

综 述

海洋微塑料污染现状及其环境行为效应的研究进展*

包木太^{1,2}, 程媛^{1,2}, 陈剑侠^{1,2}, 赵兰美^{1,2}, 李天滋², 戚清淳², 赵嘉嘉², 李一鸣^{1,2}, 陆金仁²

(1. 中国海洋大学海洋理论与工程技术教育部重点实验室/中国海洋大学海洋高等研究院, 山东 青岛 266100;

2. 中国海洋大学化学与化工学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 海洋微塑料污染问题已经在全球范围内引起了普遍关注,位列全球十大新兴环境问题之一。因其本身尺寸微小、数量庞大且来源广泛导致其危害远超普通尺寸的海洋塑料垃圾,加之在海洋水动力作用下的迁移和沉降导致其污染波及区域十分广泛。同时,微塑料自身携带的添加剂在海水中的释放、与金属、有机污染物及微生物等构成的复合污染物均会对海洋动植物的生长、生存和繁殖产生负面效应,还可能通过食物链传递对人类健康构成潜在威胁。通过调研国内外文献,本文在简要介绍海洋微塑料污染问题的兴起及相关概念的基础上,对海洋微塑料的典型来源、分布情况和污染现状进行了阐述,同时还对海洋微塑料与其他类型污染物的相互作用及其对海洋生物的影响等环境行为效应进行了总结和综述。此外,本文对海洋微塑料污染问题的未来研究方向进行了分析和展望,以期对海洋微塑料污染问题的治理提供参考和借鉴。

关键词: 微塑料;污染现状;环境行为效应;复合污染物;展望

中图法分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)11-069-12

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20200054

引用格式: 包木太,程媛,陈剑侠,等.海洋微塑料污染现状及其环境行为效应的研究进展[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2020,50(11):69-80.

BAO Mu-Tai, CHENG Yuan, CHEN Jian-Xia, et al. Research progress on the current status and environmental behavior effect of microplastic pollution[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(11): 69-80.

自 20 世纪初期发明以来,塑料为人类的生活带来了翻天覆地的变化,但由塑料引发的环境污染问题也愈发凸显并亟待解决。有研究报道,全球 192 个邻海国家每年向海洋中排放的塑料垃圾约为 480~1 200 万 t,而中国的排放量居于前列^[1]。据联合国环境规划署统计,全球每平方千米海域中漂浮的塑料数目约为 1.8 万个,若将重污染水域算在内,该数值可激增至 38 万,平均每年造成经济损失超过 130 亿美元^[2-3]。

目前,塑料/微塑料污染问题已得到了各国研究者的普遍关注,并在全球范围内开展了海洋微塑料污染情况的相关综合调查研究^[4-6],中国也在近五年陆续开始了针对微塑料的相关研究^[7]。研究发现饮用水、食盐、海洋鱼类和贝类中均有微塑料的踪迹^[8-11],甚至在人类的粪便中也检测出了多达 9 种类型的微塑料^[12]。由此可见,微塑料污染对海洋生态和人类健康构成了潜在威胁。本文将从微塑料污染研究的兴起为切入点,在对微塑料的定义和分类进行梳理的基础上,分别

对海洋微塑料的污染现状、环境行为效应等问题进行针对性阐述。以期在微塑料污染问题发展脉络的基础上,加深对该新兴污染物的认识,为海洋微塑料的治理提供借鉴。

1 微塑料研究的兴起及相关概念

1.1 微塑料研究的兴起

2004 年普利茅斯大学国际海洋垃圾研究中心主任 Richard Thompson 等通过调查研究发现^[13]:海洋中广泛分布着大量尺寸微小的塑料碎片和纤维,他们中的一些最终会漂浮到远洋带并沉积在海洋生物的栖息地中。需要指出的是,该研究并不是首次对海洋塑料污染进行报道,类似的研究可以追溯到 1970 年代^[14-15]。但直到这篇论文在《科学》杂志上发表后,人们才意识到这种尺寸微小且数量众多的污染物可能构成的危害。从某种程度上说,该篇论文可以看作是一个节点,揭开了人们对微小型塑料污染物研究的序幕。在 2014

* 基金项目:中央高校基本科研业务费专项项目(201961014);中央高校基本科研业务费国家重大项目培育项目(201822009)资助

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(201961014); the Fundamental Research Funds for the Central Universities(201822009)

收稿日期:2020-02-25;修订日期:2020-05-31

作者简介:包木太(1971-),男,教授,博导。E-mail: mtbao@ouc.edu.cn

年联合国环境规划署(UNEP)发布的年鉴中,海洋微塑料被正式列为全球十大新兴环境问题之一^[3]。从图1可以看出,2014年以后,相关论文的数量呈指数趋势急剧增加,这意味着海洋微塑料污染问题已经引起了全世界的普遍关注。

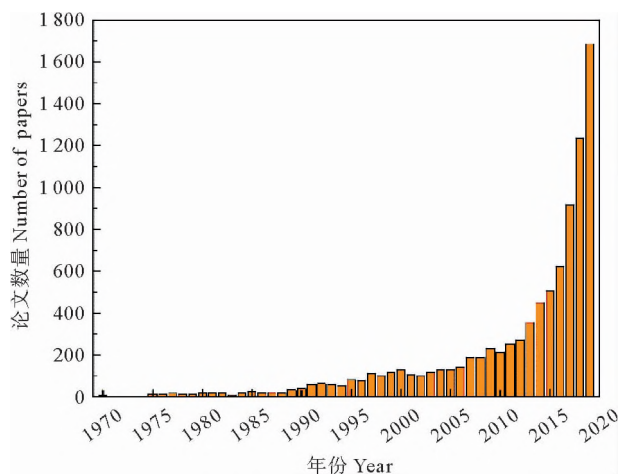


图1 1970年至2018年间发表的有关“塑料碎片/微塑料污染”论文数量的增长趋势

Fig.1 Growth trend in the number of scientific papers about "plastic debris/microplastic pollution" between 1970 and 2018 (Web of Science)

1.2 微塑料研究涉及的相关概念

在我们着手处理微塑料污染这个问题之前,首先需要明确对“微塑料”的定义和分类有清晰的认识。众多国际组织机构和研究人員已经意识到解决该问题的重要性和紧迫性^[16-18],但目前在世界范围内还没有就此达成共识。

早在2008年,华盛顿大学塔科马校区与美国国家海洋和大气管理局(NOAA)联合举办了首届国际微塑料海洋碎屑的产生、影响和命运研究研讨会(International Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris),会上将小于5 mm的塑料颗粒定义为微塑料,但同时也提到333 μm 可作为微塑料尺寸的下限^[19]。之所以选用5 mm作为微塑料的划分界限是基于这样一个前提:可以将大量的小颗粒囊括在内,这些小颗粒很容易被生物摄食,而且这些小颗粒造成的威胁可能与较大的塑料制品造成的威胁不同^[16];而设置333 μm 作为下限尺寸并不意味着实际海洋中微塑料的最小尺寸为333 μm ,而是因为开展拖网调查时普遍使用这一尺寸网眼的浮游生物网来捕获浮游生物和漂浮的碎片^[19]。2014年,全球最大的非营利性环境机构国际自然保护联盟(IUCN)^[20]对微塑料进行了进一步定义:尺寸小于5 mm的微小塑料或纤维为“microplastics”(MPs),尺寸小于100 nm的则为“nanoplastics”(NPs)。

在诸多的研究中,也不乏相关研究人員和组织机构采用1 mm作为界定微塑料的尺寸,Costa等^[21]在2009年对巴西某城市海滩上的塑料颗粒进行研究时提及,没有普遍认可的专业术语对塑料碎片和颗粒的尺寸进行描述,在参考了前人的研究后提出:将尺寸介于1~20 mm的塑料碎片称作“small”,将小于1 mm的则称为“microplastics”;Browne等^[22-23]在研究六大洲海岸线微塑料空间分布与其源和汇的关系、被摄食的微塑料在贻贝循环系统中的转移、河口岸线塑料碎片的分布特征时均将1 mm作为微塑料的界定标准;联合国海洋污染科学问题联合专家组(GESAMP)于2015年发布的一份报告中亦对塑料污染物的术语和相对应的尺寸进行了详细描述,其中规定“nano- $<1\ \mu\text{m}$ ”、“micro-介于 $1\ \mu\text{m}$ 和1 mm之间”、“meso-介于1 mm~2.5 cm之间”、“macro-介于2.5 mm和1 m之间”、“mega- $>1\ \text{m}$ ”^[16]。

至于微塑料的分类,Sundt等^[24]提出的分类方法得到了包括国际自然保护联盟(IUCN)^[25]在内的研究者和研究机构的认可^[16, 26]。Sundt将微塑料大致分为了两类^[24],一类是初级微塑料,另一类则是次级微塑料。前者是指在人类生产生活过程中直接产生并释放到环境中的塑料微粒,例如个人清洁日化用品中添加的塑料磨砂微珠就是一种典型的初级微塑料^[18, 27-28];后者则是指由尺寸较大的塑料碎片在环境中经一系列物理、化学和生物过程后形成的尺寸较小的塑料碎片。

由此可见不明确的术语和定义不仅会引起误解,还会拖慢该领域的研究进度,阻碍微塑料污染治理措施的出台^[17]。就尺寸的界定来看,微塑料的形状各异导致的高径比差异悬殊,单纯依靠单一参数对其进行分类和界定无法满足目前需求。但随着研究人員对微塑料研究的不断深入,国际组织机构和各国政府对微塑料污染的监察监管逐渐走向正轨,填补“微塑料”相关术语模糊这一鸿沟的迫切性和重要性也日渐凸显。为了尽快达成共识,近期微塑料研究领域的众多专家就其定义和分类框架提出了合理化建议^[17]:其中不再单纯依赖尺寸分级,而是采用了聚合物组成、固态、溶解度这三个物理化学性质作为定义标准,同时采用大小、形状、颜色和来源四个分类词对其进行分类;在此基础上,专家们建议将“塑料碎片”定义为由合成或经过大量改性的天然聚合物组成的物体,作为一种基本成分(标准I),当它在自然环境中没有实现预期的功能时,在20 $^{\circ}\text{C}$ 下是固体(标准II)和具有不溶性(标准III)。该框架的提出不仅夯实了微塑料研究的基础,为该领域未来研究的标准化和规范化做出了积极贡献,随着研究的不断深入,此方案也将得到进一步的修订和完善。

2 海洋微塑料的污染现状

海洋微塑料主要来自于陆源污染物、海源污染物和大气污染物,而大气中微塑料的实际来源也是陆源污染,因此陆源和海源污染才是海洋微塑料的根本来源,据统计 98% 的初生微塑料来自于陆源塑料垃圾,仅有 2% 来自海上活动^[25]。

2.1 海洋微塑料的源和汇

为了管控海洋微塑料污染,提出具有针对性的治理举措,需首先明确海洋微塑料的主要来源和最终聚集地。2014 年 IUCN 发布的报告指出,海洋中所有塑料垃圾量的 15%~31% 为初生微塑料^[25],这些初生微塑料的关键来源包括轮胎、合成纺织品、船舶涂料、路面标线、个人护理产品、微球塑料原料和城市灰尘七类^[24-26,29-30]。报告中指出:合成纤维和合成橡胶轮胎是海洋中初级微塑料(石油基)污染的主要输入源,约占总输入量的三分之二^[25-26];另外,城市灰尘对海洋初级微塑料污染的输入也不容忽视,仅次于轮胎和合成纺织品。但为人们所熟知的个人护理用品中的塑料微珠释放量却仅占海洋微塑料输入量的 2%^[25]。

塑料制品、橡胶制品及人工合成纤维制品等在其生命周期内的每一阶段都会有微塑料的产生,在使用和维护时产生的量尤其大。在产品的生产加工过程中,塑料原料熔融或粉碎时会在设备上发生粘附、产生粉尘,其中的一些会随雨水的冲刷或洗涤水而汇入海中,还有一些会直接进入大气中;渔业、海上养殖业所使用工具和设施的磨损、老化而产生的微塑料也是微塑料常见的海源输入;洗衣废水是纤维状海洋微塑料的主要来源,实验条件下家用洗衣机平均每洗一件衣服会释放超过 19 000 条纤维并随洗衣废水直接排放^[31],另外还有一些纤维则会在衣物烘干过程中进入大气。曾有报道指出,海洋沉积物中的微塑料污染主要来源于洗衣废水中的各类细小的纺织纤维^[32-33]。轮胎的磨损是环境中微塑料的重要全球来源,据估计每年由于汽车轮胎磨损产生的微塑料量约为人均 0.23~4.7 kg,远超飞机轮胎磨损、人造草坪、刹车磨损和道路标线等产生的微塑料量,由轮胎磨损产生的微塑料对全球海洋塑料总量的相对贡献率约为 5%~10%,对空气中颗粒物(PM_{2.5})的贡献率为 3%~7%,但该来源一直以来都没有受到人们的重视^[34]。

海洋微塑料的命运与其自身的物理化学特性(如化学成分、密度、尺寸、形状、浮力、表面电荷和疏水性等)和海洋中的动力学条件(水动力过程、风、波浪、潮汐和洋流)息息相关^[35-39]。常见的塑料原料的密度介于 0.8~1.5 g/cm³ 之间,海水的密度介于 1.02~1.07 g/cm³ 之间^[40],当微塑料所受浮力大于其重力时,便会

漂浮在海面,反之则会发生沉降并汇入海底。常见的微塑料种类主要有聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚酰胺、聚酯、聚氯乙烯等,其中像聚乙烯、聚丙烯这类密度小于水的微塑料在进入水体的初期都会漂浮在海面上或悬浮在水中,像聚甲醛这样的重质的微塑料会直接发生垂直迁移并坠入海底。目前在海洋中漂浮着的微塑料总量预计已超 26.8 万 t^[41-42]。在洋流、潮汐的影响下,微塑料会发生迁移和扩散,有的会被海浪冲到岸滩,有的则会在环流中持续累积。当它们与其他生物或非生物发生相互作用后会导致生物淤积、团聚,并在密度大于海水密度后最终坠入海底^[43]。值得注意的是,当微塑料的颗粒尺寸小到一定程度时,无论其密度如何,这些微小的颗粒都会表现出胶体颗粒的性质并悬浮在水体中^[44]。虽然目前水体中有相当量的微塑料存在,但海洋沉积物中的微塑料才是大部分微塑料的最终归宿^[41]。有研究发现北极海冰中也存在微塑料^[45-46],该发现也为微塑料其他可能的归宿提供了依据。

被生物摄食的那部分微塑料也不容忽略。目前有大量报道证实微塑料可被浮游生物、软体生物、鱼类、甲壳类生物、海鸟、海龟等海洋生物摄食^[47-56]。一方面,微塑料的尺寸、大小、颜色多种多样,在外观上对海洋生物产生迷惑,从而被误认为猎物而摄食^[51],已有研究发现几乎所有的海鸟都会误食微塑料^[47]。另一方面,有研究证明塑料中添加的化学添加剂可能会引发食欲,从而会引起珊瑚的兴奋并对其进行主动摄食^[50]。此外,除了与微塑料的尺寸、形状、密度、颜色等特征有关外^[14,57-58],微塑料表面附着的物质也是影响微塑料被生物摄食的因素之一。具有环境特征微塑料在海中不仅可以吸附有机物、营养盐,同样还可以作为微生物、浮游动植物栖息的场所^[59],同时,因为浮游植物是大多数浮游动物的重要食物来源,海洋环境中的藻类等浮游植物与微塑料相互作用形成的聚集体会对浮游动物的摄食产生干扰^[51]。也就是说,塑料表面的这种微环境引起了“捕食增强作用”^[60],致使其更易被生物摄食。

2.2 海洋微塑料的分布

2.2.1 微塑料分布的主要影响因素及其在近海典型区域的空间分布 为了更全面监控全球微塑料污染态势,各国研究者已开展了大量有关微塑料分布和丰度的调查。相关研究主要集中在海水环境方面,据调查有超过 96% 的微塑料相关研究与海水有关,仅有不到 4% 的研究有关淡水中的微塑料^[61]。

就研究区域来看,最初主要集中在河口、湖泊、近海等人类生产生活 and 工业密集的区域^[4,6,41],由此可知海洋中的微塑料的丰度受人类生产生活的直接影

响^[62]。海洋微塑料污染程度与周边人口密度和经济活动的活跃程度呈正相关性^[63]。污水排放、填海造陆、海水养殖、渔业捕捞、沿海旅游等频繁的人类活动向海洋输入了大量的塑料垃圾,加之受风、降雨、洋流和潮汐等自然因素的影响,使大块的塑料垃圾连同大量微塑

料汇集并滞留在近海区域^[64-65];随后大块的塑料垃圾经阳光辐射和海浪拍打发生进一步光氧化降解和机械降解,最终近海区域成为了微塑料污染的重灾区^[7,66]。我国近海典型水体中微塑料的空间分布如表1所示^[67-73]。

表1 我国近海典型水体中微塑料的分布情况

Table 1 Distribution of microplastics in therepresentative waterbody in China coast

采样点 Sampling site	采样方法 Sampling method	丰度/个·m ⁻³ Abundance	尺寸/mm Size	主要形状 Main shape	主要类型 Main type
长江口 ^[67]	采集水样过筛 (32 μm)	4 137.3±2 461.5	0.5~5 (>90%)	纤维 (79.1%)	—
东海 ^[67]	浮游生物网 (333 μm)	0.167±0.138		纤维 (83.2%)	
北黄海 ^[68]	采集水样过筛(30 μm)	545±282	<1 (70%)	薄膜 (58.1%±24.9%) 纤维 (39.1%±22.3%)	聚乙烯 (77.8%)
黄河近河口 ^[69]	采集水样过筛 (50 μm)	4.97×10 ⁵ (雨季) 9.3×10 ⁵ (旱季)	<0.2 (87.94%)	纤维 (93.12%)	聚乙烯 聚丙烯 聚苯乙烯
胶州湾 ^[70]	采集水样过筛 (20 μm)	20~120	<4	纤维 (77.14%)	聚对苯二甲酸乙二醇酯 (56.25%)
珠江口 ^[71]	采集水样过筛 (50 μm)	8 902	<0.5 (>80%)	薄膜(52%) 碎片(47%)	聚酰胺(26.2%) 玻璃纸(23.1%)
南中国海 ^[72]	采集水样过筛 (50 μm) 邦戈网 (333 μm)	2 569±1 770 0.045±0.093	<0.3 (92%)	—	醇酸树脂(22.5%) 聚己内酯(20.9%)
南沙群岛 ^[73]	采集水样过筛 (48 μm)	1 733	<0.5	微珠 (76.5%)	聚氯乙烯(37.9%) 聚酰胺(21%) 聚乙烯(21%)

中国作为一个人口众多的发展中国家,近海的微塑料污染状况受到全球的普遍关注。有研究证实我国近海的微塑料污染程度较重,居于全球前列^[74]。据估计^[42],到2025年中国和印度尼西亚沿海将会成为微塑料的主要聚集地。赵世焯^[7,75-76]对中国部分典型河口内塑料赋存特征进行了调查,发现长江口内与东海采样区域微塑料浓度差接近2 500倍,这说明河流是海洋微塑料污染的一个重要来源,且从临近外海区域延伸至河口内,微塑料污染的严重程度急剧增加,揭示了海洋微塑料的明显陆源特征,且其分布特征主要受珠江

的陆源输入控制。周倩^[77]对渤海海峡客运航道和渤海中心远离海岸区表层海中的中微塑料丰度进行了调查,发现该区域海面微塑料丰度达27.0个/m³,渤海中心区为11.8个/m³,亦印证了离岸越近的海域微塑料污染越严重这一规律。我国周边近海沉积物中微塑料的污染状况也有相关调查研究。Wang等^[78]调查了南黄海的沉积物的微塑料丰度和特征,发现聚丙烯(31%),聚酯(24%),尼龙(19%)和聚苯乙烯(15%)是沉积物中最丰富的聚合物,沉积物中的微塑料丰度均与水深呈正相关,纤维、透明的微塑料和小于0.5 mm

的微塑料是沉积物中微塑料的最主要类型。Zhao等^[79]调查发现中国渤海,北黄海和南黄海沉积物中微塑料平均丰度分别为 171.8、123.6 和 72 个/(kg 干重沉积物),且主要为人造丝、聚乙烯和聚对苯二甲酸乙二醇酯。

除了受到人口密集程度的影响之外,近海的微塑料污染状况一定程度上还与一个国家的污染管控有关,不同地区近海的微塑料污染状况也存在差异^[80]。早在 1987 年就有研究证实南非仅有少部分的污水得到了妥善处置^[81],三十年后该问题仍未得到解决,各类型的污水依旧直接排入下水系统^[82]。有相应研究对南非东南部海岸线的微塑料污染状况进行过评估调查^[83],发现该区域近海沉积物和水体受到了严重的微塑料污染,海滩沉积物中的微塑料丰度介于(688.9±348.2)和(3 308±1 449)个/m²之间,而水中的微塑料介于(257.9±53.36)和(1 215±276.7)个/m³,这些微塑料中绝大部分为纤维状,而这些纤维极有可能来自于没有被妥善处理的城市污水^[80]。

台风和洋流等自然因素亦会对近海的微塑料分布和丰度产生影响。Desforges 等^[4]对东北太平洋和加拿大不列颠哥伦比亚省沿岸的微塑料污染进行研究时发现,东北太平洋、西海岸温哥华岛、夏洛特女王湾和乔治亚海峡四个采样点中,三处的微塑料浓度与陆源污染相关,四个采样点微塑料的平均丰度仅为(2 080±2 190)个/m³,但人口稀少且工业不发达的夏洛特女王湾的微塑料丰度确很高达到(7 630±1 410)个/m³,一方面从太平洋洋流和北海岸洋流汇聚而来的塑料颗粒可能会进入夏洛特女王湾,局部环流起着留住它们的作用,另一方面可能是当地发达的渔业等带来的微塑料污染。Wang 等^[84]还对台风前后桑沟湾内微塑料含量进行了调查研究,发现纤维是主要的微塑料类型,且台风过后海水和沉积物中微塑料含量增加了 40%,同时台风还改变了微塑料的颜色分布,并增加了海水中聚丙烯,聚苯乙烯和聚对苯二甲酸乙二醇酯的比例。

2.2.2 远海及深海典型区域微塑料的空间分布 自 1870 年代起,研究者们逐渐在北大西洋和北太平洋的塑料堆积区开展了小范围的调查^[42]。在北大西洋和太平洋表面和深海中,均有微塑料的踪迹^[85-86],但大洋环流为这些塑料碎片的主要聚集地,五大环流所在位置基本与五大塑料碎片聚集地一致。也就是说微塑料在海洋中的分布极为广泛且分布区域高度集中,空间分布主要受海流影响^[87]。Pan 等^[88]发现西北太平洋表面海水中微塑料的主要成分是聚乙烯,其次分别是聚丙烯和尼龙,且平均丰度达到 10⁴ 个/km²,此研究认为该区域微塑料的空间分布状况在很大程度上归因于流形、邻近海洋环流旋涡、黑潮和黑潮扩展系统的综合作

用。

近年随着微塑料研究热度的提升,研究范围不断扩大^[89-91],研究者们相继开展了极地和深海的微塑料污染情况的调查研究^[53-54]。其中就包含对马里亚纳海沟挑战者深渊及周边环境中的微塑料污染情况进行的调查,研究结果表明在 2 673~10 908 m 底层海水中,微塑料含量为 2.06~13.51 个/L,比开放大洋表层及次表层水中微塑料含量还要高出数倍;在 5 108~10 908 m 的表层沉积物中,微塑料含量为 200~2 200 个/L,也明显高于大多数深海沉积物中微塑料的含量,这充分说明了微塑料污染无孔不入,全球海洋的最深处已经受到了严重的微塑料污染^[92]。

2.2.3 海洋生物体内的微塑料分布 微塑料在海洋中的分布范围越广意味着其可能累及的海洋生物也越多。就目前的研究来看,远在极地的生物也未能幸免。Moore 等^[93]对生存在北冰洋边缘波弗特海中的七头白鲸进行了调查了,在它们的消化器官中均检出了微塑料,且平均每头白鲸体内的微塑料数量约为(97±42)个,其中约一半为聚酯纤维。位于北极和亚北极区的白令海和楚科奇海中的底栖生物也受到了微塑料影响^[89],研究所涉及的共计 413 只生物体内平均含有 0.04~1.67 块微塑料,87% 为纤维状,在所调查的 11 种生物中红海盘车海星体内的微塑料检出量最高,约为其他物种的 1.43~38.71 倍。极地鳕鱼被认为是北极生态系统中的关键物种,有研究^[94]在其幼鱼的胃中也发现了环氧树脂颗粒和高岭土-聚甲基丙烯酸甲酯混合物,尽管只有少量,但也为北极地区生物遭受微塑料影响提供了证据。Bessa 等^[95]对南极地区 80 只企鹅的粪便进行了分析,发现其中 20% 的企鹅体内都含有微塑料,主要为纤维和碎片,但平均丰度要低于已有的有关世界其他地方海鸟体内的微塑料含量的数据。以上在生物体内或粪便中发现的微塑料大部分为纤维状的微塑料,而 Iannilli 等^[96]针对北极地区底栖端足目生物摄食微塑料的现象进行调查研究时发现,所有研究对象体内均存在微塑料,但其中的绝大部分为碎片状,类型以聚甲基丙烯酸酰胺为主,仅有 5% 为纤维状。被生物所摄食的微塑料在形状、类型、甚至是颜色上有所差异在一定程度上也反映出各种生物在摄食习惯上存在的差异。

通过以上研究可以看出,在极地动物体内或粪便中检测出微塑料不仅为微塑料的远距离传输提供了证据,更重要的是提醒我们这些敏感区域承受着巨大的生态压力^[97],有必要进一步对这些敏感生态系统的微塑料水平和变化趋势进行跟踪评估^[95]。

3 海洋微塑料的典型环境行为效应

海洋中的微塑料在汇入海洋之前往往已在环境中

存在了一定时间,经历了一系列物理作用和化学作用,使其性质发生了一定程度的改变;在汇入海后又受到海浪拍打和太阳辐射,使得微塑料的老化进一步加剧。老化后的微塑料的物理化学性质会发生较为明显的改变。其表面出现侵蚀、沟壑,比表面积增大,表面官能团发生改变^[98],这些改变为后期微塑料与环境发生相互作用提供了先决条件。

3.1 微塑料对污染物的富集

具有环境特征微塑料在海中可作为载体大量富集重金属^[99]和持久性有机污染物^[100-102],有文献指出微塑料对疏水性的有机化合物(HOCs)表现出强烈的吸附和富集趋势^[39],这主要是因为有机污染物一般都具有疏水亲油的特性,且海洋微塑料自身具有较大的比表面积^[103-104]。经初步研究发现^[57,104-105]塑料对有机化合物的吸附量比天然沉积物和土壤可高出约两个数量级,比海水中有有机化合物的浓度高可高出六个数量级。目前对于微塑料的吸附研究主要集中在多环芳烃(PAHs)^[101,103,106-107]、多氯联苯(PCBs)^[101,108]、二氯二苯基三氯乙烷/滴滴涕(DDTs)^[105]、多溴联苯醚(PBDEs)^[109-110]、抗生素^[98]、雌二醇和壬基酚等内分泌干扰素(EDCs)^[105,111]、金属及金属氧化物^[112]等物质上。目前研究的污染物范围很广,但最根本也是最重要的就是要明确污染物如何吸附在微塑料上,以及微塑料与污染物之间的相互作用受哪些因素所控制^[103]。

微塑料对环境中污染物的吸附受多种因素共同影响。微塑料的性质(聚合物类型、结晶度、尺寸、颜色、风化程度等)决定其吸附能力,是影响吸附过程的一个主要因素^[113-115]。Wang等^[116]研究了微米、亚微米和纳米级聚苯乙烯微塑料对菲和硝基苯的吸附,发现了微塑料的尺寸效应对其吸附能力的影响。表面结构和表面含氧官能团的改变程度的不同会影响他们对海水中有有机污染物的吸附行为和机制^[117],Liu等^[98]研究了紫外老化的聚苯乙烯(PS)和聚氯乙烯(PVC)对环丙沙星(CIP)吸附,认为因老化而形成的氢键对老化塑料吸附能力的提升起着重要作用。还有研究通过对比菲、萘、林丹、1-萘酚四种污染物在不同类型的塑料颗粒上的吸附行为,发现塑料本身的分子结构也对其吸附有机污染物的吸附起关键作用^[118]。另外,环境因素(盐度、pH、水体中污染物的浓度等)也会对污染物的吸附产生影响^[98]。例如,在临近工业厂区、养殖区、港口等污染源的场所均发现了吸附有较高浓度污染物的塑料颗粒^[108,119]。Lo等^[108]全面研究评估了香港周边海域沉积微塑料中的16种PAHs、15种PCBs同系物及22种有机氯农药,发现香港东部海岸的微塑料样品中有机氯农药(OCPs)的浓度明显高于其他区域,且该类污染物的主要潜在来源是当地的渔业和水产养殖业,主要

类型为DDT及其代谢产物(DDX),有力地证明了环境条件对微塑料吸附污染物产生影响。

3.2 微塑料中添加剂的浸出

微塑料与污染物的相互作用除了上述的吸附和富集之外,另一种则是添加剂、催化剂、引发剂和残留的单体等物质^[120-121]在海水中的浸出。目前塑料中常见的添加剂主要有热稳定剂、润滑剂、增塑剂、增韧剂、着色剂、抗氧化剂、光稳定剂、发泡剂和阻燃剂等。因塑料的类型和功能不同,其中含有的添加剂类型也有所差异^[105]。已有塑料产品浸出实验证明增塑剂会对大型蚤产生毒害作用^[122],使绿海胆的胚胎发育异常率增至50%以上^[123],甚至还会对海洋桡足类动物产生致死作用^[124]。而这些有毒有害物质的释放速率和释放量不仅与浸泡时间、微塑料的老化程度及理化性质有关,同样也与其所处环境条件境密不可分。Luo等^[125]通过研究聚氨酯泡沫微塑料中荧光添加剂在天然(河流、湖泊、湿地和海水)和模拟水体中(酸性水、盐水和碱性水)的浸出行为发现,添加剂的释放量随溶液pH值和浸出时间的增加而增加。盐度也与添加剂的浸出量呈正相关,高浓度的氯化钠有利于添加剂的浸出^[125-126]。Chen等^[127]通过研究了海洋微塑料样品在不同环境条件下内分泌干扰素(EDCs)的浸出行为,发现相较于微波和高压蒸汽,太阳辐射下浸出的EDCs量相对更大。通过以上分析可以推测,海洋中微塑料尤其是漂浮在海面上直接受到太阳辐射的微塑料的添加剂浸出行为造成的潜在生态风险高于淡水。

3.3 微塑料对海洋动物影响

目前,小至浮游生物、底栖生物、贝类、鱼类、大到鲨鱼、鲸鱼体内都发现了微塑料的存在^[10,49,128-129]。有报道证实共计超过150种淡水和海洋鱼类会摄食微塑料^[130]。其中生物的主动摄食和经食物链的传递都是微塑料进入生物体的途径^[131]。

微塑料除了被生物摄食之外,同样也可以附着在生物体表面,甚至可能转移到鳃、肝脏、肌肉等其他组织器官中^[132-133]。微塑料在进入生物体后会引发生物摄食效率降低、生长迟滞、行为表现异常等一系列问题^[134-135]。研究因摄食微塑料而出现的不良反应的重要前提则是要了解微塑料在生物消化道内的出现和积累的过程^[136]。微塑料在生物体内的积累过程中首先产生的则是大量物理性影响,比如机械性损伤、胃肠道梗阻、假性饱腹感和由此引发的摄食减少、肠道功能紊乱、营养不良、生长迟滞,最终可能导致死亡^[137-138]。此外,摄入的微塑料会引起一些应激性反应,使生物体的生理功能、生长和繁殖受到影响。在有关青鳉鱼的微塑料暴露实验中,Wang等^[139]发现暴露在10 μm聚苯乙烯微塑料环境中60天后微塑料在青鳉鱼肠内和肝

中产生积聚,引起了氧化应激反应和组织学变化。微塑料的粒度也是暴露实验中的重要参数之一,尺寸不同对生物产生的影响也不同^[140-141]。Jeong 等^[142]研究了纳米级(0.05 μm)和微米级(0.5 和 6 μm)聚苯乙烯荧光微珠对水蚤的影响,发现 0.05 μm 的微珠可以造成其发育迟缓并影响其繁殖能力,而 0.5 μm 微珠却只能使其蜕皮延迟,并没有对其整体发育造成影响。Wang 等^[139]发现当暴露在微塑料的浓度为 2、20、和 200 mg/L 的环境中时,雌鱼性腺成熟时间均会延迟,其繁殖力也会降低;当雌鱼和雄鱼均暴露于 20 mg/L 的微塑料环境中时,孵化时间会发生延迟,后代的孵化率、心率和体长也会降低,该研究首次证明了与环境相关的微量塑料浓度对海洋鱼类的繁殖有不利影响,并可能对海洋鱼类种群构成潜在威胁。

随着微塑料在生物体内的累积,其自身添加的或者从环境中吸附的化学物质在生物体内的累积量也随之增加,会给生物带来更为严重的化学性危害,甚至产生病理性损伤。单纯的微塑料或者单纯的溶解于水体中的有害化学物质对于生物体的影响都要小于添加或负载了化学物质的微塑料给生物体带来的影响,且这种影响不再是微塑料和有害物质各自对于生物体影响的简单叠加。有研究发现摄食纯净低密度聚乙烯颗粒(LDPE)的鱼类出现了包括糖原耗尽、脂肪空泡和单细胞坏死等一系列症状的肝脏应激反应,而摄食了含有持久性生物累积性有毒物质(PBTs)的 LDPE 后肝脏则出现了病理性损伤^[143]。另外,有模拟实验指出微塑料中的持久性有机污染物在肠道条件下的析出速率较在海水条件下高出了 30 倍^[138],析出的有机污染物在消化道内积累的同时,也会随着微塑料被转移至其他组织和器官中^[66]。由此可见,当微塑料与污染物构成了复合污染物后可能会引发海洋生物的健康危机。

从生物毒理学角度看,由于微塑料本身的高疏水性,当其吸附并富集了疏水性有机污染物后会在食物链中发生迁移^[144-145],这些有毒有害物质最终可能会对整个生态系统构成潜在威胁^[146]。再者,能摄食微塑料的海洋生物种类极其广泛,除了常见的鱼类、贝类、海洋哺乳类等类别之外,蠕虫、端足目、藤壶等滤食性和底栖无脊椎动物也易摄食微塑料^[13,96]。因此,微塑料被研究者认为是致使生物多样性丧失的重要因素^[147]。李爱峰等^[148]综述了人类食用的贻贝、鱼类和鱼罐头中微塑料污染情况,一定程度上说明人类食用海产品会增加摄入微塑料风险,为微塑料向食物链顶端传递提供了依据,但目前还没有确切证据证明人类健康会受其影响。

4 展望

(1) 理论框架的搭建与规范的建立

为了消除“知沟”(Knowledge gap),应尽快就微塑料定义、分类、计量标准等基础概念在行业内达成共识,制定相关规范和说明。

(2) 监测体系的完善

为了更好地监控和预测海洋微塑料污染状况,实现全球数据共享,应制定并完善与国际接轨的监测和采样的方式方法,并自此基础上结合海洋水动力学对微塑料在海洋中的迁移和沉降行为进行研究。

(3) 研究策略的创新

着重关注生态脆弱区域的微塑料污染状况,利用微塑料与海洋生物之间的相互作用,深入挖掘可被利用于检测微塑料污染状况的指示生物,为海洋环境监测提供新的手段。

(4) 生态风险的评估与管控

在研究微塑料的生态风险时应着重研究其自身携带污染物的释放规律及与海洋中其他污染物、微生物之间的相互作用,探究复合污染物的生态效应及其在生物链中的传递。需要注意的是,生态毒理学实验中采用的参数尤其是微塑料的浓度应尽可能贴近真实海洋环境,这样可获得更具有实际指导意义的数据。

(5) 海洋塑料污染问题的根治

为从根本上解决海洋塑料污染问题,应大力开发海水降解塑料、可生物降解塑料以替代目前普遍使用的石油基塑料;另外,还应着力发展生物强化降解技术,以实现海洋塑料/微塑料污染的无害和减害处理,并为其资源化利用提供借鉴。

参考文献:

- [1] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, et al. Marine pollution plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347 (6223): 768-771.
- [2] 陈斌. 海洋环境微塑料生态效应影响研究[J]. *环境与发展*, 2018, 30(03): 33-37.
Chen B. Study on the ecological effect of marine micro plastics[J]. *Environment and Development*, 2018, 30(3): 33-37.
- [3] UNEP. UNEP Year Book 2011: Emerging Issues in Our Global Environment[M]. Nairobi: UNEP, 2011: 48-53.
- [4] Desforjes J P, Galbraith M, Dangerfield N, et al. Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean[J]. *Mar Pollut Bull*, 2014, 79(1-2): 94-99.
- [5] Pedrotti M L, Petit S, Elineau A, et al. Changes in the floating plastic pollution of the Mediterranean Sea in relation to the distance to land[J]. *Plos One*, 2016, 11(8): e0161581.
- [6] Zeri C, Adamopoulou A, Bojanic Vazic D, et al. Floating plastics in Adriatic waters (Mediterranean Sea): From the macro-to the micro-scale[J]. *Mar Pollut Bull*, 2018, 136: 341-350.
- [7] 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]. *Mar Pollut Bull*, 2014, 86 (1-2): 562-568.

- [8] Koelmans A A, Mohamed Nor N H, Hermesen E, et al. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality[J]. *Water Res*, 2019, 155: 410-422.
- [9] Kim J S, Lee H J, Kim S K, et al. Global pattern of microplastics (MPs) in commercial food-grade salts: Sea salt as an indicator of seawater MP pollution[J]. *Environ Sci Technol*, 2018, 52(21): 12819-12828.
- [10] Lusher A L, Mchugh M, Thompson R C. Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel[J]. *Mar Pollut Bull*, 2013, 67(1-2): 94-99.
- [11] Van Cauwenberghe L, Janssen C R. Microplastics in bivalves cultured for human consumption[J]. *Environ Pollut*, 2014, 193: 65-70.
- [12] Schwabl P, Koppel S, Konigshofer P, et al. Detection of various microplastics in human stool: A prospective case series[J]. *Ann Intern Med*, 2019, 171(7): 453-457.
- [13] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea; where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838.
- [14] Ryan P G, Moloney C L. Marine litter keeps increasing[J]. *Nature*, 1993, 361(6407): 23.
- [15] Carpenter E J, Smith K L. Plastics on the Sargasso sea surface [J]. *Science*, 1972, 175(4027): 1240-1241.
- [16] Koehler A, Anderson A, Andrady A, et al. Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: A global assessment[M]. United Kingdom: IMO, 2015.
- [17] Hartmann N B, Huffer T, Thompson R C, et al. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris[J]. *Environ Sci Technol*, 2019, 53(3): 1039-1047.
- [18] 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]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46(6): 3060-3075.
- [19] Arthur C, Baker J, Bamford H, et al. Summary of the international research workshop on the occurrence, effects, and fate of microplastic marine debris[J]. 2020, 2009: 7-17.
- [20] Florian Thevenon C C. Plastic Debris in the Ocean: The Characterization of Marine Plastics and Their Environmental Impacts, Situation Analysis Report[R]. Switzerland: IUCN, 2014.
- [21] Browne M A, Crump P, Niven S J, et al. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks[J]. *Environ Sci Technol*, 2011, 45(21): 9175-9179.
- [22] Browne M A, Dissanayake A, Galloway T S, et al. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L)[J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42(13): 5026-5031.
- [23] Browne M A, Galloway T S, Thompson R C. Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines[J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 44(9): 3404-3409.
- [24] Sundt P, Schultze P, Syversen F. Sources of Microplastic Pollution to the Marine Environment[R]. Norway: Norwegian Environment Agency, 2014.
- [25] Boucher J, Friot D. Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources[M]. Switzerland: IUCN, 2017.
- [26] Roland Essel L E, Michael C, Ralph H A. Sources of Microplastics Relevant to Marine Protection in Germany[M]. Germany: Federal Environment Agency, 2015.
- [27] Fendall L S, Sewell M A. Contributing to marine pollution by washing your face: microplastics in facial cleansers[J]. *Mar Pollut Bull*, 2009, 58(8): 1225-1228.
- [28] Gregor Y M R. Plastic 'scrubbers' in hand cleansers: a further (and minor) source for marine pollution identified[J]. *Mar Pollut Bull*, 1996, 32(12): 867-871.
- [29] Magnusson K, Eliasson K, Frane A, et al. Swedish Sources and Pathways for Microplastics to the Marine Environment[R]. Sweden: Swedish Environmental Protection Agency, 2016.
- [30] Lassen C, Hansen S F, Magnusson K, et al. Microplastics Occurrence, Effects and Sources of Releases to the Environment in Denmark [R]. Denmark: Danish Environmental Protection Agency, 2015.
- [31] Napper I E, Thompson R C. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions[J]. *Mar Pollut Bull*, 2016, 112(1-2): 39-45.
- [32] Habib D, Locke D C, Cannone L J. Synthetic fibers as indicators of municipal sewage sludge, sludge products, and sewage treatment plant effluents[J]. *Water Air Soil Poll*, 1998, 103(1-4): 1-8.
- [33] Zubris K A V, Richards B K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge[J]. *Environ Pollut*, 2005, 138(2): 201-211.
- [34] Kole P J, Lohr A J, Van Belleghem F, et al. Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2017, 14(10): 1265.
- [35] 王佳佳, 赵娜娜, 李金惠. 中国海洋微塑料污染现状与防治建议[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 3056-3063.
Wang J J, Zhao N N, Li J H. Current situation of marine microplastics pollution and prevention proposals in China[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(7): 3056-3063.
- [36] Critchell K, Lambrechts J. Modelling accumulation of marine plastics in the coastal zone; what are the dominant physical processes? [J]. *Estuar Coast Shelf S*, 2016, 171: 111-122.
- [37] Zhang H. Transport of microplastics in coastal seas[J]. *Estuar Coast Shelf S*, 2017, 199: 74-86.
- [38] Vermeiren P, Munoz C C, Ikejima K. Sources and sinks of plastic debris in estuaries: A conceptual model integrating biological, physical and chemical distribution mechanisms [J]. *Mar Pollut Bull*, 2016, 113(1-2): 7-16.
- [39] Alimi O S, Farner Budarz J, Hernandez L M, et al. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport[J]. *Environ Sci Technol*, 2018, 52(4): 1704-1724.
- [40] Wang W, Ge J, Yu X. Bioavailability and toxicity of microplastics to fish species: A review[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2020, 189: 109913.
- [41] Eriksen M, Lebreton L C M, Carson H S, et al. Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea[J]. *Plos One*, 2014, 9(12): e111913.

- [42] Van Sebille E, Wilcox C, Lebreton L, et al. A global inventory of small floating plastic debris[J]. *Environ Res Lett*, 2015, 10(12): 124006.
- [43] Woodall L C, Sanchez-Vidal A, Canals M, et al. The deep sea is a major sink for microplastic debris[J]. *Roy Soc Open Sci*, 2014, 1(4): 140317.
- [44] Filella M. Questions of size and numbers in environmental research on microplastics: Methodological and conceptual aspects[J]. *Environ Chem*, 2015, 12(5): 527-538.
- [45] Obbard R W, Sadri S, Wong Y Q, et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice[J]. *Earths Future*, 2014, 2(6): 315-320.
- [46] Zalasiewicz J, Waters C N, Do Sul J A I, et al. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene[J]. *Anthropocene*, 2016, 13: 4-17.
- [47] Wilcox C, Van Sebille E, Hardesty B D. Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112(38): 11899-11904.
- [48] Devriese L I, Van Der Meulen M D, Maes T, et al. Microplastic contamination in brown shrimp (*Crangon crangon*, Linnaeus 1758) from coastal waters of the Southern North Sea and Channel area[J]. *Mar Pollut Bull*, 2015, 98(1-2): 179-187.
- [49] Cole M, Lindeque P, Fileman E, et al. Microplastic ingestion by zooplankton[J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(12): 6646-6655.
- [50] Allen A S, Seymour A C, Rittschof D. Chemoreception drives plastic consumption in a hard coral[J]. *Mar Pollut Bull*, 2017, 124(1): 198-205.
- [51] Egbeocha C O, Malek S, Emenike C U, et al. Feasting on microplastics: ingestion by and effects on marine organisms[J]. *Aquat Biol*, 2018, 27: 93-106.
- [52] Savoca S, Capillo G, Mancuso M, et al. Microplastics occurrence in the Tyrrhenian waters and in the gastrointestinal tract of two congener species of seabreams[J]. *Environ Toxicol Pharmacol*, 2019, 67: 35-41.
- [53] Pannetier P, Morin B, Le Bihanic F, et al. Environmental samples of microplastics induce significant toxic effects in fish larvae[J]. *Environ Int*, 2020, 134: 105047.
- [54] Chae Y, An Y J. Effects of food presence on microplastic ingestion and egestion in *Mytilus galloprovincialis*[J]. *Chemosphere*, 2020, 240: 124855.
- [55] Duncan E M, Broderick A C, Fuller W J, et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles[J]. *Glob Chang Biol*, 2019, 25(2): 744-752.
- [56] Chapron L, Peru E, Engler A, et al. Macro-and microplastics affect cold-water corals growth, feeding and behaviour[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 15299.
- [57] Wright S L, Thompson R C, Galloway T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review[J]. *Environ Pollut*, 2013, 178: 483-492.
- [58] Browne M A, Galloway T, Thompson R. Microplastic-an emerging contaminant of potential concern? [J]. *Integr Environ Assess*, 2007, 3(4): 559-561.
- [59] Zettler E R, Mincer T J, Amaral-Zettler L A. Life in the "plasticsphere": Microbial communities on plastic marine debris[J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(13): 7137-7146.
- [60] 何蕾, 黄芳娟, 殷克东. 海洋微塑料作为生物载体的生态效应[J]. *热带海洋学报*, 2018, 37(4): 1-8.
- He L, Huang F J, Yin K D. The ecological effect of marine microplastics as a biological vector[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2018, 37(4): 1-8.
- [61] Lambert S, Wagner M. Microplastics are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater Environments: An Overview[M]. Switzerland: Springer, 2018: 1-23.
- [62] Li J, Liu H, Paul Chen J. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection[J]. *Water Res*, 2018, 137: 362-374.
- [63] Bollmann U E, Simon M, Vollertsen J, et al. Assessment of input of organic micropollutants and microplastics into the Baltic Sea by urban waters[J]. *Mar Pollut Bull*, 2019, 148: 149-155.
- [64] Cozar A, Echevarria F, Gonzalez-Gordillo J I, et al. Plastic debris in the open ocean[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(28): 10239-10244.
- [65] Law K L, Moret-Ferguson S, Maximenko N A, et al. Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre[J]. *Science*, 2010, 329(5996): 1185-1188.
- [66] Avio C G, Gorbi S, Milan M, et al. Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels[J]. *Environ Pollut*, 2015, 198: 211-222.
- [67] Zhao S, Zhu L, Wang T, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution[J]. *Mar Pollut Bull*, 2014, 86(1-2): 562-568.
- [68] Zhu L, Bai H, Chen B, et al. Microplastic pollution in North Yellow Sea, China: Observations on occurrence, distribution and identification[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 636: 20-29.
- [69] Han M, Niu X, Tang M, et al. Distribution of microplastics in surface water of the lower Yellow River near estuary[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 707: 135601.
- [70] Zheng Y, Li J, Cao W, et al. Distribution characteristics of microplastics in the seawater and sediment: A case study in Jiaozhou Bay, China[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 674: 27-35.
- [71] Yan M, Nie H, Xu K, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River estuary, China[J]. *Chemosphere*, 2019, 217: 879-886.
- [72] Cai M, He H, Liu M, et al. Lost but can't be neglected: Huge quantities of small microplastics hide in the South China Sea[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 633: 1206-1216.
- [73] Nie H, Wang J, Xu K, et al. Microplastic pollution in water and fish samples around Nanxun Reef in Nansha Islands, South China Sea[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 696: 134022.
- [74] Avio C G, Gorbi S, Regoli F. Plastics and microplastics in the oceans: From emerging pollutants to emerged threat[J]. *Mar Environ Res*, 2017, 128: 2-11.
- [75] Zhao S, Zhu L, Li D. Microplastic in three urban estuaries, China[J]. *Environ Pollut*, 2015, 206: 597-604.
- [76] 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 Concentration of Some Key Estuaries in China and Approach for Analyzing Microplastic in Marine Snow [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.

- [77] 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.
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.
- [78] Wang J, Wang M, Ru S, et al. High levels of microplastic pollution in the sediments and benthic organisms of the South Yellow Sea, China[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 651(Pt 2): 1661-1669.
- [79] Zhao J M, Ran W, Teng J, et al. Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 640: 637-645.
- [80] Peng L, Fu D, Qi H, et al. Micro-and nano-plastics in marine environment: Source, distribution and threats-A review[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 698: 134254.
- [81] Brown A C. Marine pollution and health in South Africa[J]. *South African Medical Journal Suid-Afrikaanse Tydskrif Vir geneeskunde*, 1987, 71(4): 244-248.
- [82] Mema V. Impact of poorly maintained wastewater sewage treatment plants-lessons from South Africa: Wastewater management[J]. *ReSource*, 2010, 12(3): 60-65.
- [83] Nel H A, Froneman P W. A quantitative analysis of microplastic pollution along the south-eastern coastline of South Africa[J]. *Mar Pollut Bull*, 2015, 101(1): 274-279.
- [84] Wang J, Lu L, Wang M, et al. Typhoons increase the abundance of microplastics in the marine environment and cultured organisms: A case study in Sanggou Bay, China[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 667: 1-8.
- [85] UNEP. Marine Litter, an Analytical Overview[R]. Kenya: United Nations Environment Programme, 2005.
- [86] Gjerde K M. Ecosystems and Biodiversity in Deep Waters and High Seas[M]. Kenya: UNEP, 2006.
- [87] 孙承君, 蒋风华, 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.
Sun C J, Jiang F H, Li J X, et al. Advances in the study of sources, distribution and ecological impacts of marine microplastics[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(4): 449-461.
- [88] Pan Z, Guo H G, Chen H Z, et al. Microplastics in the North-western Pacific: Abundance, distribution, and characteristics[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 650: 1913-1922.
- [89] Mua J L, Zhang S F, Qu L, et al. Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea[J]. *Mar Pollut Bull*, 2019, 143: 58-65.
- [90] Lusher A L, Tirelli V, Oconnor I, et al. Microplastics in Arctic polar waters: The first reported values of particles in surface and sub-surface samples[J]. *Sci Rep-Uk*, 2015, 5: 14947.
- [91] Imhof H K, Sigl R, Brauer E, et al. Spatial and temporal variation of macro-, meso-and microplastic abundance on a remote coral island of the Maldives, Indian Ocean[J]. *Mar Pollut Bull*, 2017, 116(1-2): 340-347.
- [92] Peng X, Chen M, Chen S, et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean[J]. *Geochem Perspect Lett*, 2018, 9: 1-5.
- [93] Moore R C, Loseto L, Noel M, et al. Microplastics in beluga whales (*Delphinapterus leucas*) from the Eastern Beaufort Sea [J]. *Mar Pollut Bull*, 2020, 150: 110723.
- [94] Kühn S, Schaafsma F L, Van Werven B, et al. Plastic ingestion by juvenile polar cod (*Boreogadus saida*) in the Arctic Ocean[J]. *Polar Biology*, 2018, 41(6): 1269-1278.
- [95] Bessa F, Ratcliffe N, Otero V, et al. Microplastics in gentoo penguins from the Antarctic region[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 14191.
- [96] Iannilli V, Pasquali V, Setini A, et al. First evidence of microplastics ingestion in benthic amphipods from Svalbard[J]. *Environ Res*, 2019, 179: 108811.
- [97] Bergmann M, Lutz B, Tekman M B, et al. Citizen scientists reveal: Marine litter pollutes Arctic beaches and affects wild life[J]. *Mar Pollut Bull*, 2017, 125(1-2): 535-540.
- [98] Liu G, Zhu Z, Yang Y, et al. Sorption behavior and mechanism of hydrophilic organic chemicals to virgin and aged microplastics in freshwater and seawater[J]. *Environ Pollut*, 2019, 246: 26-33.
- [99] Ashton K, Holmes L, Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment[J]. *Mar Pollut Bull*, 2010, 60(11): 2050-2055.
- [100] Law K L, Thompson R C. Microplastics in the seas[J]. *Science*, 2014, 345(6193): 144-145.
- [101] Ogata Y, Takada H, Mizukawa K, et al. International pellet watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs[J]. *Mar Pollut Bull*, 2009, 58(10): 1437-1446.
- [102] Koelmans A A, Besseling E, Wegner A, et al. Plastic as a carrier of POPs to aquatic organisms: A model analysis[J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(14): 7812-7820.
- [103] Liu L, Fokink R, Koelmans A A. Sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to polystyrene nanoplastic[J]. *Environ Toxicol Chem*, 2016, 35(7): 1650-1655.
- [104] Rodrigues J P, Duarte A C, Santos-Echeandía J, et al. Significance of interactions between microplastics and POPs in the marine environment: A critical overview[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 111: 252-260.
- [105] Mato Y, Isobe T, Takada H, et al. Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35(2): 318-324.
- [106] Lee H, Shim W J, Kwon J H. Sorption capacity of plastic debris for hydrophobic organic chemicals[J]. *Sci Total Environ*, 2014, 470: 1545-1552.
- [107] Karkanorachaki K, Kiparissis S, Kalogerakis G C, et al. Plastic pellets, meso-and microplastics on the coastline of Northern Crete: Distribution and organic pollution[J]. *Mar Pollut Bull*, 2018, 133: 578-589.
- [108] Lo H S, Wong C Y, Tam N F, et al. Spatial distribution and source identification of hydrophobic organic compounds (HOCs) on sedimentary microplastic in Hong Kong[J]. *Chemosphere*, 2019, 219: 418-426.
- [109] Gaylor M O, Harvey E, Hale R C. Polybrominated diphenyl ether (PBDE) accumulation by earthworms (*Eisenia fetida*) exposed to biosolids-, polyurethane foam microparticle-, and penta-BDE-amended soils[J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(23): 13831-13839.
- [110] 徐鹏程, 郭健, 马东, 等. 新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1329-1337.

- Xu P C, Guo J, Ma D, et al. Sorption of polybrominated diphenyl ethers by virgin and aged microplastics[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1329-1337.
- [111] Liu X, Xu J, Zhao Y, et al. Hydrophobic sorption behaviors of 17 β -Estradiol on environmental microplastics [J]. *Chemosphere*, 2019, 226: 726-735.
- [112] Holmes L A, Turner A, Thompson R C. Interactions between trace metals and plastic production pellets under estuarine conditions[J]. *Mar Chem*, 2014, 167: 25-32.
- [113] Ziccardi L M, Edgington A, Hentz K, et al. Microplastics as vectors for bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in the marine environment: A state-of-the-science review[J]. *Environ Toxicol Chem*, 2016, 35(7): 1667-1676.
- [114] De Sá L C, Oliveira M, Ribeiro F, et al. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 645: 1029-1039.
- [115] Frias J P G L, Sobral P, Ferreira A M. Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast[J]. *Mar Pollut Bull*, 2010, 60(11): 1988-1992.
- [116] Wang J, Liu X, Liu G, et al. Size effect of polystyrene microplastics on sorption of phenanthrene and nitrobenzene[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 173: 331-338.
- [117] Huffer T, Weniger A K, Hofmann T. Sorption of organic compounds by aged polystyrene microplastic particles[J]. *Environ Pollut*, 2018, 236: 218-225.
- [118] Guo X, Wang X, Zhou X, et al. Sorption of four hydrophobic organic compounds by three chemically distinct polymers: Role of chemical and physical composition[J]. *Environ Sci Technol*, 2012, 46(13): 7252-7259.
- [119] Antunes J C, Frias J G L, Micaelo A C, et al. Resin pellets from beaches of the Portuguese coast and adsorbed persistent organic pollutants[J]. *Estuar Coast Shelf S*, 2013, 130: 62-69.
- [120] Da Costa J P, Santos P S M, Duarte A C, et al. (Nano)plastics in the environment-sources, fates and effects[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 566-567: 15-26.
- [121] Iguchi T, Watanabe H, Katsu Y. Application of ecotoxicogenomics for studying endocrine disruption in vertebrates and invertebrates[J]. *Environ Health Persp*, 2006, 114(Sup. 1): 101-105.
- [122] Lithner D, Damberg J, Dave G, et al. Leachates from plastic consumer products-screening for toxicity with *Daphnia magna* [J]. *Chemosphere*, 2009, 74(9): 1195-1200.
- [123] Nobre C R, Santana M F M, Maluf A, et al. Assessment of microplastic toxicity to embryonic development of the sea urchin *Lytechinus variegatus* (Echinodermata: Echinoidea) [J]. *Mar Pollut Bull*, 2015, 92(1-2): 99-104.
- [124] Bejgarn S, Macleod M, Bogdal C, et al. Toxicity of leachate from weathering plastics: An exploratory screening study with *Nitocra spinipes*[J]. *Chemosphere*, 2015, 132: 114-119.
- [125] Luo H, Xiang Y, He D, et al. Leaching behavior of fluorescent additives from microplastics and the toxicity of leachate to *Chlorella vulgaris*[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 678: 1-9.
- [126] Luo H, Li Y, Zhao Y, et al. Effects of accelerated aging on characteristics, leaching, and toxicity of commercial lead chromate pigmented microplastics[J]. *Environ Pollut*, 2020, 257: 113475.
- [127] Chen Q Q, Allgeier A, Yin D Q, et al. Leaching of endocrine disrupting chemicals from marine microplastics and mesoplastics under common life stress conditions[J]. *Environ Int*, 2019, 130: 104938.
- [128] Wardrop P, Shimeta J, Nuggeoda D, et al. Chemical pollutants sorbed to ingested microbeads from personal care products accumulate in fish[J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(7): 4037-4044.
- [129] Alomar C, Deudero S. Evidence of microplastic ingestion in the shark *Galeus melastomus* Rafinesque, 1810 in the continental shelf off the western Mediterranean Sea [J]. *Environ Pollut*, 2017, 223: 223-229.
- [130] Jabeen K, Su L, Li J, et al. Microplastics and mesoplastics in fish from coastal and fresh waters of China[J]. *Environ Pollut*, 2017, 221: 141-149.
- [131] 刘强, 徐旭丹, 黄伟, 等海洋微塑料污染的生态效应研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7397-7409.
- Liu Q, Xu X D, Huang W, et al. Research advances on the ecological effects of microplastic pollution in the marine environment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7397-7409.
- [132] Abbasi S, Soltani N, Keshavarzi B, et al. Microplastics in different tissues of fish and prawn from the Musa Estuary, Persian Gulf[J]. *Chemosphere*, 2018, 205: 80-87.
- [133] Su L, Deng H, Li B, et al. The occurrence of microplastic in specific organs in commercially caught fishes from coast and estuary area of east China[J]. *J Hazard Mater*, 2019, 365: 716-724.
- [134] Kashiwada S. Distribution of nanoparticles in the see-through medaka (*Oryzias latipes*) [J]. *Environ Health Perspect*, 2006, 114(11): 1697-1702.
- [135] Cedervall T, Hansson L A, Lard M, et al. Food chain transport of nanoparticles affects behaviour and fat metabolism in fish[J]. *Plos One*, 2012, 7(2): e32254.
- [136] Hernandez-Milian G, Lusher A, Macgibbon S, et al. Microplastics in grey seal (*Halichoerus grypus*) intestines: Are they associated with parasite aggregations? [J]. *Mar Pollut Bull*, 2019, 146: 349-354.
- [137] Fossi M C, Peda C, Compa M, et al. Bioindicators for monitoring marine litter ingestion and its impacts on Mediterranean biodiversity[J]. *Environ Pollut*, 2018, 237: 1023-1040.
- [138] Jabeen K, Li B, Chen Q, et al. Effects of virgin microplastics on goldfish (*Carassius auratus*) [J]. *Chemosphere*, 2018, 213: 323-332.
- [139] Wang J, Li Y J, Lu L, et al. Polystyrene microplastics cause tissue damages, sex-specific reproductive disruption and transgenerational effects in marine medaka (*Oryzias melastigma*) [J]. *Environ Pollut*, 2019, 254: 113024.
- [140] 蔡亚云, 赵佳玥, 李文锋, 等. 不同粒径塑料微颗粒在斑马鱼腮组织中的积累及其对毒性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(6): 1154-1158.
- Cai Y Y, Zhao J Y, Li W F, et al. Retention of polystyrene particles of different sizes in zebrafish gills and their effect on toxicity of anthracene to gill cells[J]. *Chinese Journal of Applied and*

- Environmental Biology, 2017, 23(6): 1154-1158.
- [141] Zhang C, Chen X, Wang J, et al. Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between microplastic and algae[J]. Environ Pollut, 2017, 220(B): 1282-1288.
- [142] Jeong C B, Kang H M, Lee M C, et al. Adverse effects of microplastics and oxidative stress-induced MAPK/Nrf2 pathway-mediated defense mechanisms in the marine copepod *Paracyclopina nana* [J]. Sci Rep, 2017, 7: 41323.
- [143] Rochman C M, Hoh E, Kurobe T, et al. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress[J]. Sci Rep, 2013, 3: 3263.
- [144] Ding J, Zhang S, Razanajatovo R M, et al. Accumulation, tissue distribution, and biochemical effects of polystyrene microplastics in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. Environ Pollut, 2018, 238: 1-9.
- [145] Green D S, Boots B, O'connor N E, et al. Microplastics Affect the ecological functioning of an important biogenic habitat[J]. Environ Sci Technol, 2017, 51(1): 68-77.
- [146] Andrady A L. Microplastics in the marine environment[J]. Mar Pollut Bull, 2011, 62(8): 1596-1605.
- [147] Gall S C, Thompson R C. The impact of debris on marine life [J]. Mar Pollut Bull, 2015, 92(1-2): 170-179.
- [148] 李爱峰, 李方晓, 邱江兵, 等. 水环境中微塑料的污染现状、生物毒性及控制对策[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(10): 88-100.
- Li A F, Li F X, Qiu J B, et al. Pollution status biological toxicity and control strategy of microplastics in water environments: A review[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(10): 88-100.

Research Progress on the Current Status and Environmental Behavior Effect of Microplastic Pollution

BAO Mu-Tai^{1,2}, CHENG Yuan^{1,2}, CHEN Jian-Xia^{1,2}, ZHAO Lan-Mei^{1,2},
LI Tian-Zi², QI Qing-Chun², ZHAO Jia-Jia², LI Yi-Ming^{1,2}, LU Jin-Ren²

(1. The Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education/Institute for Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The ubiquitous occurrence of microplastics in the ocean is an issue of growing concern worldwide, which has been listed as one of the top ten emerging global environmental problems. The size of the microplastic is small, while it is of great advantage in terms of both quantity and the numbers of origins, and hence has a more detrimental environmental effect than large-size plastic waste. Additionally, microplastics' reach will be expanded through the horizontal and vertical transfer in the ocean under the hydrodynamic forces. Meanwhile, the additives leaching from microplastics and the combined pollutants (microplastics, heavy metals, organic pollutants or microorganisms) will affect the growth, survival and reproduction of flora and fauna negatively, and eventually they may pose threats to human health through the food chain. In this paper, the rise of microplastic pollution and related concepts was introduced briefly by investigating and summarizing literatures at home and abroad, its typical sources, distribution and pollution status were also illustrated. On that basis, the interaction between microplastics and other pollutants, environmental behavior effects were analyzed. In the last section of this article, we proposed future research directions to serve as an available reference for the control and abatement of marine microplastics.

Key words: microplastics; pollution status; environmental behavior effect; combined pollutants; outlook

责任编辑 徐 环