

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



2019

Vol.40 No.6

第40卷 第6期

目 次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清 (2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容 (2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧 (2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)
快速城市化区河流温室气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑 (2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌 (2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩 (2948)
污泥四要素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	《环境科学》征稿简则 (2947)
信息 (2646, 2656, 2857)	

青岛4个海水浴场微塑料的分布特征

罗雅丹^{1,2}, 林千惠^{1,2}, 贾芳丽^{1,2}, 徐功娣^{1,3}, 李锋民^{1,2*}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 海洋生态与环境教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学近海环境污染控制研究所, 青岛 266100; 3. 海南热带海洋学院生态环境学院, 三亚 572022)

摘要: 微塑料(microplastics, MPs)作为有毒有害物质的载体, 会随洋流作用传播、被生物摄入并影响其生长代谢, 已经成为全球性的环境问题。为揭示青岛近岸 MPs 分布规律和影响因素, 利用表层现场采样、密度悬浮法分离、光学显微镜和荧光显微镜结合观察的方法, 研究了青岛近岸4个典型海水浴场海水和沉积物中 MPs 丰度分布, 分析了各海水浴场 MPs 的粒径范围、形状和化学成分。结果表明, 4个浴场海水中 MPs 含量范围为 $5.05 \times 10^3 \sim 1.25 \times 10^4$ 个 $\cdot\text{m}^{-3}$; 沉积物中 MPs 含量范围为 $1.91 \times 10^3 \sim 4.35 \times 10^3$ 个 $\cdot\text{m}^{-2}$, 海水中 MPs 含量高的站位相应沉积物中含量也高。4种粒径范围 MPs 在海水及沉积物中皆表现为粒径大小与其含量成负相关, 例如, 海水中 MPs 含量最高的为 $0.05 \sim 0.1$ mm (4.10×10^3 个 $\cdot\text{m}^{-3}$), 最低为 $1 \sim 5$ mm (2.05×10^3 个 $\cdot\text{m}^{-3}$)。纤维状 MPs 在海水中和沉积物中均占比最高, 分别为 48.73% 和 37.51%, 其次为颗粒和碎片型。用 ATR-FTIR 从海水中检测出 8 种塑料类型, 含量由高到低为: PET > PP > PS > PE > PVC $\approx$ SB > PA $\approx$ PMA; 沉积物中检测出 6 种 MPs, 同海水相比, 没有 PMA 和 PA, 含量较高的 4 种 MPs 类型与海水相同。沉积物中的 MPs 在粒径、形状及成分上与海水具有相似性, 说明青岛近岸海水浴场海水及沉积物可能有相同的污染源: 包装行业、服装纺织业、旅游业。研究结果为揭示沿海旅游型城市海水浴场 MPs 的分布及来源、开展海岸带 MPs 污染研究与监督工作提供了基础数据。

关键词: 微塑料(MPs); 海水浴场; 分布特征; 傅里叶红外; 青岛

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2631-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201810074

Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches

LUO Ya-dan^{1,2}, LIN Qian-hui^{1,2}, JIA Fang-li^{1,2}, XU Gong-di^{1,3}, LI Feng-min^{1,2*}

(1. Key Laboratory on Marine Environment and Ecology of Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Institute of Coastal Environmental Pollution Control, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. College of Ecological Environment, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China)

Abstract: Microplastics (MPs, plastic fibers, debris, or particles that are generally smaller than 5 mm in diameter) can serve as carriers for hazardous substances, which are ingested by organisms in the ocean and can affect their growth and metabolism. Moreover, MPs will spread with ocean currents, and MP pollution has become a global problem. In this study, the MP abundance distribution of four typical beaches near the coast of Qingdao was studied by the combination of ordinary microscope and fluorescence microscope methods. In addition, the distribution of MPs collected from various beaches in different particle size ranges, shapes, and chemical compositions was discussed. Abundances on the sea surface varied between 5.05×10^3 particles $\cdot\text{m}^{-3}$ and 1.25×10^4 particles $\cdot\text{m}^{-3}$, and the concentration of MPs in sand varied between 1.91×10^3 particles $\cdot\text{m}^{-2}$ and 4.35×10^3 particles $\cdot\text{m}^{-2}$, with no significant differences detected among the four beaches examined. The results show the pervasiveness of MP pollution in coastal environments of Qingdao. The size of particles found in this study ranged from 5 mm to 50 μm , and increases in abundance were detected with the decreasing particle size. Polypropylene (PP), polyethylene (PE), polystyrene (PS), polyethylene terephthalate (PET), polyvinyl chloride (PVC), 96% polystyrene + 4% butadiene copolymer (SB), polymethyl acrylate (PMA), and polyamide (PA) were present in seawater in coastal environments of Qingdao, and compared with the seawater samples, no PA or PMA were found in sand. Research results indicated that fiber was dominant in seawater and sand. MPs in the sand were similar to those in seawater in terms of the particle size, shape, and composition, thus indicating that the seawater and sand of the bathing beaches in Qingdao may have the same pollution sources, e. g., the packaging industry, clothing textile industry, and tourism. This paper studies the distribution and sources of MPs in the bathing beaches of Qingdao, and it provides basic data for research and supervision of environmental MP pollution in Chinese coastal zones.

Key words: microplastics(MPs); bathing beach; distribution characteristics; FTIR spectrometer; Qingdao

塑料是海洋垃圾中的重要组成部分, 且有逐年递增的趋势^[1]。塑料在环境中经过一系列物理、化学作用(光照、机械磨损等)及生物降解成小的碎片、纤维或颗粒^[2,3], 通常将直径小于 5 mm 的塑料定义为微塑料(microplastics, MPs)。据估计, 2013 年全球海洋中约有 4.85 万亿个 MPs (< 4.75 mm), 总重量约为 3.54 万 t^[4]; 2014 年达到 15 ~ 51 万亿个, 总量在 9.3 ~ 23.6 万 t 之间^[5], MPs

已经成为一种日益严重的污染物。MPs 主要来源于大型塑料的降解, 同时也包含一些工业生产过

收稿日期: 2018-10-12; 修订日期: 2019-01-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406304); 国家自然科学基金委员会-山东省联合基金项目(U1606404); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2015CB453301)

作者简介: 罗雅丹(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微塑料的分布特征及其污染情况, E-mail: 17860729965@163.com

* 通信作者, E-mail: lifengmin@ouc.edu.cn

程中直接产生的微米级塑料^[6, 7]. 海洋中的 MPs 容易被海洋生物摄食^[8~10]或附着其上^[11], 会影响海洋生物的生理代谢和生长发育等^[12], 富集在 MPs 上的污染物和细菌等也会对生物产生更大的危害^[13]. 摄入体内的 MPs 无法被生物分解, 通过食物链在各营养级之间传递^[14], 最终危害人类健康^[15].

MPs 在洋流的作用下会迁移扩散至全球, 而海洋中已经存在的 MPs 会在潮汐及洋流作用下汇聚至海岸带滞留^[7], 近年来的研究显示 MPs 在近海环境分布相对集中^[16]. 据全球统计数据, 大约 80% 的塑料垃圾会滞留在海滩上^[17], 且有大规模人类活动的沿海是污染物集中区域^[18]. 2013 年国内开始沿着海岸线对 MPs 进行定量研究, 重点研究了长江口^[19], 此后, 在香港^[20]、广东^[21]和厦门^[16]等沿海区域也发现了大量 MPs.

青岛市拥有 816.98 km 海岸线, 是沿海重要中心城市, 是国务院批准的山东半岛蓝色经济区规划核心区域龙头城市, 以海洋经济为主题的发展区域, 因此沿海生态系统的稳定性引起越来越大的关

注. 青岛市是旅游城市, 大部分海岸线是高强度的人类活动地区(如海岸带养殖场和海水浴场等), 海水浴场是人类与 MPs 有直接接触的区域, MPs 存在健康风险, 亟需阐明其在海水浴场的分布规律和来源特征.

本文选择青岛 4 个典型的海水浴场, 采集了海水以及沙滩沉积物样品, 通过尼罗红染色结合荧光显微镜观察, 检测各采样点 MPs 的含量、粒径、颜色及塑料类型, 揭示海水浴场 MPs 的分布规律, 并探究其来源. 本研究结果对了解全国 MPs 的污染现状和污染源提供基础数据, 也能一定程度上反映滨海旅游业对近海 MPs 污染的影响.

1 材料与方法

1.1 研究区域

山东省青岛市地处山东半岛东南部沿海, 濒临黄海, 隔海与朝鲜半岛相望, 是著名的滨海旅游城市. 研究区域为开发成旅游区域的海水浴场(表 1), 自西向东选择 4 个典型海水浴场, 是人类活动较为频繁的区域.

表 1 青岛近岸海水浴场采样点
Table 1 Sampling points on Qingdao coastal beaches

采集站点	标记	功能	经度(E)	纬度(N)
栈桥海水浴场	ZQ	海水浴场	120°19'13.77"	36°03'30.43"
第一海水浴场	N1	海水浴场	120°20'34.00"	36°03'22.49"
第二海水浴场	N2	海水浴场	120°21'11.08"	36°02'58.88"
石老人海水浴场	SLR	海水浴场	120°28'36.18"	36°05'39.97"

1.2 样品采集

海水样品利用带有刻度的不锈钢桶人工采集, 每个站点采集约 50 L 海水, 用 50 μm 孔径的浮游生物网过滤, 将样品收集于 1 L 的棕色玻璃瓶中. 沙滩表层沉积物样品的采集地点选择潮间带区域^[22, 23]. 沙滩沉积物样品采用不锈钢采样铲采集 20 cm × 20 cm × 2 cm 的立方体, 锡箔纸包好, 放入聚乙烯密封袋^[24, 25].

1.3 样品处理

采用过滤消解法从表层海水样品中分离微塑料: 将每个水样品通过孔径为 5 μm 的混合纤维素滤膜(直径 50 mm)过滤. 将膜上所有物质用 30% 的 H₂O₂ 冲洗至 100 mL 的小烧杯中, 加入 0.01 g FeCl₂, 立即密封置于 60℃ 的水浴锅中加热 72 h^[26, 22], 去除样品中生物有机质. 静置 24 h 后, 将烧杯中的液体过 0.45 μm 的混合纤维素滤膜(直径 50 mm)过滤, 观察前将滤膜储存在培养皿中, 避光保存.

采取密度浮选法从沉积物中分离微塑料: 取固体样品(湿重约 100 g)至 1 L 烧杯中, 加饱和 NaCl

溶液, 玻璃棒充分搅拌约 2 min, 密封静置 24 h 后取上层液体^[26, 18], 每个样品重复浮选 3 ~ 5 次, 将所有收集的上清液置于同一烧杯中, 后续处理方法与水样的处理方法一致, 先消解去除生物有机质, 过滤观察.

1.4 微塑料的定量

将滤膜置于荧光显微镜(Leica DM2500)下进行观察计数, 切换到光学显微镜, 观察是否有遗漏的 MPs 及每个 MPs 的颜色, 用尼罗红试剂染色, 在荧光显微镜下观察. 统计记录每个样品中 MPs 的粒径大小、形状和颜色.

1.5 微塑料的鉴定

通过使用衰减全反射傅里叶变换红外光谱仪(PerkinElmer L160000A)识别聚合物是否为塑料及其塑料类型^[27], 将过滤后的样品膜放于干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司 DHG-9140A)干燥后进行测定, 探测器光谱范围为 400 ~ 4 000 cm⁻¹, 4 次扫描, 将扫描后的光谱图保存, 根据波峰的位置进行人工辨别和分析, 确定其是否为塑料. 如果是, 根据能谱图进一步判断 MPs 的种类.

1.6 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据统计分析和绘图，站位图用 Auto CAD 2008 绘制。

2 结果与讨论

2.1 青岛近岸海水浴场的 MPs 数量分布

在青岛近岸海水浴场的水体和沙滩沉积物中观察到的微塑料含量分布如图 1 所示。青岛海水浴场的近岸表层海水中 MPs 的含量为 $5.05 \times 10^3 \sim 1.25 \times 10^4$ 个·m⁻³，4 个海水浴场海水中 MPs 平均含量 7.61×10^3 个·m⁻³，在这 4 个采样站位 MPs 的含量按照由大到小的排列顺序为：第一海水浴场 > 栈桥 > 第二海水浴场 > 石老人。青岛海水浴场的沙滩沉积物中 MPs 的含量按照由大到小的排列顺序为：栈桥 > 第一海水浴场 > 第二海水浴场 > 石老人，其中 MPs 含量最高为栈桥 (4.35×10^3 个·m⁻²)，最低的为石老人 (1.91×10^3 个·m⁻²)，4 个海水浴场沙滩沉积物中 MPs 平均含量 3.10×10^3 个·m⁻²。

目前国内沿海地区 MPs 分布的研究发现香港滨海沙滩 MPs 的平均含量为 5 595 个·m⁻² [20]，广东省沿海滩涂 MPs 平均含量为 (6 675 ± 702) 个·m⁻² [21]，厦门沿海地区的 MPs 在表层海水中为

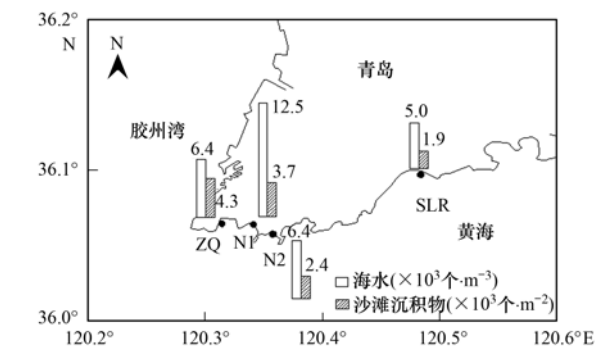


图 1 MPs 在青岛近岸海水浴场的水体及沉积物中的含量分布情况

Fig. 1 Distribution of MPs in seawater and sand

103 ~ 2 017 个·m⁻³ [16]，对比发现，青岛近岸海水浴场的污染状况处于一个较高水平。本研究中 MPs 在沙滩沉积物中含量低于海水中，一方面与采样点的功能区有关，青岛的各大海水浴场定期有人员进行垃圾的清理工作，从而降低了沙滩上大型塑料(如塑料瓶、塑料包装袋等)在光照、海浪及生物作用下产生 MPs 的风险 [2, 28]。另一方面，采样通过人工打水方式，取水点接近潮间带，属于 MPs 集中区域 [29]，大量碎片可能随海水进入采样桶中。

2.2 青岛近岸海水浴场的 MPs 粒径分布

图 2 为青岛近岸海水浴场 MPs 的总含量和各

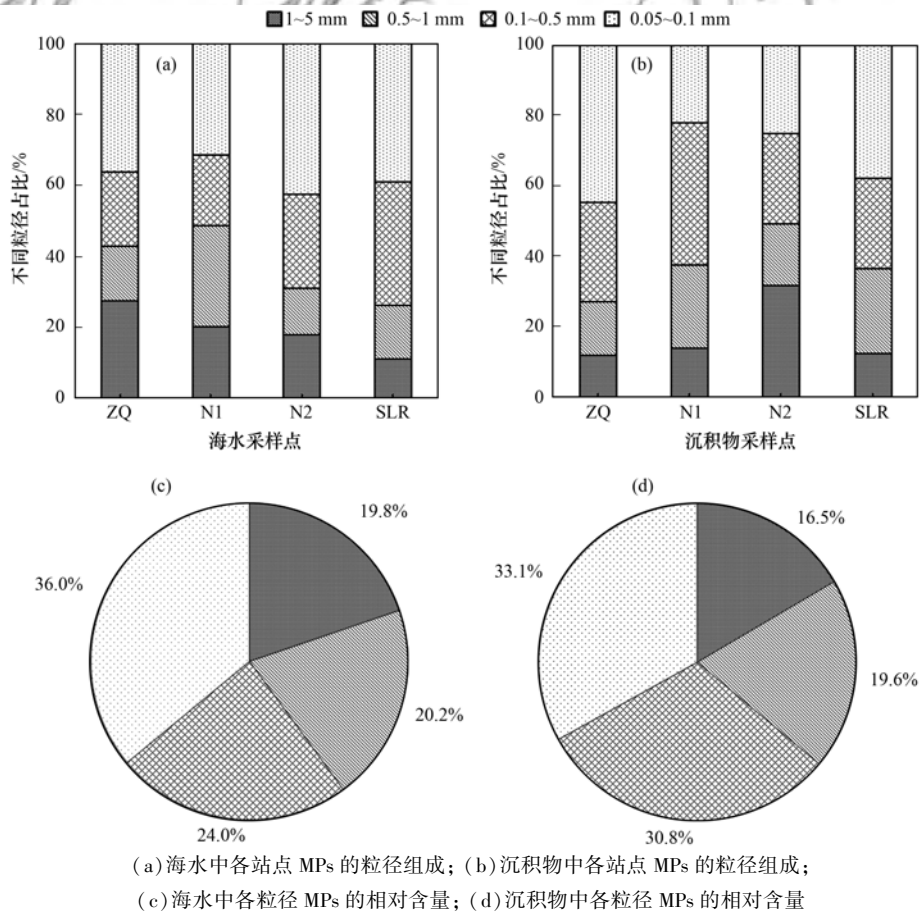


图 2 不同粒径的 MPs 在海水及沙滩沉积物中的分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of MPs with different particle sizes in seawater and sand

站位的粒径分布. 4 个海水浴场不同粒径范围 MPs 所占的比例由大到小依次为: $0.05 \sim 0.1 \text{ mm} > 0.1 \sim 0.5 \text{ mm} > 0.5 \sim 1 \text{ mm} > 1 \sim 5 \text{ mm}$, 海水与沙滩沉积物的结果相同, 这与多数研究中随着 MPs 粒径的增大, 含量递减的结果一致^[16, 30]. 每个站位 MPs 的粒径分布可以看出, 小粒径 ($< 1 \text{ mm}$) 的 MPs 所占比例皆超过 60%, 说明青岛不同海水浴场中 MPs 在粒径特征上具有相似特征.

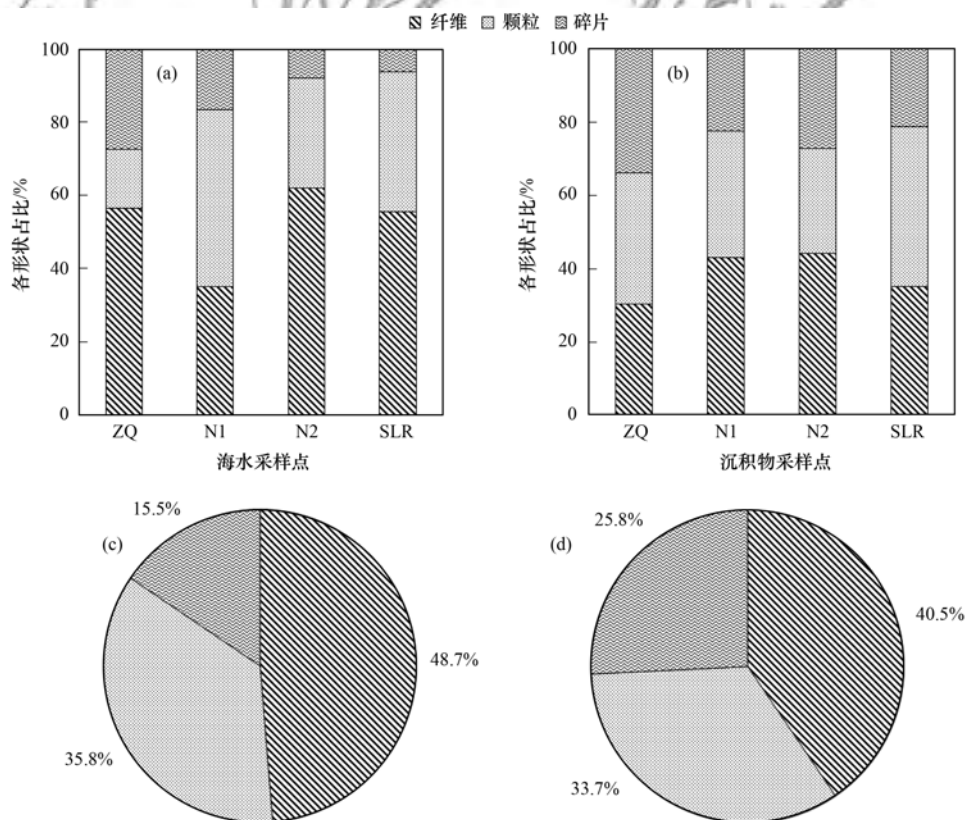
N1 和 N2 的海水样及 ZQ 的沉积物样不符合粒径与含量呈反比的关系, 可能是 MPs 的来源造成的差异, ZQ 及 N2 (八大关景区内) 是青岛著名景点, 人流量较大且较为集中, 采样站位离污染源较近, 其中刚生成的 MPs 占比较高, 加上 MPs 在海水环境中性质较为稳定, 不易发生破碎和降解, 因而大粒径的 MPs 所占比例较高. 而沉积物中 $50 \mu\text{m}$ 以下的 MPs 较多, 表明沙滩上塑料垃圾受高温、紫外辐射裂解后极易形成 MPs 甚至纳米级 MPs, 并通过风力或潮汐等作用带入海域中^[13]. 在环境中采样的微塑料的尺寸下限显然取决于采样和处理方法^[31], 本研究采用 $50 \mu\text{m}$ 的网采取水样, 所以统计的粒径下限为 $50 \mu\text{m}$.

2.3 青岛近岸海水浴场的 MPs 形状分布

青岛近岸海水浴场 MPs 的总体和各站位的形状分布见图 3 所示. MPs 按照形状分为纤维、颗粒、碎片, 本研究中青岛海水浴场的表层海水中纤维型 MPs 的比例最大 (48.73%), 这与在德国北海岸线^[32] 和阿拉伯海湾沿岸^[33] 等地的研究结果一致. 含量第 2 位的是颗粒型 MPs (35.77%), 最少的是碎片型 MPs (15.50%). 环境中的纤维 MPs 主要来自于服装纺织业、旅游业以及海运和渔业^[18, 34], 纺织品和旅游业应该是海水浴场 MPs 的主要来源. 颗粒和碎片 MPs 主要来自日常生活以及旅游过程中产生的塑料破碎而成^[19]. 具体哪方面污染源还要结合 MPs 的颜色、组分和粒径来分析. 青岛近岸沉积物中 3 种形状的 MPs 占的比例由高到低依次为纤维 MPs、颗粒 MPs 和碎片 MPs, 与海水中相比, 3 种类型比例较平均.

2.4 青岛近岸海水浴场的 MPs 颜色分布

将观察到的 MPs 按照颜色分为 4 类: 白色、透明、黑色及彩色 (绿色、黄色、红色、蓝色和紫色), 青岛近岸海水和沉积物中, 白色的 MPs 占比最高, 海水中占 35.94%, 沉积物中占 38.88%, 其次是透



(a) 海水中各站点 MPs 的形状组成; (b) 沉积物中各站点 MPs 的形状组成;
(c) 海水中各形状 MPs 的相对含量; (d) 沉积物中各形状 MPs 的相对含量

图 3 不同形状的 MPs 在海水及沙滩沉积物中的分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of MPs with different shape in seawater and sand

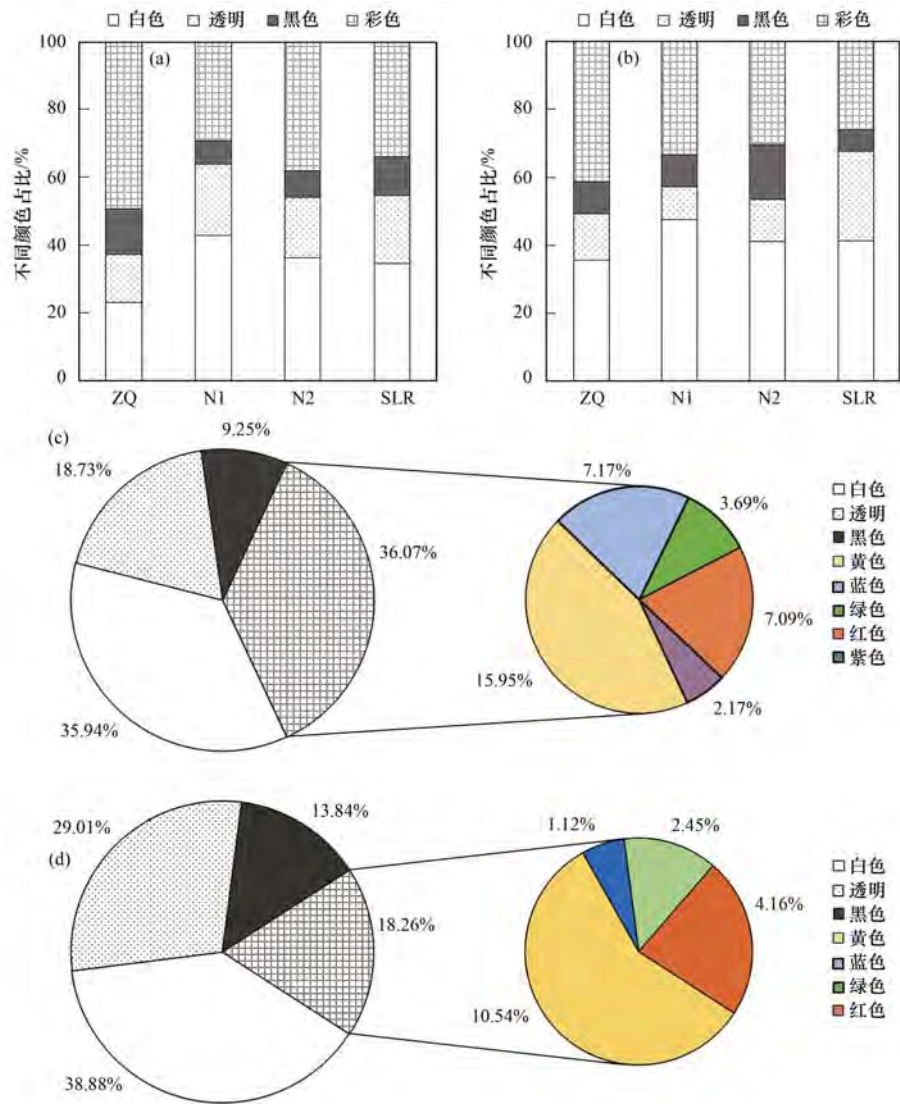
明的 MPs，在海水中占 18.73%，沉积物中占 29.01%。最少的是黑色塑料及各种彩色塑料(图 4)。现已有研究表明，染色塑料颗粒表面含有更多的有害元素^[35~37]，如镉、铅、铜等重金属，并在一系列环境作用下会释放到环境中。此外，MPs 的摄入情况受到塑料颜色的影响，海洋生物更容易摄食颜色鲜艳^[38]或颜色与其食物相近的塑料颗粒，如远洋的鱼类更容易摄入黑色 MPs^[39]，海龟在水下更容易摄食深色 MPs，而海鸟更容易摄食浅色 MPs^[40]。

与海水样品相比，沉积物中白色和透明塑料占比例较高，原因是采样点在潮间带，沙子的比热容小于海水，在相同的光照条件下沙滩的温度要明显高于海水，因此除了光照对 MPs 的影响，沉积物 MPs 还受到高温影响，因此彩色 MPs 容易褪色为透

明或白色。MPs 的颜色受环境影响，特别是光照、辐射和氧化，白色和透明 MPs 受氧化和辐射作用容易黄化^[2, 41]，环境中土壤和有机质颗粒的附着也使得 MPs 容易黄化，尤其是在水体杂质含量高的近岸水体，因此水体中黄色 MPs (15.95%) 明显高于沉积物中 (10.54%)。

2.5 青岛近岸海水浴场的 MPs 材质构成

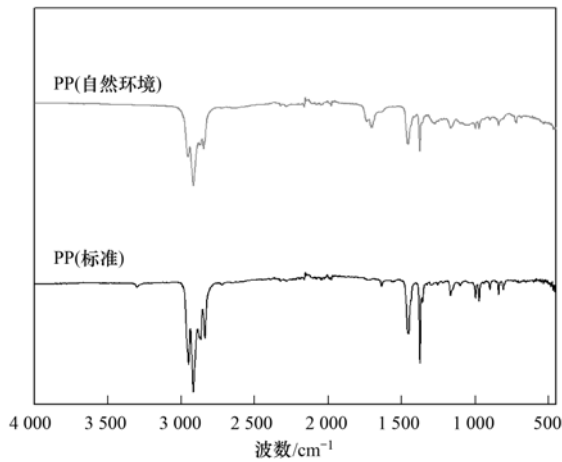
通过形状、颜色等特征来识别 MPs，非塑料微粒和微纤维可能被错误地归类为微塑料^[33]，因此采用傅里叶红外光谱进行进一步确认(图 5)。海水中选取的 80 个样品，共有 68 个为塑料，占 85%，共 8 种塑料类型，分别为聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP)、聚对苯二甲酸乙二酯 (PET)、聚苯乙烯 (PS)、聚酰胺 (PA)、聚氯乙烯 (PVC)、聚丙烯酸甲酯 (PMA)、96% 聚苯乙烯 + 4% 丁二烯共聚物



(a) 海水中各站点 MPs 的颜色组成; (b) 沉积物中各站点 MPs 的颜色组成;
(c) 海水中各颜色 MPs 的相对含量; (d) 沉积物中各颜色 MPs 的相对含量

图 4 不同颜色的 MPs 在海水及沙滩沉积物中的分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of MPs with different colors in seawater and sand



以 N2 收集到的 PP 为例

图5 与标准塑料相比,收集的微塑料的 FTIR 光谱

Fig. 5 FTIR spectra of collected microplastics compared with virgin plastics

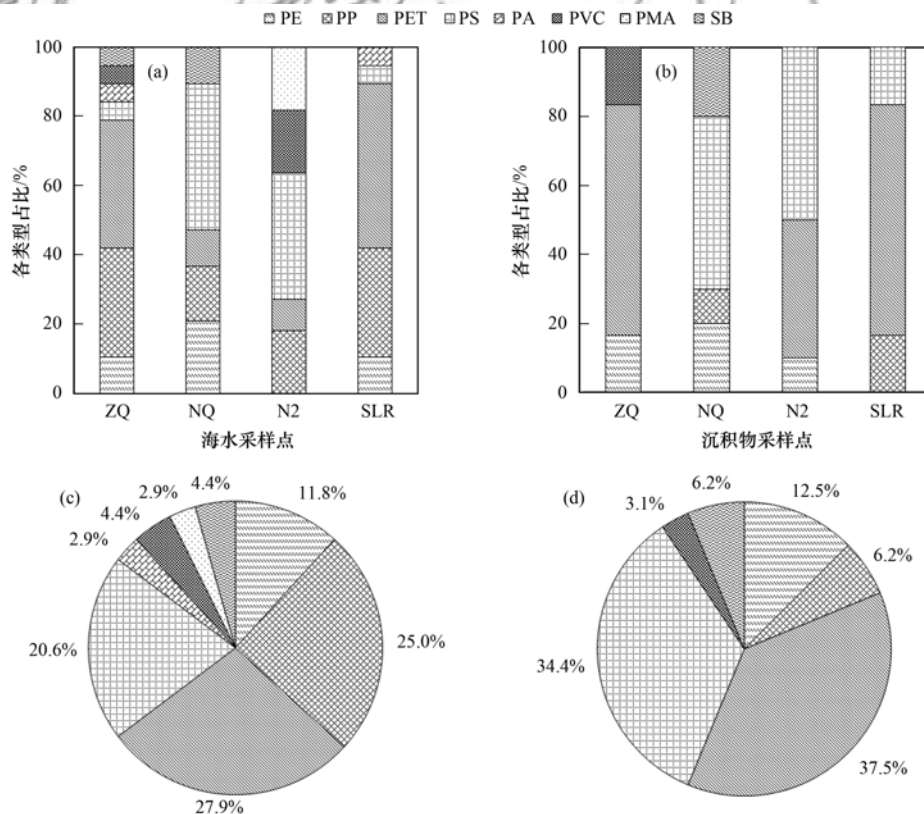
(SB). 沉积物选取的 40 个 MPs 中有 32 个为塑料, 占 80%, 共 6 种塑料类型, 分别为 PE、PP、PET、PS、PVC、SB. 青岛近岸海水浴场的 MPs 总体类型和各站位不同类型 MPs 的占比如图 6 所示.

海水与沉积物中占比较大的 4 种 MPs (PET、PS、PP 和 PE) 类型一致, 说明了青岛近岸海水和沉积物可能有共同的污染源. 沉积物采样点均在潮间

带区域, 海水退潮时会在该区域累积塑料等固体物质, 也会将沙滩上固体物质带入海水中^[42], 该结果也证明了 MPs 在海水和沉积物之间有转移. 从本次检测结果发现, 青岛近岸海水浴场的 MPs 含量最多的是 PET, 且沉积物中的 PET (37.5%) 大于海水中的 (27.9%), 这是因为密度大于海水的聚合物 (PET 密度为 $1.38 \sim 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 会更容易沉降进入到沉积物中^[43]. 含量较高的 4 种 MPs (PET、PS、PP 和 PE) 主要应用于包装业、渔业和旅游业^[28], 这与本研究的地区 (海水浴场) 容易产生的塑料垃圾类型吻合.

纤维微塑料主要是产生于衣服纤维的破碎, 这部分微塑料的主要成分为 PET 和 PA, 分别是涤纶和锦纶, 是合成纺织纤维中用的比例最高的两种. 钓鱼线和塑料绳也是青岛海水浴场纤维 MPs 的重要来源, 主要成分为 PE 和 PP, 经与购买的塑料绳、鱼线的外观和傅立叶红外对比, 外观相似且成分相同.

颗粒微塑料分为塑料泡沫及硬质塑料颗粒, 前者主要来自于塑料泡沫盆/箱、泡沫浮子等, 主要成分为 PS 和 SB, 泡沫类塑料质地较软, 在机械磨损的作用下易破碎成 MPs; 后者主要来源于工业生



(a) 海水中各站点 MPs 的塑料类型; (b) 海水中各站点 MPs 的塑料类型;
(c) 海水中各类型 MPs 的相对含量; (d) 沉积物中各类型 MPs 的相对含量

图6 不同类型的 MPs 在海水及沙滩沉积物中的分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of different MP types in seawater and sand

产的树脂颗粒、生活中使用的硬质塑料等,本次实验中检测到 MPs 颗粒有 PE、PP、PVC 和 PMA。

碎片微塑料分为硬质塑料碎片和软质塑料薄膜,两者主要来自于包装行业和旅游业,成分均为 PP 和 PE。硬质塑料碎片可能来自于塑料玩具、塑料餐盒和塑料瓶等,软质塑料薄膜有食品包装袋、塑料编织袋等。

3 结论

微塑料在青岛近岸的海水浴场的沙滩沉积物和表层海水中普遍存在,从青岛海水浴场分离出的微塑料的主要类型是 PET、PP、PS 和 PE,含量最多的是 50~100 μm 的纤维状微塑料,并且存在 MPs 的含量随粒径的减小而增加的规律。MPs 的材质和形状表明其主要来源是包装业、纺织业和旅游业(垃圾袋、包装盒、钓鱼线等)。沉积物中白色微塑料占较大比重,而表层海水中彩色微塑料较多,说明不同环境对微塑料的老化有着较大影响。研究中 4 个浴场海水中 MPs 含量范围为 $5.05 \times 10^3 \sim 1.25 \times 10^4$ 个 $\cdot\text{m}^{-3}$,平均为 7.61×10^3 个 $\cdot\text{m}^{-3}$;沉积物中 MPs 含量范围为 $1.91 \times 10^3 \sim 4.35 \times 10^3$ 个 $\cdot\text{m}^{-2}$,平均为 3.10×10^3 个 $\cdot\text{m}^{-2}$,与国内外的其他研究结果相比,青岛海水浴场海水及沉积物中的 MPs 含量处于一个较高的水平。

参考文献:

- [1] 孙承君,蒋凤华,李景喜,等. 海洋中微塑料的来源、分布及生态环境影响研究进展[J]. 海洋科学进展, 2016, **34**(4): 449-461.
Sun C J, Jiang F H, Li J X, et al. The research progress in source, distribution, ecological and environmental effects of marine microplastics[J]. Advances in Marine Science, 2016, **34**(4): 449-461.
- [2] Song Y K, Hong S H, Jang M, et al. Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(8): 4368-4376.
- [3] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Science, 2004, **304**(5672): 838.
- [4] Eriksen M, Lebreton L C M, Carson H S, et al. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea[J]. PLoS One, 2014, **9**(12): e111913.
- [5] Van Sebille E, Wilcox C, Lebreton L, et al. A global inventory of small floating plastic debris[J]. Environmental Research Letters, 2015, **10**(12): 124006.
- [6] Andrady A L. Microplastics in the marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(8): 1596-1605.
- [7] Cózar A, Echevarría F, González-Gordillo J I, et al. Plastic debris in the open ocean[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, **111**(28): 10239-10244.
- [8] Silva-Cavalcanti J S, Silva J D B, De França E J, et al. Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource[J]. Environmental Pollution, 2017, **221**: 218-226.
- [9] Peters C A, Thomas P A, Rieper K B, et al. Foraging preferences influence microplastic ingestion by six marine fish species from the Texas Gulf coast[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, **124**(1): 82-88.
- [10] Jabeen K, Su L, Li J N, et al. Microplastics and mesoplastics in fish from coastal and fresh waters of China[J]. Environmental Pollution, 2017, **221**: 141-149.
- [11] Kolandhasamy P, Su L, Li J N, et al. Adherence of microplastics to soft tissue of mussels: a novel way to uptake microplastics beyond ingestion[J]. Science of the Total Environment, 2018, **610-611**: 635-640.
- [12] Hämer J, Gutow L, Köhler A, et al. Fate of microplastics in the marine isopod *Idotea emarginata*[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(22): 13451-13458.
- [13] 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.
- [14] Batel A, Linti F, Scherer M, et al. Transfer of benzo[a]pyrene from microplastics to *Artemia* nauplii and further to zebrafish via a trophic food web experiment: CYP1A induction and visual tracking of persistent organic pollutants[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2016, **35**(7): 1656-1666.
- [15] Wright S L, Kelly F J. Plastic and human health: a micro issue? [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(12): 6634-6647.
- [16] Tang G W, Liu M Y, Zhou Q, et al. Microplastics and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Xiamen coastal areas: implications for anthropogenic impacts[J]. Science of the Total Environment, 2018, **634**: 811-820.
- [17] Frias J P G L. Effects of the presence of microplastic particles in portuguese coastal waters and marine mussels[D]. Portugal: Universidade NOVA de Lisboa, 2015. 2-5.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Fok L, Cheung P K. Hong Kong at the Pearl river estuary: a hotspot of microplastic pollution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **99**(1-2): 112-118.
- [21] Fok L, Cheung P K, Tang G D, et al. Size distribution of stranded small plastic debris on the coast of Guangdong, south China[J]. Environmental Pollution, 2017, **220**: 407-412.
- [22] Liebezeit G, Dubaish F. Microplastics in beaches of the east Frisian islands Spiekeroog and Kachelotplate[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, **89**(1): 213-217.
- [23] Nuelle M T, Dekiff J H, Remy D, et al. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments[J]. Environmental Pollution, 2014, **184**: 161-169.
- [24] Kim I S, Chae D H, Kim S K, et al. Factors influencing the spatial variation of microplastics on high-tidal coastal beaches in Korea[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, **69**(3): 299-309.
- [25] Noik V J, Tuah P M. A first survey on the abundance of plastics fragments and particles on two sandy beaches in Kuching,

- Sarawak, Malaysia [A]. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [C]. England: IOP Publishing, 2015. 633-644.
- [26] Lo H S, Xu X, Wong C Y, *et al.* Comparisons of microplastic pollution between mudflats and sandy beaches in Hong Kong [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **236**: 208-217.
- [27] K  ppler A, Fischer D, Oberbeckmann S, *et al.* Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2016, **408**(29): 8377-8391.
- [28] Auta H S, Emenike C U, Fauziah S H. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions [J]. *Environment International*, 2017, **102**: 165-176.
- [29] Mathalon A, Hill P. Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **81**(1): 69-79.
- [30] Cai M G, He H X, Liu M Y, *et al.* Lost but can't be neglected: huge quantities of small microplastics hide in the south China sea [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 1206-1216.
- [31] 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.
- [32] Dekiff J H, Remy D, Klasmeier J, *et al.* Occurrence and spatial distribution of microplastics in sediments from Norderney [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **186**: 248-256.
- [33] Abayomi O A, Range P, Al-Ghouti M A, *et al.* Microplastics in coastal environments of the Arabian Gulf [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **124**(1): 181-188.
- [34] Duis K, Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2016, **28**(1): 2.
- [35] Imhof H K, Laforsch C, Wiesheu A C, *et al.* Pigments and plastic in limnetic ecosystems: a qualitative and quantitative study on microparticles of different size classes [J]. *Water Research*, 2016, **98**: 64-74.
- [36] OBmann B E, Sarau G, Holtmannsp  tter H, *et al.* Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water [J]. *Water Research*, 2018, **141**: 307-316.
- [37] Turner A. Concentrations and migratabilities of hazardous elements in second-hand children's plastic toys [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(5): 3110-3116.
- [38] Zhao S Y, Zhu L X, Li D J. Characterization of small plastic debris on tourism beaches around the south China sea [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2015, **1**: 55-62.
- [39] Lusher A L, McHugh M, Thompson R C. Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English channel [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **67**(1-2): 94-99.
- [40] Santos R G, Andr  des R, Fardim L M, *et al.* Marine debris ingestion and Thayer's law-The importance of plastic color [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 585-588.
- [41] Veerasingam S, Saha M, Suneel V, *et al.* Characteristics, seasonal distribution and surface degradation features of microplastic pellets along the Goa coast, India [J]. *Chemosphere*, 2016, **159**: 496-505.
- [42] Thompson R C. Plastic debris in the marine environment: consequences and solutions [A]. In: Krause J, Nordheim H, Br  ger S (Eds.). *Marine Nature Conservation in Europe* [M]. Stralsund: Federal Agency for Nature Conservation, 2006. 107-116.
- [43] Engler R E. The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(22): 12302-12315.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)