

海南万泉河入海河口微塑料赋存特征及风险评价

王少露 吴思怡 谢福武* 何书海*

(海南省生态环境监测中心,海口 571126)

摘要 为探索海南万泉河入海河口区的微塑料赋存特征,采用现场调查和实验室分析相结合的方法研究微塑料分布和组成特征,解析其潜在来源,并结合聚合物风险指数法、污染负荷指数法和潜在生态风险指数法评估其生态风险。结果表明:万泉河入海河口微塑料丰度为 $0.32\sim 0.74$ 个/ m^3 ,平均丰度为 (0.53 ± 0.13) 个/ m^3 ;微塑料成分主要为聚丙烯(PP,34.8%)、聚酯纤维(PES,23.7%)和聚乙烯(PE,20.0%);形状多为片状(58.4%),其次为纤维状(32.3%);颜色呈现出多样化,以半透明(41.6%)和白色(36.8%)为主;粒径以 $1.0\sim 4.0$ mm的微塑料为主,占比为42.2%。特征分析显示,微塑料主要来源于旅游活动、渔业生产和居民生产生活污水,且受风力、海流、径流和海水稀释的影响,微塑料丰度值呈区域分布不均匀现象。与国内外研究相比,万泉河入海河口的表层海水微塑料丰度处于较低污染水平。风险评价结果也表明,该区域微塑料整体污染水平较低,但对于高化学毒性的塑料制品的危害应不容忽视。

关键词 微塑料;赋存特征;风险评估;万泉河;入海河口

中图分类号:O65 X82 文献标志码:A 文章编号:2095-1035(2024)08-1099-10

Occurrence and Risk Assessment of Microplastics in Estuaries Area of Wanquan River, Hainan

WANG Shaolu, WU Siyi, XIE Fuwu*, HE Shuhai*

(Hainan Ecological Environmental Monitoring Center, Haikou, Hainan 571126, China)

Abstract To probe the storage characteristics of microplastics in estuaries of Wanquan river, Hainan, the distribution and composition of microplastics were explored by combination of on-site investigation and laboratory analysis. The potential sources were analyzed, and the ecological risks were assessed by the polymer risk index, pollution load index, and potential ecological risk index. Results showed that microplastics abundance in Wanquan river estuaries were ranged from 0.32 to 0.74 ind/ m^3 and the mean value was (0.53 ± 0.13) ind/ m^3 . The components of microplastics were polypropylene (PP, 34.8%),

收稿日期:2024-02-27 修回日期:2024-04-13

基金项目:海南省自然科学基金青年基金资助项目(321QN0960);海南省自然科学基金高层次人才基金资助项目(420RC755)

作者简介:王少露,女,工程师,主要从事海洋微塑料与生态环境学研究。E-mail:15248951720@163.com

* 通信作者:谢福武,男,工程师,主要从事环境微塑料与生态环境学研究。E-mail:xfw1021900977@163.com

何书海,男,研究员,主要从事生态环境污染研究。E-mail:heshuhai1981@163.com

引用格式:王少露,吴思怡,谢福武,等.海南万泉河入海河口微塑料赋存特征及风险评价[J].中国无机分析化学,2024,14(8):1099-1108.

WANG Shaolu, WU Siyi, XIE Fuwu, et al. Occurrence and Risk Assessment of Microplastics in Estuaries Area of Wanquan River, Hainan[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2024, 14(8): 1099-1108.

polyester(PES,23.7%) and polyethylene(PE,20.0%). Microplastics shapes were mostly in the form of fragments(58.4%), followed by fibers(32.3%). While colors displayed a wide variety, with a predominance of translucent(41.6%) and white(36.8%) colors. Size of microplastics were ranged from 1.0 to 4.0 mm, accounting for 42.2%. The characteristic analysis indicated that microplastics primarily originated from tourism activities, fisheries production, and domestic sewage from residents. Furthermore, microplastics abundance exhibited a regional distribution unevenly, which influenced by wind power, ocean currents, runoff, and seawater dilution. Compared with domestic and abroad studies, the surface seawater microplastics in the estuary of Wanquan river were at a relatively low pollution level. The risk assessment results also showed that the overall pollution level of microplastics in this region were low, but control measures should be taken for plastic products with high chemical toxicity.

Keywords microplastics; storage characteristics; risk assessment; Wanquan river; estuaries

塑料制品由于其质轻、价廉、耐用且易于加工成型等特点,被广泛应用于日常生活中。据统计,2021年全球塑料产量高达3.91亿t^[1]。大量塑料制品使用完毕后,仅有少部分被回收得到有效利用,大多数塑料垃圾都将进入自然环境中,据研究估计,塑料垃圾到2050年将增加到120亿t左右^[2]。自然环境中的塑料垃圾在物理、化学和生物的作用下,可分解破碎成更微小的塑料碎片或颗粒,其中直径小于5mm的塑料垃圾被定义为微塑料^[3]。微塑料作为一种新型污染物,广泛存在于全球多种介质中,在海洋、河流、湖泊、土壤、沉积物和地下水均能检测出微塑料。由于微塑料本身存在有害的化学添加剂,并能够吸附有毒有害物质,被海洋生物误食,随食物链传递和累积,最终威胁人体健康^[4],已成为全球广泛关注的热点环境问题。

生态风险评估是管控和治理微塑料污染的基础和前提。根据联合国《全球化学品统一分类标签制度》和危险等级模型,目前超过一半的塑料聚合物被确定为危险聚合物^[5]。然而,目前还缺乏系统、规范的评价体系来评估自然环境中微塑料的生态风险,主要是通过借鉴其他污染物评价方法对微塑料进行风险评价。污染负荷指数(Pollution Load Index, PLI)是评价区域整体承载污染物的负荷情况,能直接反映多种污染物对环境污染的贡献及其在时空上的变化趋势,目前已被广泛用于评估微塑料污染水平。继LITHNER等^[5]对塑料聚合物的毒性进行评分之后,微塑料聚合物的化学毒性也被作为评价其生态风险的重要指标,并随之提出了聚合物风险指数(Polymer Hazardous Index, PHI)。随着学者们对微塑料多元形态认识的加深和研究的深

入,XU等^[6]提出了考虑丰度和聚合物毒性的潜在生态风险指数(Potential Ecological Risk Index, PERI),并将该指数应用于长江口微塑料的生态风险评估,使微塑料生态风险的研究广度更进一步。指数法原是为了用于沉积物和生物体内重金属生态风险的评价方法,目前已广泛用于水体、沉积物、生物体和大气微塑料的生态风险研究^[7-8]。河口区是陆海物质交汇的重要场所,是陆源污染物进入海洋的重要途径。受人类活动影响,河口环境是微塑料污染的重灾区,我国以及世界范围的河口区都检测到了高丰度的微塑料污染^[9-11],因此河口区微塑料污染问题值得关注。当前对海南万泉河入海河口微塑料赋存特征研究鲜有报道,仅有谢福武等^[12]针对三大江入海河口微塑料分布特征和污染状况的研究,及王少露等^[13]对海南昌化江入海河口微塑料赋存特征和风险评估的研究,然而对于海南万泉河入海河口微塑料污染的生态风险状况尚未探究。基于此,本研究通过分析万泉河入海河口表层水体中微塑料污染来源、分布与组成特征,并对该区域微塑料污染的潜在生态风险进行了综合评价,以期对微塑料的污染防治提供充足的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究在海南万泉河口区共布设3条调查断面,每条断面布设3个点位,采样点位整体呈扇形布点方式,并于河口区布设1个点位,共计10个点位(图1)。微塑料样品采集与分析按照《海洋微塑料监测技术规程(试行)》(海环字[2016]13号)中规定的方法进行。

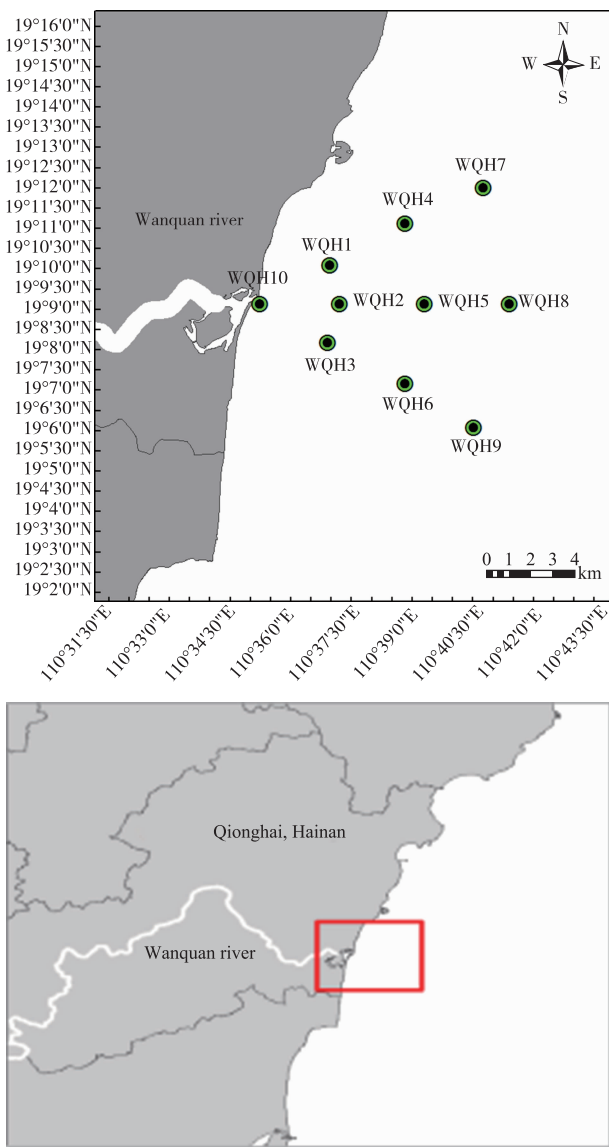


图 1 万泉河入海河口微塑料采样点位
Figure 1 Sampling sites of microplastics in
Wanquan river estuaries.

1.2 样品采集

2022 年 11 月在万泉河入海河口区使用浮游生物网(网口长 1 m、宽 0.5 m,网衣孔径 330 μm,网衣长 2~3 m)采集表层海水微塑料。采样以水平拖网的形式进行,网口上装有流量计,用于计算过水流量。采样时,船舶行驶速度保持 3.7 km/h 左右船

速,每次拖网 10~15 min。拖网结束后,回收网具,将样品收集于 1 L 的样品瓶中,加入 5% 的甲醛溶液,混匀后保存。

1.3 样品处理

样品依次通过 5 mm 和 0.3 mm 的不锈钢筛网,将 0.3 mm 筛网上的截留物用纯水冲入 500 mL 烧杯中。将烧杯置于烘箱内于 60 ℃下烘干。样品烘干后,向烧杯中加入 20 mL 0.05 mol/L 的硫酸亚铁溶液和 20 mL 30% 过氧化氢,室温下消解,如果仍可观察到有机质,重复上述操作直至有机质完全消解。消解完成后,每 20 mL 的消解液中加入 6 g 氯化钠固体。待氯化钠溶解后,将溶液转移至分液漏斗中进行密度分离。静置分离后,将下层杂质除去保留上层浮选液。上层浮选液用 10 μm 的不锈钢滤膜过滤,滤膜置于培养皿中,于 60 ℃下烘干,待进一步分析。

1.4 样品分析

采用体视显微镜(Discovery. v8,德国)对不锈钢滤膜(10 μm)上的样品进行目视识别,用镊子挑拣出疑似微塑料的物质,记录其形状、颜色并测量尺寸。采用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet iN10+IZ10,美国)对挑拣的物质进行检测,确定其化学组成,光谱范围设定为 400~4 000 cm⁻¹,每次测量扫描 16 次用时 3 s。将样品光谱与标准图谱进行比较(匹配度≥75%),根据特征峰判定微塑料的成分类型。

1.5 质量保证和质量控制

由于微塑料在环境中广泛存在,为减少实验误差,实验中使用的试剂均经滤膜过滤后使用,玻璃器皿用超纯水清洗干净后使用。每批样品以超纯水开展空白实验,即 1 个现场空白样品和 3 个实验室空白加标样品。现场空白样品与样品以相同操作步骤进行前处理和分析,本次现场空白样品检测数量<5,符合质控要求。实验室空白加标样品即在装有超纯水的烧杯中添加 4 种不同粒径、形状、颜色和成分的微塑料标准样品各 20 个,按实验室预处理和样品分析流程操作,获取实验室空白加标样品数据(表 1),本次加标回收率在 98.8%~100%,符合质控要求。

表 1 微塑料空白加标实验结果

Table 1 Results of blank and marked microplastic experiments

Component	PE	PE	PS	PA	Total	Recoveries/%
Size/mm	0.1—0.3	1—3	0.3—0.5	1—3		
Color-shape	Green-pellet	Blue-film	White-pellet	Yellow-fiber		
Sample 1	19	20	20	20	79	98.8
Sample 2	20	20	20	20	80	100
Sample 3	20	20	20	20	80	100

1.6 数据分析

表层海水微塑料丰度(D)计算公式如下:

$$D = n / [(r_i - r_0) \times k \times w \times h]$$

式中, D 为微塑料丰度,个/ m^3 ; n 为获取的微塑料总数量,个; r_i 为流量计的结束值, r ; r_0 为流量计的初始值, r ; k 为流量计的标定值, m/r ; w 为网具的网口宽度, m ; h 为网具的网口高度, m 。

采样站位图、微塑料丰度图等均采用 Arcgis 10.3 软件绘制,数据处理采用统计软件 Excel 2007 和 SigmaPlot 10.0 进行统计学分析和绘图。

1.7 生态风险评价

本研究结合聚合物风险指数法(PHI)、污染负荷指数法(PLI)和潜在生态风险指数法(PERI)对研究区域中微塑料的生态风险进行评价。其中,聚合物风险指数法以不同类型塑料聚合物的危害指数为评价因子,用于评价微塑料的生态毒理风险^[5],计算公式为:

$$PHI = \sum P_n \times S_n$$

式中,PHI 为聚合物风险指数, P_n 为第 n 类聚合物所占比例, S_n 为第 n 类聚合物的危害指数。聚乙烯(Polyethylene, PE)、聚丙烯(Polypropylene, PP)、聚乙烯-丙烯共聚物(Polyethylene-Propylene Copolymers, PE-PP)、聚苯乙烯(Polystyrene, PS)、聚酯纤维(Polyester, PES)、尼龙/聚酰胺(Nylon/Polyamide, PA)、聚氨酯(Polyurethane, PU)的危险系数^[5,14]分别为 11、1、12、30、4、47、7 384。

污染负荷指数法反映某一区域内的微塑料污染程度,用于评价微塑料污染水平风险^[15],计算公式为:

$$CF_i = \frac{C_i}{C_0}$$

$$PLI = \sqrt{CF_i}$$

$$PLI_{\text{zone}} = \sqrt[n]{PLI_1 \times PLI_2 \cdots \times PLI_n}$$

式中, CF_i 为微塑料的污染系数, C_i 为微塑料在某个站位的实测丰度,个/ m^3 ; C_0 为微塑料丰度的背景参考值,个/ m^3 ; PLI 为某一站位的微塑料污染负荷指数, n 为站位个数, PLI_{zone} 为调查区域内的微塑料污染负荷指数。

潜在生态风险指数法(PERI)基于微塑料浓度和聚合物化学毒性来综合评价微塑料污染的风险水平^[16],计算公式为:

$$T_i = \sum P_i \times Z_i$$

$$PERI_i = T_i \times \frac{C_i}{C_0}$$

$$PERI_{\text{zone}} = \sqrt[i]{PERI_1 \times PERI_2 \times \cdots \times PERI_i}$$

式中, Z_i 为各类塑料聚合物的危险系数; P_i 为各采样点每种微塑料百分比,%; T_i 为某一样本微塑料的综合毒性响应因子; C_i 为样本 i 的实测微塑料丰度,个/ m^3 ; C_0 为环境安全浓度,个/ m^3 ; $PERI_i$ 为样本 i 的综合潜在生态风险指数; $PERI_{\text{zone}}$ 为研究区域微塑料的综合潜在生态风险指数。微塑料生态风险评价等级^[17]划分标准详见表 2。

表 2 微塑料风险评价等级划分标准

Table 2 Classification standard for microplastics risk assessment

PHI	Risk rank	PLI	Risk rank	$PERI$	Risk rank
<10	I (Lower risk)	<10	I (Lower risk)	≤ 0.01	No significant risk
$10 \leq PHI < 100$	II (Medium risk)	$10 \leq PLI < 20$	II (Medium risk)	$0.01 < PERI \leq 0.1$	Lower ecological risk
$100 \leq PHI < 1\,000$	III (Higher risk)	$20 \leq PLI < 30$	III (Higher risk)	$0.1 < PERI \leq 0.5$	Medium ecological risk
$\geq 1\,000$	IV (Extremely high risk)	≥ 30	IV (Extremely higher risk)	$0.5 < PERI \leq 1.0$	Higher ecological risk
				$PERI > 1.0$	Ecological hazards

2 结果与讨论

2.1 微塑料分布特征及污染水平

万泉河入海河口表层海水微塑料丰度如图 2 所示,各点位微塑料的丰度为 0.32~0.74 个/ m^3 ,平均丰度为(0.53±0.13) 个/ m^3 。最高丰度值出现于 WQH7 点位,最低丰度值位于 WQH10 点位。从空间上看,各监测点位的微塑料丰度呈分布不均匀现象,该结果可能与人口密度、人类活动和海洋水文环

境相关。位于河口区 WQH10 点位的丰度值最低,该点位处于国家 4A 级旅游度假区内部,长期处在旅游景区的管理中,有效的管理可能是该站位微塑料丰度最低的原因。而位于研究区域东北部的 WQH7 点位丰度值最高,可能与该海域秋季东北季风所引起的洋流、水团作用的影响有关,该研究调查时间为 11 月份,此时整个海域盛行东北季风,微塑料易随季风转换所引起的洋流、水团作用进行迁移,使得微塑料向西南方向聚集。据研究资料显示,微

塑料丰度与沿岸距离密切相关,近岸点位微塑料丰度高于远岸点位^[18]。而本文却未观察到此现象,如 WQH8 点位距离沿岸最远,但却具有较高的微塑料丰度值。这表明了离岸距离并不是影响微塑料分布的唯一因素,微塑料在海水中的分布可能也受到海流、水团、河流和暴风雨等间接影响^[19],导致离岸较远的区域微塑料有局部汇集的现象。此外,与国内外相似采样方法的研究结果相比,万泉河入海河口表层海水微塑料整体处于较低污染水平,万泉河河口的微塑料平均丰度值高于海口湾(0.44 ± 0.21) 个/ m^3 ^[20]、海南昌化江河口 0.29 个/ m^3 ^[13]、江苏沿海城市 0.33 个/ m^3 ^[21]、伊朗恰巴哈尔海湾(0.49 ± 0.43) 个/ m^3 ^[22]和法国布列塔尼布雷斯特湾(0.24 ± 0.35) 个/ m^3 ^[23];然而,其平均丰度值则要低于海州湾 2.6 个/ m^3 ^[24]、

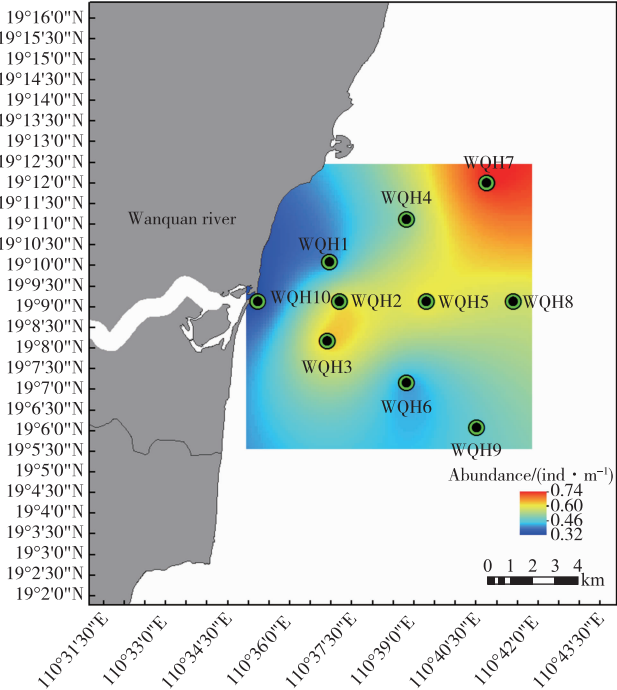


图 2 各点位微塑料的丰度分布
Figure 2 Distribution of microplastics abundance at each station.

象山湾(8.91 ± 4.70) 个/ m^3 ^[25]、青岛近岸(93.1 ± 63.5) 个/ m^3 ^[26]、香港沿海 $0.51\sim279.09$ 个/ m^3 ^[27]、美国旧金山湾 $15\sim2\,000$ 个/ m^3 ^[28]和加拿大西海岸($1\,710\pm1\,110$) 个/ m^3 ^[29]等海湾或近岸海域。甚至远低于珠江河口(雨季 545.5 个/ m^3 ,旱季 294.9 个/ m^3)^[9]、马来西亚克兰河口 $0.5\sim4.5$ 个/ m^3 ^[10]和克罗地亚克尔卡河口 $0.13\sim3.68$ 个/ m^3 ^[11]等河口区域。

2.2 微塑料成分组成及来源分析

微塑料成分类型如图 3a 所示,共鉴定出了 9 种不同成分微塑料,包括了聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚乙烯-丙烯共聚物(PE-PP)、聚苯乙烯(PS)、聚酯纤维(PES)、丙烯酸(Acrylic,AC)、人造丝(Rayon,RY)、尼龙/聚酰胺(NY/PA)和聚氨酯(PU)。其中,以 PP 的占比居高,为 34.8% ,其次为 PES(23.7%)和 PE(20.0%)。各点位的微塑料成分组成差异不明显,均以较高丰度占比的 PP、PES 和 PE 为主,WQH5 点位以 PP 占比最高,WQH7 点位以 PES 占比最明显,这也表明了万泉河河口区域微塑料成分组成受到了人类活动的强烈影响。

由本研究微塑料的成分和形状特征的结果可知,万泉河入海河口微塑料主要为片状的 PP 和 PE,纤维状的 PES(图 3a、3c),且所有点位中均检出片状的 PP 和 PE。相关研究表明,PE 和 PP 是表层水体中微塑料的主要成分,其来源主要是塑料包装、吸管、容器、电器、绳、瓶盖、皮带和塑料管道等日常生活用品^[19,30],及农渔业养殖所用的塑料大棚、地膜、浮排等^[31]。本研究区域位于滨海旅游区玉带滩,游客于沙滩上留下的塑料垃圾主要包括饮料瓶、塑料玩具和塑料袋等,而这些塑料垃圾的化学成分为 PP 和 PE,可推测出片状的 PE 和 PP 主要来源于上述塑料制品破碎产生。而 2017 年欧盟统计报告中指出纺织品(包括衣着用、装饰用、工业用等纺织品)的纤维塑料也是海洋水体中微塑料重要来源,源自纺织纤维的微塑料占海洋微塑料总量的 35% ^[32]。此外,废弃纺织品以及纺织衣物的日常清洗也会产生大量纤维状微塑料,研究表明家用洗衣机每清洗 6 kg 的腈纶纺织品可释放超 70 万根纤维^[33],所以生活污水也是纤维状微塑料的主要来源。同时,水产养殖业、船舶运输以及渔业捕捞过程中使用的绳索、渔网等工具,在使用和废弃后也会产生大量的微塑料纤维^[34]。本研究所有点位中均有纤维状微塑料检出,占比为 32.3% ,以 PES 为主,与纺织塑料的来源特征相符。尤其是 WQH7 点位检

出的纤维状微塑料占比最高,这可能与该点位周边分布大量的度假酒店和居民生活区有关,生活污水排放是这些纤维状微塑料的重要来源。另外,该点位附近有琼海市最大的潭门渔港,渔业活动中使用的渔网、钓鱼线、绳索和船帆等的风化脱落会产生大量的纤维状微塑料,由此可推测出这些纤维塑料来源于生活污水和渔业活动。综上,万泉河入海河口的微塑料主要来源于生活污水、旅游活动和渔业活动。

2.3 微塑料粒径、形状及颜色组成

微塑料粒径结构组成如图 3b 所示,万泉河入海河口区以 4.0~5.0 mm 范围的微塑料占比最高,为 21.9%,其次为 1.0~2.0 mm 范围的微塑料,占比为 20.3%。从空间上看,各点位微塑料粒径以 3.0~4.0 mm 和 1.0~2.0 mm 范围的微塑料占优势,4.0~5.0 mm 范围的微塑料在 WQH2、WQH3、WQH6 和 WQH7 点位占比最为明显,0.5~1.0 mm 范围的微塑料在 WQH5、WQH7 和 WQH8 点位的占比最突出,而 <0.5 mm 的微塑料占比均较低。塑料垃圾进入水体后往往需要经紫外辐射、机械磨损、风浪作用等多重作用下才会逐渐分解破碎成小粒径的微塑料^[35]。根据多数研究结果显示,水体中

微塑料数量随着粒径减小而逐渐增加,且以小粒径(<1 mm)的微塑料占主导^[36]。然而本研究中均以大粒径的微塑料所组成,这也表明了该研究区域微塑料经历的微型化过程较短,多与沿岸陆源输入相关。本研究区域周边有著名景点玉带滩,且沿岸密布度假酒店,游客众多人流量较大,采样站位离污染源较近,其中刚生成的微塑料占比较高,加上微塑料在海水环境中性质较为稳定,不易发生破碎和降解,因而大粒径的微塑料所占比较高。

微塑料形状结构组成如图 3c 所示,共检出 6 种形状的微塑料,包括纤维状、线状、颗粒状、薄膜状、片状和泡沫状。其中,以片状最为丰富,占比为 58.4%,其次是纤维,占比为 32.3%。从空间上看,各点位均以片状和纤维状微塑料占优势,泡沫状微塑料主要存在于 WQH3 和 WQH6 点位,占较高比重。线状微塑料则分布于 WQH4、WQH8 和 WQH10 点位,具有一定丰度占比。与已有研究结果^[37-38]相比,本研究检出的微塑料形状特征与其基本相似,均以片状和纤维状微塑料数量居多。据研究资料显示,片状微塑料来源较为广泛,日常生活中所应用的许多塑料制品在经过一系列的分裂降解后,最终均可能演变成片状微塑料,如塑料杯、饮料瓶、吸管、

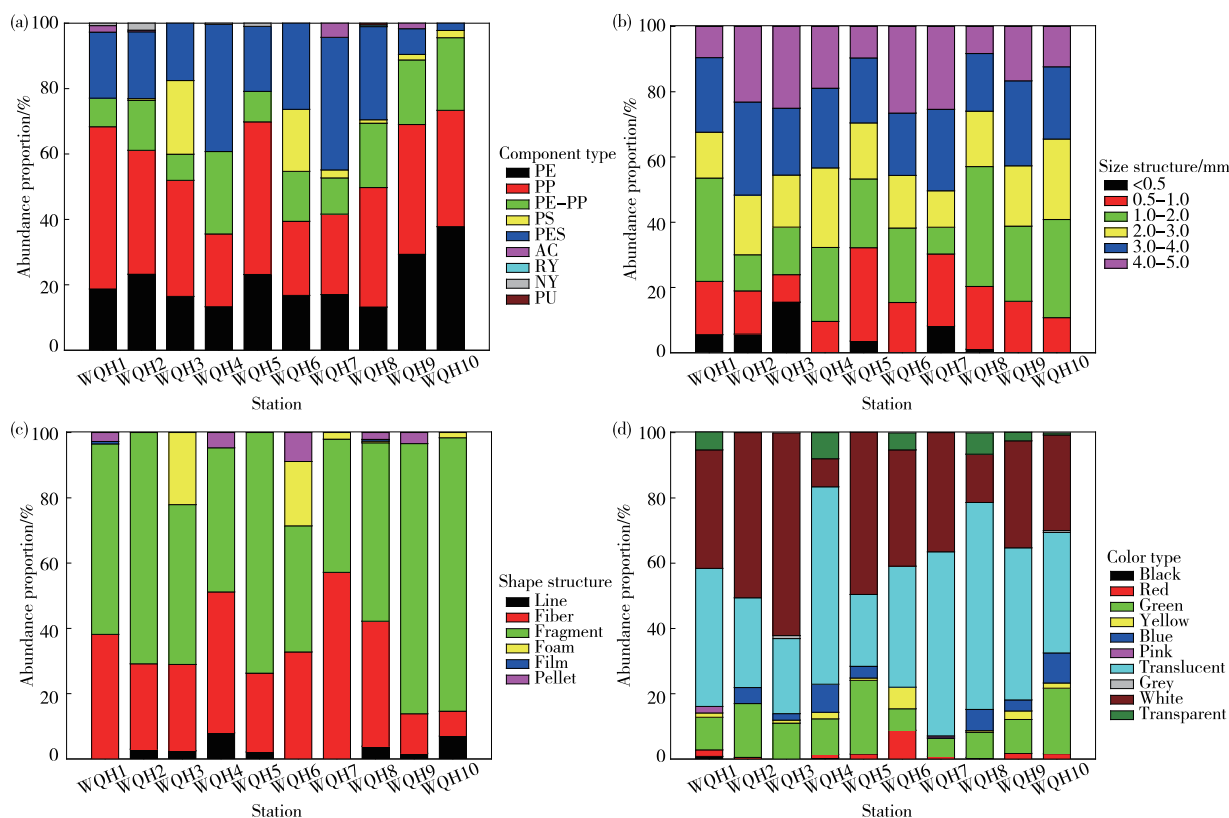


图 3 万泉河入海口微塑料成分、粒径、形状、颜色组成

Figure 3 Composition, particle size, shape and color of microplastics in Wanquan river estuaries.

一次性餐盒、厨具甚至轮胎碎屑等^[39]。而纤维状微塑料多来源于生活污水,如衣物的洗涤会导致大量纤维状微塑料脱落^[40]。此外,渔业活动使用的渔网和钓鱼线等渔具也是纤维状微塑料的重要来源^[34]。

微塑料颜色特征分布如图 3d 所示,共检出了半透明、白色、绿色、蓝色、透明、红色、黄色、粉色、黑色和灰色等 10 类不同颜色微塑料。其中,半透明为最常见的颜色,占比为 41.6%;白色微塑料次之,占比为 36.8%。从空间上看,各点位的微塑料颜色类型均以白色和半透明微塑料占主导。绿色类微塑料在各站位中也有分布,WQH2、WQH3 和 WQH5 点位均有相应占比。与已有研究结果相似^[41],微塑料均以浅色(透明、半透明或白色)的微塑料为主。而浅色微塑料丰度较高的原因大多源自浅色塑料本身的大量生产,如一次性餐具、塑料袋等产品多由浅色塑料制成,且这些产品容易破损,是微塑料的主要来源^[42]。另外也可能是由于微塑料长时间在风化和阳光照射作用下发生褪色的缘故^[43]。万泉河入海河口微塑料颜色所呈现出的多样化特征,也说明了该区域的微塑料的来源较为广泛。

2.4 微塑料的风险评价

由于当前缺乏统一性、系统性的微塑料生态风险评价方法,本文采用国内外常用的三种微塑料生态风险评价指标模型对研究区域的微塑料污染状况进行了风险评价。

如表 3 所示,各点位的聚合物风险指数(PHI)范围为 4.73~46.49,聚合物风险指数(PHI)的平均值为 11.11,总体的风险级别为Ⅱ级。其中,WQH3、WQH6 和 WQH8 点位的聚合物风险指数(PHI)均超过了 10,风险级别为Ⅱ级,其余站位的聚合物风险指数(PHI)均低于 10,风险等级为Ⅰ级。究其原因,主要是因为 WQH8 点位中,因检出毒性系数高的 PU(毒性系数为 7 384),虽然其占比仅有 1%,但其带来的生态风险极高。在 WQH3 和 WQH6 点位中,较高占比的 PS(毒性系数为 30)毒性系数较高,也导致这两个站位具有较高微塑料生态风险。其余站位中,占比较高的 PE(毒性系数为 11)、PES(毒性系数为 4)和 PP(毒性系数为 1)的毒性系数都偏低,以致这些站位微塑料风险属于较低风险。与海南岛南部海湾^[37]微塑料污染研究相比,本研究区域的聚合物风险污染较轻,万泉河入海河口区的 PHI 值整体较低,可能与万泉河河口高毒性聚合物占比较低有关。

由微塑料污染负荷指数(PLI)分析可知,各点位的污染负荷指数(PLI)在 1.00~1.52,研究区域的污染负荷指数(PLI)的平均值为 1.27,风险级别为Ⅰ级。所有站位的 PLI 均在 10 以下,评价均为Ⅰ级,属于低风险状态,表明研究区域的微塑料污染负荷较低。值得注意的是,污染负荷指数以微塑料丰度为指标,因此,该指数的分布特征与微塑料丰度值密切相关。相关研究结果发现微塑料丰度与聚合物风险指数(PHI)相关性不显著,但高丰度微塑料可能会因持续性积累而造成潜在的生态风险^[44]。而聚合物风险指数(PHI)主要考虑微塑料成分毒性及所在点位占比而未考虑微塑料丰度。由本研究结果可知,万泉河河口区均以低危险的 PP、PES 和 PE 塑料占比居高,而 WQH3、WQH6 和 WQH8 的丰度值较 WQH7 点位虽低,但其高危险的 PS、PU 塑料占比则相对较高,这也导致了这些点位的聚合物风险指数(PHI)偏高。因此,对于较高聚合物风险指数(PHI)和高丰度微塑料的区域应规范好塑料制品的使用和废弃塑料的回收利用,发展可生物降解塑料,减少环境污染。基于本研究评估结果,万泉河入海河口微塑料的生态风险整体处于较低污染水平,与乳山近岸海水养殖区^[45]和东山湾^[14]微塑料污染相比,万泉河入海河口的污染负荷指数(PHI)相对较低。

而潜在生态风险指数(PERI)则综合了微塑料实际浓度(丰度)、安全环境浓度和聚合物毒性系数三项重要的指标,可更加全面地反映出研究区域的实际生态风险污染水平。如表 3 所示,万泉河入海河口区的微塑料 PERI 指数在 0.000 28~0.004,潜在生态风险指数平均值为 0.000 65,整个研究区域整体处于无显著生态风险状态。与国内外的研究相比,万泉河入海河口的微塑料生态风险指数明显低于泰国沿海(50~470)^[46]、印度海港区(253~445)^[47]、东印度洋(0.17)^[48]和南海(0.02)^[48]等海域,稍高于海南昌化江入海河口(0.000 4)^[13]。总体上,以上研究结果均表明当前万泉河口区的微塑料污染状况整体较轻,但后续仍需持续关注微塑料污染,在削减微塑料丰度的同时应注意 PVC 和 PU 等高风险聚合物的控制。此外,由于当前没有一个统一的标准模型来评估微塑料的风险,希望未来在建立针对微塑料污染的环境风险评估框架时,能明确不同环境介质中微塑料丰度的安全阈值,确定标准化的分析方法,这对于准确量化微塑料污染水平和生态风险具有重要意义。

表 3 微塑料生态风险评价指数

Table 3 Ecological risk assessment index of microplastic

Station	PHI	Risk rank	PLI	Risk rank	PERI	Risk rank
WQH1	4.73	I (Lower risk)	1.12	I (Lower risk)	0.000 28	No significant risk
WQH2	6.75	I (Lower risk)	1.38	I (Lower risk)	0.000 62	No significant risk
WQH3	10.10	II (Medium risk)	1.41	I (Lower risk)	0.000 97	No significant risk
WQH4	6.47	I (Lower risk)	1.26	I (Lower risk)	0.000 50	No significant risk
WQH5	5.36	I (Lower risk)	1.38	I (Lower risk)	0.000 49	No significant risk
WQH6	10.66	II (Medium risk)	1.13	I (Lower risk)	0.000 66	No significant risk
WQH7	5.79	I (Lower risk)	1.52	I (Lower risk)	0.000 64	No significant risk
WQH8	46.49	II (Medium risk)	1.33	I (Lower risk)	0.003 99	No significant risk
WQH9	6.83	I (Lower risk)	1.21	I (Lower risk)	0.000 48	No significant risk
WQH10	7.96	I (Lower risk)	1.00	I (Lower risk)	0.000 38	No significant risk
Mean	11.11	II (Medium risk)	1.27	I (Lower risk)	0.000 65	No significant risk

3 结论

1)万泉河入海河口区微塑料丰度为 0.32~0.74 个/m³,平均丰度为(0.53±0.13) 个/m³;微塑料成分以 PP,PES 和 PE 占主导,粒径以 1.0~4.0 mm 的微塑料为主,形状颜色多以半透明、白色片状微塑料和半透明的纤维状塑料居多。

2)与国内外的研究结果相比,万泉河入海河口区的微塑料整体处于较低污染水平,该区域生活污水排放、旅游活动和渔业活动是微塑料的主要来源,且风力、海流、径流和海水稀释的也是导致微塑料在水体中分布不均匀的重要原因。

3)微塑料聚合物风险指数、污染负荷指数及潜在生态风险指数均表明,万泉河入海河口区表层水体微塑料整体污染程度较轻。但对于部分具有高化学毒性的塑料制品,应采取适当的管控措施。

参考文献

[1] Plastics Europe. Plastics-the facts 2022;an analysis of European plastics production,demand and waste data[R]. Belgium;Plastic Europe,2022.

[2] GEYER R,JAMBECK J R,LAW K L. Production, use,and fate of all plastics ever made[J]. Science Advances,2017,3(7):1-5.

[3] 谢福武,田毓婷,吴思怡,等. 海南乐东农用地土壤微塑料分布状况调查[J/OL]. 中国无机分析化学;1-13 [2024-04-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.6005.O6.20240219.0917.002.html>.

XIE Fuwu,TIAN Yuting,WU Siyi,et al. Investigation on microplastics distribution of soil in Ledong farmland,Hainan[J/OL]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry;1-13[2024-04-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.6005.O6.20240219.0917.002.html>.

[4] FARRELL P,NELSON K. Trophic level transfer of microplastic;*Mytilus edulis*(L.) to *Carcinus maenas*(L.)[J]. Environmental Pollution,2013,177:1-3.

[5] LITHNER D,LARSSON A,DAVE G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition[J]. Science of the Total Environment,2011,409(18):3309-3324.

[6] XU P,PENG G Y,SU L, et al. Microplastic risk assessment in surface waters;a case study in the Changjiang Estuary,China[J]. Marine Pollution Bulletin,2018,133: 647-654.

[7] 刘文政,刘利亚,周贻兵,等. 黔产市售鱼腥草中重金属含量分析及膳食风险评估[J]. 中国无机分析化学, 2023,13(5):425-432.

LIU Wenzheng,LIU Liya,ZHOU Yibing,et al. Content analysis and dietary risk assessment of heavy metals in *Houttuynia cordata* from Guizhou province[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(5):425-432.

[8] PATTERSON J,JEYASANTA K I,LAJU R L,et al. Microplastic in the coral reef environments of the Gulf of Mannar,India-Characteristics,distributions,sources and ecological risks[J]. Environmental Pollution,2022, 298;118848. DOI:10.1016/j.envpol.2022.118848.

[9] LI S Y,WANG Y L,LIU L H, et al. Temporal and spatial distribution of microplastics in a coastal region of the Pearl River estuary,China[J]. Water,2021, 13(12):1618. DOI:10.3390/w13121618.

[10] ZAKI M R M,YING P X,ZAINUDDIN A H, et al. Occurrence,abundance,and distribution of microplastics pollution;an evidence in surface tropical water of Klang River estuary,Malaysia[J]. Environmental Geochemistry and Health,2021,43(9):3733-3748.

[11] PARAÉ M,CUCULIÉ V,CUKROV N,et al. Microplastic distribution through the salinity gradient in a stratified estuary[J]. Water,2022,14(20):3255. DOI:10.

- 3390/w14203255.
- [12] 谢福武,王少露,吴思怡,等. 秋季海南三大江入海河口区的微塑料污染状况[J]. 广东海洋大学学报, 2023,43(4):137-144.
- XIE Fuwu, WANG Shaolu, WU Siyi, et al. Microplastics pollution in estuaries areas of three major rivers of Hainan in autumn[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2023, 43(4): 137-144.
- [13] 王少露,吴思怡,雷宇,等. 海南昌化江入海河口区微塑料污染特征及风险评估[J]. 海洋环境科学, 2024, 43(2):292-300.
- WANG Shaolu, WU Siyi, LEI Yu, et al. Characteristics of microplastics pollution and risk assessment in estuaries of Changhua river, Hainan[J]. Marine Environmental Science, 2024, 43(2): 292-300.
- [14] PAN Z, LIU Q L, JIANG R G, et al. Microplastic pollution and ecological risk assessment in an estuarine environment: The Dongshan Bay of China [J]. Chemosphere, 2021, 262: 127876. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2020. 127876.
- [15] TOMLINSON D L, WILSON J G, HARRIS C R, et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. Helgoländer Meeresuntersuchungen, 1980, 33(1): 566-575.
- [16] EVERAERT G, CAUWENBERGHE L V, RIJCKE M D, et al. Risk assessment of microplastics in the ocean: Modelling approach and first conclusions [J]. Environmental Pollution, 2018, 242(Pt B): 1930-1938.
- [17] ZHANG K, SHI H H, PENG J P, et al. Microplastic pollution in China's inland water systems: a review of findings, methods, characteristics, effects, and management[J]. Science of The Total Environment, 2018, 630: 1641-1653.
- [18] 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, 2019, 244: 827-833.
- [19] COYLE R, HARDIMAN G, O' DRISCAOLL K. Microplastics in the marine environment: a review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems[J]. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 2020, 2(4): 100010. DOI: 10. 1016/j. cscee. 2020. 100010.
- [20] QI H Y, FU D D, WANG Z Z, et al. Microplastics occurrence and spatial distribution in seawater and sediment of Haikou Bay in the northern South China Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020, 239: 106757. DOI: 10. 1016/j. ecss. 2020. 106757.
- [21] 张晓昱,张梦亦,魏爱泓,等. 江苏省近岸海域表层海水微塑料的组成与赋存特征[J]. 环境监控与预警, 2021, 13(2): 9-13.
- ZHANG Xiaoyu, ZHANG Mengyi, WEI Aihong, et al. Composition and existential characteristics of microplastics in surface waters of Jiangsu coastal area[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2021, 13(2): 9-13.
- [22] ALIABAD M K, NASSIRI M, KOR K. Microplastics in the surface seawaters of Chabahar Bay, Gulf of Oman(Makran Coasts)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 143: 125-133.
- [23] FRERE 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.
- [24] 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.
- LI Zheng, GAO Chunmei, YANG Jinlong, et al. Distribution characteristics of microplastics in surface water and sediments of Haizhou Bay, Lianyungang [J]. Environmental Science, 2020, 41(7): 3212-3221.
- [25] CHEN M L, JIN M, TAO P R, et al. Assessment of microplastics derived from mariculture in Xiangshan Bay, China[J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 1146-1156.
- [26] LUO Y D, SUN C Z, LI C G, et al. Spatial patterns of microplastics in surface seawater, sediment, and sand along Qingdao coastal environment[J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 916859. DOI: 10. 3389 FMARS. 2022. 916859.
- [27] TSANG Y Y, MAK C W, LIEBICH C, et al. Microplastic pollution in the marine waters and sediments of Hong Kong[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 115(1): 20-28.
- [28] SUTTON R, MASON S A, STANEK S K, et al. Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 109(1): 230-235.
- [29] 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): 94-99.
- [30] KOEHLER A, ANDERSON A, ANDRADY A, et al. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment [R]. International Maritime Organization, 2015.
- [31] 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.
- [32] BROWNE M A, GALLOWAY T, THOMPSON R. Microplastic-an emerging contaminant of potential concern[J]. *Integrated Environmental Assessment & Management*, 2010, 3(4):559-561.
- [33] NAPPER I E, THOMPSON R C. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: effects of fabric type and washing conditions [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 112(1):39-45.
- [34] 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.
- LIU Qiming, LIANG Haitao, XI Guili, et al. Pollution characteristics of microplastics in sediments of Xiamen bay beach[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(3):1217-1221.
- [35] 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, 51:4368-4376.
- [36] 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.
- [37] 边伟杰, 吕淑果, 史云峰, 等. 海南岛南部海湾潮间带沉积物微塑料赋存特征及其风险评估[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(3):345-353.
- BIAN Weijie, LYU Shuguo, SHI Yunfeng, et al. The distribution characteristics of microplastics and risk assessment in intertidal sediments of southern bay of Hainan Island [J]. *Marine Environmental Science*, 2023, 42(3):345-353.
- [38] 周筱田, 赵雯璐, 李铁军, 等. 浙江省近岸海域表层水体中微塑料分布与组成特征[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 47(3):371-379.
- ZHOU Xiaotian, ZHAO Wenlu, LI Tiejun, et al. Distribution and composition characteristics of microplastics in the coastal surface seawaters of Zhejiang province[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2021, 47(3):371-379.
- [39] CORCORAN P L, BIESINGER M C, GRIFI M. Plastics and beaches: a degrading relationship [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(1):80-84.
- [40] BROWNE M A, GALLOWAY T S, THOMPSON R C. Spatial patterns of plastic debris along Estuarine shorelines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(9):3404-3409.
- [41] 陈欣, 谢秀琴, 王孟, 等. 南海近岸珊瑚礁海域表层水体中微塑料的分布特征[J]. *环境化学*, 2023, 42(3):843-854.
- CHEN Xin, XIE Xiuqin, WANG Meng, et al. Distribution characteristics of microplastics in surface waters of inshore coral reefs area in the South China Sea [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(3):843-854.
- [42] JIANG C B, YIN L S, LI Z W, et al. Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249:91-98.
- [43] 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.
- YIN Shiqi, JIA Fangli, LIU Xiaoyin, et al. The distribution of microplastics and their influence factors in surface seawater and tidal flat sediments in Qingdao coast[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4):1410-1418.
- [44] ZHONG P, LIU Q L, JIANG R G, et al. Microplastic pollution and ecological risk assessment in an estuarine environment: the Dongshan Bay of China [J]. *Chemosphere*, 2021, 262, 127876. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2020. 127876.
- [45] 梁辉, 唐衍力, 于梦杰, 等. 乳山近岸海水养殖区表层水微塑料赋存特征及生态风险评估[J/OL]. *中国环境科学*, 1-11 [2024-02-23]. DOI: 10. 19674/j. cnki. issn1000-6923. 20240016. 015.
- LIANG Hui, TANG Yanli, YU Mengjie, et al. Occurrence characteristics and ecological risk assessment of microplastics in surface seawater of nearshore mariculture area in Rushan[J/OL]. *China Environmental Science*, 1-11[2024-02-23]. DOI: 10. 19674/j. cnki. issn1000-6923. 20240016. 015.
- [46] PRARAT P, HONGSAWAT P. Microplastic pollution in surface seawater and beach sand from the shore of Rayong province, Thailand: distribution, characterization, and ecological risk assessment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 174:113200. DOI: 10. 1016/j. marpolbul. 2021. 113200.
- [47] KEERTHIKA K, PADMAVATHY P, RANI V, et al. Spatial, seasonal and ecological risk assessment of microplastics in sediment and surface water along the Thoothukudi, south Tamil Nadu, south east India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2022, 194(11):820. DOI:10. 1007/s10661-022-10468-z.
- [48] 李常军. 中国南海和东印度洋水体微塑料赋存、源汇和生态风险的研究[D]. 上海:华东师范大学, 2022.
- LI Changjun. A study on the distribution, source to sink and ecological risk assessment of microplastics in water bodies of the South China Sea and Eastern Indian Ocean[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.