

烟台海岸带微塑料的污染特征研究*

Research on the Pollution Characteristics of Microplastics in Yantai Coastal Zone

摘要 为揭示近海海岸带微塑料的分布特征与主要来源, 本文聚焦烟台海岸带区域, 对潮滩、水体、沉积物和河流等不同的环境介质进行了季节性连续调查。结果表明, 烟台海岸带微塑料的丰度在不同环境介质中存在差异, 并具有显著的季节特征。在形状组成上, 水体和沉积物中微塑料检出有纤维和碎片两种形状, 以纤维为主; 而潮滩沉积物中的微塑料则主要有纤维和发泡类, 夏季以发泡类为主, 说明微塑料的分布直接受人类养殖活动的影响。调查数据显示微塑料在水体中垂直运动相对复杂, 纤维和碎片类微塑料更易于被生物附着而沉降至海底集聚。受河流、大气沉降、水体运输等多种环境因素影响, 水体和海底沉积物是近岸海洋微塑料的主要存在介质, 大气沉降可能是水体和海底沉积物中纤维类微塑料的重要来源。

关键词 微塑料; 海岸带; 环境介质; 养殖活动; 垂直运动

■文/程姣姣 李艳芳 邹涛 唐诚

DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2020.23.008

微塑料污染作为全球关注的新环境问题, 在世界各地被广泛检测出^[1]。在我国, 微塑料的研究工作也在陆续开展中, 在全国范围的调查中均已发现了微塑料的存在, 如在渤海、黄海、东海、南海^[2-5], 长江口、珠江口等东部近岸海域^[6], 内陆主要径流^[7]和湖泊^[8]等。调查发现, 长江口微塑料丰度达到了 $4137.3 \pm 2461.5 \text{ n/m}^3$ ^[6], 北黄海微塑料的丰度为 $545 \pm 282 \text{ n/m}^3$ ^[2], 但东海微塑料丰度只有 0.31 n/m^3 ^[3]。很明显, 这种区域性丰度差异是由海洋环境和人类活动影响造成的, 不同区域微塑料的污染状况不同。

海岸带区域作为连接人类活动与海洋最为活跃的地区, 是海洋微塑料污染研究最为集中的区域。但是在目前针对海岸带微塑料污染的研究中, 主要是针对单一环境介质的污染状况研究, 如研究潮滩微塑料、近岸水体、海底沉积物等的污染状况^[9-11], 没有系统性研究海岸带多环境介质

中微塑料的整体污染状况。山东烟台是我国重要的港口城市和渔业基地。随着经济发展, 烟台四十里湾承载的人类活动带来的压力与日俱增, 尤其是海岸带区域, 渔业、养殖业、海洋捕捞等活动直接给海岸带环境带来了显著的影响。该地区集中发展海水养殖、旅游、海上垂钓, 导致大量塑料碎片进入沿海海滩和海洋。本文选取烟台四十里湾为研究对象, 系统研究海岸带不同环境介质中微塑料的分布状况, 开展海岸带微塑料三维动态分布的初步探索, 为海岸带微塑料污染监控提供基础依据。

材料与方法

研究区域及样品收集

烟台四十里湾位于北黄海南部海域, 东北部与北黄海相连, 水深8~15m, 岸线较为平直, 基本沿西北—东南走向, 属于狭长开放型海湾。本研究采样站位选取河流、潮滩沉积物、水体和海底沉积

物一共18个, 其中3条河流各1个站位(R1~R3)、潮滩7个采样站位(B1~B7)、水体和海底沉积物采用相同的8个站位(S1~S8, 见表1)。

样品分别于2019年2月、5月、8月和11月采集。采样时, 在低潮时采集位于潮上带和潮间带的2个潮滩沉积物样品, 使用不锈钢采样铲随机采集3个大小为30cm×30cm, 约2cm深的样方, 放入自封袋避光保存, 当天送回实验室。水体采样分为表层和底层水(12m, 水深不足12m的采集水底样品), 使用不锈钢采水器或水泵采集20L水样进行过滤分析。海底沉积物使用箱式采泥器采集海底表层5cm的沉积物(受条件限制2月未采集海底沉积物)。所有采集样品装入样品袋避光保存, 调查完成后统一运回实验室处理。

水体及沉积物中微塑料提取

水体样品

水体样品的分离主要使用过滤

*基金项目:国家重点研发计划项目(2016yfc1402202);国家自然科学基金项目(41806029);山东省自然科学基金项目(ZR2018QD006);烟台市重点研发计划(2017ZH095);中国科学院国际伙伴计划(133337KYSB20160003)

表1 烟台海岸带调查站位信息

采样点	经度	纬度
S1	121.4858° E	37.5296° N
S2	121.5239° E	37.51436° N
S3	121.5603° E	37.4972° N
S4	121.5895° E	37.47704° N
S5	121.5574° E	37.45592° N
S6	121.516° E	37.46927° N
S7	121.4846° E	37.48508° N
S8	121.4707° E	37.51054° N
R1	121.5782° E	37.42974° N
R2	121.5593° E	37.41592° N
R3	121.4709° E	37.46877° N
B1	121.5789° E	37.43503° N
B2	121.5548° E	37.43931° N
B3	121.5367° E	37.44786° N
B4	121.5127° E	37.45309° N
B5	121.4716° E	37.47187° N
B6	121.4587° E	37.48352° N
B7	121.4494° E	37.51633° N

进行二次抽滤，并用蒸馏水洗净滤膜上的盐分，将滤膜置于培养皿中。海底沉积物处理过程与潮滩沉积物的处理过程相似，但未经过筛网直接进行浮选。所有滤膜均放置在4℃的冰箱保存。

数据处理及分析

使用体视显微镜对滤膜上的微塑料样品进行数量、颜色和类型统计，并用显微镜摄像系统测量塑料微粒的最大边缘长度。使用衰减全反射傅里叶红外光谱仪对微塑料样品进行成分鉴定。使用高分辨扫描电子显微镜观测微塑料的微观形貌。水体中微塑料的丰度单位以每升微塑料个数表示 (n/L)。沉积物中微塑料的丰度单位则表示为每千克干重微塑料个数 (n/kg)。

结果与分析

本实验选取2月、5月、8月、11月代表全年4个季度（分别为冬、春、夏、秋），对四十里湾潮滩、水体、海底微塑料进行检测，检测结果用以代表烟台海岸带微塑料污染情况。结果如下。

微塑料在烟台海岸带潮滩表层沉积物中的分布

潮滩微塑料的丰度分布范围为20.4~514n/kg，全年平均微塑料的丰度为108.5±122.0n/kg。潮滩微塑料的丰度存在季节变化特征，平均看来冬季微塑料的丰度最高，这与长江口潮滩的调查结果一致^[5]，主要是由于冬季降水的减少增加了微塑料在潮滩的滞留性。如图1所示，潮滩微塑料的分布明显受取样位置的影响，冬季除了B5站位潮间带微塑料含量高于潮上带，其他位点潮上带的微塑料丰度普遍高于潮间带。

图2显示了潮滩微塑料的类型分

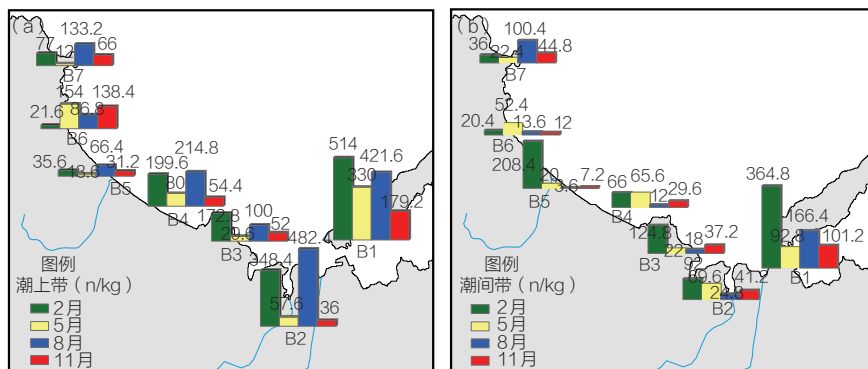


图1 烟台海岸带潮滩微塑料丰度分布图
(a) 潮上带 (b) 潮间带

法。使用20μm的尼龙滤膜对水样进行抽滤，将滤膜上的物质转移至250mL的高型烧杯中，加入50mL30% H_2O_2 溶液，盖上玻璃皿后室温放置48h，然后移至60℃电热板进行消解，至烧杯中无可见有机质时则样品消解完成。用5μm的硝酸纤维素滤膜再次抽滤，将滤膜置于干净的培养皿中进行微塑料检测。

沉积物样品

采用连续流动分离浮选的方法对

沉积物样品进行分离^[12]。潮滩沉积物样品在60℃条件下干燥72h，恒温恒重后，取500g干重沉积物过5mm的网眼筛。使用 $CaCl_2$ 溶液（密度为1.3g/cm³）进行浮选，用20μm的尼龙滤膜对上清液进行抽滤，将分离得到的物质加入50mL30% H_2O_2 溶液进行消解，室温放置48h后，移至60℃电热板加热，直至烧杯中无可见有机质。再用 $ZnCl_2$ 溶液（密度为1.5g/cm³）进行二次浮选，采用5μm的硝酸纤维素滤膜

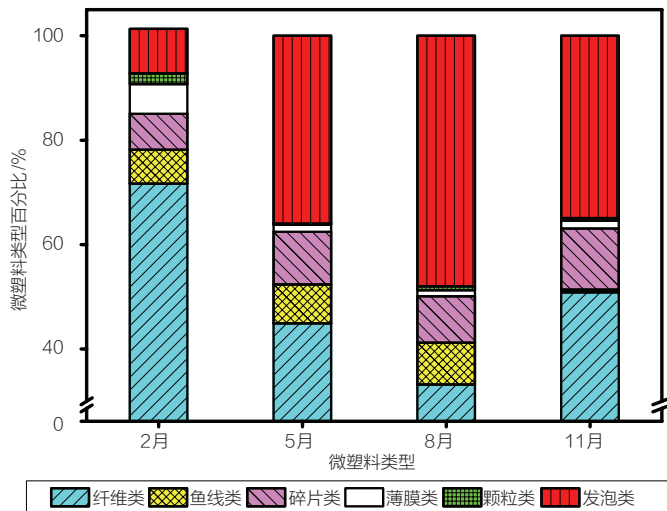


图2 潮滩微塑料类型的季节分布

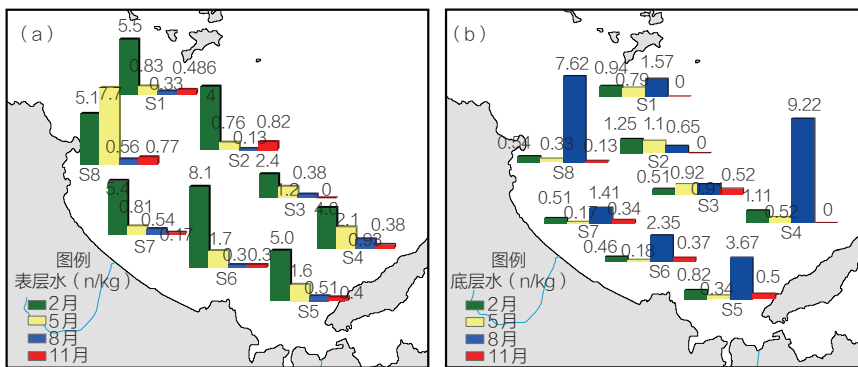


图3 烟台海岸带海水微塑料丰度的季节分布图 (a) 表层水 (b) 底层水

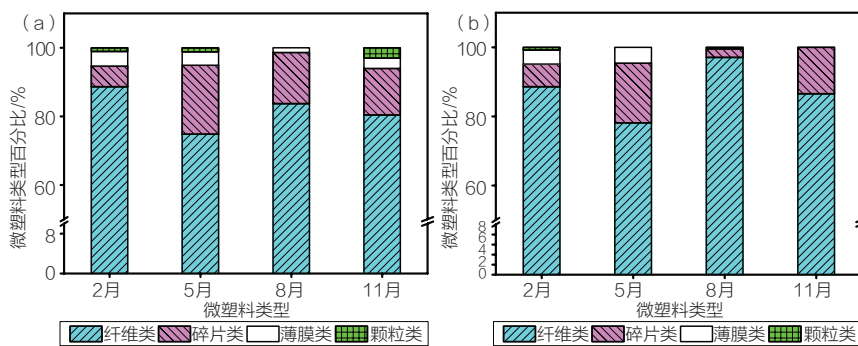


图4 表、底层水中微塑料类型组成的季节分布 (a) 表层水 (b) 底层水

布, 四个季度潮滩沉积物均有不同丰度的微塑料被检出, 纤维状、发泡类、碎片状、渔线、颗粒和薄膜类的微塑料均被检测到。在所有的7个位点中, 纤维类和发泡类两种形状微塑料所占比例最高, 达到80%以上, 其次是碎片类和鱼线类微塑料, 还有少

量的薄膜类微塑料。纤维类和发泡类微塑料的分布具有显著的季节特征, 夏季发泡类微塑料比例增加, 纤维类减少; 而冬季与之正相反, 纤维类最多。颗粒类微塑料含量最少, 其次是薄膜类微塑料, 颗粒类微塑料只在冬季和夏季出现过。本研究所检出的微

塑料粒径按1mm间隔划分, 经分析, 烟台海岸带潮滩微塑料的粒径主要集中在0~1mm和1~2mm, 所占比例达60%以上。

微塑料在烟台海岸带水体中的分布

如图3所示, 水体中微塑料丰度在表、底层存在空间差异。从季节平均来看, 表层水中冬季微塑料丰度最高, 夏季偏低; 而在底层水中则是夏季微塑料丰度最高。微塑料年平均丰度在表层水为 2.0 ± 2.4 n/L, 在底层水为 0.8 ± 0.3 n/L, 除夏季外, 表层水丰度显著高于底层水。空间分布上显示, 表层水中近岸微塑料丰度高于远岸区域而底层水中近岸微塑料丰度低于远岸区域。

如图4所示, 8个采样点表、底层水中均有纤维、碎片、薄膜和颗粒类4种类型的微塑料被检测到, 并且在所有位点中纤维状微塑料所占比例均高于碎片状微塑料, 纤维状微塑料含量均在70%以上。总体看来, 不同类型的微塑料占比时空变化不大, 春季碎片状微塑料在表、底层均有增加, 而纤维状微塑料则略有减少; 夏、秋季底层水中只有纤维类和碎片类两种类型的微塑料存在。粒径分布上, 表、底层水中检出的微塑料均以<2mm粒径为主。

微塑料在海底沉积物中的分布

烟台海岸带海底沉积物的微塑料丰度平均为 71.3 ± 37.5 n/kg。如图5 (a) 所示, 微塑料在海底沉积物中的分布存在显著的季节特征。总体看来, 11月海底沉积物中微塑料的含量相对最高, 而8月与5月微塑料的含量分布特征不明显。微塑料在空间上没有明显的分布差异。如图5 (b) 所示, 在微塑料的形状组成上, 所有位点均只检出了纤维状和碎片状两种类

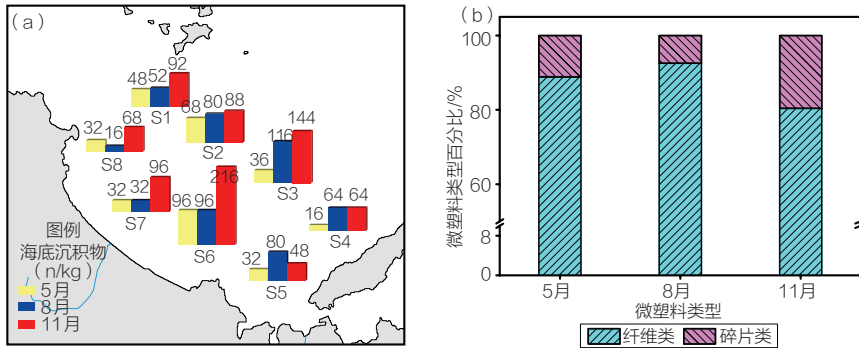


图5 海底沉积物中微塑料丰度(a)和组成形状(b)的季节分布

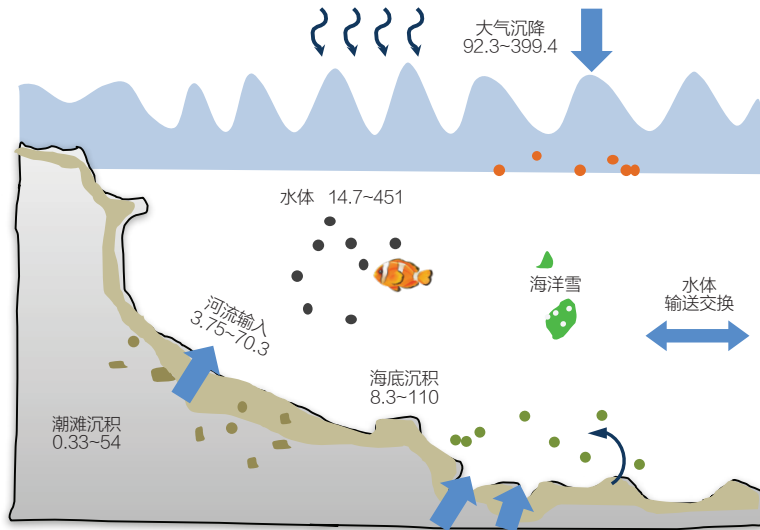


图6 烟台海岸带不同环境介质中微塑料分布图 ($\times 10^{10}$ n/a)

型, 没有发现薄膜类和颗粒类的微塑料, 其中纤维状占比超过70%, 这与Zhang等^[13]的结果一致。粒径分布上小于1mm的占比最高, 其次是1~2mm的。

讨论

潮滩微塑料来源

烟台海岸带潮滩微塑料分为纤维、发泡、碎片、鱼线、薄膜和颗粒6种类型, 经现场调查并参照相关研究, 大致可判断烟台海滩不同类型微塑料的主要来源。纤维类微塑料主要来源于化纤类衣物的纤维残体、废弃的绳索以及大气沉降, 而且大气沉降所占比例可能更大^[14]。除去纤维类,

发泡类微塑料是潮滩中占比最大的类型。烟台沿海的养殖活动集中在5—11月, 对应这期间潮滩上发泡类微塑料的大量增加说明发泡类微塑料主要来源于养殖活动。其主要来源于渔业养殖使用的发泡浮子、泡沫箱、泡沫板等塑料垃圾, 这些密度较小的发泡类塑料在日晒、风力等外力作用下老化破碎形成微塑料, 从而聚集在潮滩上。将检测出的鱼线与沙滩上采集的渔网、渔线进行成分鉴定, 发现二者成分一致, 都是聚乙烯和聚丙烯, 说明渔业养殖使用的渔网、鱼线等是潮滩鱼线的主要来源, 这与周倩等^[15]在滨海潮滩的发现一致。薄膜类微塑

料主要来源于食品的普通塑料包装袋。少量的碎片和颗粒类微塑料可能直接来源于塑料废弃物的裂解破碎。对比我国沿海潮滩, 可以发现潮滩微塑料的类型分布直接与人类活动密切相关, 如厦门湾^[9]、香港^[16]等潮滩均发现了大量的发泡类微塑料, 这些微塑料直接来源于当地的渔业养殖活动。而在长江口的潮滩中只检出了纤维状和碎片状两种形状的微塑料^[5], 这主要是因为调查的长江口潮滩附近主要是河道运输, 没有受养殖活动的影响。

水体微塑料的垂向迁移过程

水体中的微塑料通过扩散、悬浮/再悬浮、沉降、埋藏等过程在海水表层、水体、海底沉积物之间进行迁移。使用Pearson相关性来检测微塑料在水体中垂直运动的可能性。结果显示底层水与海底沉积物中的微塑料丰度相关性不大(相关系数均低于0.5), 而表层水与底层水中微塑料的丰度相关性也小于0.5, 只在夏季出现显著相关(相关系数为0.83)。这说明从表层到海底水体微塑料的垂向迁移并不是简单的线性递减或指数衰减, 微塑料在水体中的分布具有空间差异性。现有的调查数据不能有效地解释微塑料是如何从表层海水迁移到底层水直至海底沉积物的, 这需要现场实验和更多的调查数据。

如图4和图5(b)所示, 在微塑料的类型上, 纤维类和碎片类是从表层水体到底层水体直至海底沉积物中占比最多的类型, 这与莱州湾微塑料垂向分布的调查结果一致^[17]。随着垂直深度的增加, 纤维类和碎片类两种类型的微塑料总占比也逐渐升高, 海底沉积物中只检出了纤维类和碎片类微塑料的存在, 微塑料在垂直方向上类型分布的一致性表明微塑料存

在垂直方向的迁移。由于受湍流、沉降一再悬浮、生物摄食、生物附着等的影响^[18]，垂直方向上如何迁移尚不清楚。研究发现，在相同的水文条件下，具有更高比表面积的塑料颗粒（如纤维和碎片）更容易发生生物絮凝作用，形成密度更大的凝聚体，使微塑料具有更高的沉降速率^[19]。如图4所示，8月表层水中纤维类和碎片类微塑料更易发生生物絮凝反应从而垂直迁移至底层水中，造成夏季底层水微塑料丰度显著增大[见图3(b)]。

正如Woodall等^[20]在海底沉积物中发现的一样，微塑料主要以聚酯类纤维的形式存在于海底。我们在烟台近岸海底沉积物中也发现了大量的纤维类微塑料。虽然海底微塑料的分布呈现显著的季节特征，但是其季节分布与水体微塑料的季节分布不一致。这说明，海底沉降—埋藏过程是海底微塑料的重新再分配过程，湍流混合、生物扰动等都会影响海底微塑料的重新分布^[21]。

研究表明微塑料在垂直方向的混合和迁移对微塑料的丰度和尺寸分布有很大的影响^[22]。除了海洋水动力状况能影响海水中微塑料的变化和迁移行为^[23]外，生物过程也可以影响微塑料的垂直分布，而且是一个不可忽略的重要过程。Kowalski等^[24]通过实验发现塑料缝隙可以镶嵌泥沙、黏土矿物等颗粒物从而增加微塑料的沉降速度。而微塑料与浮游植物、有机碎片、小颗粒等团聚体的结合，同样可以促进微塑料在水体中的沉降^[21]。赵世焯^[25]在研究河口微塑料赋存状态时指出，海洋雪是微塑料在海洋表、底层间传输的一种潜在途径。通过海洋雪，微塑料可以由表层向下迁移进而沉降于海底，从而使海底成为海洋微塑料的主要汇^[20]。

烟台海岸带微塑料的总体分布特征

从物质的迁移赋存角度考虑，微塑料除了有陆源、海源两大类外，大气沉降也是不可忽视的来源。烟台海岸带海域面积为86.7km²，平均水深10m，岸线长20km，沿海潮滩的面积为2.89km²。依据各个站位水体、海底沉积物、潮滩以及河流中微塑料含量的最大值和最小值，推算各环境介质中微塑料的年均含量，其中大气沉降量采用田媛等^[14]在环渤海海域的调查结果，烟台海域的降通量为35.7~154.4nm⁻²d⁻¹。最终得到微塑料在烟台海岸带不同环境介质中的年均分布状态（见图6）。每年大气沉降输入量为92.3×10¹⁰~399.4×10¹⁰n，河流输入量为3.75×10¹⁰~70.3×10¹⁰n，水体中微塑料含量约14.7×10¹⁰~451×10¹⁰n，海底沉积物中微塑料含量约8.3×10¹⁰~110×10¹⁰n。从微塑料来源来看，河流和大气沉降是海洋微塑料的重要来源，尤其是海洋中的纤维类微塑料，大气沉降输入的纤维类微塑料显著高于河流输入量^[14, 26]，大气沉降贡献率达65%，河流仅占11.5%，海洋输送占23.5%，大气沉降输入的纤维类微塑料可能是水体和海底沉积物中微塑料的主要来源[见图4、图5(b)]。在不考虑微塑料在不同海域水体交换的输送量的情况下，评估烟台潮滩、水体和海底三种不同环境介质中微塑料的贡献，结果发现水体中微塑料的含量最高（63%~73%），海底沉积物微塑料占17.9%~35.6%，潮滩上微塑料的贡献率仅为1.4%~8.8%。这里海底和潮滩沉积物的贡献被低估了，因为沉积物的厚度只考虑了表层5cm。虽然潮滩微塑料的丰度高于海底沉积物，但潮

滩面积偏小，导致潮滩微塑料的贡献率远低于海底沉积物。总体看来，近岸海域微塑料主要存在于水体中，其次是沉降到海底沉积物中，剩下的一部分与其他海域进行输送，一部分被海浪搁浅至潮滩上积累。

结论

本文研究结果表明：（1）烟台海岸带微塑料在水体和沉积物中聚集，表层水微塑料含量显著高于底层水，海底沉积物中微塑料的年均丰度为71.3±37.5n/kg，主要有纤维和碎片两种类型，其中纤维类所占比例最高。（2）潮滩微塑料年均丰度为108.5±122.0n/kg，比海底沉积物的丰度值偏高。微塑料类型主要有纤维类和发泡类两种，夏季发泡类微塑料含量最大。（3）潮滩微塑料的类型组成和丰度分布很明显直接受人类活动影响，尤其是养殖活动。（4）微塑料在水体中存在垂向迁移运动，调查数据显示微塑料的垂直运动机制相对复杂，纤维类和碎片类微塑料更易于被生物附着而发生沉降反应。（5）水体及沉积物中微塑料的集聚受到河流、大气沉降、水体运输等多种环境动力因素影响。从微塑料总量分布推算，水体和海底沉积物是近岸海洋微塑料的主要存在介质，大气沉降可能是水体和海底沉积物中纤维类微塑料的重要来源。^{HB}

参考文献

- [1]VAN CAUWENBERGHE L, DEVRIESE L, GALGANI F, et al. Microplastics in sediments: a review of techniques, occurrence and effects[J]. Marine Environmental Research, 2015, 111: 5-17.
- [2]ZHU L, BAI H, CHEN B, et al. Microplastic pollution in North Yellow Sea, China: Observations

- on occurrence, distribution and identification[J]. *The Science of the total environment*, 2018, 636: 20-29.
- [3]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]. *海洋与湖泊*, 2018, 49(1): 62-69.
- [4]黄铀佳. 我国南海区微塑料的污染现状和未来展望[J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(6): 40-47.
- [5]朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 等. 长江口潮滩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.
- [6]ZHAO S, ZHU L, WANG T, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze estuary system, China: first observation on occurrence distribution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 86(12): 562-568.
- [7]PENG G, XU P, ZHU B, et al. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: a case study of risk assessment in mega-cities[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 448-456.
- [8]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.
- [9]刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 等. 厦门湾海湾微塑料污染特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1217-1221.
- [10]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, 2: 198-2504.
- [11]ZHAO J, 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: 637-645.
- [12]ZHOU Q, ZHANG H, FU C, et al. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 201-208.
- [13]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, 14: 9-15.
- [14]田媛, 涂晨, 周倩, 等. 环渤海海岸大气微塑料污染时空分布特征与表面形貌[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(4): 1401-1409.
- [15]周倩, 章海波, 周阳, 等. 滨海河口潮滩中微塑料的表面风化和成分变化[J]. *科学通报*, 2018, 2: 214-224.
- [16]FOK L, CHEUNG P K. Hong Kong at the Pearl River Estuary: A hotspot of microplastic pollution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 99(1): 112-118.
- [17]TENG J, ZHAO J, ZHANG C, et al. A systems analysis of microplastic pollution in Laizhou Bay, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 745, 140815.
- [18]LIUBARTSEVA S, COPPINI G, LECCI R, et al. Tracking plastics in the Mediterranean: 2D Lagrangian model[J]. *Mar. Pollut. Bull.* 2018, 129: 151-162.
- [19]RYAN P. Does Size and Buoyancy Affect the Long-distance Transport of Floating Debris?[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10: 84019.
- [20]WOODALL L C, SANCHEZ-VIDAL A, CANALS M, et al. The deep sea is a major sink for microplastic debris[J]. *Royal Society Open Science*, 2014, 1: 140317.
- [21]KATIJIA K, CHOY C A, SHERLOCK R E, et al. From the surface to the seafloor: how giant larvaceans transport microplastics into the deep sea[J]. *Science Advances*, 2017, 3(8): e1700715.
- [22]DESFORGES J 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.
- [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]KOWALSKI N, REICHAARDT A M, WANIEK J J. Sinking rates of microplastics and potential implications of Their alteration by physical, biological, and chemical Factors[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 109(1): 310-319.
- [25]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.
- [26]周倩, 田崇国, 骆永明. 滨海城市大气环境中发现多种微塑料及其沉降通量差异[J]. *科学通报*, 2017, 62(33): 3902-3909.
- (程姣姣, 中国科学院烟台海岸带研究所、烟台大学; 李艳芳系中国科学院烟台海岸带研究所助理研究员; 邹涛、唐诚系中国科学院烟台海岸带研究所副研究员。李艳芳系本文通讯作者)