

【调查与研究】

黄海北部四十里湾微塑料污染特征研究

程姣姣^{1,2}, 郭献军¹, 李艳芳²

(1.烟台大学 环境与材料工程学院, 山东 烟台 264003; 2.中国科学院烟台海岸带研究所, 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003)

摘要: 海洋微塑料污染现已成为被高度关注的全球环境问题之一。本文研究了北黄海近岸区域——四十里湾周边包括潮滩、海水以及河流中的微塑料污染情况。调查发现, 四十里湾微塑料在表层水、河流和潮滩中的平均丰度分别是 (5.2 ± 1.6) N/L、 5.2 N/L 和 (163.2 ± 151.3) N/kg (干重)。微塑料类型以纤维类为主, 主要来源于养殖活动和河流输入, 其次是碎片类、薄膜类、发泡类以及颗粒类, 粒径分布中 < 1 mm 的微塑料含量最多 ($> 50\%$)。四十里湾水体和潮滩中的微塑料分布具有显著的空间差异, 主要受养殖活动、生活和水动力的影响。未来需要更多数据以充分认识微塑料在近岸开放海湾的分布特征。

关键词: 四十里湾; 微塑料; 水体; 潮滩; 丰度

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2021)01-0001-07

The characteristics of microplastics pollution in Sishili bay of the North Yellow Sea

CHENG Jiao-jiao^{1,2}, GUO Xian-jun¹, LI Yan-fang²

(1.School of Environmental and Materials Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China; 2.Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: Marine microplastic pollution has become one of the highly concerned global environmental issues. In this study, microplastic pollution in tidal flats seawater and rivers of Sishili bay were investigated along the coastal zone of the North Yellow Sea. The average abundance of microplastics in the surface water, river and tidal flat were (5.2 ± 1.6) N/L, 5.2 N/L and (163.2 ± 151.3) N/kg (d.w.), respectively. The fibers were dominated in microplastic types, which was primarily from aquaculture farming and river inputs, followed by fragments, films, foams and particles. The majority size of microplastics was < 1 mm ($> 50\%$). The distribution of microplastics in the water and tidal flat of Sishili bay showed significant spatial differences, which are mainly affected by aquaculture farming, daily living and hydrodynamics. More data are required in the future to understand the mechanism of microplastics distribution in the coastal open bay.

Key words: Sishili bay; microplastics; water; tidal flat; abundance

2004 年, Thompson 首次将“微塑料(micro-plastic)”定义为尺寸小于 5 mm 的塑料颗粒, 并指出应重视微塑料对海洋生态系统的生态效应^[1],

随后有关微塑料分布和危害的研究相继开展。研究发现微塑料的来源多元化, 废弃的塑料制品可通过地表径流输入海洋, 滨海旅游业、船舶运

收稿日期: 2019-09-16, 修订日期: 2019-12-31

基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2016YFC1402202); 国家自然科学基金项目(41806029); 山东省自然科学基金项目(ZR2018QD006)

作者简介: 程姣姣(1989—), 女, 山东青岛人, 硕士, 主要研究方向海岸带环境微塑料, E-mail: cjj1015@126.com

通讯作者: 郭献军, 副教授, E-mail: xjg10@126.com

李艳芳, 助理研究员, E-mail: yfli@yic.ac.cn

输业和海水养殖等产生的塑料垃圾会直接进入海洋^[2]。海洋中的塑料制品经过物理降解、光降解和生物降解最终形成不同形貌的微塑料^[1]。海洋微塑料污染问题已经引起了各国政府、学者和民众的关注。目前已在全球各地的河流^[3]、潮滩^[4-6]、海湾^[7-8]、大洋甚至极地^[9]发现了微塑料的存在。在我国,微塑料分布也非常广泛。在近海如南海^[10]、东海^[3]、黄海^[8]和渤海^[11],河口区域^[3]如长江口、珠江口,内陆湖泊^[12]以及青藏高原地区^[12]的调查中均发现了微塑料。然而,对于人类活动频繁的近岸海湾,关于微塑料污染水平和分布特性的调查研究却较少。

四十里湾是我国北方典型的渔业基地,作为人类活动剧烈的区域,周边的污水排放和水产养殖活动产生的塑料垃圾可能会对附近海域的环境产生影响。为此,我们对四十里湾区域的水体、潮滩和入海河流进行调查,通过分析微塑料的形态、丰度和化学成分,获得四十里湾微塑料的污染状况和空间分布特征,以期更好地了解人类活动的影响,为我国北黄海海洋微塑料的风险评估提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

四十里湾位于北黄海南部海岸区域(图1),西与芝罘湾相连,东邻养马岛,北有崆峒岛,海岸

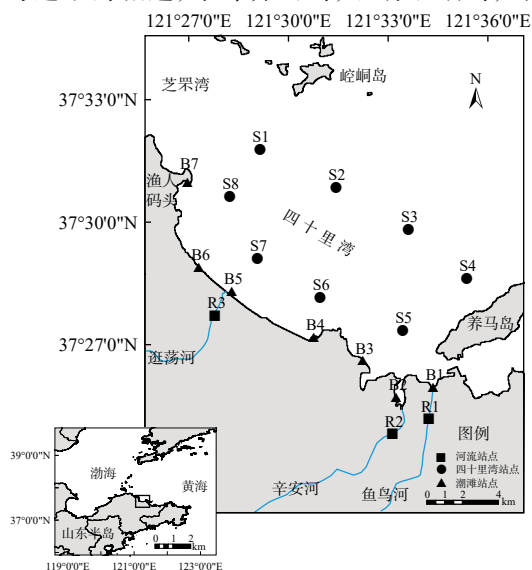


图1 四十里湾调查站点

Fig. 1 Survey sites in the Sishili bay

线长 20 km, 沿岸有逛荡河、辛安河和鱼鸟河入海, 水深较浅, 多为 8~15 m, 水体交换能力较差^[13]。

1.2 样品采集

根据四十里湾的地理特征和人类活动的影响, 本研究从河流、潮滩、水体选取了 18 个站位(图1), 其中包括 3 个河流站位(R1—R3)、7 个潮滩站位(B1—B7)和 8 个海水站位(S1—S8), 共采集 33 个样品。采样时间为 2019 年 2 月, 该时间段四十里湾内无渔业养殖活动开展。

在四十里湾分别采集底层和表层水样, 入湾河流由于水深较浅仅采集表层水样。根据四十里湾水深(8~15 m)情况, 底层水的采样深度为 12 m, 水深不足 12 m 的站位采集水底样品。水样采集参照熊宽旭等^[8]的采样方法, 使用不锈钢采水器, 采集 20 L 水样进行过滤分析。潮滩沉积物设置潮上带(最高潮位线)和潮间带两个采样点。沉积物样品采集使用不锈钢采样铲, 随机采集 3 个 30 cm×30 cm, 深约 2 cm 的样方, 样品装入 PE 采样袋中^[8]。所有采集样品均置于避光处保存, 调查完成后统一运回实验室处理。

1.3 样品处理及分析

水样处理方法: 采用过滤法从水体样品中分离微塑料^[14], 将水样抽滤到 20 μm 的尼龙滤膜(47 mm, Millipore)上, 将滤膜上的物质转移到 250 mL 的高型烧杯中, 加入 50 mL 30% H₂O₂, 盖上玻璃皿, 室温放置 48 h 后, 移至 60 °C 电热板上加热, 直至烧杯中无可见有机质。消解完全后, 用 5 μm 的硝酸纤维素滤膜(47 mm, Whatman)对消解后的样品进行抽滤。

潮滩沉积物处理方法: 采用连续流动分离浮选方法从沉积物中分离微塑料^[14], 所有沉积物样品在 60 °C 条件下干燥 72 h, 恒温恒重后, 称取 500 g 干重沉积物过 5 mm 的网眼筛。采用 CaCl₂ (密度 1.3 g/cm³) 溶液进行浮选, 用 20 μm 的尼龙滤膜对上清液进行抽滤, 分离得到的物质转移到 250 mL 的高型烧杯中, 加入 50 mL 30% H₂O₂, 盖上玻璃皿, 室温放置 48 h 后, 移至 60 °C 电热板上加热, 直至烧杯中无可见有机质。再用 ZnCl₂ 溶液(密度 1.5 g/cm³)进行二次浮选, 采用 5 μm 的硝酸纤维素滤膜对二次浮选的上清液进行抽滤, 并用蒸馏水洗净滤膜上的盐分。所有滤

膜均放置在 4 ℃ 的冰箱中保存, 待分析。

样品分析均使用体视显微镜 (Leica S9I, 6.1x-55x) 对滤膜上的微塑料样品进行挑选计数, 并用显微镜摄像系统测量塑料微粒的最大边缘长度 (55 μm ~ 5 mm)。使用衰减全反射傅里叶红外光谱仪 (Nicolet Is5) 对微塑料样品进行成分鉴定 (随机挑选 51 个样品)。水体中微塑料的丰度单位以每升水体中微塑料个数表示 (N/L)。沉积物中微塑料的丰度单位则表示为每千克干重沉积物中的微塑料个数 (N/kg 干重)。

1.4 质控措施

为避免背景污染, 所有实验器材均经过彻底的预清洗和蒸馏水冲洗 3 遍。水样采集前使用待采集水样对采样桶进行再次润洗。实验人员穿着防静电实验服并在清洁干净的实验室内进行实验操作。微塑料无处不在, 有研究发现, 蒸馏水中也存在微塑料^[8], 为避免干扰, 需要对所用的蒸馏水进行检测。分别从 3 桶蒸馏水中提取水样, 用 20 μm 的尼龙滤膜对 5 L 蒸馏水进行过滤^[7], 并对滤膜上的微塑料计数, 结果发现冲洗所用的蒸馏水中含有微塑料。为去除干扰, 以 3 组实验的微塑料丰度平均值作为背景值 (1.4 N/L), 后续所有样品的微塑料丰度计算均扣除该背景值。

2 结果与讨论

2.1 水体中微塑料污染特征

2.1.1 丰度、类型与粒径

由图 2a 可知, 四十里湾表层和底层水体的微塑料丰度范围分别为 2.4 ~ 8.1 N/L、0.5 ~ 1.25 N/L,

对应的平均丰度为 (5.2 $\pm$ 1.6) N/L、(0.8 $\pm$ 0.3) N/L, 表层水微塑料丰度明显高于底层水。

目前, 海洋微塑料的调查缺乏标准化的方法, 导致不同研究的结果差异性显著。表 1 列举了部分区域采用不同的调查方法得到的结果, 对比发现, 使用拖网方法较使用水样法得到的结果普遍偏低, 主要原因是拖网的孔径 (330 μm) 过大^[3,9,11], 会滤掉粒径 < 300 μm 和部分纤维状微塑料。在渤海同一时期的调查结果中, Zhang 等^[11] 与 Dai 等^[15] 的调查结果相差 1000 余倍也证明了这一点。与采用水样法进行调查的研究结果^[7-8,15] 相比, 四十里湾的微塑料丰度范围与渤海和北黄海桑沟湾的丰度范围接近, 比韩国南部海岸和加拿大夏洛特皇后湾^[7,16] 的丰度范围偏低。因此, 四十里湾微塑料的污染水平处于中等程度。

在四十里湾的水体中主要发现了纤维类、碎片类、薄膜类和颗粒类 4 种类型的微塑料 (图 3)。如图 2b 所示, 纤维类在表、底层水中含量最多, 占 88% 以上, 其次是碎片类和薄膜类, 颗粒类在水体微塑料类型中所占的比例最小。由图 2c 可知, 四十里湾湾内表、底层水体中的微塑料粒径均以 < 1 mm 为主 (>50%), 并且随着粒径增大, 其丰度占比逐渐减少。

四十里湾 3 条入湾河流鱼鸟河、辛安河、逛荡河的微塑料丰度依次为 2.4 N/L、9.15 N/L、4.05 N/L, 平均丰度为 5.2 N/L。纤维类微塑料在河流中的比例最大, 大于 90% (图 2b)。研究表明衣物洗涤产生的大量纤维可通过城市污水进入河流, 最终汇入海湾^[17]。辛安河沿岸受村庄生

表 1 不同海域表层微塑料的丰度范围对比

Tab.1 Microplastic abundances in the surface water of different sea areas

调查区域	采样方法	过滤孔径/ μm	平均丰度	采样深度	参考文献
北极表层	manta拖网(0.55 ~ 1.85 km)	333	(0.34 $\pm$ 0.31) N/m ³	表层海水(16 cm)	[9]
中国东海海岸	浮游生物网(30*40 cm ² , 2节25 ~ 30 min)	333	(0.167 $\pm$ 0.138) N/m ³	表层海水(30 cm)	[3]
中国渤海	manta拖网(0.95 m*0.45 m, 1 ~ 2节, 15 min)	330	(0.33 $\pm$ 0.34) N/m ³	表层海水(45 cm)	[11]
加拿大夏洛特皇后湾	盐水吸入系统泵入(10 ~ 20 min)	62.5	(7630 $\pm$ 1410) N/m ³	表层海水(4.5 m)	[7]
韩国南部海岸	SML水样法/2.2 ~ 2.8 L	0.75	(206 $\pm$ 131) N/L	表层海水(150 ~ 400 μm)	[16]
中国长江口	水泵/12 ~ 20 L	32	(4137.3 $\pm$ 2461.5) N/m ³	表层海水(1 m)	[3]
中国渤海	CTD采样器/5 L	20	2.2 N/L	表层海水(5 m)	[15]
北黄海桑沟湾	不锈钢采水器/5 L	20	2.8 ~ 41.8 N/L	表层海水	[8]
四十里湾	采样器/20 L	20	2.4 ~ 8.1 N/L	表层海水(30 cm)	本文

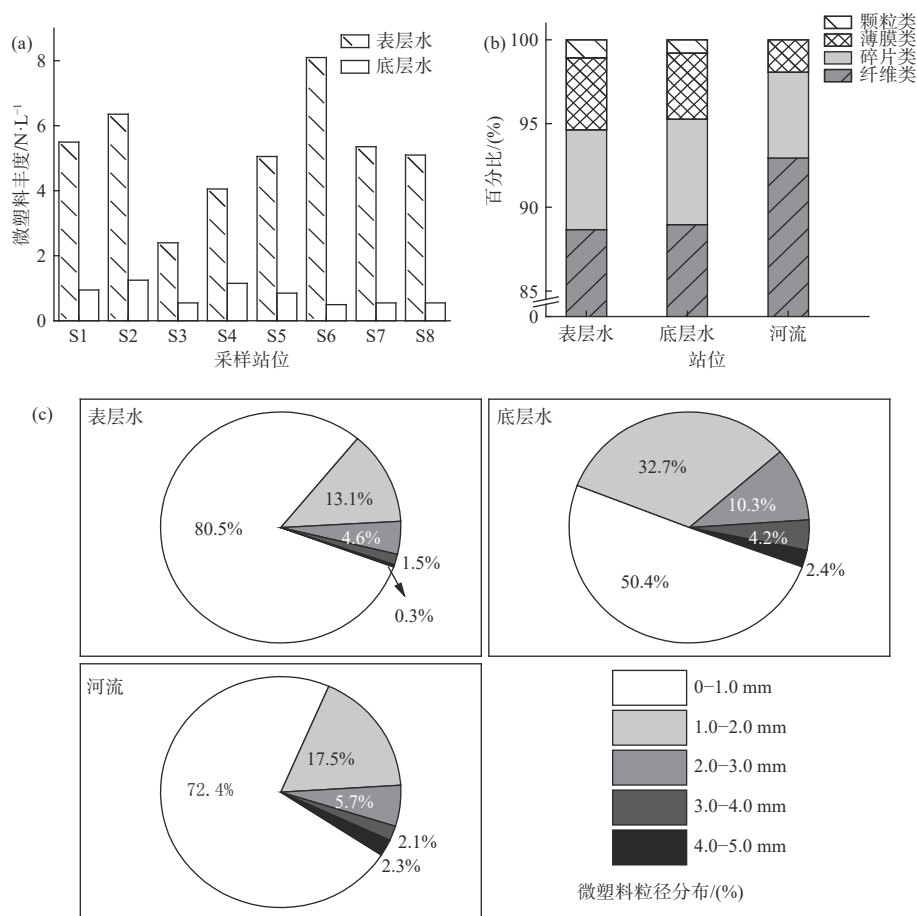
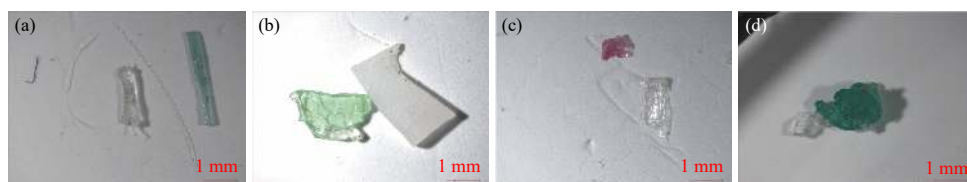


图 2 四十里湾水体微塑料丰度(a)、类型(b)和粒径(c)分布

Fig. 2 Distribution of microplastics abundance (a), types (b) and size (c) in the water column of Sishili bay



(a 纤维类, b 碎片类, c 薄膜类, d 颗粒类)

图 3 水体检出的微塑料类型

Fig. 3 Microplastic types detected in the water

活污水直排等人类活动影响,其微塑料含量明显高于鱼鸟河与逛荡河。另外,城市污水处理厂的出水也汇入四十里湾,因此我们推测生活污水排放是四十里湾近岸水体中纤维类微塑料的重要来源。水体中颗粒类的微塑料可能是其他海域的微塑料在风、浪、流等海洋动力作用下输送而来的。

2.1.2 空间分布

Lebreton 等^[18]认为河流是海洋微塑料陆源污染的重要来源,如图 4a 所示,受河流影响,在四十里湾表层水体中的微塑料丰度近岸区域明

显高于离岸区域。底层水微塑料的丰度则呈现离岸区域比近岸区域偏高的特征,这一现象与桑沟湾底层水微塑料的分布一致^[8],这可能是由于受海洋环流、风、潮汐等动力过程的影响,微塑料在垂直方向上进行了再分配的结果^[19]。此外,由于四十里湾内存在大面积的养殖区,虽然调查时段内养殖活动停止,但是养殖活动产生的塑料废弃物依然存在,底层水微塑料的分布很可能是微塑料在水动力作用下进一步迁移运输的结果。

正如图 4b 所示,在局地海流、潮汐和河流的

影响下, 四十里湾表层微塑料的类型组成呈现近岸简单、远岸复杂的特征。受养殖活动和河流的影响, 近岸区域微塑料主要以纤维类和碎片类为主 (S5—S8), 这些微塑料在海流的作用下向深水

迁移扩散, 在远岸的底层水中出现一致的类型组成 (S1—S4)。可见, 深水区 (S1—S4) 底层水中的微塑料主要来源于近岸表层水微塑料的迁移沉降, 进而导致远岸海底沉积物中的微塑料丰度也偏高^[20]。

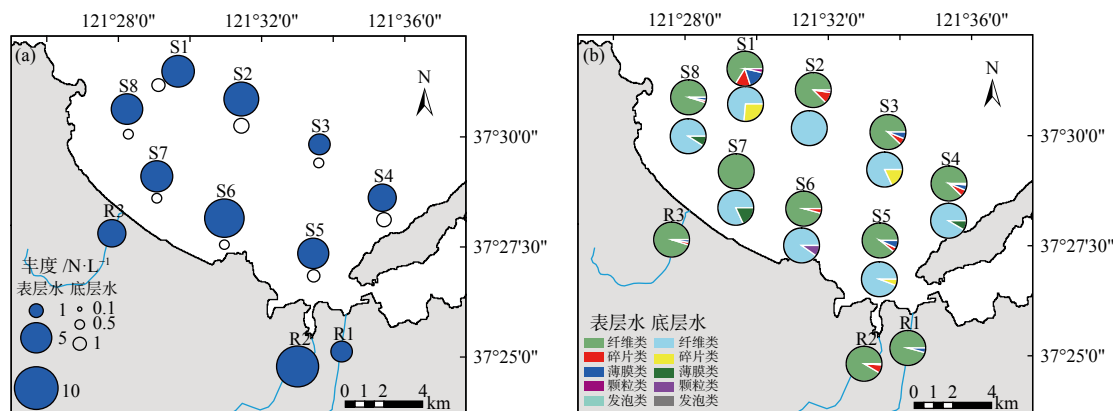


图 4 四十里湾水体微塑料丰度(a)和不同类型(b)空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of microplastics abundance (a) and different types (b) in the water of Sishili bay

2.2 潮滩沉积物中的微塑料污染特征

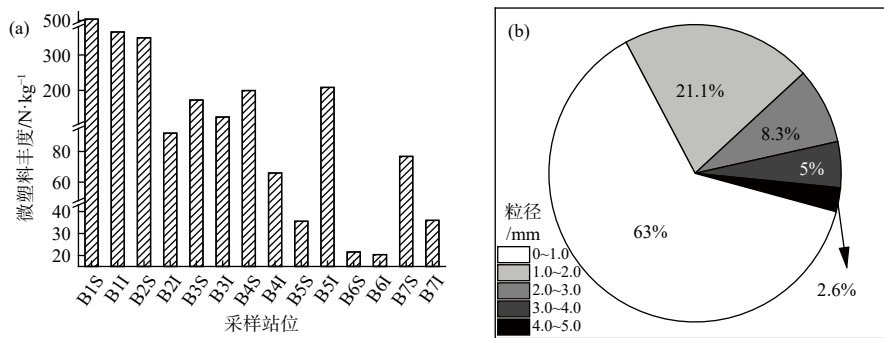
2.2.1 丰度、类型与粒径

四十里湾潮滩微塑料的丰度分布范围为 20.4 ~ 514 N/kg(干重), 平均丰度为 (163.2 ± 151.3) N/kg(干重)(图 5a)。微塑料主要有纤维类、碎片类、薄膜类、颗粒类和发泡类 5 种类型, 纤维类占主导地位, 碎片类、薄膜类等其他类型在不同的站位丰度占比不同(图 6)。受潮汐、海浪的影响, 除 B5 站位外, 潮上带微塑料含量均高于潮间带。潮滩中的微塑料粒径以 <1 mm 为主(63%), 并且随着微塑料粒径的增加, 其占比逐渐减少(图 5b)。

表 2 列出了世界各地潮滩微塑料丰度的调查结果, 各地区潮滩微塑料丰度的空间差异性较大, 可能与潮滩的功能、性质以及人类活动有关。与其他国家和地区相比, 四十里湾潮滩微塑料的含量处于中等水平^[4-6]。作为养殖海滩, 四十里湾潮滩微塑料含量比桑沟湾的养殖潮滩低^[8], 并且远小于海南的旅游海滩^[10], 可见受人类活动的影响, 不同性质的潮滩微塑料污染程度不同。

2.2.2 空间分布

如图 6a 所示, 河口潮滩(B1、B2 站点)的微塑料含量明显高于其他站位, 说明河口是沿海地区微塑料重要的源。潮滩微塑料丰度的空间分



(S: 潮上带, I: 潮间带)

(S: supratidal zone, I: intertidal zone)

图 5 四十里湾潮滩微塑料丰度(a)和粒径(b)分布

Fig. 5 The abundance (a) and particle size distribution (b) of microplastics in the tidal flat of Sishili bay

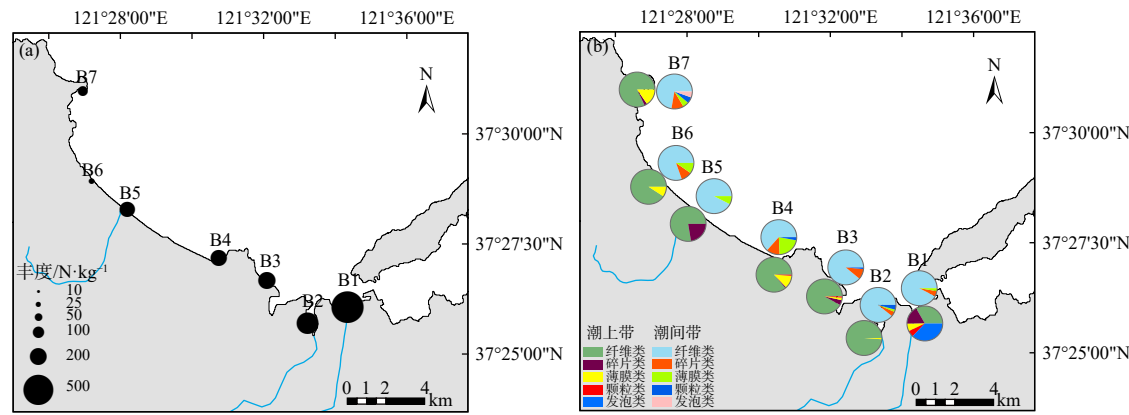


图 6 四十里湾潮滩微塑料丰度(a)和类型组成(b)空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of microplastics abundance (a) and different types (b) on the tidal flat of Sishili bay

表 2 不同潮滩沉积物的微塑料丰度

Tab.2 Microplastic abundances in sediment of different tidal flats

调查区域	采样方法	过滤孔径/ μm	平均丰度	采样位置	参考文献
德国海滩	—	1.2	38 N/10 g	潮上带沙丘(1 cm)	[4]
			496 N/10 g	最高潮位线(1 cm)	
比利时沿海地区	Van Veen抓斗	38	49 ~ 156 N/kg	最高潮位线, 潮间带, 潮下带	[5]
波兰沙滩	10 cm金属环	45	25 ~ 53 N/kg	沙滩中部(2.5 cm)	[6]
海南旅游海滩	玻璃表面皿	—	343.6 ~ 435.7 N/50 g	潮间带(1 cm)	[10]
			(720.38 $\pm$ 2059.09) N/kg	旅游海滩(2 cm)	
山东省海岸带潮滩	不锈钢采样铲	25	(149.95 $\pm$ 219.95) N/kg	河口区潮滩(2 cm)	[14]
			(193.75 $\pm$ 52.68) N/kg	渔船码头潮滩(2 cm)	
北黄海桑沟湾	不锈钢采样铲	20	31.2 ~ 1246.8 N/kg	潮滩(2 cm)	[8]
四十里湾	不锈钢采样铲	20	163.2 N/kg	最高潮位线, 潮间带(2 cm)	本文

布受人类活动、潮汐与海浪、风与洋流等各种因素的影响。B3、B4 站点位于扇贝养殖区, 养殖活动使用的养殖网、塑料编织袋和泡沫箱等是此处纤维类、碎片类及发泡类微塑料的重要贡献源。B6 站点潮滩微塑料含量最少(< 25 N/kg), 主要原因是此处潮滩人工堆积了大量的碎石、砂砾, 导致潮滩面积减少, 性质改变。四十里湾岸线接近平直, 水域相对开阔, 受潮汐和海浪影响显著, 因而造成潮上带与潮间带的微塑料类型组成差异明显(图 6b), 潮上带微塑料丰度普遍高于潮间带。四十里湾作为黄海沿岸的渔业养殖区, 微塑料污染情况同桑沟湾相似, 主要受养殖活动影响。养殖活动内容不同, 造成微塑料污染的类型组成不同。不同于桑沟湾的筏架养殖, 四十里湾主要以贝类养殖为主, 导致四十里湾发泡类微塑料含量减少, 碎片类增多^[8]。

2.3 成分

在四十里湾潮滩检测到的微塑料里, 选取 51 个样品(>1 mm)进行成分鉴定, 结果检测出以下 6 种微塑料: 人造丝、聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚酰胺(尼龙)和聚对苯二甲酸乙二醇酯, 其中聚烯烃类占检测量的 55% 以上, 且主要是纤维类和碎片类。除了人造丝用于衣物纤维外, 聚烯烃和聚苯乙烯主要用于海水养殖中的网箱、渔绳渔线、浮子等寿命较短的塑料产品, 可见四十里湾微塑料主要来源于养殖活动, 而城市污水则是四十里湾人造丝的重要来源。

3 结 论

(1)微塑料普遍存在于四十里湾的表层水、河流和潮滩沉积物中, 平均丰度分别是 (5.2 $\pm$ 1.6) N/L、5.2 N/L 和 (163.2 $\pm$ 151.3) N/kg(干重);

分布类型以纤维类为主,其次是碎片类、薄膜类、发泡类以及颗粒类,含量最多的是粒径为0~1.0 mm的微塑料,与其他地区比较,四十里湾微塑料污染程度处于中等水平。

(2)受人类活动影响,四十里湾表层水微塑料丰度近岸高于远岸。水体和滩上的微塑料主要来源于河流和养殖活动。

(3)四十里湾微塑料在水体和滩上的空间分布主要受河流和水动力的影响。因此,单次调查不能有效地掌握微塑料的分布规律,需要将多次调查结果结合海洋动力过程,才能完整地揭示微塑料的分布规律。

参考文献:

- [1] 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] MOORE C J. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat[J]. *Environmental Research*, 2008, 108(2): 131-139.
- [3] 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.
- [4] LIEBEZEIT G, DUBAISH F. Microplastics in beaches of the East Frisian islands Spiekeroog and Kachelotplate[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, 89: 213-217.
- [5] CLAESSENS M, DE MEESTER S, VAN LANDUYT L, et al. Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(10): 2199-2204.
- [6] GRACA B, SZEWC K, ZAKRZEWSKA D, et al. Sources and fate of microplastics in marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea-a preliminary study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(8): 7650-7661.
- [7] 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.
- [8] 熊宽旭,赵新月,周倩,等. 黄海桑沟湾水体及沉积物中微塑料污染特征研究[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(2): 198-204, 220.
- [9] 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.
- [10] QIU Q X, PENG J P, YU X B, et al. Occurrence of microplastics in the coastal marine environment: first observation on sediment of China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 98(1/2): 274-280.
- [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] ZHANG K, SU J, XIONG X, et al. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet plateau, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 450-455.
- [13] 刘东艳,申旭红,王玉珏,等. 烟台四十里湾表层沉积物有机质来源及环境意义[J]. *海洋学报*, 2012, 34(5): 205-212.
- [14] 周倩. 典型滨海滩涂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.
- [15] DAI Z F, ZHANG H B, ZHOU Q, et al. Occurrence of microplastics in the water column and sediment in an inland sea affected by intensive anthropogenic activities[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 1557-1565.
- [16] SONG Y K, HONG S H, JANG M, et al. Large accumulation of micro-sized synthetic polymer particles in the sea surface microlayer[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(16): 9014-9021.
- [17] 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.
- [18] LEBRETON L C M, VAN DER ZWET J, DAMSTEEG J W, et al. River plastic emissions to the world's oceans[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15611.
- [19] 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.
- [20] ZHANG B, WU D, YANG X, et al. Microplastic pollution in the surface sediments collected from Sishili Bay, North Yellow Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 141: 9-15.