河北典型入海河口丰水期微塑料赋存特征及来源分析

刘有才1,张蒨1,李林强1, 为² 酋

(1.河北省水文工程地质勘查院(河北省遥感中心),河北石家庄050021;2.自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要:为探究入海河口表层海水的微塑料赋存及来源,掌握微塑料分布基线,服务海洋生态环境保护 及预警监测工作,本研究选取河北省大蒲河口、大清河口、南排河口3个典型河口进行微塑料污染调 查。通过采样、预处理和鉴定研究发现,河北近岸海域表层海水微塑料丰度为(0.14±0.11) n/m³, 粒径 范围主要集中在 0.5~2.0 mm,聚合物类型主要为人造丝(Ravon),其次为聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)。多样性指数分析显示,经济结构、人类活动及河道汇水面积等因素对河口微塑料浓度产生影 响,不同河口微塑料污染程度和来源存在差异,河北海域的表层海水微塑料丰度总体处于较低水平。 关键词:微塑料:入海河口:表层海水:赋存特征:来源分析 中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2024)04-0612-07

Occurrence characteristics and sources analysis of microplastics during high-flow period in typical estuarine areas of Hebei province

LIU Youcai¹, ZHANG Qian¹, LI Lingiang¹, CAO Wei²

(1.Hebei Hydrological Engineering Geological Exploration Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2.First Institute of oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Abstract: With the intention of exploring the occurrence characteristics and sources of microplastics in the surface seawater of estuaries, mastering the distribution baseline of microplastics, and serving the protection and early warning monitoring of marine ecological environment, this study selected three typical estuaries in Hebei province, including Dapu estuary, Daqing estuary, and Nanpai estuary, to investigate the microplastic contamination. Through sampling, pretreatment, and identification, it was found that the abundance of microplastics in surface seawater in the coastal waters of Hebei Province is 0.14±0.11 n/m³, with particle sizes mainly concentrated in the range of 0.5-2.0 mm, and the predominant polymer type is Rayon, followed by polyethylene terephthalate (PET). Diversity index analysis indicates that the factors affecting the concentration of microplastics in estuaries are economic structure, human activities and catchment area of the river course. The extent and sources of microplastic contamination in different estuaries vary. The abundance of microplastics in the surface seawater of research area is generally at a relatively low level.

Key words: microplastics; estuary; surface seawater; occurrence characteristics; source analysis

出了微塑料的概念^[1],并将其定义为粒径小于5mm 境中存在数百年至数千年^[2]。微塑料作为一种

2004 年英国科学家 Thompson 团队首次提 的塑料颗粒,其化学性质较为稳定,可在海洋环

收稿日期:2024-01-30,修订日期:2024-03-29

基金项目:河北省重点海域微塑料调查监测与生态评估(13000023P00EEC410144A),河北省自然资源厅。 作者简介:刘有才(1981-), 男, 河北省石家庄市, 高级工程师, 主要研究方向为海洋环境, E-mail: skyhks@163.com 通信作者:张 蒨, 工程师, 主要研究方向为水文地质, E-mail: Zhang Q16@163.com

新污染物,很容易被海洋生物误食,它们一旦进入到食物链,就会通过食物链的富集作用而影响到上一级生物^[3]。微塑料在环境中广泛存在,在陆地^[4]、海洋^[5]甚至极地地区^[6]都有分布。海洋中80%的微塑料来源于陆地,其次是海上生产活动^[7],微塑料可以通过污水处理厂、渔业捕捞、水产养殖、河流径流、家庭、工业和农业废水等途径进入水体环境,进而经由河流进入海洋。河口地处海陆交互区,在全球范围普遍存在微塑料污染,近年来也开展了大量微塑料研究工作,据估算全球每年从陆地进入海洋的塑料垃圾高达480~1270万吨^[8]。

本文选取河北省3处典型入海河口开展微 塑料调查研究,分别为秦皇岛市大蒲河口、唐山 市大清河口及沧州市南排河口,3处河口均存在 污水排海问题,通过对其微塑料的丰度、形状、 颜色、粒径以及聚合物种类等特征进行分析,探 寻微塑料的潜在来源,为区域海洋环境保护及预 警监测提供数据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

饮马河和东沙河由大蒲河口入海, 饮马河全 长 44 km, 流域面积 534 km², 东沙河全长 27.5 km, 流域面积 129 km²; 大清河和新潮河由大清河口 入海, 大清河全长 54 km, 流域面积 241 km², 新 潮河全长 10.8 km, 流域面积 52.62 km²; 南排河、 石碑河和黄浪渠由南排河口入海, 流域面积 13707 km²。

1.2 样品采集

于 2023 年 7 月进行样品采集, 调查站位布 设在河道、河口及近岸海域区域, 总体呈扇形展 布。大蒲河口 9 个站位、大清河口 8 个站位、南 排河口 10 个站位, 共计 27 个站位(表 1)。使用 浮游生物网(网衣长 200 cm, 网口长 120 cm, 网 口宽 60 cm, 网目大小 0.33 mm)以水平拖动的方 式采集微塑料。拖网流量计采用德国 HYDRO-BIOS 公司 438 110 数字生物网口流量计。每个 站位以不高于 1.54 m/s(3 knots)的船速拖拽, 用 GPS 定点记录拖行起始坐标及路线。将采集到 的样品妥善存放在玻璃瓶中, 并进行冷藏保存。 按照《海洋微塑料监测技术规范(试行)》要求开展样品采集工作,不同站位的拖网采样均遵循相同的操作步骤,确保拖网采样数据的规范性和可比性。

表1 微塑料取样站位

	Tab.1 Microplastic sampling sites			
河口	编号	取样位置	经度	纬度
	Q1	河道	119°19′41.40″E	39°41′38.06″N
	Q2	河道	119°19′18.57″E	39°40′44.13″N
	Q3	河道	119°19′15.12″E	39°40′40.68″N
	Q4	海域	119°20′29.58″E	39°40′50.47″N
大蒲河口	Q5	海域	119°23′24.52″E	39°42′10.31″N
	Q6	海域	119°23′13.08″E	39°39′25.98″N
	Q7	海域	119°26′41.08″E	39°39′25.98″N
	Q8	海域	119°27′9.33″E	39°40′14.98″N
	Q9	海域	119°25′32.85″E	39°37′5.38″N
大蒲河口	T1	河道	118°51′32.84″E	39°10′35.45″N
	T2	河道	118°51′40.71″E	39°10′57.58″N
	Т3	海域	118°52′5.00″E	39°9′21.16″N
	T4	海域	118°51′30.03″E	39°7′31.80″N
	Т5	海域	118°52′28.05″E	39°7′1.38″N
	T6	海域	118°46′48.66″E	39°5′16.24″N
	T7	海域	118°50′15.82″E	39°3′46.84″N
	Т8	海域	118°57′27.68″E	39°5′31.72″N
	C1	河道	117°37′32.47″E	38°29′27.28″N
	C2	河道	117°31′1.85″E	38°28′55.55″N
	C3	河道	117°38′48.87″E	38°29′14.92″N
	C4	河道	117°37′13.86″E	38°28′54.80″N
南排河口	C5	海域	117°40′34.38″E	38°29′57.52″N
	C6	海域	117°40′59.85″E	38°31′30.72″N
	C7	海域	117°41′59.46″E	38°29′40.19″N
	C8	海域	117°42′57.28″E	38°34′18.03″N
	C9	海域	117°48′8.04″E	38°32′8.10″N
	C10	海域	117°48′11.19″E	38°31′43.77″N

1.3 样品预处理

用干净镊子将样品中大块杂质夹出后冲洗, 依照样品浑浊程度,加入 30%(*w/v*)浓度的 H₂O₂溶液进行消解,将消解后的溶液通过过滤 装置,过滤到硝酸纤维滤膜(直径为 47 mm,孔径 为 0.45 μm)上,将滤膜置于洁净、干燥的培养皿 中,在4℃条件下保存。

1.4 微塑料鉴定

使用体视显微镜(Nikon, SMZ 1270)对富 集在滤膜上的微塑料进行观察,获取颜色、形 状、大小等信息:通过红外显微成像光谱仪 (PerkinElmer, Spotlight 400)对滤膜上所有物质 进行微塑料和疑似微塑料的聚合物类型鉴定。 采用 ATR 采样模式, 波长范围为 4000~750 cm⁻¹, 空间分辨率为 $6.25 \, \mu m$, 光谱分辨率为 $8 \, cm^{-1}$, 扫 描次数为16次。将ATR成像附件接触到待测 微塑料颗粒所在区域采集成像数据,使用软件进 行自动主成分分析(PCA),得到采样区域内主成 分分布的红外成像图,根据不同组分在成像图中 的分布确定微塑料的材质。将样品产生的红外 谱图与标准图库(SadItler Library)进行对比,以 确定聚合物的类型^[9]。谱图匹配度在 70% 以上 认定为可信数据,匹配度为60%~70%需逐一排 查特征峰,匹配度低于60%认定为无效数据。

1.5 质控工作

实验器具使用前均用超纯水冲洗 3 遍以上, 实验所用溶剂均使用玻璃纤维滤膜过滤备用;抽 滤完成后使用超纯水洗净烧杯内壁和抽滤装置; 实验用敞口器皿使用铝箔覆盖,样品盛装在金属 或玻璃容器中;药品或试剂使用完毕后应及时封 口;操作人员穿戴纯棉实验服;实验进行时关闭 门窗并避免随意走动;每次实验设置 3 个空白对照。 1.6 数据分析

微塑料丰度采用平均值±标准偏差表示,绘 图采用 Origin 2021 软件。通过多样性指数分析 微塑料来源的多样性及复杂性,同时利用微塑料 的表观形态、外貌特征帮助判断微塑料的污染 来源。多样性分析采用 Shannon ~ Weaver 指数^[10], 公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^{N} P_i \ln P_i$$
$$P_i = N_i / N$$

式中: H'为多样性指数; P_i为总样本中i种微 塑料的比例; N为类别数, i为1~N。

2 结果与讨论

 2.1 微塑料丰度水平及影响分析 鉴定结果显示大蒲河河道微塑料丰度为 (0.43±0.36) n/m³, 表层海水微塑料丰度为(0.15± 0.040) n/m³; 大清河河道微塑料丰度为(0.030± 0.010) n/m³, 表层海水微塑料丰度为(0.050± 0.020) n/m³; 南排河河道微塑料丰度为(0.23± 8.24) n/m³, 表层海水微塑料丰度为(0.23± 0.15) n/m³。综合3个地区的测试结果得出,河 北省典型海域表层海水微塑料丰度(不含河道) 为(0.14±0.11) n/m³, 南排河河道水样微塑料丰度 最高, 大蒲河、南排河河道水体微塑料丰度大于 表层海水, 大清河河道水体微塑料丰度稍低于表 层海水。

本次调查表层海水的检测结果与同样使用 0.33 mm 拖 网 的 渤 海 表 层 水 体 微 塑 料 浓 度 [(0.33±0.34) n/m³]^[11]水平相近;与 2020年、 2021年河北省海洋生态环境监测获取的微塑料 平均丰度(0.84 n/m³、0.44 n/m³)相比,浓度有下 降趋势;与国内外其他海域进行对比,河北海域 的表层海水微塑料丰度总体处于较低水平[12-16]。 受多种因素的相互作用影响,南排河口河道水体 微塑料丰度较高,其中汇水面积和人类工程活动 是两个主要因素。南排河口相较大清河口及大 蒲河口,入海路径相对较长、汇水面积大,这种 地理特征可能对当地水体中微塑料的多样性和 污染程度产生影响,意味着更多的河流、支流以 及附近地区的径流携带来自不同地方的污染物 质,包括微塑料,都会汇聚到该地区的水域中。 另外,河流流速、水深和水文特征也会影响微塑 料颗粒的输运和沉积,流速较慢的河段和水体淤 积较多的地区可能会更容易积聚微塑料颗粒,南 排河河道流通性较差,存在河口淤积现象,从而 在一定程度上增加了微塑料的积聚。

2.2 微塑料粒径分析

3 个地区微塑料粒径对比分析列于表 2。大 蒲河河道微塑料粒径以 1.0~2.0 mm 为主,占比 为 32.90%,海水微塑料粒径以 0.5~1.0 mm 和 1.0~2.0 mm为主,占比分别为 37.12% 和 30.92%; 大清河河道微塑料粒径以 0.5~1.0 mm 为主, 占比为 30.80%,海水微塑料粒径以 0.5~1.0 mm 为主,占比为 29.22%,其次是 1.0~2.0 mm 和 2.0~3.0 mm,占比分别为 22.54% 和 15.57%;南 排河河道微塑料粒径以 1.0~2.0 mm 和 0.5~ 1.0 mm 为主,占比分别为 43.50% 和 29.58%。海水 微塑料 粒径以 1.0~2.0 mm 为主,占比为 30.25%,其次是 0.5~1.0 mm 和 2.0~3.0 mm,占 比分别为 30.18% 和 18.87%。从各站位微塑料 粒径对比可以看出,0.50~1.0 mm、1.0~2.0 mm

两个粒径范围占比最大(图1)。微塑料尺寸范 围总体呈正态分布,不同河口的微塑料粒径分布 存在差异,但粒径范围主要集中在0.5~2.0 mm。 对比河道微塑料尺寸可以看出海域微塑料有进 一步降解、破碎的趋势。

Tab.2 The percentage distribution of interoplastic particle sizes varies anong different river estuaries and nearshole areas						
粒径分类/mm	大蒲河河道	大蒲河口海水	大清河河道	大清河口海水	南排河河道	南排河口海水
0.33 ~ 0.5	11.60	14.00	17.90	10.32	6.63	11.68
0.5 ~ 1.0	17.27	37.12	30.80	29.22	29.58	30.18
1.0 ~ 2.0	32.90	30.92	10.25	22.54	43.50	30.25
2.0 ~ 3.0	15.60	2.35	15.55	15.57	10.38	18.87
3.0 ~ 4.0	10.20	1.52	22.90	6.77	4.38	4.63
4.0 ~ 5.0	9.00	2.12	2.65	3.82	3.88	0.78

注:因采样孔径为0.33 mm,所以未展示<0.33 mm微塑料百分比



图 1 不同采样站位间塑料碎片粒径百分比分布

Fig. 1 The percentage distribution of plastic fragment sizes varies among different sampling stations

2.3 微塑料聚合物类型及来源分析

本次共检测出 11 种微塑料聚合物类型,分 别为人造丝(Rayon)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)、聚苯乙烯(PS)、氯化聚乙烯(CPE)、聚 氯乙烯(PVC)、聚酯纤维(PES)、聚丙烯(PP)、 聚偏氯乙烯和聚乙烯共聚物(PVDC+PE)、聚乙 烯(PE)、聚甲醛树脂(POM)、聚丙烯酰胺 (PAM)等。所有站位聚合物类型均以 Rayon 为 主,其次为 PET。大蒲河口、大清河口及南排 河口3个地区的Rayon占比分别为80.19%、77.03%、60.96%。南排河口PET占比最大,为25.91%(表3、图2)。

Tab.3Percentage of microplastic polymer types				
中文な物	英文缩写	占比/(%)		
十文名称		大蒲河口	大清河口	南排河口
人造丝	Rayon	80.19	77.03	60.96
聚对苯二甲酸乙二醇酯	PET	10.96	16.38	25.91
氯化聚乙烯	CPE	1.04	5.28	1.80
聚苯乙烯	PS	1.48	0.77	5.09
聚氯乙烯	PVC	0.78	0.17	1.53
聚丙烯	РР	1.53	0.84	0.17
聚酯纤维, 涤纶	PES	0.17	2.05	4.01
聚偏氯乙烯和聚乙烯的共聚物	PVDC+PE	1.48	0.77	5.09
聚乙烯	PE	1.04	5.28	1.80

表 3 微塑料聚合物类型占比







有关研究成果显示, 渤海、北黄海和南黄海沉 积物中的微塑料主要成分为 Rayon、PE 和 PET^[17], 与本次研究确定的主要聚合物类型相近, Rayon 和 PET 是渤海、黄海海域主要的微塑料类型。 渔船活动和生活污水的排放是造成表层海水存 在高比例纤维状微塑料的主要原因^[18-20], Rayon 是一种人造纤维,通常来源于衣物、纺织品、渔 网等物品的磨损和分解,微塑料会通过洗衣废 水、纺织厂废水等途径进入海洋环境中,日常清 洗衣物过程中每次会产生大量纤维颗粒进入废 水^[21],并在水体中迅速破裂,导致水体中 Rayon 等纤维状微塑料含量升高。纤维类微塑料具有 较高的比表面积,且它们的粒径大致相同,使得 它们很容易漂浮在水体表面^[22],这也是本区表层 海水中 Rayon 丰度高的一项重要原因。

我国青岛近岸、胶州湾以及连云港海州湾附 近海域微塑料中 PET 均为主要的聚合物类型^[23-26], 本次研究 PET 占比仅次于 Rayon。PET 常被用 作渔船绳具,在日常操作中会受到摩擦和拉扯, 从而导致绳索表面受到磨损和分解,释放微小 的 PET 颗粒到海洋中,特别是在频繁活动的渔 船周围,这种磨损可能会加剧微塑料颗粒的释 放。实验数据显示,南排河口的微塑料中 PET 的比例较高,占比为 25.91%,大清河口次之,这 与这两个地区渔业活动较多的现状一致,说明渔 船活动可能是研究海域微塑料 PET 丰度高的重 要原因。

CPE 是一种新型的合成材料,是 PVC 塑料 优良的抗冲击改性剂,也是综合性能良好的合成 橡胶,已广泛用于电缆、电线、胶管、胶布、橡塑 制品、密封材料、阻燃运输带、防水卷材、薄膜 和异型材等制品。CPE 主要以碎片类存在,由于 其耐化学腐蚀和耐热性,常被制作成包装用途 的 CPE 膜。片状 CPE 被认为可能来自破损的包 装 材料,推测研究海域微塑料中的碎片类 CPE 与包装行业相关,包括塑料袋、包装材料、 塑料薄膜。大清河口上游农业较发达,相比其他 两个河口塑料薄膜使用量大,该河口 CPE 材质 微塑料占比为 5.28%,显著高于另外两个地区。

2.4 多样性指数与来源

微塑料多样性分析指数显示,南排河口表层 水体的微塑料多样性指数最高,为0.87±0.47,表 明该区域微塑料的种类相对较多;大清河口微 塑料多样性指数为0.56±0.37,大蒲河口微塑料 多样性指数为0.51±0.44,两处差别相对较小 (表4)。

表 4 微塑料多样性指数及优势类型 Tab.4 Microplastics diversity index and dominant types

	-		51
研究区域	多样性指数	优势类型	(>10%)
大蒲河口	0.51±0.44	Rayon(80.19%)	PET(10.96%)
大清河口	0.56±0.37	Rayon(77.03%)	PET(16.38%)
南排河口	0.87±0.47	Rayon(60.96%)	PET(25.91%)

微塑料多样性指数在一定程度上与经济结 构、人类活动及汇水面积相关。本次研究数据 显示汇水面积与多样性指数呈正相关关系,汇水 面积大的河口微塑料种类往往较多,尤其在河道 内表现最为明显,具体为南排河河道>大蒲河河 道>大清河河道。多样性指数与区域经济活动、 经济结构息息相关。南排河口地处黄骅市,根据 河北省沿海经济数据^[27]可知,黄骅市是以能源 产业为主导,同时涵盖海洋捕捞、水产养殖、精 深加工、盐业、海洋运输等多元海洋经济产业, 加上上游各类人类活动,河道水体成分较复杂, 微塑料丰度较高,微塑料种类较为分散,从而微 塑料来源多样性指数较高;大清河口及上游区域 经济主要以煤化工业、装备制造业、港口物流业 和文化旅游业为支柱,形成了相对复杂的产业结 构,尽管表层水体中微塑料丰度低,但其微塑料 的来源同样具有一定复杂性;大蒲河口微塑料污 染水平相对较低,且来源单一,这是因为河口紧 邻黄金海岸国家级自然保护区和旅游区,该地区 生态环境良好,经济结构,主要以旅游业和海洋 水产养殖为主。

3 结论

(1)河北典型河口及近岸海域表层海水普遍存在微塑料,表层海水(不含河道)微塑料丰度为 (0.14±0.11) n/m³,总体处于较低水平;粒径主要 集中在 0.5~2.0 mm 范围,多呈正态分布。聚合 物类型以 Rayon 为主,其次为 PET。

(2)微塑料丰度多样性指数与经济结构、人 类活动及汇水面积等因素相关。推测 Rayon 可 能来源于衣物、纺织品、渔网等人造纤维的磨损 和分解, PET 来源于废弃的塑料制品、纺织洗涤 废水以及渔船绳具等, CPE 丰度与农村塑料薄膜 用量存在相关性。

(3)本文仅对粒径大于 0.33 mm 的微塑料进 行了分析测试, 区域微塑料丰度水平可能被低 估,因此对于 0.33 mm 以下的微塑料有待进一步 深入研究。本次选取的 27 个采样点覆盖了 3 处 河口及近岸海域, 但调查频次及空间范围均有一 定的局限性, 有待持续深入追踪微塑料来源及生 态风险, 尤其需要重点关注路径长、汇水面积 大、水质差的河流,从而为海洋生态环境保护及 预警监测提供科学支持。

参考文献:

- THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic?[J]. Science, 2004, 304(5672): 838.
- [2] 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.
- [3] LI L Z, LUO Y M, LI R J, et al. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(11): 929-937.
- [4] WANG J, LI J Y, LIU S T, et al. Distinct microplastic distributions in soils of different land-use types: A case study of Chinese farmlands[J]. Environmental Pollution, 2021, 269: 116199.
- [5] LI D J, LIU K, LI C J, et al. Profiling the vertical transport of Microplastics in the West Pacific Ocean and the East Indian Ocean with a novel in situ filtration technique[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(20): 12979-12988.
- [6] LUSHER A L, TIRELLI V, O'CONNOR I, et al. Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14947.
- [7] DA COSTA J P, SANTOS P S M, DUARTE A C, et al. (Nano)plastics in the environment –sources, fates and effects[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566/567: 15-26.
- [8] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. Science, 2015, 347(6223): 768-771.
- [9] 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.
- [10] BARAKOTI S, CELIK I, MOORHEAD D, et al. Diversity analysis of water sources, uses, and flows from source to use in the USA[J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 1409-1415.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] FRIAS J P G L, OTERO V, SOBRAL P. Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal

waters[J]. Marine Environmental Research, 2014, 95: 89-95.

- [14] 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.
- [15] NG K L, OBBARD J P. Prevalence of microplastics in Singapore's coastal marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, 52(7): 761-767.
- [16] ISOBE A, UCHIDA K, TOKAI T, et al. East Asian seas: a hot spot of pelagic microplastics[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 101(2): 618-623.
- [17] ZHAO J M, RAN W, TENG J, et al. Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China[J]. Science of the Total Environment 2018, 640/641: 637-645.
- [18] 刘启明,梁海涛,锡桂莉,等. 厦门湾海滩微塑料污染特征 [J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1217-1221.
- [19] CHUBARENKO I P, ESIUKOVA E E, BAGAEV A V, et al. Three-dimensional distribution of anthropogenic microparticles in the body of sandy beaches[J]. Science of the Total Environment, 2018, 628/629: 1340-1351.
- [20] 赵新月,熊宽旭,周 倩,等.黄海桑沟湾潮滩塑料垃圾与微 塑料组成和来源研究[J].海洋环境科学,2020,39(4):529-536.
- [21] BROWNE M A, CRUMP P, NIVEN S J, et al. Accumulation of microplastic on shorelines woldwide: sources and sinks[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(21): 9175-9179.
- [22] WANG W F, NDUNGU A W, LI Z, et al. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1369-1374.
- [23] 尹诗琪, 贾芳丽, 刘筱因, 等. 青岛近岸表层海水和潮滩沉积 物中微塑料的分布及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, 41(4): 1410-1418.
- [24] 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.
- [25] ZHENG Y F, LI J X, CAO W, et al. Distribution characteristics of microplastics in the seawater and sediment: a case study in Jiaozhou Bay, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 674: 27-35.
- [26] 李 征,高春梅,杨金龙,等.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[J].环境科学,2020,41(7): 3212-3221.
- [27] 河北省统计局,国家统计局河北调查总队.河北统计年鉴-2022[M].北京:中国统计出版社,2023.

(本文编辑:胡莹莹)