

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM_{2.5})排放测算方法:以上海市为例 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)

上海夏季PM_{2.5}中有机物的组分特征、空间分布和来源 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)

北京南郊区PM_{2.5}中水溶性无机盐季节变化及来源分析 高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)

基于样方法的天津市春季道路扬尘PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源解析 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)

广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)

基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)

区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用 樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)

典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)

多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究 庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)

氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)

白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)

太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)

长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)

桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)

青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)

城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)

溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)

三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)

澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)

蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)

两种水生植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)

于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)

岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)

农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广州 (2174)

不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)

真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)

石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G 夏文君, 刘锋, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)

载镧或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)

DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验 梁雨, 何江涛, 张思 (2219)

污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)

低温污水前置强化混凝 刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)

印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性 谭玉琚, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)

生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)

两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)

铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)

热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)

曝气时间对比亚硝化颗粒污泥形成的影响 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)

中国城市污泥中汞含量的时空分布特征 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)

夏季太湖草/藻型湖区N₂O生成与迁移特征及其影响因素 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)

太湖藻型湖区CH₄、CO₂排放特征及其影响因素分析 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO₂、N₂O特征 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)

黄土高原成龄苹果园生态系统CO₂通量特征 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)

生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 汤稼豪 (2351)

不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)

ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)

不同排海方式城市尾水微生物扩散规律 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)

旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)

不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)

生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)

铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)

湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾克宇 (2431)

反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)

广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)

三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)

水稻不同生长时期不同组织中抗生内生菌的筛选与鉴定 王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)

汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)

华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)

基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM_{2.5}健康效应 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)

中国PM_{2.5}污染空间分布的社会经济影响因素分析 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

《环境科学》征订启事(2094) 《环境科学》征稿简则(2164) 信息(2183, 2411, 2445)

长江口潮滩表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点

朱晓桐¹, 衣俊^{1,2}, 强丽媛¹, 程金平^{1,2,3*}

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 香港城市大学深圳研究院深圳海洋生物多样性可持续利用重点实验室, 深圳 518057; 3. 香港科技大学环境科学学科, 香港)

摘要: 河口区域是污染物的源头与交汇的区域. 为探索微塑料在长江口潮滩的污染现状, 本文选取长江口 6 个采样点、4 个季度的潮滩沉积物进行采样分析, 长江口潮滩沉积物中微塑料检测结果显示的平均丰度为 $(3.42 \pm 1.31) \text{ items} \cdot \text{g}^{-1}$, 有纤维状和碎片状两种存在形式, 其中纤维状占主要部分. 微塑料在潮滩沉积物中的分布与沉降和长江口冲淤情况有着高度一致性, 在沉积物冲刷地段位点微塑料丰度较低, 在沉积物淤积位点微塑料丰度较高. 长江口潮滩沉积物中微塑料丰度在 1 月达到最高值, 且在 1 月和 4 月各位点差异较大, 在 7 月和 11 月差异较小. 再悬浮实验表明, 微塑料主要在表层沉积物和水中共聚. 本文结果表明, 长江口潮滩沉积物受到一定程度的微塑料污染, 微塑料在潮滩的积聚与长江口冲淤、降水和潮汐等因素密切相关. 本文的结果可以为长江口潮滩表层沉积物中微塑料的污染研究提供一定的基础数据.

关键词: 微塑料; 潮滩沉积物; 季度特征; 沉降特点; 长江口

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2067-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201709032

Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary

ZHU Xiao-tong¹, YI Jun^{1,2}, QIANG Li-yuan¹, CHENG Jin-ping^{1,2,3*}

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Shenzhen Key Laboratory for the Sustainable Use of Marine Biodiversity, Research Centre for the Oceans and Human Health, City University of Hong Kong Shenzhen Research Institute, Shenzhen 518057, China; 3. Environmental Science Programs, the Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China)

Abstract: This study is designed to understand the microplastic contamination in the coastal area of Yangtze estuary. The abundance and distribution profiles of microplastics in the surface sediment of six sampling sites along the Yangtze estuary were examined throughout one year. The detected average concentration of microplastic, including fibers and fragments, in the surface sediment of Yangtze estuary was $(3.42 \pm 1.31) \text{ items} \cdot \text{g}^{-1}$ (DW). Sampling during four seasons, in the months of January, April, July, and November, indicated the highest abundance of microplastics in Yangtze estuary surface sediment occurred in January. A re-suspension experiment showed that microplastics tend to settle in the surface sediment after re-suspension. The distribution and settlement of microplastics along the coastal area has a high concordance with the dynamic erosion-accretion process of the Yangtze estuary. Microplastics tend to settle in accretion sites rather than in erosion sites.

Key words: microplastics; surface sediment; seasonal patterns; distribution; Yangtze estuary

微塑料是指粒径小于 5 mm 的塑料颗粒^[1], 由于其过小的粒径以及难降解的特性, 受到学界的广泛关注. 微塑料主要来源于日用品^[2]、工业添加^[1]以及大块塑料的破碎^[1]. 经过几十年积聚, 海洋中塑料垃圾不断增加, 微塑料污染也在全球范围内被广泛检测到^[3]. 在我国, 微塑料污染也非常严重, 沿海地带如台州椒江、温州瓯江和福州闽江几个河口海岸区域的水样中微塑料(DW)的浓度为 $(600 \sim 1\ 100 \text{ items} \cdot \text{m}^{-3})$ ^[4], 是发达国家的 30 ~ 50 倍之多. 环境中微塑料作为一种新型污染物对海洋环境产生危害, 其自身含有的许多有毒的添加剂如色素、增塑剂等^[5]会随着微塑料在海洋中流动释放. 由于粒径较小, 微塑料容易被海洋生物误食^[6,7],

随着食物链在海洋生物体内积聚. 微塑料有较大的比表面积, 能够作为凝结核不断吸附海洋中的其他污染物. 甚至还有研究表明, 微塑料可以作为一些小型海洋生物迁徙的载体, 随着洋流进入到外地环境中, 从而引发生物入侵现象^[8,9].

长江是欧亚大陆第一大河, 全长约 6 300 km, 超过四亿人居住在长江流域^[10]. 长江携带大量的废弃物进入中国东海, 对整个西太平洋海岸环境产

收稿日期: 2017-09-04; 修订日期: 2017-10-26

基金项目: 教育部新世纪优秀人才计划项目(NECT-12-0181); 国家自然科学基金项目(41101489); 深圳科技计划重点实验室项目(ZDSYS20140509155229806)

作者简介: 朱晓桐(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境毒理学, E-mail: leon.zhu@hotmail.com

* 通信作者, E-mail: jinpingcheng@gmail.com

生重要影响^[11]。长江口是长江在东海入海口的一段水域,全长约 232 km。由于人口稠密、河流流量大、水上活动多,长江口极易受到塑料垃圾积聚的危害。根据报道,长江口水域中的微塑料(DW)浓度达到 $(4\ 137.3 \pm 2\ 461.5)$ items·m⁻³^[12],相较于欧美等发达国家水域^[13]来说处于一个非常高的水平,相较于临近水域如韩国仁川周边海域^[14],水样中微塑料的浓度也达到 3~5 倍之多,因此,微塑料污染问题在长江口已刻不容缓。

沉积物在各种沉降、密度或联合沉淀等作用下,成为海洋生态系统的“沉淀槽”和污染的第二来源^[15~17]。微塑料在沉积物中积聚后,在环境改变或生物扰动等作用下,能够重新悬浮于水面中与其他污染物结合或者释放有毒物质^[18]。河口地带中的各种物质如废弃物、重金属或有机污染物等,在河流输入和海洋作用下形成盐水楔,进而极易沉降后被掩埋在底泥沉积物环境中^[19],并且这些污染物会相互结合^[20]。河流中携带的物质在河口径流和潮汐的作用下,其丰度和成分都会发生一定改变^[21],因此污染物在潮滩地带中的流动性、生物可利用性和环境毒性不可以简单地用浓度来表示^[22,23],应该考虑其连续的作用。目前,我国针对微塑料污染的研究集中于水体和水生生物,本文选取长江口潮滩沉积物作为研究对象,开展了对潮滩沉积物中微塑料污染的检测和沉积特点的初步探索。

1 材料与与方法

1.1 仪器与试剂

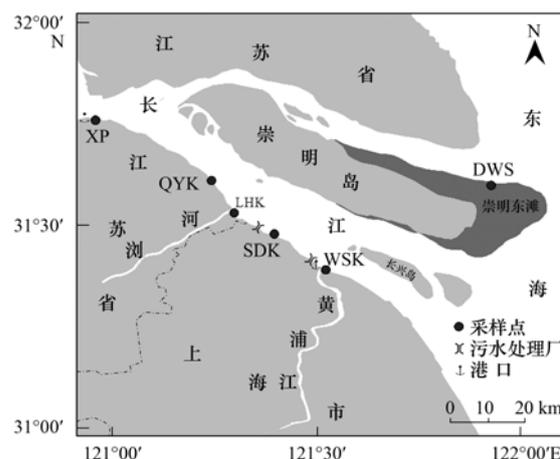
仪器:烘箱(BZF-50,上海博讯公司)、体视显微镜(M165FC,德国 Leica 公司),电子分析天平(BSA124S,德国 Sartorius),真空抽滤系统(GM-0.33A,天津津腾公司),实验室常用玻璃器皿购于中国医药集团上海公司。

试剂:NaCl(分析纯)购于中国医药集团上海公司。

1.2 研究区域及样品收集与处理

沉积物样品采集于东旺沙(DWS: 121°55'06" E, 31°34'08"N)、吴淞口(WSK: 121°30'33"E, 31°23'36"N)、石洞口(SDK: 121°23'50"E, 31°28'40"N)、浏河口(LHK: 121°17'45"E, 31°31'05"N)、七丫口(QYK: 121°14'37"E, 31°36'36"N)和浒浦(XP: 120°57'34"E, 31°45'33"N)共 6 个典型采样点,如图 1 所示。

长江口潮滩表层(0~5 cm)沉积物样品分别于



沿长江边从下游至上游分布,WSK:吴淞口,石洞口;SDK,浏河口;LHK,七丫口;QYK和浒浦;XP;DWS:东旺沙,位于中国第三大岛屿崇明岛

图 1 长江入海口地区采样点示意

Fig. 1 Sampling sites along the Yangtze estuary

2016年4月、7月和11月以及2017年1月采集。采样时,于低潮期使用干净不锈钢铲采集沉积物(每个采样点隔50 m取样,共取3个平行样品),样品用锡箔纸包裹后置于自封袋密封保存,当天送回实验室。每份样品取部分于烘箱(BZF-50,上海博讯公司)中烘干处理,烘箱温度70℃,烘干至沉积物质量恒定不再发生变化。所有样品用锡箔纸包好,置于自封袋在4℃冰箱中保存。

1.3 沉积物中的微塑料提取

实验前将NaCl溶液(300 g·L⁻¹)通过直径47 mm,孔径5.0 μm的玻璃纤维滤膜(GF/B,英国 Whatman 公司)过滤。称取沉积物干样($n=3$),加入沉积物干样质量20倍体积的过滤后的NaCl溶液,摇晃至均匀,室温静置12 h。取上清液通过真空抽滤系统(GM-0.33A,天津津腾公司),滤膜采用直径47 mm,孔径5.0 μm的混合硝酸纤维素膜(SMWP04700,英国 Millipore 公司),真空抽滤完成,将滤膜置于干净的培养皿中进行微塑料检测。

1.4 沉积物中微塑料再悬浮-沉降

为研究微塑料颗粒在潮滩表层沉积物中的沉降特点,对沉积物样品进行实验室模拟再悬浮过程^[24],通过对不同层面沉积物进行微塑料检测来探索微塑料颗粒在沉积物中的沉降趋势。

取沉积物样品(未经烘干处理)置于离心管中,加入适量去离子水,彻底摇匀,直至整个体系呈匀浆状(无结块)。体系于4℃静置24 h直至完全沉降分层后,12 000 r·min⁻¹离心5 min。

离心后,体系分为3层:澄清的悬浮相、上层稀

疏的胶状沉积物、下层稠密的紧致沉积物。悬浮相直接通过混合硝酸纤维素膜 (SMWP04700, 英国 Millipore 公司) 真空过滤后, 显微镜下进行微塑料检测。上层和下层沉积物分别转移至锥形瓶中, 加入过滤后的 NaCl 溶液 ($300 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), 摇晃至均匀。室温静置 12 h, 取上清液通过直径 47 mm, 孔径 $5.0 \mu\text{m}$ 的混合硝酸纤维素膜 (SMWP04700, 英国 Millipore 公司) 进行过滤, 将滤膜置于干净的培养皿中进行微塑料检测。

分别取上层、下层沉积物样品, 于烘箱 (BZF-50, 上海博讯公司) 中进行烘干处理, 烘箱温度 70°C , 烘干至沉积物质量恒定不再发生变化。样品烘干后, 于研钵中研磨至粉末状, 进行粒度测试。粒度测试采用激光粒度分析仪 (LS 13320, Beckman Coulter Corporation, USA), 每层沉积物共有 3 个平行。

1.5 数据处理及分析

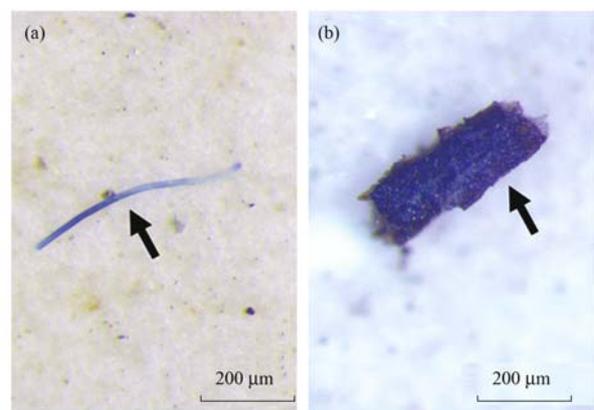
滤膜置于 Leica 体视镜 (MI65FC, 德国 Leica 公司) 观察, 拍照。根据照片对微塑料丰度、形状特征等进行统计分析。每个实验样品设置 3 组平行 ($n=3$), 所有实验数据均采用平均值 \pm 标准偏差 ($\text{mean} \pm \text{SD}$) 表示。实验中使用的地理信息图使用 ArcGis 10.2 软件进行绘制。实验结果使用 GraphPad Prism 5.0 软件分析及显著性检验, $P < 0.05$ 表示差异具有显著性统计学意义。

2 结果与分析

2.1 微塑料在长江口潮滩表层沉积物中的形状与分布

本实验选取 2016 年的 4、7、11 月和 2017 年 1

月这 4 个月份样品代表全年 4 个季度, 对吴淞口、石洞口、浏河口、七丫口、浒浦和东旺沙这 6 个采样点潮滩沉积物进行检测, 代表长江口潮滩沉积物中微塑料污染情况。如图 2 所示, 4 个季度长江口潮滩沉积物中均有不同丰度的微塑料被检测到, 且在各个采样位点中, 微塑料主要由纤维状和碎片状两种形状组成。从粒径来看, 纤维状微塑料的粒径分布较为广泛, 从 $100 \sim 2500 \mu\text{m}$ 均有分布, 并在 $500 \sim 1000 \mu\text{m}$ 区间内分布较多; 碎片状微塑料粒径分布较为集中, 大多不超过 $300 \mu\text{m}$, 相对于纤维状微塑料较小。

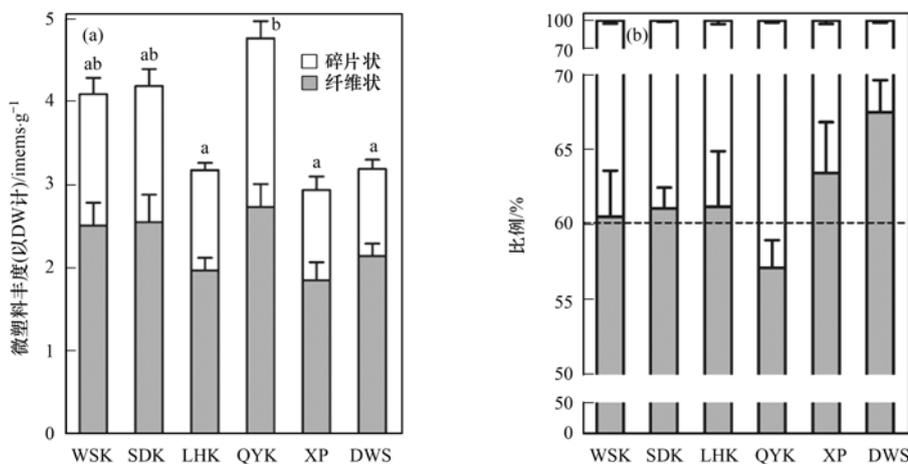


(a) 纤维状微塑料; (b) 碎片状微塑料

图 2 长江口潮滩表层沉积物中微塑料的不同存在形式

Fig. 2 Presence of microplastics in the Yangtze estuary

如 3(a) 所示, 长江口潮滩 6 个采样点沉积物中微塑料 (DW) 平均丰度为 $(3.42 \pm 1.31) \text{ items}\cdot\text{g}^{-1}$ 。七丫口 (QYK) 为 6 个采样点中微塑料丰度最高的位点, 丰度为 $4.76 \text{ items}\cdot\text{g}^{-1}$, 显著性高于浏河口 (LHK)、浒浦 (XP) 和石洞口 (SDK) (P



(a) 沉积物中微塑料全年平均丰度; (b) 沉积物中两种微塑料组成比例

图 3 长江口潮滩表层沉积物中微塑料污染现状 ($n=12$)

Fig. 3 Microplastics pollution status in surface sediment of the Yangtze estuary ($n=12$)

<0.05); 吴淞口 (WSK) 和石洞口 (SDK) 也是微塑料丰度较高的位点, 丰度 (以 DW 计) 分别为 4.09 和 4.19 $\text{items}\cdot\text{g}^{-1}$, 与其他各位点并无显著性差异 ($P > 0.05$); 位于长江口上游的浏河口 (LHK)、浒浦 (XP) 和崇明岛上的东旺沙 (DWS) 为微塑料丰度最低的两个位点, 丰度 (以 DW 计) 为 3.18、2.93 和 3.19 $\text{items}\cdot\text{g}^{-1}$.

如图 3(b) 所示, 6 个采样点中均有纤维状和碎片状两种形状的微塑料被检测到, 在所有位点中纤维状微塑料所占比例均高于碎片状微塑料, 除七丫口外其余 5 个位点中纤维状微塑料在 60% 以上. 6 个采样位点中, 位于崇明岛潮滩的东旺沙沉积物中纤维状微塑料所占比例最高, 七丫口沉积物中微塑料纤维状所占比例最低, 低于 60%. 七丫口是微塑料丰度最高的位点, 但碎片状微塑料含量相对较高.

2.2 微塑料在长江口潮滩表层沉积物中的季度变化及规律

本实验选取 2016 年 4 月、7 月、11 月和 2017

年 1 月这 4 个月份样品代表全年 4 个季度 (表 1). 长江口是长江进入东海的入海口, 背靠江苏、浙江两省和上海市, 地属亚热带湿润季风型气候, 气候温和, 降水量充沛. 在长江下游地区, 每年 4 月会进入连续阴天降水气候, 被称为梅雨季节, 即长江口地区的雨季. 长江口雨季降水量 133.3 mm 显著性高于旱季的降水量 58.05 mm ($P < 0.05$), 雨季低潮位高度 133 cm 也显著性高于旱季 93 cm ($P < 0.05$), 雨季微塑料丰度 (以 DW 计) 为 $(3.16 \pm 0.90) \text{items}\cdot\text{g}^{-1}$, 显著性低于旱季 (以 DW 计) $(4.36 \pm 1.66) \text{items}\cdot\text{g}^{-1}$ ($P < 0.05$). 这表明, 雨季的高降水量和高低潮位高度对潮滩的冲刷带走了沉积物中微塑料, 对微塑料污染有一定减缓作用.

各个季度中长江口潮滩沉积物中微塑料丰度变化如图 4 所示. 7 月为雨季末期, 降水量和低潮位高度都较高, 降水与潮汐冲刷对微塑料丰度影响较大, 仅吴淞口 (WSK) 微塑料丰度显著性高于另外 4 个位点 (除七丫口外). 11 月为雨季结束, 旱季开始时期, 各位点微塑料差异不明显, 仅浒浦 (XP) 微

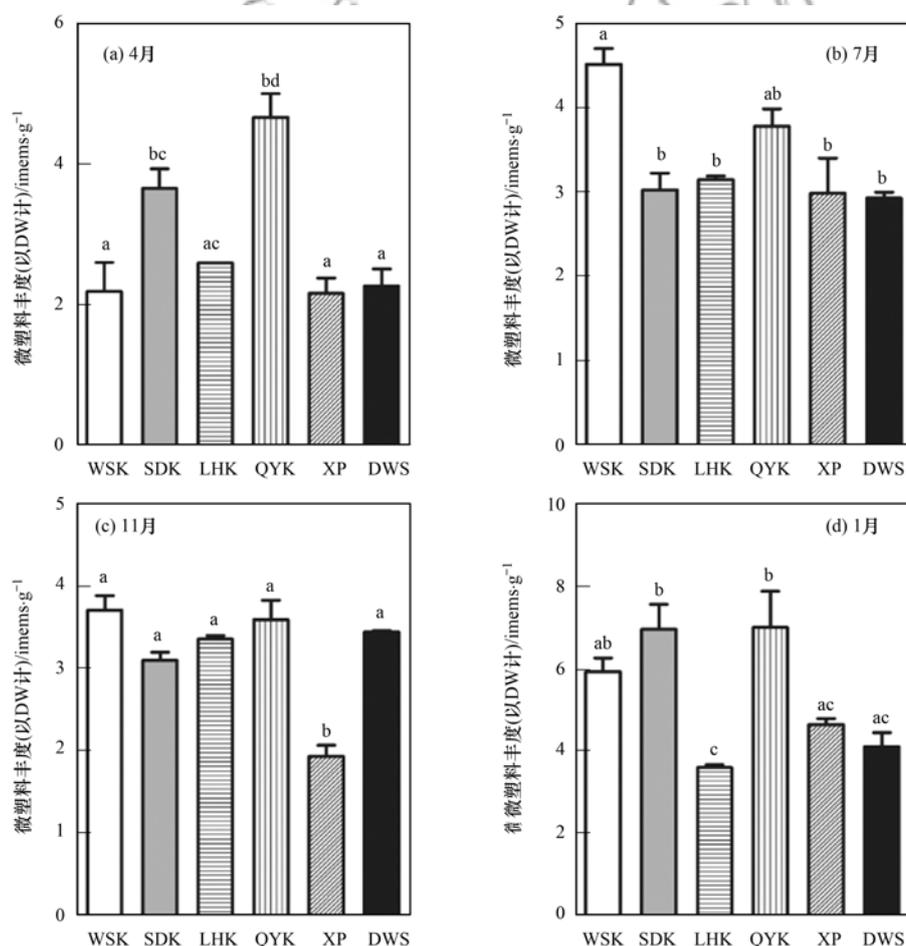


图 4 长江口潮滩沉积物中微塑料丰度季度特征

Fig. 4 Abundance of microplastics in different seasons in the Yangtze estuary sediment

表 1 长江口各季度气候基本信息¹⁾

Table 1 Basic weather information for the Yangtze estuary showing seasonal patterns

日期(年-月)	主要风向	风力	当月降水天数 /d	当月降水量 /mm	潮位信息 (WSK)	
					高潮位/cm	低潮位/cm
2016-04	东风, 东南风	3 级	15	153.6	270	120
2016-07	东风, 东南风	3 级	18	113.0	313	146
2016-11	北风	3 级	11	51.8	367	95
2017-01	东北风, 北风	1 级	8	64.3	270	91

1) 数据来源上海市气象局和上海海事局

塑料丰度显著性低于其他位点. 4 月和 1 月为微塑料差异较明显的季度. 1 月为旱季末期, 石洞口 (SDK) 和七丫口 (QYK) 微塑料丰度显著性高于浏河口 (LHK)、浒浦 (XP) 和东旺沙 (DWS); 4 月为旱季结束, 雨季开始, 七丫口 (QYK) 微塑料丰度显著性高于浏河口 (LHK)、浒浦 (XP) 和东旺沙 (DWS). 这表明, 七丫口 (QYK) 等微塑料污染较严重的位点, 污染积聚时期主要为旱季, 雨季降水和潮汐的冲刷对微塑料污染积聚有着减缓作用.

微塑料在长江口潮滩 6 个采样点表层沉积物中季度变化如 5 所示. 4 个季度检测结果表明, 微塑料在冬季(1 月)的丰度较其他 3 个季度有显著性升高 ($P < 0.05$), 在夏季和秋季微塑料浓度无显著性差异. 通过与表 1 中采样期间长江口各季度气候基本信息对比, 可以发现降水量与潮滩沉积物中微塑料丰度有着一定关联, 当降水量和降水天数较低时, 微塑料的丰度相对较高. 这表明降水的冲刷会减弱微塑料的积聚, 有利于缓解微塑料污染在河口沿岸地带的积累. 在不同季度的各个采样点中, 微塑料均呈现纤维状和碎片状两种不同形状, 其比例也不相同. 其中, 纤维状微塑料所占比例在各个季度各个采样点均高于碎片状微塑料, 并且总体呈上升趋势.

2.3 微塑料的再悬浮-沉降特点

长江口潮滩沉积物再悬浮-沉降后, 体系分为悬浮相、上层沉积物和下层沉积物 3 层(图 6). 上层沉积物体积占沉积物总体积 60% (0~3 cm), 质量占 30%; 下层沉积物占总体积 40%, 密度是上层沉积物 3.5 倍, 下层沉积物平均粒径 ($14.00 \mu\text{m} \pm 0.69 \mu\text{m}$) 显著高于上层沉积物 ($6.16 \mu\text{m} \pm 1.02 \mu\text{m}$) ($P < 0.05$). 再悬浮-沉降后, 微塑料倾向于在上层沉积物和悬浮相中分布, 占微塑料总量 75% 以上. 上层沉积物中微塑料丰度显著性高于下层沉积物 ($P < 0.05$). 对微塑料形态进行统计分析发现, 总体上纤维状微塑料数量要多于碎片状, 但沉积物

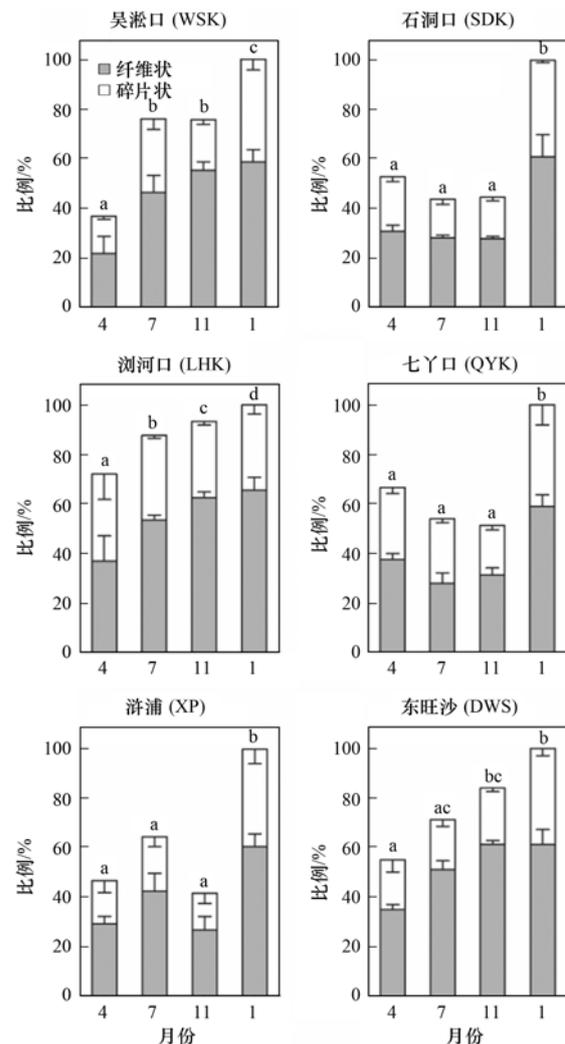


图 5 微塑料的形状组成在各位点的季度变化

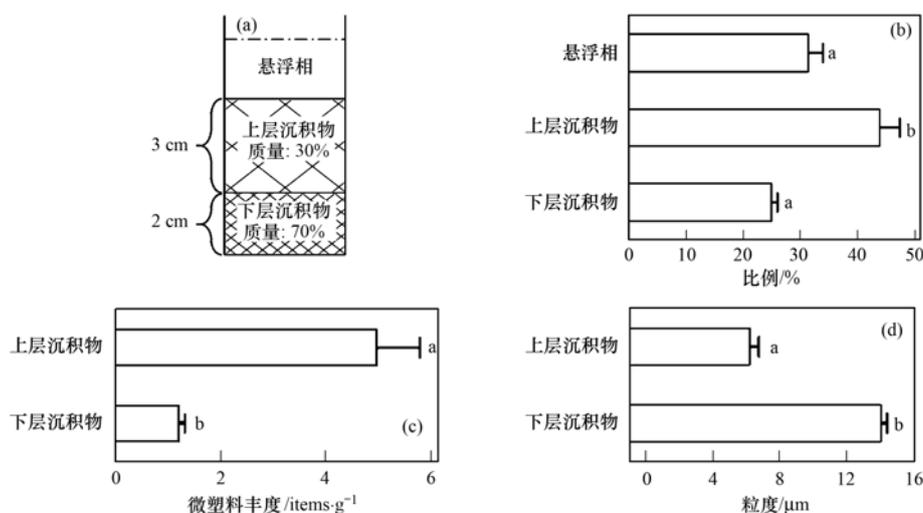
Fig. 5 Seasonal pattern of the physical types of microplastics at each sampling site

越深, 碎片状微塑料所占比例越高, 即碎片状微塑料更易向更下层沉积物积聚, 而纤维状微塑料更倾向于在上层或者悬浮相间隙水中积聚.

3 讨论

3.1 长江口潮滩沉积物中微塑料污染

从形态上看, 长江口潮滩沉积物中微塑料的形



(a) 深度 -3 ~ 0 cm 为上层沉积物, -5 ~ -3 cm 为下层沉积物; (b) 沉降后微塑料在沉积物中各层分布 ($n=3$);

(c) 沉降后微塑料在沉积物中各层丰度 ($n=3$); (d) 沉降后上、下层沉积物粒度

图 6 微塑料在表层沉积物中的再悬浮后沉降特点示意

Fig. 6 Re-distribution of microplastics in sediment after re-settlement

状组成与比例, 与环境^[12, 25]和海洋生物体内^[26]微塑料形态检测结果相符合. 长江口潮滩沉积物中微塑料丰度与长江口气候变化的关联性, 降水对沉积物的冲刷会对沉积物中微塑料丰度有较大影响, 与 Lima 等的发现一致^[27]. 各位点的微塑料丰度与冲淤情况有着较高的一致性, 长江口是长江向海洋输送物质的重要地段, 水体中的微塑料在长江口径流与潮汐共同作用下, 容易沉降积聚在沉积物中, 因此长江口沉积物的冲淤对于微塑料的积聚有着重要影响, 在浒浦和浏河口冲刷强于淤积的位点^[28], 微塑料丰度较低; 在七丫口、石洞口和吴淞口淤积强于冲刷的位点^[28], 微塑料丰度较高. 同时, 临近污水处理厂、港口等工业活动的吴淞口、石洞口和七丫口, 潮滩沉积物中微塑料丰度高于浒浦和东旺沙, 表明人类活动对微塑料污染也有着重要影响.

长江口潮滩沉积物中微塑料丰度检测结果与长江口河口表层水^[12]中微塑料(以 DW 计)浓度 $[(4.03 \pm 2.40) \text{ items} \cdot \text{g}^{-1}]$ 相近, 低于北部湾^[29]沉积物中微塑料浓度 $(6.92 \text{ items} \cdot \text{g}^{-1})$, 远高于近海海底沉积物中微塑料丰度 $[(0.121 \pm 0.009) \text{ items} \cdot \text{g}^{-1}]$ ^[25], 近海海底沉积物中微塑料丰度为潮滩沉积物的 1% ~ 2%. 通过比较长江口潮滩与中国内陆河流区域的微塑料污染现状发现, 内陆河流区域更为严重. 中国三峡大坝地区长江支流水域^[5]微塑料浓度达到 192.5 ~ 11 889.7 $\text{items} \cdot \text{g}^{-1}$, 是长江口潮滩地区 100 ~ 2 500 倍, 这表明径流和潮汐双重作用下的河口区域微塑料的污染程度低于内陆河流

区域. 微塑料污染在国内外河口区域潮滩沉积物中都被检测到, 如美国佐治亚海岸潮滩^[30]. 与国外河流、河口区域微塑料污染相比, 中国微塑料污染问题十分突出. 美国切萨皮克湾表层水样^[31]中微塑料含量仅 $(1.96 \times 10^{-13} \pm 6.94 \times 10^{-14}) \text{ items} \cdot \text{g}^{-1}$, 远远低于长江口表层水样; 德国内陆河流莱茵河流域潮滩表层沉积物^[32]中微塑料含量为 4 $\text{items} \cdot \text{g}^{-1}$, 远远低于中国内陆三峡流域污染水平.

3.2 微塑料在沉积物中再悬浮-沉降特点

长江口潮滩沉积物经再悬浮-沉降后分层与各层粒度与之前关于沉积物再悬浮沉降研究结果相符^[24]. 通过实验室模拟微塑料在沉积物中的再悬浮沉降过程, 微塑料在沉积物中的分布与 Green 等^[33]的结果相符合. 潮滩表层沉积物是污染积聚严重的区域^[34], 也是许多海洋生物如底栖生物的栖息地. 研究表明, 微塑料自身可以作为凝结核对其他污染有一定吸附作用^[35]. 微塑料倾向于在表层沉积物中分布, 与其他污染物容易结合可能性增加, 产生的联合毒性也可能增强. 长江口潮滩沉积物近十年的沉降速率约为 $6.4 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[36], 因此潮滩沉积物中的微塑料污染大多分布于潮滩近年内的沉积物中, 而难以进入更底层沉降的沉积物中. 对于长江口潮滩沉积物中微塑料污染问题的研究, 可能要重点关注近年来沉积物的影响.

4 结论

本文研究结果表明: 微塑料在长江口潮滩沉积

物中积聚, 全年平均丰度(以 DW 计)为 (3.42 ± 1.31) items \cdot g $^{-1}$, 主要有纤维状和碎片状两种存在形式, 其中纤维状所占比例较高. 微塑料的积聚受到降水、河流冲淤等环境因素影响较大, 高降水量和河流冲刷会降低潮滩沉积物中微塑料的积聚. 微塑料更易在潮滩表层沉积物中积聚, 难以进入深层沉积物中.

参考文献:

- [1] Andradý A L. Microplastics in the marine environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(8): 1596-1605.
- [2] Fendall L S, Sewell M A. Contributing to marine pollution by washing your face; microplastics in facial cleansers [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, **58**(8): 1225-1228.
- [3] Van Cauwenberghe L, Devriese L, Galgani F, *et al.* Microplastics in sediments: a review of techniques, occurrence and effects [J]. Marine Environmental Research, 2015, **111**: 5-17.
- [4] Zhang K, Gong W, Lv J Z, *et al.* Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges Dam [J]. Environmental Pollution, 2015, **204**: 117-123.
- [5] Teuten E L, Rowland S J, Galloway T S, *et al.* Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(22): 7759-7764.
- [6] Desforges J P W, Galbraith M, Ross P S. Ingestion of microplastics by zooplankton in the northeast Pacific Ocean [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, **69**(3): 320-330.
- [7] Van Cauwenberghe L, Claessens M, Vandegehuchte M B, *et al.* Microplastics are taken up by mussels (*Mytilus edulis*) and lugworms (*Arenicola marina*) living in natural habitats [J]. Environmental Pollution, 2015, **199**: 10-17.
- [8] Teuten E L, Saquing J M, Knappe D R U, *et al.* Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 2009, **364**(1526): 2027-2045.
- [9] Gregory M R. Environmental implications of plastic debris in marine settings-entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 2009, **364**(1526): 2013-2025.
- [10] Chen Z Y, Li J F, Shen H T, *et al.* Yangtze River of China: historical analysis of discharge variability and sediment flux [J]. Geomorphology, 2001, **41**(2-3): 77-91.
- [11] Li M T, Xu K Q, Watanabe M, *et al.* Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, **71**(1-2): 3-12.
- [12] 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.
- [13] Corcoran P L, Norris T, Ceccanese T, *et al.* Hidden plastics of Lake Ontario, Canada and their potential preservation in the sediment record [J]. Environmental Pollution, 2015, **204**: 17-25.
- [14] Chae D H, Kim I S, Kim S K, *et al.* Abundance and distribution characteristics of microplastics in surface seawaters of the Incheon/Kyeonggi Coastal Region [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, **69**(3): 269-278.
- [15] Dang D H, Lenoble V, Durrieu G, *et al.* Seasonal variations of coastal sedimentary trace metals cycling: Insight on the effect of manganese and iron (oxy) hydroxides, sulphide and organic matter [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **92**(1-2): 113-124.
- [16] Schintu M, Buosi C, Galgani F, *et al.* Interpretation of coastal sediment quality based on trace metal and PAH analysis, benthic foraminifera, and toxicity tests (Sardinia, Western Mediterranean) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **94**(1-2): 72-83.
- [17] Alomar C, Estarellas F, Deudero S. Microplastics in the Mediterranean Sea: deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size [J]. Marine Environmental Research, 2016, **115**: 1-10.
- [18] Prajith A, Rao V P, Chakraborty P. Distribution, provenance and early diagenesis of major and trace metals in sediment cores from the Mandovi estuary, western India [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, **170**: 173-185.
- [19] Wang G G, Peng J L, Hao T, *et al.* Distribution and region-specific sources of Dieldrin plus in marine sediments from the coastal East China Sea [J]. Science of the Total Environment, 2016, **573**: 389-396.
- [20] Roig N, Sierra J, Moreno-Garrido I, *et al.* Metal bioavailability in freshwater sediment samples and their influence on ecological status of river basins [J]. Science of the Total Environment, 2016, **540**: 287-296.
- [21] Gao S, Wang Y P. Changes in material fluxes from the Changjiang River and their implications on the adjoining continental shelf ecosystem [J]. Continental Shelf Research, 2008, **28**(12): 1490-1500.
- [22] Moore F, Nematollahi M J, Keshavarzi B. Heavy metals fractionation in surface sediments of Gowatr Bay-Iran [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, **187**: 4117.
- [23] Palleyi S, Banoo S, Kar R N, *et al.* Textural and geochemical characteristics of off shore sediment of North Bay of Bengal: a statistical approach for marine metal pollution [J]. International Journal of Sediment Research, 2015, **30**(3): 208-222.
- [24] Huang L D, Li Z X, Bai X L, *et al.* Laboratory study of phosphorus retention and release by eutrophic lake sediments: modeling and implications for P release assessments [J]. Ecological Engineering, 2016, **95**: 438-446.
- [25] Peng G Y, Zhu B S, Yang D Q, *et al.* Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China [J]. Environmental Pollution, 2017, **225**: 283-290.
- [26] Li J N, Qu X Y, Su L, *et al.* Microplastics in mussels along the coastal waters of China [J]. Environmental Pollution, 2016, **214**: 177-184.
- [27] Lima A R A, Barletta M, Costa M F. Seasonal distribution and

- interactions between plankton and Microplastics in a tropical estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, **165**: 213-225.
- [28] 刘杰, 赵德招, 程海峰. 长江口南支河床近期冲淤演变机制[J]. *水运工程*, 2011, (7): 113-118.
- [29] Qiu Q X, Peng J P, Yu X B, *et al.* Occurrence of Microplastics in the coastal marine environment: first observation on sediment of China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **98**(1-2): 274-280.
- [30] Lee R F, Sanders D P. The amount and accumulation rate of plastic debris on marshes and beaches on the Georgia coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, **91**(1): 113-119.
- [31] Yonkos L T, Friedel E A, Perez-Reyes A C, *et al.* Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, U. S. A. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(24): 14195-14202.
- [32] 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.
- [33] Green D S, Boots B, O'Connor N E, *et al.* Microplastics affect the ecological functioning of an important biogenic habitat[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(1): 68-77.
- [34] Yu R L, Hu G R, Lin C Q, *et al.* Contamination of heavy metals and isotopic tracing of Pb in intertidal surface sediments of Jinjiang River Estuary, SE China [J]. *Applied Geochemistry*, 2017, **83**: 41-49.
- [35] Luís L G, Ferreira P, Fonte E, *et al.* Does the presence of Microplastics influence the acute toxicity of chromium (VI) to early juveniles of the common goby (*Pomatoschistus microps*)? A study with juveniles from two wild estuarine populations [J]. *Aquatic Toxicology*, 2015, **164**: 163-174.
- [36] 张敬, 杜金洲, 张文祥, 等. 基于²¹⁰Pb、²²⁸Th 和⁷Be 三种放射性核素的长江口潮滩沉积速率研究——以崇明东滩为例 [A]. 见: 第十届中国河口海岸学术研讨会论文集 [C]. 北京: 中国海洋学会, 中国海洋湖沼学会, 2007. 246-251.



CONTENTS

Estimation of Fine Particle (PM _{2.5}) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in PM _{2.5} in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in PM _{2.5} in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a MnFe ₂ O ₄ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N ₂ O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO ₂ and N ₂ O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO ₂ Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism Between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of PM _{2.5} Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)