。本研究未在空白实验中检测到微塑料存在。

2 结果与分析

2.1 城市河道表层水中的微塑料分布特征

城市河道 C1 ~ C8 表层水中均检测出较高的微塑料污染丰度[平均丰度为(7.5 ± 2.8)个·L⁻¹],但存在区域差异。市郊城镇河道 C1 ~ C5 表层水中微塑料的平均丰度为(6.0 ± 2.6)个·L⁻¹,显著低于中心城区河道 C6 ~ C8 表层水中微塑料的平均丰度[(10.0 ± 1.1)个·L⁻¹,图 2(a)]。微塑料的尺寸越小丰度越高,< 0.5 μm 的微塑料在表层水中占 40% 以上[图 2(b)]。微塑料的颜色主要以透明为主,其次为黑色和红色[图 2(c)]。城市河道表层水中只检测出碎片和纤维两种类型的微塑料,如图 2(d)。其中,纤维的占比超过 96%,而碎片仅占 4% 以下。聚酯在表层水中占主导地位,占比达 77.78%,而聚酰胺占 11.11%,聚丙烯占 5.56%,混合物占 5.56% [图 2(e)]。聚酯、聚酰胺和聚丙烯的红外谱图分别如图 3 所示。聚酯的红外特征峰主要由羰基和—C—O—C—的振动吸收组成,聚酰胺的红外特征峰主要由酰胺基和亚甲基链的振动吸收组成,聚

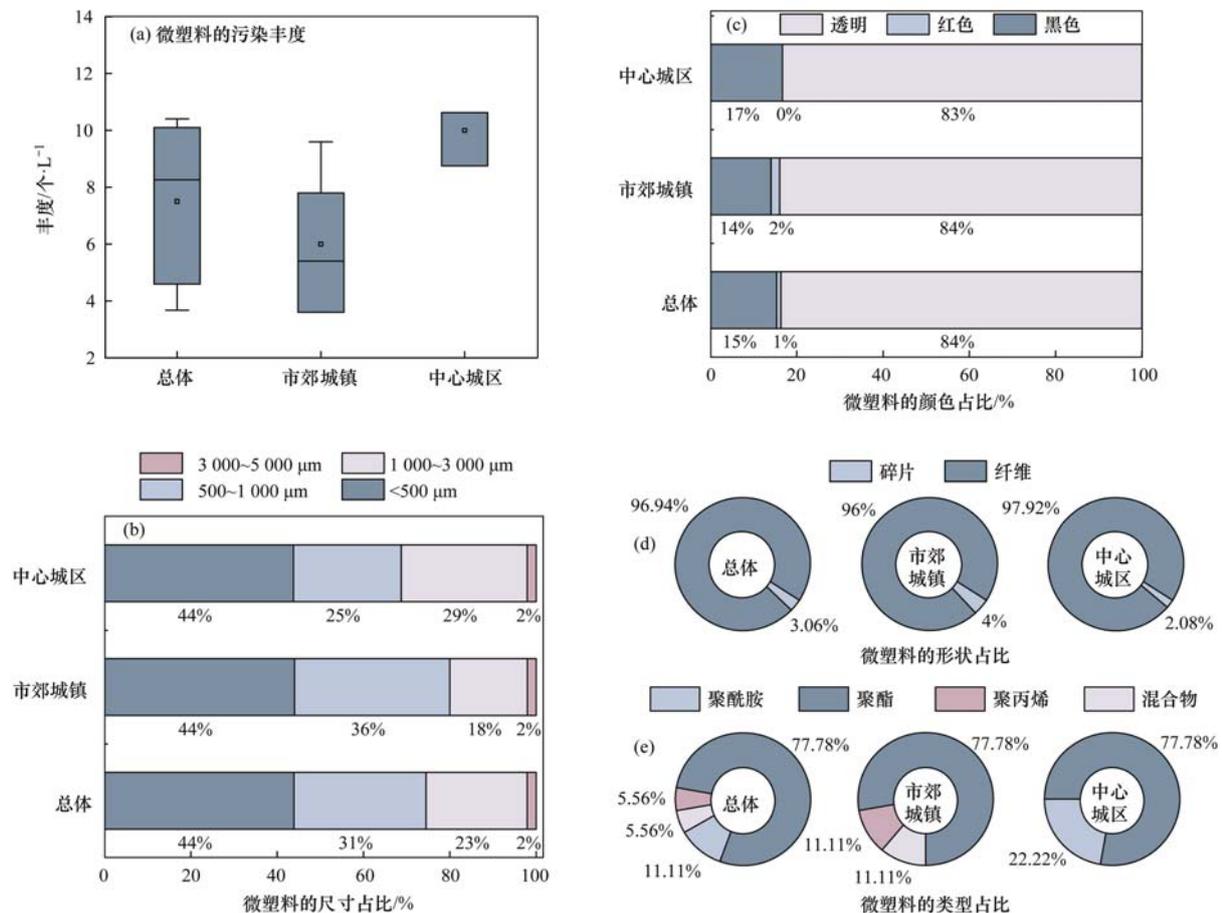


图 2 城市河道表层水中微塑料的分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of microplastics in surface water of urban rivers

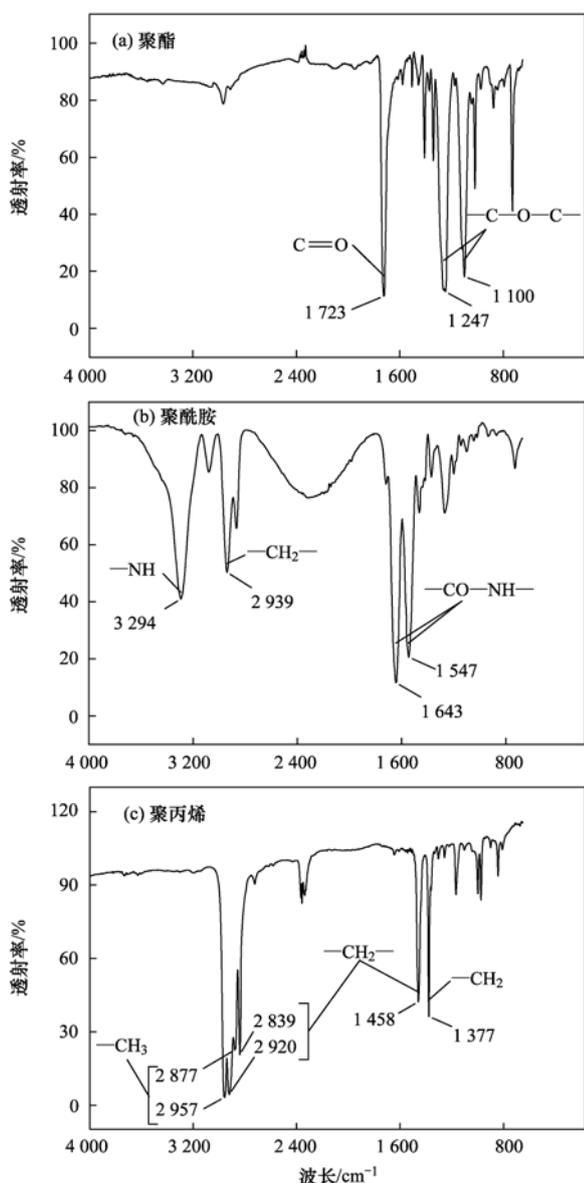


图3 不同聚合物类型的红外谱图

Fig. 3 Infrared spectra of different polymer types

丙烯的红外特征峰主要由甲基和亚甲基的振动吸收组成。

2.2 城市河道沉积物中的微塑料分布特征

不同于表层水中微塑料的污染丰度容易受某一污染源的实时影响,沉积物中的微塑料主要来源于周围环境中多类污染源的长期影响,更多的是反映一种历史积累的结果,所以城市河道沉积物中微塑料的污染丰度(以湿重计)往往更高[(1 575.5 ± 758.4)个·kg⁻¹],但不同区域间仍存在较大差异。其中,市郊城镇河道沉积物中微塑料的平均丰度(以湿重计)为(1 312.8 ± 494.5)个·kg⁻¹,而中心城区河道沉积物中微塑料的平均丰度(以湿重计)为(2 013.3 ± 459.1)个·kg⁻¹[图4(a)].值得注意的是,微塑料在沉积物和表层水中表现出相同的分布特征,即尺寸越小丰度越高,低于500 μm、纤维状、

透明色和聚酯类的微塑料始终在城市河道中占据主导地位(图4)。但在沉积物中,微塑料具有更加丰富的颜色分布、形状分布和聚合物组成:除透明、黑色和红色外,沉积物中还检测出黄色、蓝色和绿色等;除碎片和纤维外,沉积物中还检测出颗粒和薄膜等;除聚酯、聚酰胺和聚丙烯外,沉积物中还检测出聚甲基丙烯酸甲酯和聚乙烯等。聚甲基丙烯酸甲酯和聚乙烯的红外谱图分别如图5所示。聚甲基丙烯酸甲酯的红外特征峰主要由甲基、亚甲基、羰基和—C—O—C—的振动吸收的影响,而聚乙烯的红外特征峰仅由亚甲基的振动吸收组成。

3 讨论

3.1 城市河道中微塑料的污染现状

3.1.1 污染丰度

城市河道是微塑料污染的重点区域^[18]。其中,上海市城市河道表层水中微塑料的污染丰度为(7.5 ± 2.8)个·L⁻¹,沉积物中微塑料的污染丰度(以湿重计)为(1 575.5 ± 758.4)个·kg⁻¹,显著高于其他天然淡水河道中微塑料的污染丰度。武汉市^[13]和广州市^[19]等城市河道表层水中微塑料的污染丰度分别为(2 516.7 ± 911.7) ~ (2 933 ± 305.5)个·m⁻³和379 ~ 7 924个·m⁻³(表1),而青藏高原地区河道表层水中微塑料的污染丰度为483 ~ 967个·m⁻³(表1)^[20];广州市^[19]和普埃布拉市^[21]的城市河道沉积物中微塑料的污染丰度(以干重计)分别为1 669个·kg⁻¹和(1 633.34 ± 202.56)个·kg⁻¹(表2),而Klein等^[9]在莱茵河某自然保护区河段沉积物中检测到的微塑料污染丰度(以干重计)为268 ~ 314个·kg⁻¹(表2)。城市河道与天然河道中微塑料污染丰度的差异主要是由人为因素导致的。在天然河道周围,很少受到人类活动的直接影响,河道中的微塑料污染主要来源于上游微塑料的远距离传输,所以污染丰度较低。与世界范围内的淡水系统相比,上海市城市河道中的微塑料污染丰度略高于墨尔本(60 ~ 2 500个·m⁻³,表1)^[22]、巴黎(3 ~ 108个·m⁻³,表1)^[23]和普埃布拉[(1 633.34 ± 202.56)个·kg⁻¹(干重),表2]^[21]等发达国家城市,这可能与不同的城市化进程和人口密度等环境因子有关。在上海市,人口密度更高,人类活动更加频繁,所以排污总量大及塑料制品使用量大,再加上塑料废弃物管理不善,这就容易造成更加严峻的微塑料污染负担。但无论是在发达国家还是发展中国家,淡水系统中的微塑料污染都表现出相同的空间分布特征,即城市河道中微塑料的污染丰度要高于其他天然淡水河道。

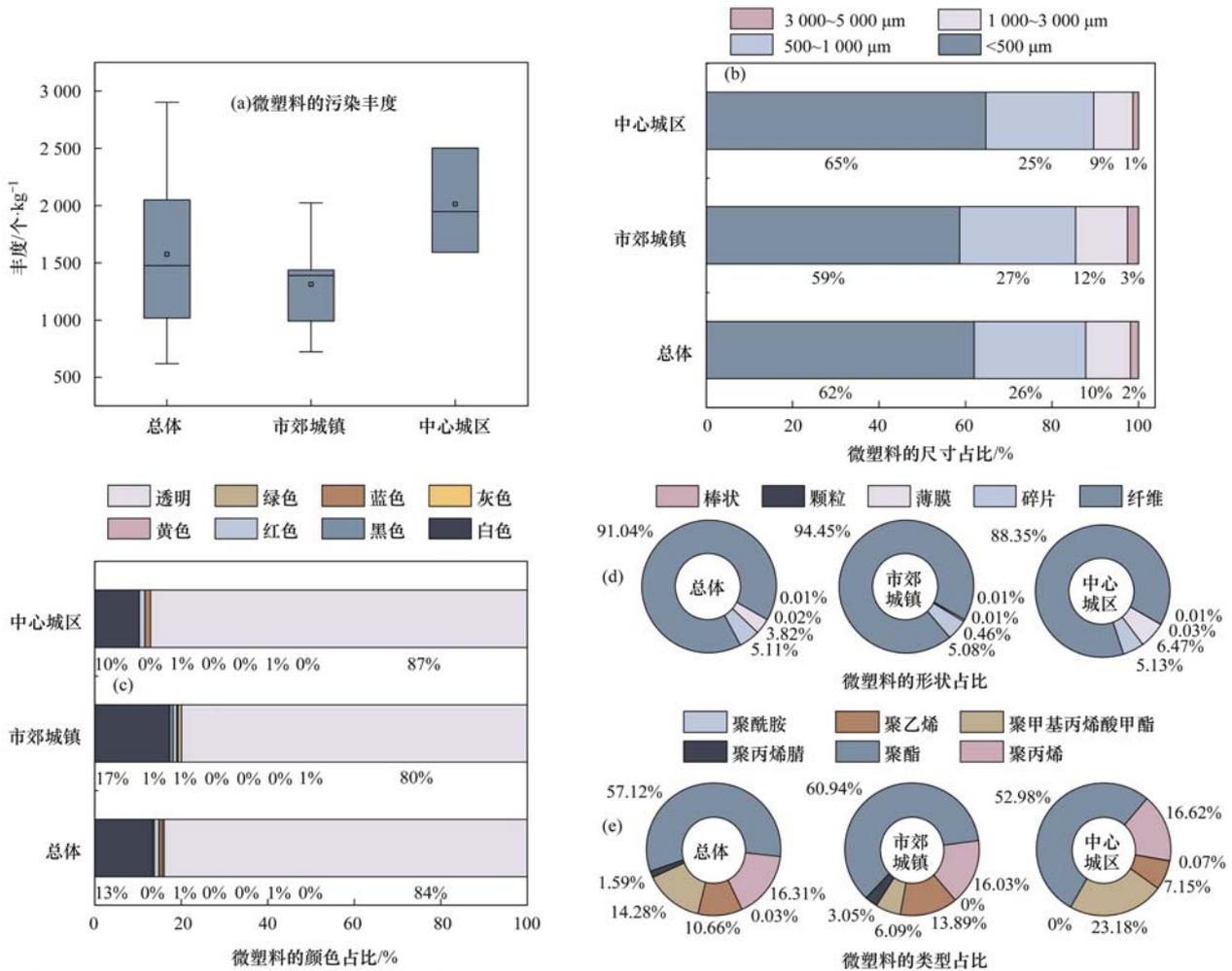


图4 城市河道沉积物中的微塑料分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of microplastics in sediments of urban rivers

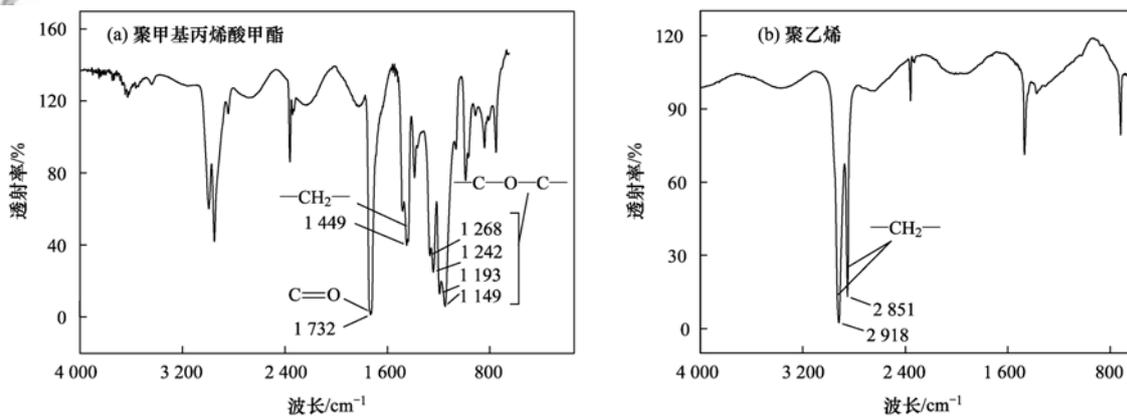


图5 不同聚合物类型的红外谱图

Fig. 5 Infrared spectra of different polymer types

应当指出,目前国际上关于微塑料采样、预处理、挑选和鉴定的研究方法还没有统一的标准,不同研究报告中采用的研究方法可能有所不同,如分离溶液密度、最小尺寸检测下限和计量单位等.本文选择计量单位相近的研究结果进行比较,并进行了单位换算(表1和表2),但受其他因素的潜在影响,结果间的比较仍然可能存在偏差.

3.1.2 形状分布

城市河道中微塑料的主要形状有纤维、碎片和薄膜等.其中,纤维在上海市城市河道中占据主要地位,这也与大多数城市水体的研究结果一致^[13,19,22,23].但在多瑙河奥地利国家公园河段^[24]中,球团类的微塑料占比最高,且主要为工业原料.本研究发现,上海市城市河道中的微塑料主要来源

表 1 不同淡水河道表层水中微塑料的污染丰度¹⁾

Table 1 Pollution abundance of microplastics in surface water of different freshwater rivers

研究地点	分离溶液	尺寸范围 /mm	丰度	优势		文献
				形状	类型	
青藏高原地区河道	氯化锌(1.5 g·cm ⁻³)	0.045 ~ 5	483 ~ 967 个·m ⁻³	纤维	PE	[20]
武汉市市域河道	— ¹⁾	0.05 ~ 5	(2 516.7 ± 911.7 ~ 2 933 ± 305.5) 个·m ⁻³	纤维	PET	[13]
广州市珠江	氯化钠(1.2 g·cm ⁻³)	0.02 ~ 5	379 ~ 7 924 个·m ⁻³ , 平均值 2 724 个·m ⁻³	纤维	PP	[19]
墨尔本周围河道	—	0.02 ~ 5	60 ~ 2 500 个·m ⁻³	纤维	聚酯	[22]
巴黎塞纳河	—	0.01 ~ 5	3 ~ 108 个·m ⁻³	纤维	—	[23]
多瑙河奥地利国家公园河段	—	0.5 ~ 5	(0.3 ± 4.7) 个·m ⁻³	—	—	[24]
上海市市域河道	—	0.045 ~ 5	(7.5 ± 2.8) 个·L ⁻¹ [(7 500.0 ± 2 848.3) 个·m ⁻³]	纤维	聚酯	本研究

1) “—”表示文章中没有相关数据,下同

表 2 不同淡水河道沉积物中微塑料的污染丰度

Table 2 Pollution abundance of microplastics in sediments of different freshwater rivers

研究地点	分离溶液	尺寸范围 /mm	丰度	优势		文献
				形状	类型	
青藏高原地区河道	氯化锌(1.5 g·cm ⁻³)	0.022 ~ 5	50 ~ 195 个·kg ⁻¹ (干重)	纤维	PET	[20]
广州市珠江	氯化钠(1.2 g·cm ⁻³)	0.02 ~ 5	80 ~ 9 597 个·kg ⁻¹ (干重), 平均值 1 669 个·kg ⁻¹ (干重)	纤维	PE	[19]
墨尔本周围河道	氯化钠(1.2 g·cm ⁻³)	0.02 ~ 5	0.9 ~ 298.1 个·kg ⁻¹ (干重)	纤维	聚酯	[22]
长沙市市域河道	氯化锌(1.5 g·cm ⁻³)	—	(270.17 ± 48.23 ~ 866.59 ± 37.96) 个·kg ⁻¹ (干重)	碎片	PS	[25]
普埃布拉市扎瓦潘河	氯化锌(1.5 g·cm ⁻³)	0.0012 ~ 5	(1 633.34 ± 202.56) 个·kg ⁻¹ (干重)	薄膜	—	[21]
莱茵河某自然保护区河段	氯化钠(1.2 g·cm ⁻³)	0.063 ~ 5	268 ~ 314 个·kg ⁻¹ (干重)	碎片和纤维	PE、PP、PS	[9]
上海市市域河道	氯化钠(1.2 g·cm ⁻³)	0.045 ~ 5	(1 575.5 ± 758.4) 个·kg ⁻¹ (湿重), (5 274.3 ± 3 812.5) 个·kg ⁻¹ (干重)	纤维	聚酯	本研究

于生活污水,而多瑙河奥地利国家公园河段^[24]中的微塑料主要来源于上游塑料生产基地的远距离传输.所以,环境中微塑料的形状分布不仅受其潜在来源的影响,还受水流作用等环境因子的影响.当然,这种影响不仅表现在表层水中,还表现在沉积物中.譬如,长沙市市域河道沉积物中的微塑料主要为碎片^[25],普埃布拉市扎瓦潘河内沉积物中的微塑料主要为薄膜^[21].相较于纤维,环境中的碎片和薄膜往往具有更大的面积及更高的质量,这就导致其在水流作用下更易沉积到河道底部,从而改变沉积物中微塑料的形状分布.所以,微塑料本身的理化性质也可能造成其在环境中的形状分布差异.

3.1.3 聚合物组成

城市河道表层水和沉积物中的微塑料主要为聚酯、聚乙烯和聚苯乙烯等.在人们的日常活动中,聚酯主要用于纺织衣物,且容易通过洗衣过程进入到生活污水中,并最终排放至城市河道.所以在生活污水的显著影响下,上海市等城市河道中的微塑料主要为聚酯.在青藏高原河道周围,既没有渔业养殖和船只运输,也没有沿岸工业的污染,随处可见的塑料帐篷和彩旗可能是周围河道中微塑料的潜在来源.所以,在青藏高原河道^[20]表层水中,聚乙烯是污染

丰度最高的聚合物类型.此外,受许多轻工业和个人护理产品的影响,如洗面奶微珠等,长沙市市域河道^[25]和莱茵河^[9]沉积物中还发现了聚苯乙烯的存在,而这类微塑料并没有在本研究中检出.如前所述,沉积物中的微塑料主要来源于表层水中微塑料的长期积累且具有更加丰富的分布特征(图 2 和图 4),但两者间的聚合物组成并没有表现出明确的相关性.在上海市城市河道表层水和沉积物中,聚酯始终占据主导地位,这也与 Su 等^[22]对墨尔本周围河道中微塑料的研究结果一致.但在 Lin 等^[19]的研究结果中,广州市珠江河道表层水中的微塑料以聚丙烯(密度为 0.92 g·cm⁻³)为主,而沉积物中的微塑料以聚乙烯(密度为 0.95 g·cm⁻³)为主,聚合物本身的密度差异可能是造成表层水和沉积物中聚合物组成变化的原因.由此可见,微塑料的潜在来源及其本身的理化性质等因素均会影响城市河道中微塑料的聚合物组成.

3.2 城市河道中微塑料的污染行为

3.2.1 来源

在不同来源的影响下,城市河道中的微塑料仍以聚酯、聚苯乙烯、聚丙烯和聚乙烯为主(表 1 和表 2).聚酯生产以合成纤维为主,主要用于纺织行业.

Browne 等^[26]的研究指出,单件衣物洗涤时每次可产生 >1900 根合成纤维. 聚苯乙烯主要被加工成特定的小尺寸用于乳液和牙膏等个人护理产品的生产,所以个人护理产品的广泛使用,也会造成微塑料的大量释放^[27]. 此外,聚丙烯和聚乙烯在各大城市河道中仍占较明显比例. 这类塑料因其可塑性强及价格低廉等优点被广泛用于包装和家庭用品等行业,这些塑料制品在使用结束时需按照政策规定通过回收、焚烧和填埋等途径进行处置. 但在实际操作中,有相当一部分塑料废弃物因得不到有效的管理而进入城市河道,成为二次微塑料的潜在来源^[28]. 所以,城市河道中的微塑料主要来源于洗衣废水、个人护理产品和塑料废弃物等(图 6). 洗衣废水和个人护理产品中的微塑料经市政管道传输到污水处理厂后,并不能被全部截留到污泥中,会有一小部分随出水排放进入受纳水体,即城市河道. 此外,在市政管道传输过程中,微塑料也可以通过管道溢流和污水直排等方式进入城市河道. 塑料废弃物既可以通过丢弃等方式直接进入城市河道,也可以通过地表径流等方式间接进入城市河道或纳管进入市政管道. 除上述方式外,大气沉降^[29]也可能是微塑料进入城市河道的潜在方式(图 6).

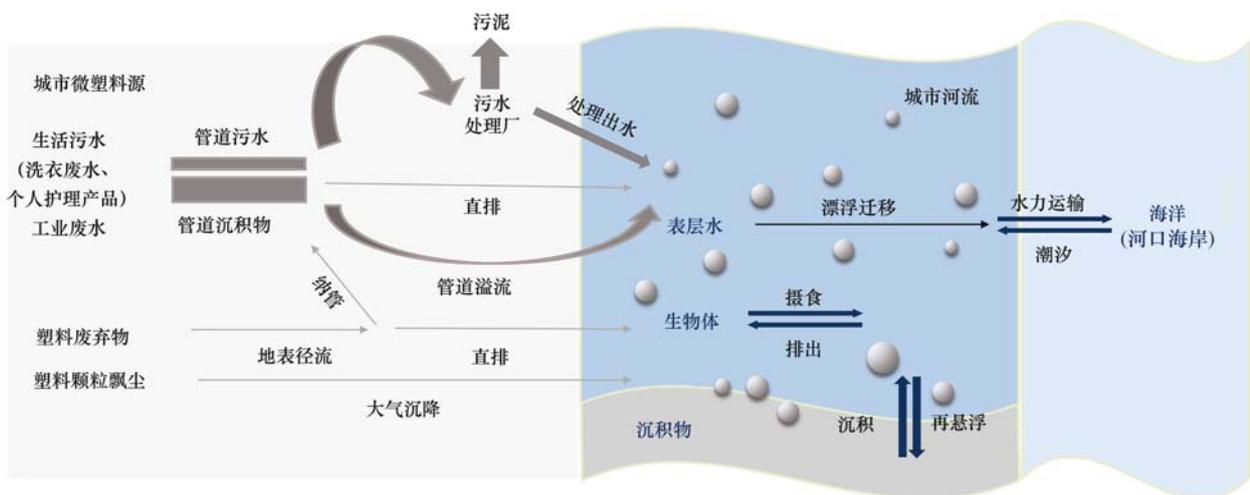
3.2.2 传输

水力条件是造成微塑料分布差异的重要因素^[9]. 强烈的水流作用能够为微塑料传输提供动力,从而导致城市河道中微塑料的远距离传输,尤其是在洪涝期^[30]. 此外,水力条件还会影响微塑料在城市河道中的垂直分布. 譬如,水流速度越慢的地方越容易使微塑料沉降,而高水流速度又可以使沉积物中的微塑料重新悬浮在水体环境中(图 6). 塑料颗粒传输模型表明,塑料浓度不仅与水力条件有关,

而且与塑料颗粒本身的特性(如尺寸和密度)有关^[31]. 就微塑料在城市河道中的初始沉降时间而言,密度大于水的微塑料会直接沉入河道底部,而密度小于水的微塑料会先漂浮在表层水中. 但 Kooi 等^[32]的沉降模型指出,微塑料表面的生物絮凝能够导致粒子密度的增加,当其密度大于周围水体环境时就会开始沉降,从而改变其垂直水位. 其中,沉降开始的时间及沉降速度等又均与微塑料颗粒本身的特性(尺寸和密度)有关.

3.2.3 归趋

沉积物、海洋和生物体是城市河道中微塑料的最主要归宿(图 6). 微塑料进入城市河道后,会在沉积作用下进入河道底部,随着时间的增长,城市河道底部会积聚越来越多的微塑料. 足够数量的微塑料既能够改变沉积物的物理性质(如平均晶粒尺寸、渗透性和热扩散系数)^[33],也能够改变沉积物中微生物的群落组成^[34]. 另一方面,城市河道中的微塑料也能够通过河流作用远距离传输至海洋,甚至在海流、风、潮汐和海啸等环境因子的作用下开始迁移至其他地点并遍布全球海洋环境. 据估计,2010 年流入海洋的塑料垃圾在 480 万 ~ 1 270 万 hm^2 之间,这一数值在 2050 年还将增加一个数量级^[35]. 此外,生物摄食也可能是城市河道中微塑料的潜在归宿. 微塑料一旦进入到生物体内,既可以对生物体造成肠道堵塞等物理损害^[36],也可以对生物体造成添加剂浸出等化学损害^[37],从而造成一定的生态风险. 值得注意的是,在各项环境因子的影响下,沉积物中的微塑料也可能在强水流作用下重新悬浮在水体环境中,并最终传输至海洋;海洋中的微塑料也可能在潮汐过程中重新沉积在沙滩上,并进入陆源传输系统;生物体中的微塑料也可能通过粪便的形式重



包括来源、传输与归趋

图 6 城市河道中微塑料的污染行为

Fig. 6 Pollution behavior of microplastics in urban rivers

新排出体外,并开始新的传输路程.所以,沉积物、海洋和生物体中的微塑料赋存数量不是一成不变的,而是保持动态平衡.

4 结论

(1)上海市城市河道中普遍存在微塑料污染,表层水中微塑料的平均丰度为 (7.5 ± 2.8) 个 $\cdot\text{L}^{-1}$,而沉积物中微塑料的平均丰度(以湿重计)则达到了 (1575.5 ± 758.4) 个 $\cdot\text{kg}^{-1}$.

(2)微塑料尺寸越小丰度越高.其中,低于500 μm 、纤维状、透明色和聚酯类的微塑料始终在上海市城市河道中占据主导地位.

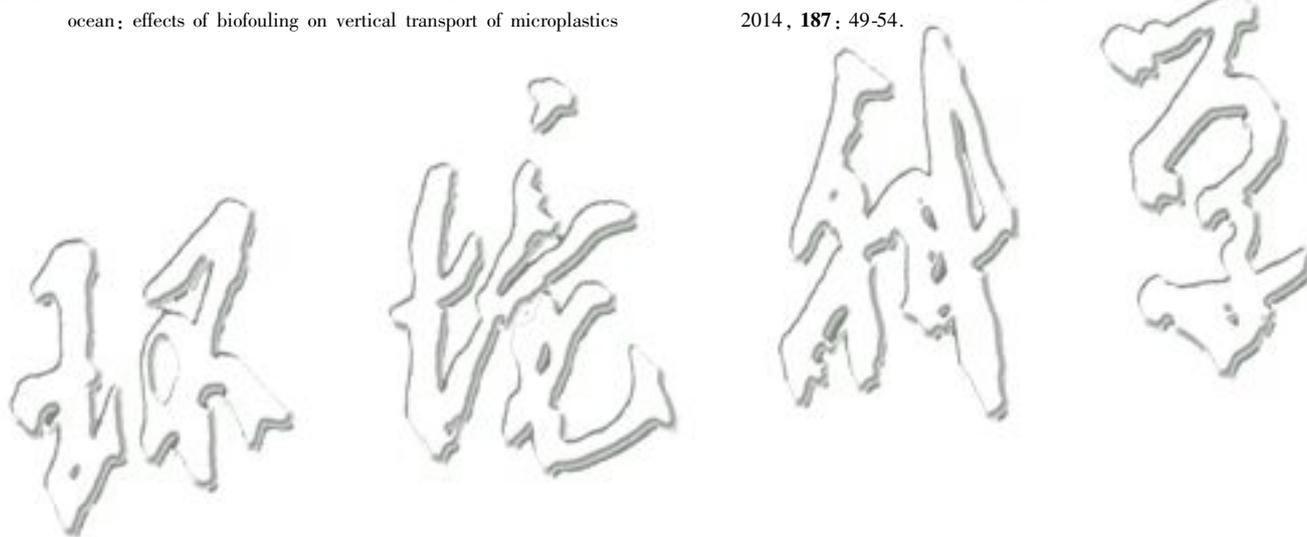
(3)上海市城市河道中的微塑料污染较为严重,且污染丰度高于天然淡水河道及国内外其他城市河道.

(4)潜在来源(主要为洗衣废水、个人护理产品和塑料废弃物等)、水动力学条件和本身理化性质等各种因素会影响不同城市河道中微塑料的形状分布和聚合物组成,但3种形状(纤维、碎片和薄膜)和4种聚合物类型(聚酯、聚丙烯、聚乙烯和聚苯乙烯)仍占据多数.

参考文献:

- [1] Wang J D, Tan Z, Peng J P, *et al.* The behaviors of microplastics in the marine environment [J]. *Marine Environmental Research*, 2016, **113**: 7-17.
- [2] Morgana S, Ghigliotti L, Estévez-Calvar N, *et al.* Microplastics in the arctic: a case study with sub-surface water and fish samples off Northeast Greenland [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 1078-1086.
- [3] Ogata Y, Takada H, Mizukawa K, *et al.* International pellet watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, **58** (10): 1437-1446.
- [4] Ashton K, Holmes L, Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**(11): 2050-2055.
- [5] Andrady A L. Microplastics in the marine environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(8): 1596-1605.
- [6] Browne M A, Galloway T S, Thompson R C. Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(9): 3404-3409.
- [7] Schmidt C, Krauth T, Wagner S. Export of plastic debris by rivers into the sea [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(21): 12246-12253.
- [8] Siegfried M, Koelmans A A, Besseling E, *et al.* Export of microplastics from land to sea. A modelling approach [J]. *Water Research*, 2017, **127**: 249-257.
- [9] Klein S, Worch E, Knepper T P. Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-main area in Germany [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(10): 6070-6076.
- [10] Horton A A, Svendsen C, Williams R J, *et al.* Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK-Abundance, sources and methods for effective quantification [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **114**(1): 218-226.
- [11] Zhao S Y, Zhu L X, Wang T, *et al.* Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: first observations on occurrence, distribution [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **86**(1-2): 562-568.
- [12] Moore C J, Lattin G L, Zellers A F. Quantity and type of plastic debris flowing from two urban rivers to coastal waters and beaches of Southern California [J]. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 2011, **11**(1): 65-73.
- [13] Wang W F, Ndungu A W, Li Z, *et al.* Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1369-1374.
- [14] Luo W Y, Su L, Craig N J, *et al.* Comparison of microplastic pollution in different water bodies from urban creeks to coastal waters [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 174-182.
- [15] Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson R C, *et al.* Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(6): 3060-3075.
- [16] Hanvey J S, Lewis P J, Lavers J L, *et al.* A review of analytical techniques for quantifying microplastics in sediments [J]. *Analytical Methods*, 2017, **9**(9): 1369-1383.
- [17] Shim W J, Hong S H, Eo S E. Identification methods in microplastic analysis: a review [J]. *Analytical Methods*, 2017, **9**(9): 1384-1391.
- [18] Eerkes-Medrano D, Thompson R C, Aldridge D C. Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs [J]. *Water Research*, 2015, **75**: 63-82.
- [19] Lin L, Zuo L Z, Peng J P, *et al.* Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: a case study in the Pearl River along Guangzhou City, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **644**: 375-381.
- [20] Jiang C B, Yin L S, Li Z W, *et al.* Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 91-98.
- [21] Shruti V C, Jonathan M P, Rodriguez-Espinosa P F, *et al.* Microplastics in freshwater sediments of Atoyac River basin, Puebla City, Mexico [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **654**: 154-163.
- [22] Su L, Sharp S M, Pettigrove V J, *et al.* Superimposed microplastic pollution in a coastal metropolis [J]. *Water Research*, 2020, **168**: 115140.
- [23] Dris R, Gasperi J, Rocher V, *et al.* Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **12**(5): 592-599.
- [24] Lechner A, Keckeis H, Lumesberger-Loisl F, *et al.* The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **188**: 177-181.
- [25] Wen X F, Du C Y, Xu P, *et al.* Microplastic pollution in surface sediments of urban water areas in Changsha, China: Abundance, composition, surface textures [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **136**: 414-423.
- [26] 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.

- [27] Lei K, Qiao F, Liu Q, *et al.* Microplastics releasing from personal care and cosmetic products in China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **123**(1-2): 122-126.
- [28] Wagner M, Scherer C, Alvarez-Muñoz D, *et al.* Microplastics in freshwater ecosystems; what we know and what we need to know [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2014, **26**(1): 12.
- [29] Cai L, Wang J, Peng J, *et al.* Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China; preliminary research and first evidence [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(32): 24928-24935.
- [30] Gündoğdu S, Çevik C, Ayat B, *et al.* How microplastics quantities increase with flood events? An example from Mersin Bay NE Levantine coast of Turkey [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **239**: 342-350.
- [31] Nizzetto L, Bussi G, Futter M N, *et al.* A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2016, **18**(8): 1050-1059.
- [32] Kooi M, van Nes E H, Scheffer M, *et al.* Ups and downs in the ocean: effects of biofouling on vertical transport of microplastics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(14): 7963-7971.
- [33] Carson H S, Colbert S L, Kaylor M J, *et al.* Small plastic debris changes water movement and heat transfer through beach sediments [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(8): 1708-1713.
- [34] Zettler E R, Mincer T J, Amaral-Zettler L A. Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(13): 7137-7146.
- [35] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, *et al.* Plastic waste inputs from land into the ocean [J]. *Science*, 2015, **347**(6223): 768-771.
- [36] Tourinho P S, Ivar Do Sul J A, Fillmann G. Is marine debris ingestion still a problem for the coastal marine biota of southern Brazil? [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**(3): 396-401.
- [37] Koelmans A A, Besseling E, Foekema E M. Leaching of plastic additives to marine organisms [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **187**: 49-54.



CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)