

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.7  
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响 ..... 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)

华北地区大气细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 ..... 杨伟, 姜晓丽 (2995)

郑州市民运会期间大气PM<sub>2.5</sub>改善效果评估 ..... 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)

成都夏冬季PM<sub>2.5</sub>中水溶性无机离子污染特征 ..... 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)

川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 ..... 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)

四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 ..... 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)

成都市工业挥发性有机物排源成分谱 ..... 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)

郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估 ..... 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)

阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 ..... 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)

典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 ..... 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)

华北地区典型重工业城市夏季近地面O<sub>3</sub>污染特征及敏感性 ..... 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)

稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 ..... 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运震 (3095)

苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 ..... 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)

轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 ..... 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日起, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)

非超低与超低排放煤电机组启动过程NO<sub>x</sub>排放特征对比分析 ..... 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)

邢台市道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 ..... 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)

叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 ..... 魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)

关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 ..... 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)

岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 ..... 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)

木沥河流域氮素污染及其污染源解析 ..... 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)

辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 ..... 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)

鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 ..... 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾璐杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)

象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 ..... 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)

乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 ..... 张慧, 王世亮, 余杨 (3204)

连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 ..... 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)

茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 ..... 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)

金盆水库沉积物铁锰释放规律 ..... 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)

城市湖泊沉积物微塑料污染特征 ..... 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)

西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 ..... 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)

海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 ..... 王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)

梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 ..... 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)

宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 ..... 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)

分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控 ..... 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)

长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 ..... 毕薇薇, 叶胜, 于健全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)

供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 ..... 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)

碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 ..... 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)

弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe<sup>0</sup>/WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制 ..... 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)

一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 ..... 廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)

生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征 ..... 王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)

低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 ..... 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)

羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 ..... 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)

低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 ..... 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)

我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 ..... 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)

城镇河流CO<sub>2</sub>及CH<sub>4</sub>排放与市政排水管网污水输入的关联影响 ..... 李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)

控释尿素对黄河故道沙性潮土N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)

我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 ..... 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)

不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异 ..... 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)

锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响 ..... 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)

钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 ..... 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)

叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 ..... 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)

《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)

# 连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征

李征<sup>1</sup>, 高春梅<sup>2</sup>, 杨金龙<sup>3</sup>, 吴立珍<sup>4</sup>, 张硕<sup>1,5\*</sup>, 刘艳华<sup>2</sup>, 靳迪迪<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306; 3. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 4. 连云港市海域使用保护动态管理中心, 连云港 222001; 5. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 近年来, 微塑料成为国内外广泛关注的新型海洋污染物, 海湾作为人类在海岸环境中的主要活动地区, 一直是海洋污染物聚集地, 但我国对近岸大部分中小型海湾环境中微塑料的分布状况仍鲜见报道. 为了解我国近岸中小型海湾的微塑料污染特征, 本研究以江苏省海州湾海域表层海水和沉积物中采集的微塑料为样本, 通过定性和定量方法研究了表层水和沉积物中微塑料主要类型和丰度及空间分布特征. 结果表明, 海州湾表层水体和沉积物中的微塑料丰度分别为  $(2.60 \pm 1.40)$  个· $m^{-3}$  和  $(0.33 \pm 0.26)$  个· $g^{-1}$ , 在国内近岸环境(表层水  $0.33 \sim 545.00$  个· $m^{-3}$ , 沉积物  $0.07 \sim 2.58$  个· $g^{-1}$ )中, 海州湾表层水中的微塑料丰度处于较低水平, 但沉积物中的微塑料处于较高水平. 塑料污染物的粒径大小在水体中分布范围为  $0.08 \sim 13.48$  mm, 其中, 微塑料(粒径  $< 5$  mm)占 91.8%, 塑料污染物在沉积物中粒径的分布范围为  $0.04 \sim 14.74$  mm, 微塑料占 91.4%, 水体和沉积物中 60% 以上的微塑料粒径小于 2.00 mm. 海州湾海域微塑料的形态以纤维状为主, 占 92%; 颜色以蓝色和黑色为主, 占 70%; 材质以人造纤维和 PET 为主, 占 79.4%. 表层水中微塑料的分布与悬浮物浓度分布具有显著的相关性 ( $P < 0.05$ ), 沉积物中微塑料的分布受多方面因素影响, 其分布规律与表层水中微塑料的分布以及沉积物中粒径的分布都具有较大差异性. 通过对微塑料的形态特征以及成分组成的分析表明, 海州湾的微塑料主要来源于海水养殖和沿岸陆源输入.

**关键词:** 微塑料; 海州湾; 表层水; 沉积物; 分布特征

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3212-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910005

## Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang

LI Zheng<sup>1</sup>, GAO Chun-mei<sup>2</sup>, YANG Jin-long<sup>3</sup>, WU Li-zhen<sup>4</sup>, ZHANG Shou<sup>1,5\*</sup>, LIU Yan-hua<sup>2</sup>, JIN Di-di<sup>2</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Oceanic Administration and Protection Center of Lianyungang, Lianyungang 222001, China; 5. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In recent years, microplastics have emerged as a new marine pollutant and have attracted wide research attention. As the main activity areas of human beings in the coastal environment, gulfs have always been the hotspots of marine pollution. However, the distribution of microplastics in most small and medium-sized coastal environments has been rarely reported in China. To understand the characteristics of microplastic pollution in small and medium-sized inshore bays in China, the main types, abundance, and spatial distribution characteristics of microplastics in the surface water and sediments in Haizhou Bay of Jiangsu province were studied by qualitative and quantitative methods. The results showed that the abundances of microplastics in the surface water and sediments of Haizhou Bay were  $(2.60 \pm 1.40) n \cdot m^{-3}$  and  $(0.33 \pm 0.26) n \cdot g^{-1}$ , respectively. In the domestic offshore environment, the abundance of microplastics was at a low level in the surface water, but at a high level in the sediments in Haizhou Bay ( $0.33 \sim 545.00 n \cdot m^{-3}$  and  $0.07 \sim 2.58 n \cdot g^{-1}$ , respectively). The range of size distribution of microplastics in water and sediments was  $0.08 \sim 13.48$  mm and  $0.04 \sim 14.74$  mm, respectively. More than 60% of the microplastics in water and sediments were small particles of sizes less than 2.00 mm. The shape of microplastics in Haizhou Bay was mainly fibrous, accounting for 92%. The main colors were blue and black, accounting for 70%. The materials were mainly man-made fibers and PET, accounting for 79.4%. There was a significant correlation between the distribution of microplastics in surface water and suspended matter concentration ( $P < 0.05$ ). The distribution of microplastics in sediments was affected by many factors, and its distribution pattern between the distribution of microplastics in surface water and the distribution of particle size in sediments was quite different. Through analysis of the morphological characteristics and composition of microplastics, the results showed that the microplastics in Haizhou Bay mainly come from mariculture and coastal land sources.

**Key words:** microplastics; Haizhou Bay; surface water; sediment; distribution characteristics

收稿日期: 2019-10-02; 修订日期: 2020-01-14

基金项目: 海州湾国家级海洋牧场示范项目(LYGD20170921025)

作者简介: 李征(1994~), 男, 硕士, 主要研究方向为海洋环境污染, E-mail: LZ71251@163.com

\* 通信作者, E-mail: s-zhang@shou.edu.cn

塑料因其稳定的化学性质及廉价的制作成本受到人们的广泛应用,但与此同时,其不易降解的特性也使其在环境中只能不断地破碎与堆积,逐步成为直径小于 5 mm 的塑料碎屑,人们一般将这些塑料碎屑定义为微塑料。相比于大型的塑料碎片,微塑料因其较大的比表面积,更易吸附环境中的毒素<sup>[1]</sup>,小体积也更易被生物捕食,进而通过食物网关系危害人类健康,而且有研究表明微塑料污染具有更大的危害性<sup>[2]</sup>。海湾是人类重要的活动场所,通常是港口、水产养殖和人口居住的集中地区,但同时也是近岸海洋污染物的主要汇集地,特别是微塑料,已有研究证明,港口和水产养殖水域是微塑料的高污染区域。目前,海洋微塑料污染问题正在成为全球海洋环境污染方面研究的热点。但我国对海湾地区微塑料污染状况的研究却十分有限。

连云港海州湾是一个开阔性海湾,该海域环境条件优越,资源较为丰富,历史上曾是江苏近海重要的渔场,近年来随着捕捞强度的下降,该海域具备了发展底播增殖和浮筏式贝藻养殖的条件,成为了近岸水域贝类和藻类养殖的主要区域。自 2011 年开始,紫菜养殖规模在连云港海州湾迅速增加,主要集中在分布于秦山岛和东西连岛附近海域<sup>[3]</sup>,这种养殖规模的扩大一方面带来了可观的经济收入,另一方面也产生了一定的环境压力,尤其是养殖设施老化

所产生的塑料碎屑,成为了该海域微塑料的主要来源;另一方面连云港也拥有较好的港口建设环境,是新兴的港口工业区,港口工业的发展促进当地的经济高速增长,但大量货物在装卸中磨损产生的包装碎屑,游客和工人在港口活动产生的生活垃圾,也是微塑料产生的潜在污染源。目前国内对海湾养殖区微塑料方面的污染情况已有一些研究报道<sup>[4~6]</sup>,但是海州湾海域微塑料方面的研究还鲜见报道,因此在海州湾海域开展微塑料分布特征和污染风险方面研究就显得尤为重要。本研究通过对海州湾海域表层水体和表层沉积物取样调查,分析水体和沉积物中微塑料的成分和分布特征,以期为该海域微塑料方面的研究及海域生态环境健康状况评估提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查时间与站位

采样时间为 2018 年秋季(11 月),采样站位为江苏省海州湾湾口中部区域(34°50.22' ~ 34°58.02' N, 119°20.64' ~ 119°39.78' E),湾内外共设置站位 20 个,其中,表层水样品采集了 A1、A2、A3、A7、A8、A9 和 B1 ~ B5 等 11 个站位,沉积物样品 17 个站位,其中,A9 站位位于海水养殖区内,B11 站位位于连云港港外锚地,具体分布情况如图 1 所示。



图 1 海州湾采样站位示意

Fig. 1 Sampling station of Haizhou Bay

### 1.2 样品采集

基于船速的大小和采样条件的限制,水体中微塑料使用浅水 II 型浮游生物网(网长 140 cm,网口内径 31.6 cm,网目大小 0.16 mm)以水平拖动的方式进行采集。每个站位以  $1.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (3 knots) 的船速拖拽约 5 min<sup>[7]</sup>,为防止浮游动植物等在运输中变质腐坏,影响后续的处理和观测,将采集到的样品放在 1 L 棕色玻璃瓶中冰鲜保存。沉积物微塑料样品

使用抓斗采泥器采集,每个站位取约 2 kg 沉积物,装入样品袋中,低温保存。在微塑料样品采集的同时,各站位均采集了海水悬浮物样品。

### 1.3 样品处理

表层水:将表层水中的微塑料样品运回实验室,先使用混合纤维滤膜(0.45  $\mu\text{m}$ , 47 mm)对各站位部分样品(视站点水样的浑浊度而定)进行抽滤,再将膜上物质转移至蒸发皿中,加入 20 mL 过氧化氢

溶液(30%)进行消解处理,使用铝箔纸遮盖蒸发皿(防止空气中的微塑料混入),静置消解 24 h(去除生物有机质).消解后溶液再次使用混合纤维滤膜(0.45  $\mu\text{m}$ , 47 mm)进行抽滤(蒸馏水冲洗蒸发皿,玻璃棒和平底漏斗 3 次,洗液一并抽滤),抽滤后将滤膜保存至滤膜盒(47 mm)中,贴标签待测.

沉积物:每个站位取 50 g 沉积物样品,使用锡箔纸包裹放入干燥箱进行干燥,用以计算其含水率,另取 50 g 样品放入 400 mL 饱和食盐水(1.12  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )中<sup>[8]</sup>,使用玻璃棒充分搅拌,加热鼓泡,自然沉降 12 h(铝箔纸遮盖烧杯,防止空气污染),取上清液进行离心,将离心液使用混合纤维滤膜(0.45  $\mu\text{m}$ , 47 mm)进行抽滤(蒸馏水冲洗蒸发皿,玻璃棒和平底漏斗 3 次,洗液一并抽滤),抽滤后将滤膜保存至滤膜盒(47 mm)中,贴标签待测.

为了减少实验误差,实验全程着纯棉实验服,戴丁腈手套;实验所用器皿、工具使用前用去离子水冲洗,密封烘干后使用;实验设置空白对照,以去除实验过程中来自空气的微塑料污染.

#### 1.4 样品定量分析

将过滤所得到的滤膜放置在体式显微镜(Nikon SMZ745,日本尼康公司)下观察,挑选出其中的塑料微粒或疑似塑料的微粒,使用体式镜上的摄像装置进行拍照,并在与之配套的摄像处理软件 ImageView 上进行保存和尺寸的测量,统计样本中微粒的丰度、形态、尺寸和颜色等信息.

#### 1.5 样品定性分析

使用傅里叶红外显微光谱仪(Nicolet iN10,美国赛默飞世尔科技公司)对挑选出的微粒进行成分鉴定,将扫描得到的光谱图与图库进行对比分析,得到微粒的化学组成成分信息,从而判断其是否为微塑料.

#### 1.6 数据处理

使用软件 WPS Office 2019 进行数据处理和绘制表格,使用 SPSS 25.0 进行方差分析(单因素  $T$  检验)和相关性分析(皮尔逊检验),判断数据的波动情况和相互联系,使用 ArcGIS 10.3 和 Adobe Photoshop 13.0 进行绘图.

## 2 结果与分析

### 2.1 海州湾微塑料丰度的水平和空间分布

海州湾表层水中微塑料丰度为(2.60  $\pm$  1.40)  $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$ ,分布范围为 1.00 ~ 5.93  $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$ .所有站位共取得样品 227 个,其中塑料碎屑为 175 个.在 11 个站位中,有 55% 的微塑料丰度在 2.60  $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$  以下,45% 站位微塑料丰度大于 2.60  $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$ ,有 5 个站位丰度超过平均值,其中养殖区内 A9 站位表层

水体中微塑料丰度最高,为 5.93  $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$ .A7 和 A9 站位的丰度与总体平均值差异极为显著(单样本  $T$  检验,  $P < 0.01$ ),而 B5 站位则与整体平均值有显著差异(单样本  $T$  检验,  $P < 0.05$ ).

海州湾沉积物中微塑料丰度(沉积物以干重计,下同)为(0.33  $\pm$  0.26)  $\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$ ,分布范围为 0.03 ~ 1.09  $\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$ .所有站位共取得样品 260 个,其中塑料碎屑有 168 个,在 17 个站位中,有 70.6% 站位微塑料丰度在 0.33  $\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$  以下,29.4% 站位微塑料丰度大于 0.33  $\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$ ,大部分站位微塑料丰度较低,只有 5 个站位丰度超过平均值,其中 A5 站位微塑料丰度最高,达到 1.09  $\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$ ,距离秦山岛较近的 A3 站位和港外锚地的 B11 站位的丰度也是明显突出,A5 和 B5 站位的丰度与整体平均值间有极为显著的差异性(单样本  $T$  检验,  $P < 0.01$ ),B1 和 B3 站位与整体平均值有显著的差异性(单样本  $T$  检验,  $P < 0.05$ ),如图 2 所示.

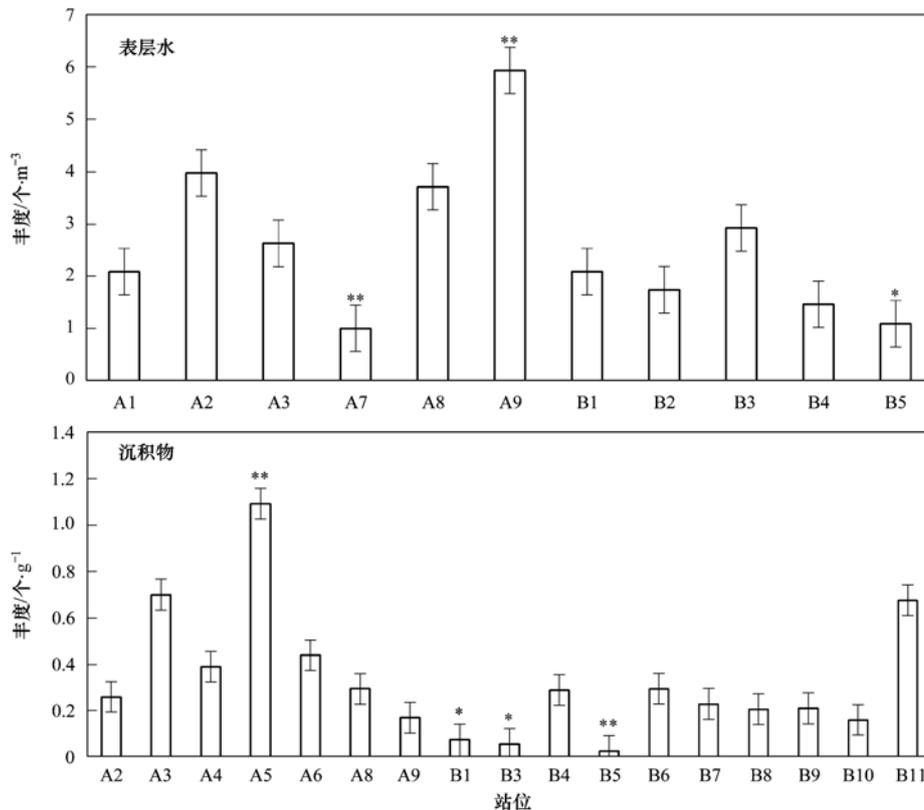
如图 3 所示,海州湾表层水中微塑料的丰度分布总体上呈现出由湾内南部向湾外北部逐步递减的分布规律,位于南部的 A9 站位与附近站位之间具有明显的丰度差.海州湾沉积物中微塑料的丰度总体上也呈现出湾内向湾外逐步递减的分布规律,湾口处的 A5 和湾外的 B11 站位与附近水域存在较大的丰度差.

海州湾湾内南部水域和湾外的北部水域表层水体中的微塑料丰度分别为(3.54  $\pm$  1.36)  $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$  和(1.47  $\pm$  0.45)  $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$ ,海湾内表层水体中的微塑料丰度显著大于湾外北部水域(单因素  $T$  检验,  $P < 0.05$ );而海湾内外沉积物中微塑料的丰度分别为(0.48  $\pm$  0.3)  $\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$  和(0.22  $\pm$  0.18)  $\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$ ,海湾内沉积物中微塑料的丰度显著大于湾外(单因素  $T$  检验,  $P < 0.05$ ).如表 1 所示.

表 1 表层水和沉积物中微塑料丰度的方差分析

项目	单因素 $T$ 检验			
	自由度	$\bar{x} \pm s$	$F$	$P$
表层水中丰度/ $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$	7	2.069 $\pm$ 0.774	2.393	0.032
沉积物中丰度/ $\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$	14	0.306 $\pm$ 0.112	5.908	0.016

在表层水体和沉积物中,湾内微塑料的平均浓度均接近湾外的两倍,且海湾内的各个站位的波动情况相较于湾外站位更加明显.从分布来看,表层水体和沉积物中的分布情况总体上是一致,但湾内高于湾外区域,经相关性分析,同站位的水体和沉积物中微塑料的丰度之间并无显著相关性(皮尔逊检验,  $P > 0.05$ ),海湾内复杂的海流状况是影响表层水体和沉积物相关性的主要因素,且由于表层水体中的



用单因素  $T$  检验法进行分析;各站点数据与整体平均值相比, \*\* 表示差异极显著 ( $P < 0.01$ ), \* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 没有 \* 表示差异不明显 ( $P > 0.05$ )

图2 微塑料的丰度

Fig. 2 Abundance of microplastics

丰度是随着该水域的潮汐在随时变化,与沉积物中的长期累积在站点间有所差异也属正常.如表2所示.

表2 相关性分析<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation analysis results

项目	类型	相关性	
		沉积物丰度	表层水丰度
沉积物丰度	皮尔逊相关性	1	0.073
	Sig. (双尾)	—	0.863
表层水丰度	皮尔逊相关性	0.073	1
	Sig. (双尾)	0.863	—

1) “—”表示没有相关数据

## 2.2 海州湾微塑料的形态特征

海州湾表层水和表层沉积物样本中的微塑料在形态上主要分为3类:纤维状、薄膜状和碎块状,如表3所示,在3种形态中,纤维状在水体和沉积物样本所占比例较高,分别为91.12%和93.21%,薄膜状在两种环境中的存在比例大致相同,而碎块状则在表层水中分布的比例略高于沉积物中.对各站位经差异显著性检验,发现表层水和沉积物中微塑料在形态比例上并没有显著性差异(单因素  $T$  检验,  $P > 0.05$ ).

微塑料按颜色共分为6种:蓝色、红色、透明、黑色、黄色和其他(绿色、白色、灰色等).其中,表层水和沉积物中微塑料的颜色主要为蓝色和黑色,分别

表3 微塑料的形态特征/%

Table 3 Morphological characteristics of microplastics/%

项目	纤维状	薄膜状	碎块状
表层水	91.12	3.10	5.78
沉积物	93.21	5.52	1.27

占样品总数70%和68%以上,两者在颜色构成上比较接近,但比例方面有明显差异,如表4所示,表层水中的蓝色与红色的比例大于沉积物中,而黄色、黑色和透明则比例则低于沉积物中,两者间比例的变化与多方面因素有关,一方面可能与水体中生物的摄食有关,海洋动物对颜色鲜艳的微粒更有摄食兴趣<sup>[9]</sup>,另一方面可能是环境的影响,一般来说,沉积物中的微塑料吸附更多的污染物<sup>[10]</sup>,在化学和物理的作用下可能造成颜色的改变.对各站位经差异显著性检验,发现表层水和沉积物中微塑料在颜色上并没有显著性差异(单因素  $T$  检验,  $P > 0.05$ ).

表层水中微塑料的粒径分布范围为0.08 ~

表4 微塑料的颜色特征/%

Table 4 Color characteristics of microplastics/%

项目	蓝色	红色	黄色	黑色	透明	其他
表层水	50.9	10.1	1.10	22.2	12.8	2.9
沉积物	33.25	5.60	4.23	35.14	20.25	1.52

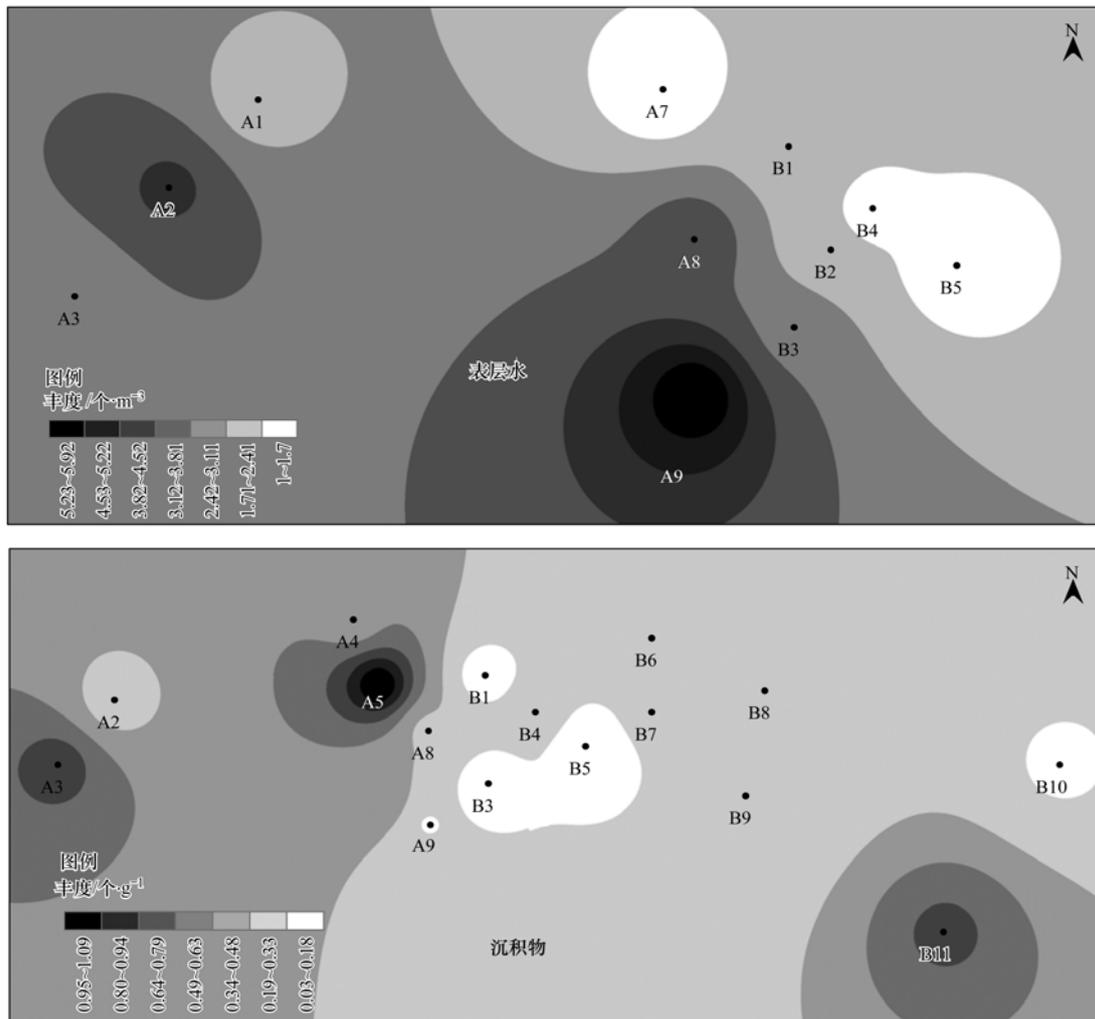


图 3 微塑料丰度分布

Fig. 3 Microplastic abundance distribution map

13.482 mm, 网具被浮游生物阻塞, 使网具孔径减小, 可获得小于网孔大小的微塑料颗粒, 沉积物中微塑料粒径分布范围为 0.04 ~ 14.737 mm, 如图 4 所示. 相比较而言, 表层水中粒径小于 2 mm 的微塑料占 80%, 沉积物占 54%, 粒径小于 2 mm 的微塑料在表层水中占比要比沉积物更大; 粒径为 2 ~ 4 mm 的微塑料在表层水和沉积物中所占比例分别为 11.87% 和 24.61%, 表层水中微塑料所占比例小于沉积物中; 粒径大于 4 mm 的微塑料在两种环境中所占比例相差不大, 分别为 23.4% 和 31.4%, 在两种环境中, 微塑料的粒径越大, 其丰度在环境中的比例则越小. 经差异显著性检验, 发现表层水和沉积物中微塑料粒径分布状况并没有显著性差异 (单因素  $T$  检验,  $P > 0.05$ ).

### 2.3 海州湾微塑料的主要成分

使用傅里叶红外显微光谱仪对样品微粒进行成分检测. 检测结果表明, 海州湾表层水和沉积物中微塑料, 主要分为 5 类: 人造纤维 (rayon)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)、聚丙烯 (PP)、聚乙烯 (PE) 和其

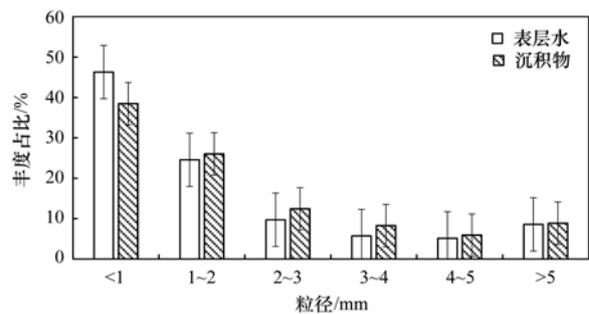


图 4 微塑料的粒径分布特征

Fig. 4 Particle size distribution characteristics of microplastics

他聚合物, 其他共聚物包括: 乙烯丙烯共聚物 (polypropylene-polyethylene)、丙烯酸乙酯与丙烯酰胺聚合物 (ethylacrylate-acrylamide)、醇酸树脂 (alkyd resin) 和尼龙 (nylon) 等. 表层水中的主要成分为人造纤维 (37.71%) 和 PET (41.71%), PE、PP 和其他材质只有少量存在 (20.58%), 而在沉积物中, 人造纤维成分 (41.98%) 和 PET (36.42%) 也是微塑料的主要成分. 整体来看, 表层水和沉积物中的微塑料的成分所占比例具有较为明显的差异性, 但从每个

站位的数据分析来看,各个站位在两种环境中的微塑料成分比例差异性并不显著(单因素 *T* 检验,  $P > 0.05$ ),如图 5 所示。

此外,在成分检测过程中也检测出其他杂质成

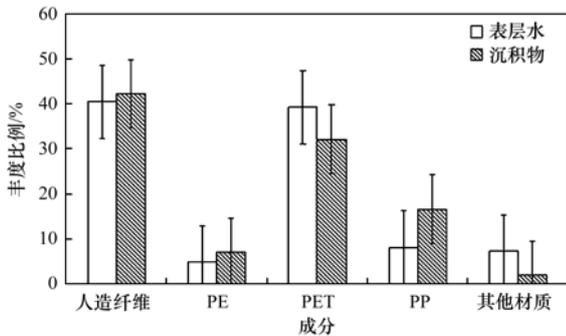


图 5 微塑料的成分比例特征

Fig. 5 Composition ratio characteristics of microplastics

分,如玻璃纤维(cellophane)、膨润土(bentonite)、纤维素(cellulose)、硫酸钡(barium sulfate)和碳酸钙(calcium carbonate)等。

海州湾海域微塑料的主要成分为人造纤维和 PET,图 6 为表层水和沉积物中人造纤维和 PET 的光谱图与标准光谱图的对比,表层水和沉积物中微塑料的光谱图中的部分波峰略有缺失,但大部分的特征峰值都能与标准光谱图一一对应。

如图 7 所示,从表层水和沉积物中微塑料的成分分布来看,海州湾的湾内外海域人造纤维和 PET 都是微塑料的主要成分,其他组分的分布稍有差别,聚乙烯只在海州湾湾外的表层水中有较少分布,在湾内的表层水及沉积物中只有极个别站点出现,而聚丙烯则集中在海州湾湾内外的交界处几个站位的表层水和沉积物中,其他材质的微塑料在海州湾湾

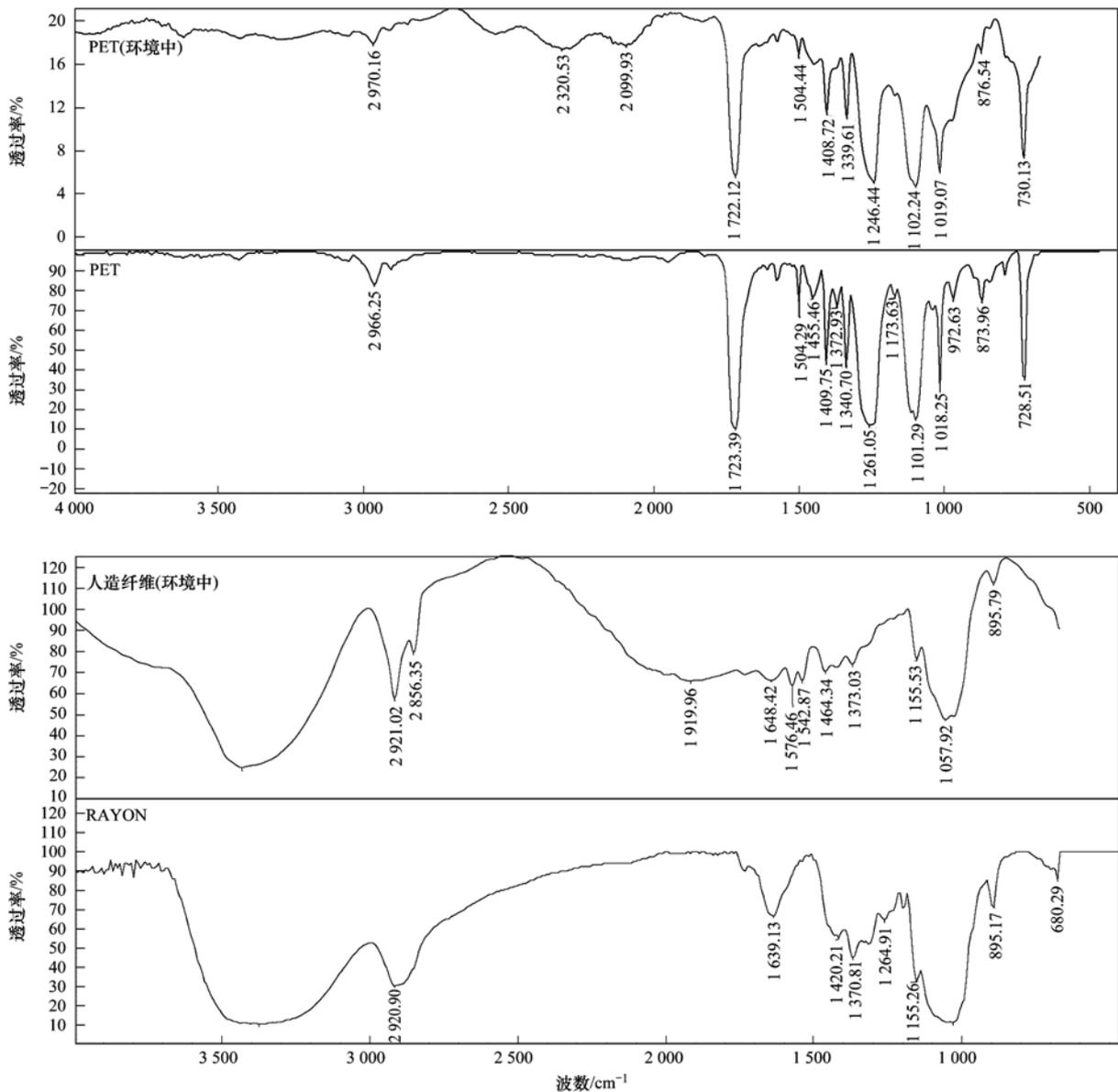


图 6 PET 和人造纤维的红外光谱图

Fig. 6 Infrared spectra of PET and synthetic fibers

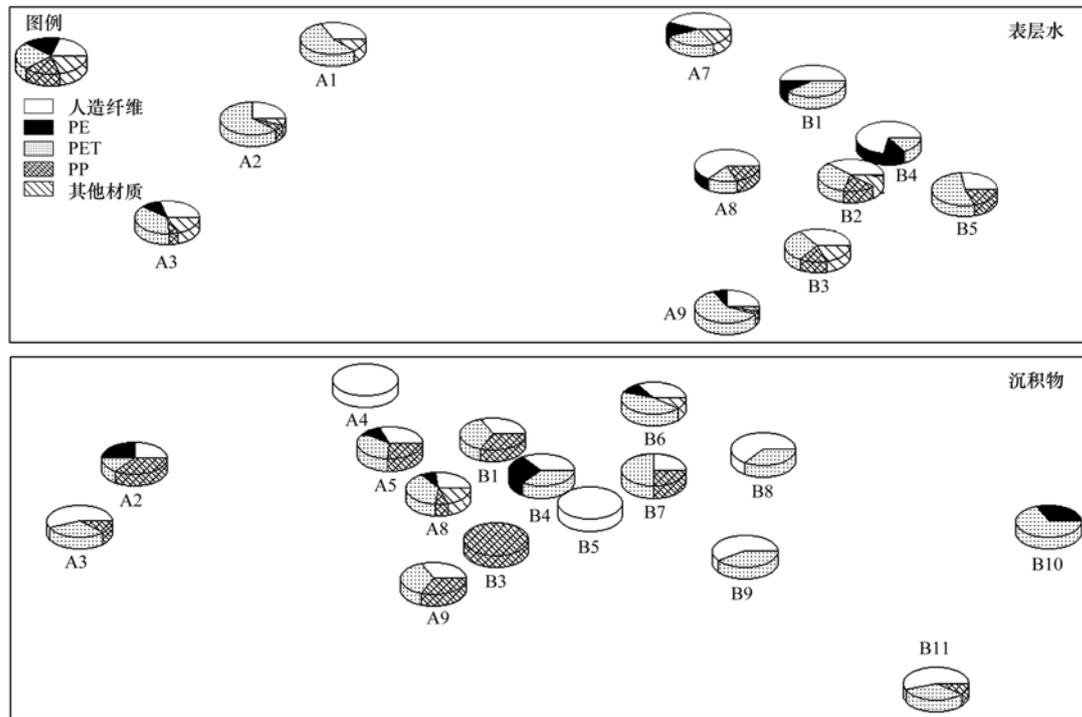


图7 微塑料材质的分布状况  
Fig. 7 Distribution of microplastics

内外的分布状况相同。

#### 2.4 微塑料的空间分布与悬浮物浓度变化的关系

通过对海州湾海域表层水微塑料的丰度特征与海水悬浮物浓度进行相关性分析,发现,两者具有极显著相关性(皮尔逊检验,  $P < 0.01$ ),如图8所示,表层水中悬浮物和微塑料在分布上存在显著的线性关系( $R^2 = 0.7154, n = 9$ )。由此可见,微塑料在海州湾表层水中的迁徙与悬浮物具有较好一致性。

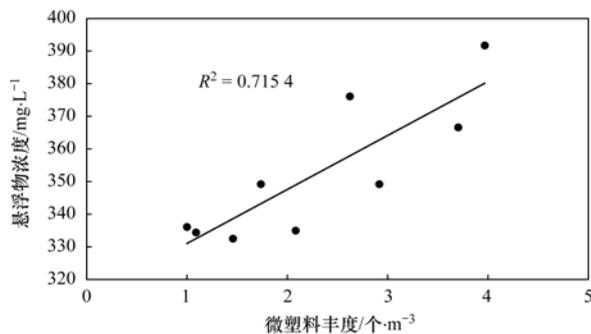


图8 微塑料丰度与悬浮物浓度的关系

Fig. 8 Relation between microplastic abundance and suspended substance concentration

### 3 讨论

#### 3.1 海州湾微塑料的总体分布

如图2所示,从总体分布来看,海州湾湾内海域表层水和沉积物中的微塑料丰度要高于湾外海域。出现这种分布情况的原因是,该海域(站位A9为海水养殖区)近年来养殖紫菜所使用的插杆和网片、

绳索等养殖设施,在日光照射、海水腐蚀、海浪冲击下,容易使养殖设置中的纤维材料老化分解而产生大量的微塑料<sup>[7]</sup>;其次,在海州湾的南部近岸,是连云港所在地,在此地区往来的大量船舶,以及装卸的货物使港口地区成为重要的微塑料来源地之一<sup>[11,12]</sup>,此外,该地区还是连云港重要的旅游景点,连岛海滨度假区以及云台山等景区存在大量塑料成分的水上娱乐设施和被遗弃的游客垃圾都是海州湾微塑料的主要来源之一<sup>[13]</sup>。

如表5所示,已有研究表明我国近海表层水体中微塑料的平均丰度为  $0.33 \sim 545$  个 $\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[14]</sup>,其中,河口和水产养殖地区水体中微塑料的密度更高,海州湾微塑料丰度( $2.6 \pm 1.40$ )个 $\cdot\text{m}^{-3}$ 低于我国的河口及水产养殖水域<sup>[4,15]</sup>,而高于南海<sup>[16]</sup>和东海<sup>[17]</sup>大部分水域,在国内外的海湾环境中,也是处于低浓度水平;我国渤海、黄海和东海的沉积物中大多含量在  $0.1 \sim 0.2$  个 $\cdot\text{g}^{-1}$ ,而海湾地区沉积物中的丰度普遍高于这些区域,如本研究中,海州湾沉积物中微塑料丰度达到( $0.33 \pm 0.26$ )个 $\cdot\text{g}^{-1}$ ,桑沟湾达到( $2.178 \pm 0.369$ )个 $\cdot\text{g}^{-1}$ <sup>[18]</sup>,大于国外的部分海湾地区。总体上,与国内外地区相比,海州湾的微塑料丰度在水体中处于低水平,在沉积物处于较高水平。

微塑料的分布情况受多方面因素影响,首先,相比于微塑料丰度极高的渤海湾及东海南部河口区域的沿岸地区发展水平,海州湾沿岸的城市发展水平较低,航运和工业规模较小,沿岸人类活动产生的塑

料废弃物较少;其次,海州湾近岸海域是海水养殖的主要区域,相比于黄海南部的如东地区<sup>[6]</sup>,海州湾存在大量的塑料海水养殖设备,这些设备的日益

磨损,成为微塑料的重要来源,另外,海州湾区域属于半开敞性环境,湾内较为平静,风浪较小,易于微塑料的沉降活动。

表 5 国内外部分地区微塑料的研究<sup>1)</sup>

Table 5 Research on microplastics in some areas at home and abroad

项目	研究水域	丰度	网具孔径/ $\mu\text{m}$	文献
海水	渤海	$0.33 \pm 0.34$	330	[19]
	渤海	11.8 ~ 27	160	[20]
	渤海	$102.9 \pm 163.3$	1	[21]
	山东桑沟湾	$63\,600 \pm 37\,400$	50	[18]
	黄海北部	$545 \pm 282$	30	[5]
	黄海(海州湾)	$2.6 \pm 1.40$	160	本研究
	黄海南部(如东)	$0.33 \pm 0.278$	333	[6]
	东海	0.31	500	[17]
	东海(长江口外海)	$0.167 \pm 0.138$	333	[15]
	东海(南部河口区域)	100 ~ 4 100	333	[15]
	南海	$0.469 \pm 0.219$	160	[16]
	中国沿岸贻贝养殖区	680 ~ 6 440	20	[4]
	加拿大皇后湾	$7\,630 \pm 1\,410$	62.5	[22]
	吉隆坡(关丹港)	130 ~ 690 (140 ~ 150)	20	[23]
	法国布列塔尼布雷斯特湾	$0.24 \pm 0.35$	335	[24]
	牙买加金斯顿港	$0.76 (0 \sim 5.73)$	250	[25]
	沉积物	山东桑沟湾	$2.178 \pm 0.369$	—
黄海南部近海		$0.155 \pm 0.061$	—	[26]
东海近海		$0.142 \pm 0.038$	—	[26]
黄海(海州湾)		$0.33 \pm 0.26$	—	本研究
黄海南部(如东)		$2.58 \pm 1.14$	—	[6]
渤海		$0.172 \pm 0.055$	—	[27]
黄海北部		$0.124 \pm 0.060$	—	[27]
黄海南部		$0.072 \pm 0.023$	—	[27]
阿拉伯海湾		0.014	—	[28]
维多利亚港		0 ~ 0.127	—	[29]
意大利近岸水域	0.042 ~ 1.069	—	[30]	

1) 丰度在海水中的单位为个 $\cdot\text{m}^{-3}$ ,在沉积物中的单位为个 $\cdot\text{g}^{-1}$ ;“—”表示文章中没有相关数据

### 3.2 海州湾微塑料的来源解析

海州湾样品中,有 92.6% 的微塑料呈纤维状存在,成分主要为人造纤维和 PET,纤维中又有 58.3% 的颜色呈蓝色,与海州湾相邻区域的黄海水域<sup>[27]</sup>曾有研究者在沉积物中测到的微塑料中,大部分也呈纤维状(77%),且颜色也多为蓝色(35%),PET 占有成分的 21.6%,同为江苏近岸的如东地区<sup>[6]</sup>表层水中的微塑料也多呈现纤维状(表层水 75.3%,沉积物 68.7%),海州湾的微塑料的形态特征与周边海域存在一定的关联性。在调查期间观察到的海水养殖及捕捞作业渔船上的网具多为蓝色,通过对渔船上的渔网和绳索进行成分检测分析,发现其成分多为 PET,因此,网具材料的老化而产生微塑料,也是海州湾表层海水和沉积物中微塑料的重要来源之一。已有研究表明<sup>[31]</sup>,一件衣物的洗涤可排出高达 1 900 个纤维,人造纤维和 PET(涤纶)被广泛用于面料的织造,因而,海州湾高比例的纤维构成情况与生活污水的排放具有相当大的关联性。薄膜

状的微塑料则多为透明,主要为聚乙烯和尼龙成分;碎块状的微塑料中以蓝色和黑色居多,其中有多组分聚合物,如乙烯与丙烯共聚物,醇酸甲酯等成分,其多用于合成橡胶和油漆涂料,从颜色和成分分析来推测,碎块状的微塑料很可能是船舶携带的防撞轮胎和船漆摩擦脱落产生的。

### 3.3 海州湾微塑料的扩散

微塑料的空间分布主要受几个因素的影响,包括污染源、水动力效应和其他环境特征<sup>[6]</sup>。悬浮物的浓度分布特征能够较好地反映海岸水动力作用规律<sup>[32]</sup>,海州湾的悬浮物主要来源于河口注入和潮汐卷席沿岸带来的泥沙,这些区域同样也为海洋微塑料的主要来源,微塑料作为海水中的悬浮污染物,其迁徙与悬浮物及流体质点相同,都具有拉格朗日性质<sup>[33]</sup>,从理论来讲,悬浮物在海水中的迁移与微塑料可能具有一致性。本研究结果显示,海州湾海域表层水中微塑料的丰度与悬浮物的浓度具有极显著的相关性,说明两者的来源具有一致性,其扩散行为也

具有相似性,未来对海州湾地区表层水中微塑料的扩散行为的研究可以尝试从悬浮物<sup>[34]</sup>的角度入手。

沉积物中微塑料的分布不仅与表层海水中微塑料的分布不同,而且与沉积物的粒径分布情况也有差异,其中可能的原因,一方面是由于潮流的原因,微塑料从河口,岸滩和养殖海域等污染源扩散到海水中,并在复杂的潮流作用下逐步向海底沉降,在 8~19m 的沉降过程中具有长距离的偏移<sup>[35]</sup>;另外在微塑料的扩散过程中,其丰度是变化的,除人造纤维和 PET 外,PE 和 PP 的分布比例在沉积物当中更大,相对于海水密度 ( $1.02 \sim 1.07 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )、PP ( $0.89 \sim 0.91 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) 和 PE ( $0.91 \sim 0.97 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )<sup>[36]</sup> 的密度更小,理应在表层海水中具有更大的比例,但由于微塑料的吸附性<sup>[37]</sup>,使其能够吸附聚集海水中的有机污染物,增加了自重,从而逐步沉降于海底沉积物中。

#### 4 结论

(1) 海州湾表层水中的微塑料丰度为  $(2.6 \pm 1.40)$  个 $\cdot\text{m}^{-3}$ ,其形态主要是纤维状,占据总体的 92%,颜色主要为蓝色和黑色,占总体的 70%,粒径小于 2 mm 微塑料在 80% 以上,主要成分是人造纤维和 PET,分别为主体的 37.71% 和 41.71%;沉积物中微塑料丰度为  $(0.33 \pm 0.26)$  个 $\cdot\text{g}^{-1}$ ;其形态主要是纤维状,占据总体的 93.6%,颜色主要为蓝色和黑色,占总体的 62%,粒径小于 2 mm 微塑料在 54% 以上,主要成分是人造纤维和 PET,分别为总体的 41.98% 和 36.42%。

(2) 表层水和沉积物中微塑料的丰度较高的站点均分布在海州湾的湾内海域,平均约为湾外站点微塑料丰度的 2 倍,湾内站点微塑料丰度具有更大的波动性;湾内外微塑料的形态特征和化学成分都具有一定的差异性.在国内外的海湾环境中,海州湾海域表层水中微塑料丰度水平较低,而沉积物微塑料丰度水平较高,存在较高的污染风险。

(3) 海州湾海域的微塑料污染物主体是人造纤维和 PET,其主要来源一方面为海州湾海域的海水养殖和捕捞业中使用的网具等,另一方面为沿岸的生活污水和地表径流等陆源输入。

(4) 表层水中微塑料的分布特征与悬浮物的迁移具有联系性,沉积物中微塑料的分布特征受多方面的影响,复杂的海流状况和多污染源是其有别于表层水微塑料分布和沉积物粒径分布的主要因素。

#### 参考文献:

[1] 薄军,陈梦云,方超,等.微塑料对海洋生物生态毒理学效

应研究进展[J].应用海洋学学报,2018,37(4):594-600.

Bo J, Chen M Y, Fang C, et al. Advance in the study on ecotoxicological effects of microplastics on marine organisms[J]. Journal of Applied Oceanography, 2018, 37(4): 594-600.

[2] Heindler F M, Alajmi F, Huerlimann R, et al. Toxic effects of polyethylene terephthalate microparticles and Di (2-ethylhexyl) phthalate on the calanoid copepod, *Parvocalanus crassirostris* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 141: 298-305.

[3] 魏振宁,邢前国,郭瑞宏,等.基于遥感的2000-2015年南海黄海紫菜养殖空间分布变化研究[J].海洋技术学报,2018,37(4):17-22.

Wei Z N, Xing Q G, Guo R H, et al. Study on the spatial distribution variation of porphyra aquaculture in the Southern Yellow Sea during the period 2000-2015 retrieved by satellite remote sensing [J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(4): 17-22.

[4] Qu X Y, Su L, Li H X, et al. Assessing the relationship between the abundance and properties of microplastics in water and in mussels [J]. Science of the Total Environment, 2018, 621: 679-686.

[5] Zhu L, Bai H Y, Chen B J, et al. Microplastic pollution in North Yellow Sea, China: observations on occurrence, distribution and identification [J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 20-29.

[6] Wang T, Zou X Q, Li B J, et al. Microplastics in a wind farm area: a case study at the Rudong Offshore Wind Farm, Yellow Sea, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 128: 466-474.

[7] Castro R O, Silva M L, Marques M R C, et al. Evaluation of microplastics in Jurujuba Cove, Niterói, RJ, Brazil, an area of mussels farming [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 110(1): 555-558.

[8] 朱晓桐,衣俊,强丽媛,等.长江口潮流表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点[J].环境科学,2018,39(5):2067-2074.

Zhu X T, Yi J, Qiang L Y, et al. Distribution and settlement of microplastics in the surface sediment of Yangtze Estuary [J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2067-2074.

[9] 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.

[10] 简敏菲,周隆胤,余厚平,等.鄱阳湖-饶河入湖段湿地底泥中微塑料的分离及其表面形貌特征[J].环境科学学报,2018,38(2):579-586.

Jian M F, Zhou L Y, Yu H P, et al. Separation and microscopic study of microplastics from the sediments of the wetland in the estuary of Raohe River of Poyang Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(2): 579-586.

[11] Chouchene K, da Costa J P, Wali A, et al. Microplastic pollution in the sediments of Sidi Mansour Harbor in Southeast Tunisia [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 146: 92-99.

[12] Shabaka S H, Ghobashy M, Marey R S. Identification of marine microplastics in Eastern Harbor, Mediterranean Coast of Egypt, using differential scanning calorimetry [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 142: 494-503.

[13] 罗雅丹,林千惠,贾芳丽,等.青岛4个海水浴场微塑料的分布特征[J].环境科学,2019,40(6):2631-2638.

Luo Y D, Lin Q H, Jia F L, et al. Distribution characteristics of microplastics in Qingdao coastal beaches [J]. Environmental Science, 2019, 40(6): 2631-2638.

- [14] 李道季. 海洋微塑料污染状况及其应对措施建议[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(2): 197-202.  
Li D J. Research advance and countermeasures on marine microplastic pollution[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(2): 197-202.
- [15] 赵世焯. 中国部分河口微塑料的赋存特征及海洋雪中微塑料分析方法研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.  
Zhao S Y. Microplastic contamination of some key estuaries in China and the approach for analyzing microplastic in marine snow [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [16] Wang T, Zou X Q, Li B J, *et al.* Preliminary study of the source apportionment and diversity of microplastics: Taking floating microplastics in the South China Sea as an example [J]. Environmental Pollution, 2019, **245**: 965-974.
- [17] 刘涛, 孙晓霞, 朱明亮, 等. 东海表层海水中微塑料分布与组成[J]. 海洋与湖沼, 2018, **49**(1): 62-69.  
Liu T, Sun X X, Zhu M L, *et al.* Distribution and composition of microplastics in the surface water of the East China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, **49**(1): 62-69.
- [18] Wang J, Lu L, Wang M X, *et al.* Typhoons increase the abundance of microplastics in the marine environment and cultured organisms: a case study in Sanggou Bay, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **667**: 1-8.
- [19] Zhang W W, Zhang S F, Wang J Y, *et al.* Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China[J]. Environmental Pollution, 2017, **231**: 541-548.
- [20] 周倩. 典型滨海潮滩及近海环境中微塑料污染特征与生态风险[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2016.  
Zhou Q. Occurrences and ecological risks of microplastics in the typical coastal beaches and seas[D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [21] Yu X B, Peng J P, Wang J D, *et al.* Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: the Bohai Sea[J]. Environmental Pollution, 2016, **214**: 722-730.
- [22] Desforges J P W, Galbraith M, Dangerfield N, *et al.* Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **79**(1-2): 94-99.
- [23] Khalik W M A W M, Ibrahim Y S, Anuar S T, *et al.* Microplastics analysis in Malaysian marine waters: a field study of Kuala Nerus and Kuantan[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, **135**: 451-457.
- [24] Frère L, Paul-Pont I, Rinnert E, *et al.* Influence of environmental and anthropogenic factors on the composition, concentration and spatial distribution of microplastics: A case study of the Bay of Brest (Brittany, France)[J]. Environmental Pollution, 2017, **225**: 211-222.
- [25] Rose D, Webber M. Characterization of microplastics in the surface waters of Kingston Harbour [J]. Science of the Total Environment, 2019, **664**: 753-760.
- [26] Zhang C F, Zhou H H, Cui Y Z, *et al.* Microplastics in offshore sediment in the Yellow Sea and East China Sea, China [J]. Environmental Pollution, 2018, **244**: 827-833.
- [27] 冉文. 黄渤海沉积物和牡蛎体内微塑料污染现状研究[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2018.  
Ran W. Research on the status of microplastics pollution in sediments and oysters in the Bohai Sea and the Yellow Sea [D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [28] Abayomi O A, Range P, Al-Ghouthi M A, *et al.* Microplastics in coastal environments of the Arabian Gulf [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, **124**(1): 181-188.
- [29] Neto J A B, Gaylarde C, Beech I, *et al.* Microplastics and attached microorganisms in sediments of the Vitória Bay estuarine system in SE Brazil [J]. Ocean & Coastal Management, 2019, **169**: 247-253.
- [30] Cannas S, Fastelli P, Guerranti C, *et al.* Plastic litter in sediments from the coasts of south Tuscany (Tyrrhenian Sea) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, **119**(1): 372-375.
- [31] 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.
- [32] 左书华, 庞启秀, 杨华, 等. 海州湾海域悬沙分布特征及运动规律分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2013, **32**(1): 10-17.  
Zuo S H, Pang Q X, Yang H, *et al.* Analysis on the distribution and movement of suspended sediment in Haizhou Bay sea area [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2013, **32**(1): 10-17.
- [33] 吴立珍, 吕海滨, 田慧娟. 海州湾南侧悬浮示踪的数值模拟[J]. 海洋环境科学, 2016, **35**(2): 247-251.  
Wu L Z, Lü H B, Tian H J. Numerical simulation of suspended particle tracking in the south of Haizhou Bay [J]. Marine Environmental Science, 2016, **35**(2): 247-251.
- [34] Hoellein T J, Shogren A J, Tank J L, *et al.* Microplastic deposition velocity in streams follows patterns for naturally occurring allochthonous particles [J]. Scientific Reports, 2019, **9**: 3740.
- [35] 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.
- [36] 张克惠. 塑料材料学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2000.
- [37] Enders K, Lenz R, Stedmon C A, *et al.* Abundance, size and polymer composition of marine microplastics  $\geq 10\mu\text{m}$  in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **100**(1): 70-81.

## CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China .....	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change .....	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM <sub>2.5</sub> Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou .....	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter .....	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province .....	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan .....	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou .....	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan .....	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode .....	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer .....	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language .....	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou .....	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode .....	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO <sub>x</sub> Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process .....	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City .....	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter .....	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain .....	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin .....	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin .....	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors .....	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake .....	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed .....	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China .....	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang .....	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin .....	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir .....	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes .....	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet .....	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater .....	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River .....	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo .....	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir .....	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems .....	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water .....	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar .....	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe <sup>0</sup> /WMF) .....	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite .....	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter .....	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater .....	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge .....	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature .....	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China .....	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network .....	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N <sub>2</sub> O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil .....	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China .....	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils .....	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil .....	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai .....	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings .....	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)