

微塑料对海洋环境的影响及对策研究

于晓霞¹ 王静静^{1*} 张传兴¹ 李爱华¹ 董艳平² 王丙晖¹

1 山东省生态环境规划研究院 2 山东省水利科学研究院

DOI:10.12238/eep.v4i5.1457

[摘要] 近年来,海洋微塑料污染作为海上垃圾污染的重要组成部分,被联合国环境署列为全球十大新兴环境问题之一。微塑料的粒径范围从几微米到几毫米,肉眼往往难以分辨,被形象地称为“海中的PM2.5”,其颗粒直径越小,比表面积越大,吸附的污染物的能力越强,对于环境的危害程度更深。本文在前人研究的基础上进行归纳、分析和总结,同时结合在该领域的实际工作,阐明了微塑料来源和迁移转化的途径,分析了我国各个海域以及港台地区微塑料的分布现状,从海洋微塑料的吸附性能、在生物体内富集、威胁海洋生态环境健康等方面,详细阐述了微塑料对海洋环境的危害,并基于国内外对海洋微塑料的防治形式,提出了针对性的对策措施和建议。

[关键词] 微塑料; 海洋环境; 危害影响; 防治对策

中图分类号: P76 **文献标识码:** A

Study on the Influence and Countermeasures of Microplastics on Marine Environment

Xiaoxia Yu¹ Jingjing Wang^{1*} Chuanxing Zhang¹ Aihua Li¹ Yanping Dong² Binghui Wang¹

1 Shandong Academy for Environmental Planning

2 Water Resources Research Institute of Shandong Province

[Abstract] In recent years, marine microplastic pollution, as an important part of marine garbage pollution, has been listed by the United Nations Environment Programme as one of the top ten emerging environmental problems in the world. The particle size of microplastics ranges from a few microns to a few millimeters, which are often difficult to distinguish with the naked eye, and are vividly called "PM2.5 in the sea", the smaller the particle diameter, the larger the specific surface area, and the stronger the ability to adsorb pollutants, which is more harmful to the environment than ordinary non-degradable plastics. This article summarizes, analyzes and summarizes on the basis of previous studies, and combines the actual work in this field to clarify the sources of microplastics and the ways of migration and transformation. It analyzes the distribution status of microplastics in various sea areas, Hong Kong and Taiwan, from the aspects of adsorption performance of marine microplastics, enrichment in organisms, threat to the health of marine ecological environment, etc., it expounds the harm of microplastics to the marine environment, and based on the prevention and control style of marine microplastics at home and abroad, it proposes targeted countermeasures and suggestions.

[Key words] microplastics; marine environment; harm and impact; prevention measures

近年来,大量文献表明,微塑料存在于与人类生活密切相关的各个生态环境中,包括河流、湖泊、海洋、土壤以及地下水。海洋微塑料广泛分布于海洋水体、海滩、海底沉积物和海洋生物体内,由于洋流和空气的长距离运输,在人类活动非常有限的两级冰川地带也发现了微塑料的踪迹^[1]。

微塑料由于粒径小,比表面积大,易裹挟吸附其他小颗粒污染物,富集在生物体内,造成大量鱼类死亡,部分通过食物链进入人体,严重威胁到了海洋生物的生存以及人类的身体健康。中国国家海洋环境监测中心实验室开展的研究显示,约76%的鱼类肠道、消化道均检出微塑料。2018年欧洲消化医学会肠胃病学

学术会议上,奥地利维也纳医科大学 Schwabl等人的报告中指出,微塑料首次在人类的粪便样品中被发现,海洋微塑料可以通过食物链被高等动物摄取,但微塑料能否被人体吸收,是否对血液循环和人体器官有不利影响尚不得而知,仍有待研究。

正是由于微塑料在海洋环境中广泛

存在以及对生物体产生的各种确定的和不确定的危害,得到了各界的广泛关注。因此有必要对海洋微塑料的来源、分布、危害以及防治措施进行研究。

1 微塑料的概念

2004年,英国普利茅斯大学的Thompson等人^[2]在《Science》杂志上发表论文《Lost at sea: where is all the plastic?》,首次提出了“微塑料”概念,即微塑料指的是直径小于5mm的塑料碎片和颗粒。这一概念被其他学者普遍认可。Crawford^[3]在此概念基础上细分了塑料的粒径范围,认为大于等于1mm小于5mm的为微塑料,大于等于1 μm小于1mm为小微塑料,小于1 μm的为纳米塑料。

2 海洋微塑料的来源

微塑料分为初生微塑料和次生微塑料两类。初生微塑料是指经过河流、污水处理厂等排入水环境的塑料颗粒工业产品;次生微塑料是由大型塑料垃圾经过物理、化学和生物过程造成分裂,体积较小而成的塑料颗粒。初生微塑料主要包括两类,一类是塑料、树脂颗粒的工业原料,如树脂工业、橡胶制造业、合成纺织业等;另一类是含清洁微珠的日用化妆品,如护肤品、牙膏、洗面奶、沐浴露以及表面处理行业的抛光料等^[4]。初生微塑料的主要化学成分包括聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚苯乙烯(PS)、高聚物聚丙烯(PP)、聚甲醛(POM)、尼龙6、尼龙12等。有调查统计,排放到海洋的7种初生塑料中,有接近三分之二的来源为合成纺织品(34.8%)、轮胎的磨损(28.3%)和城市灰尘(24.2%)^[5]。Qingjie Li, Xiaoxia Sun^[6]研究发现,污水处理厂为微塑料入海的最主要途径,污水厂中的微塑料主要来源于日用品和衣物洗涤。

次生微塑料的主要来源是部分被随意处置的塑料垃圾,合成纤维衣物的洗涤排水、农业种植所使用的的地膜等^[4],这部分塑料在水体中长时间停留,经过一系列复杂的物理、化学、生物过程,逐渐形成海洋水体中的微塑料。

3 海洋微塑料的迁移

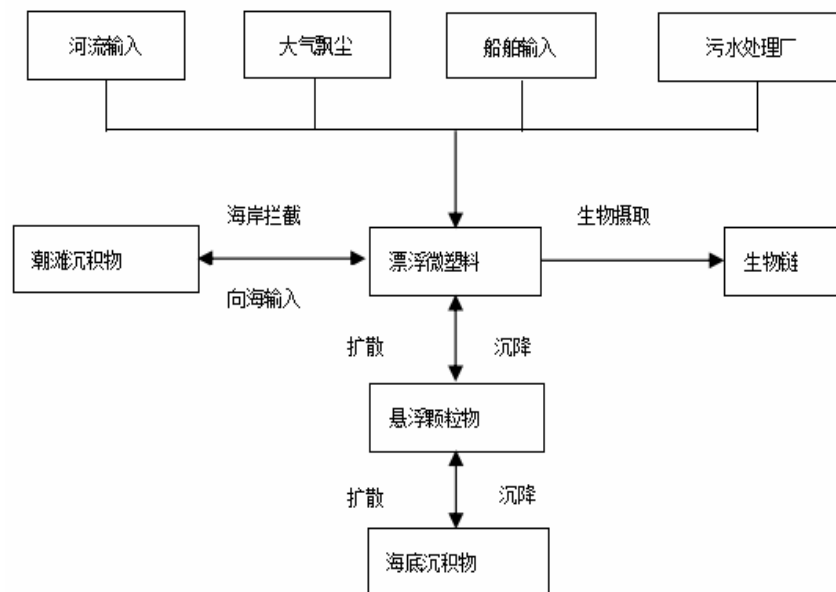


图1 海洋微塑料输入及迁移转化示意图

人类活动产生的微塑料,都可通过河流输入、大气飘尘、船舶垃圾直排、污水处理厂尾水排放等途径进入海洋环境^[7,8]。进入海洋环境的漂浮微塑料有三种迁移途径。

①由于大部分塑料密度比水小,在水体中浮力大于重力,因此漂浮在水体中随水流运动并漂浮在海岸,形成滩涂沉积物。

②漂浮的微塑料粒径小,比表面积大,在水力扰动条件下,易吸附其他微小颗粒杂质,随后沉降海底,形成海底沉积物。

③漂浮的微塑料被海洋生物当做食物所摄取,进入食物链,并通过富集作用集聚在高等动物体内,甚至出现在人类的餐桌上。海洋微塑料的迁移转化情况见图1。

4 我国海域微塑料的分布

我国每年大约生产近200万吨的废弃塑料^[9],约10%的塑料垃圾,通过各种途径输入海洋环境中^[10]。Kunz等人对海洋漂浮垃圾、海底垃圾、纤维、薄膜碎片等的调查发现,微塑料的足迹已遍布我国东部的各个海域以及港台地区(表1)。

从表1可以看出,我国海洋微塑料污染已覆盖了我国的四大海域以及香港、台湾地区。另外,国家海洋局第一海洋研究所海洋生态中心孙承君等人

^[19]指出我国2011-2015年近岸海域海底垃圾中塑料废物的比例由2011年的57%增加到2015年的87%。海底塑料垃圾的不断增长,在外力的作用下,同时也加快了海底微塑料的积累速度,加剧了微塑料污染对海洋生态环境的影响。Kühn等人^[20]2015年调查了受塑料(包括微塑料)影响的海洋野生生物种类,结果显示海龟、海洋哺乳动物和海鸟的种类从1997年86%,43%和44%增加到2015年的100%,66%和50%,这说明海洋塑料垃圾和微塑料污染已对海洋生态系统构成威胁,需要引起人类的高度重视。从《2018年中国海洋生态环境状况公报》中可以看出,我国政府层面已在渤海、黄海和南海海域,开展海面漂浮微塑料的监测工作,将平均密度、主要物质分类及主要成分作为监测指标,《2018年中国海洋生态环境状况公报》检测到的三大海域的微塑料的平均密度为0.40-1.09个/m³,主要为碎片、纤维和线,成分主要为聚丙烯、聚乙烯和聚对苯二甲酸乙二醇酯。

5 海洋微塑料的危害

5.1 海洋微塑料的吸附性能

单个微塑料的粒径越小,比表面积越大,吸附其他微小颗粒的能力就越强,从而成为部分小颗粒污染物质的载体。海洋污染物对污染物的吸附性能主要体现在对有机物和重金属物质两个方面。

5.1.1对有机物的吸附

海洋环境中存在的多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)、六氯环己烷(HCHs, 俗称六六六)、滴滴涕(DDTs)、全氟及多氟类化合物(PFASs)等疏水性有机污染物具有剧毒性、不易降解性、生物放大性和长距离迁移性, 极易被海洋微塑料吸附, 目前已经有超过200种有机化学物质在微塑料中被检出(表2)^[21, 22]。

研究表明, 不同极性和疏水性的有机物对微塑料的亲合力不同, 造成同一种微塑料对PAHs、PCBs、HCHs、DDTs和PFASs具有不同吸附能力。另外, 微塑料的自身性质、污染物的空间分布、塑料的老化程度等也影响微塑料对持续性有机污染物的吸附能力^[27]。

5.1.2对重金属的吸附

海洋环境中的重金属主要来源于海底火山喷发、地壳岩石风化后通过地表径流、大气沉降等的天然输入以及矿山与海洋油井的开发、工农业涉重废水的排放等的人为输入^[28]。重金属因其生物放大性和富集性而对海洋生态系统造成极大威胁, 因此微塑料对重金属的吸附也成为了目前研究的热点课题。

朱晓桐^[29]从牡蛎体内分离出来的微塑料进行了表面扫描电镜与能谱分析, 显示Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Cd和Pb元素可以在微塑料表面吸附, 这说明微塑料能够吸附重金属元素形成联合生物富集。Holmes^[30]等人对英格兰西南海滩及河口地区的PE进行了检测分析, 显示Al、Fe、Mn、Pb、Cr、Co、Ni、Cd等可以吸附在微塑料表面。Ashton^[31]等人对英国萨顿港的初生PE进行了检测分析, 与Holmes等人的实验结果对比, 初生微塑料的吸附能力比次生微塑料要弱(表3)。

5.2海洋微塑料对生物的危害

微塑料由于粒径小、难降解的原因, 极易被海洋生物误食摄入体内, 吸附在微塑料表面的持续性有机污染物与重金属便蓄积在海洋生物的体内。大量文献报道, 海洋中从原生动、环节动物到贝类, 再到巨型鲸鱼等哺乳类动物都会摄取微塑料^[2, 27, 32-36]。被生物摄取的微塑料

表1 中国沿海微塑料的数量与分布情况

调查地区	微塑料丰度	调查时间	参考文献
台湾北部沿海及沙滩	~10970 个/m ²	2015	Kunz 等 ^[11]
东海	0.167±0.138 个/m ²	2013	Zhao 等 ^[12]
东海(长江口)	4137.3±2461.5 个/m ²	2013	Zhao 等 ^[12]
东海(椒江口)	956 个/m ³	2015	Zhao 等 ^[13]
东海(瓯江口)	680 个/m ³	2015	Zhao 等 ^[13]
东海(闽江口)	1246 个/m ³	2015	Zhao 等 ^[13]
北黄海	545±282 个/m ³	2018	Zhu 等 ^[14]
渤海	0.33±0.34 个/m ³	2017	Zhang 等 ^[15]
珠海(南海北部)	~132 个/m ²	2014	Zhou 等 ^[16]
北海(广西北部湾)	11 个/m ²	2014	Zhao 等 ^[17]
香港周边海域	5595 个/m ²	2014	Fok 等 ^[18]

表2 海洋微塑料富集有机污染物种类及浓度

有机污染物	微塑料种类	Co(μg/L)	吸附能力(μg/g)	参考文献
PAHs	PVC、PE	0.6-6.1	2-4	[23]
PCBs	PP	50-2500	93.45-344.8	[24]
HCHs	PE、PP、PS	650	-	[25]
DDTs	PVC、PE	0.6-6.1	1.5-10	[23]
PFASs	PE、PS、PVC	5-50	1.4-2.4	[26]

表3 初生微塑料与次生微塑料中富集重金属的种类及浓度

微塑料种类	地点	重金属	污染物浓度(μg/g)	参考文献
次生微塑料	英格兰西南河口	Al	8.33-171	[30]
		Fe	11.7-314	
		Mn	0.35-308	
		Cu	0.012-2.38	
		Pb	0.052-5.85	
		Zn	0.051-10.0	
初生微塑料	萨顿港	Al	6.20±3.65	[31]
		Fe	17.98±7.49	
		Mn	2.61±1.97	
		Cu	0.28±0.18	
		Pb	1.72±0.92	
		Zn	0.25±0.18	

难以被消化排出体外而积累在消化系统, 产生饱腹感的错觉从而影响生物的进一步进食。微塑料被海参、贝类、甲壳类、鱼类等生物摄取后沿着食物链, 从低营养级者传递至高级营养者(图1), 经过生物放大和富集的作用, 微塑料丰度在食物链的顶端达到峰值。Besseling^[32]等人投加低剂量的聚苯乙烯后, 检测出海蚯蚓体内发现的PCB的积累量是投加前的1.1-3.6倍。此外, Rochman^[37]为证实此观点, 用吸附了PAHs、PCBs和PBBS的微塑料养殖日本青鳞鱼, 两个月后发现, 鱼体内的PBDEs、PCB28的浓度明显增高。2018年欧洲消化医学会肠胃病学学术会议上, 奥地利维也纳医科大学的Schwabl等人的报告中指出, 微塑料首次在人类的粪便样品中被发现。随着微塑料携带

的有毒有害物质的富集和转移, 人类作为食物链的最高级营养者势必会遭受有害影响, 但微塑料是否在人体内蓄积, 是否以排泄和排遗的方式全部排出体外, 是否对人类的消化器官造成影响, 仍有待深入研究。

5.3海洋微塑料的其他危害

大量的微塑料漂浮或悬浮在海洋环境中, 阻碍了光线在海水中的传递, 影响了水中各种生物对阳光的利用^[38]; 微塑料会影响暴露在海洋生物的产卵量和繁殖健康^[38]; 由于微塑料可以通过洋流等的作用下远距离、长时间漂浮, 附着在微塑料上的微生物或原生动可能携带到新的海洋环境中, 从而引起外来物种入侵的潜在危险^[39]。

6 海洋微塑料的防治形式

6.1 国外防治措施

作为海洋环境中的一类新型污染物,海上塑料垃圾和微塑料污染问题已成为世界各国亟待解决的重大全球性海洋生态环境问题。2014年6月,首届联合国环境大会提出要关注海洋垃圾和微塑料问题,2017年德国汉堡G20峰会通过了“G20海洋垃圾行动计划”,将海洋塑料污染和微塑料的治理与防治上升到全球层面。众多沿海国家也开始积极出台了针对性的法规和政策。如欧洲化妆品及个人护肤品协会(Cosmetics Europe, the Personal Care Association)于2015年10月向成员国建议在2020年前停止使用去角质的塑料微珠^[40]。2017年3月法国颁布“The Decree 2017-291”法令,宣布自2018年1月1日起,法国下架所有的含塑料微粒的化妆品;自2020年1月1日起,禁止生产、销售家用塑料棉棒和一次性塑料餐具,并建议由可降解纸所取代^[41]。2015年美国国会通过《无微珠水域法案》(Microbeads-Free Water Act of 2015),明确2017年7月1日起不得生产任何含有塑料微珠的化妆品,并在2018年7月1日起全面禁止销售^[42]。2017年美国多个地方政府颁布“禁塑令”或“限塑令”,禁止使用一次性塑料袋或对其征税,征得税收用于缓解塑料垃圾污染^[43]。此外英国、加拿大和韩国等国家陆续淘汰或禁止销售含有塑料微珠的化妆品。

6.2 国内防治措施

我国作为塑料生产和使用大国,每年大约产生200万吨的废弃塑料^[8],通过各种途径进入海洋环境,给海洋环境生态系统造成严重威胁。2016年我国启动了微塑料的监测工作,涵盖水体、海底、海滩和生物体等范围。同时启动了国家重点研发项目,专门针对海洋微塑料的监测技术、不同环境介质中微塑料的组成与数量分布和微塑料污染生态风险评估方法等开展研究^[44]。我国从实施“限塑令”已有10多年的时间,一次性的塑料制品在日常生活中仍然随处可见,“限塑令”的实施效果并不显著,海洋塑料污染的压力不减反增。

很显然,解决海洋微塑料污染的问题不是一项单个国家就能解决的工程,需要各国政府的共同参与,在全球范围内开展广泛的国际合作,系统研究从陆地地表水到深海海洋水再到极地冰川等环境的海洋微塑料调查、运输及生命周期,逐步建立海洋微塑料对海洋生物及人类健康的风险评估方法。

7 海洋微塑料防控建议

目前尚未清楚海洋微塑料是否直接影响人类生命健康,但可以肯定的是海洋微塑料可以通过食物链的作用被人类摄入,人类作为食物链的最高级营养者,在生物富集的作用下,体内会积累大量的微塑料。

在微塑料污染的防控措施上,建议以上游干预为指导思想,以塑料生命周期管理流程为主线,从生产设计、消费使用、废物管理三个方面实现微塑料产生与排放减量化,实施以“源头防控”为核心的微塑料污染防治模式,实现重点企业微塑料的减排^[45]。具体防控措施建议包括以下几点。

7.1 制定检测标准,建立海洋微塑料风险评估系统

建立一套与国际接轨的微塑料的采样、分析、鉴定、监测方法,规范微塑料丰度的表示方法和单位,对于回答相关科学问题,比较不同研究成果,提出微塑料污染海洋治理措施等具有科研意义。2020年7月15日,《塑料及其制品可回收性设计规范》及《海洋塑料再生利用产销监管链管理体系要求》标准编制工作启动会在成都成功召开,初心就是让塑料循环利用行业在后疫情时代的技术健康发展提供技术基础支持和保障。

通过制定的相应标准及方法建立我国沿海地区微塑料“来源—迁移—归宿—行为”风险评估系统,持续开展生态风险、社会风险评价,为后续的近海生态系统管理与决策提供科学支撑。

7.2 加强微塑料防治立法工作,增强人们的环保意识,进而改变人们的生活习惯和消费习惯

首先,微塑料主要来源于日用品和

衣服洗涤等护理品行业,因此建议生态环境部会同国家食品药品监督管理部门尽快制定相关政策,禁止生产和销售含塑料微珠的个人护理品,明确现有含塑料微珠个人洗护用品的市场退出时间表,同时,引导和鼓励国内生产企业以天然产物替代塑料微珠,推进个人护理品行业的绿色健康发展;其次是建立完善海洋塑料垃圾污染公共环境意识教育体系。我国“限塑令”实施成效并不显著的主要原因人们很难改变现有的生活方式和习惯,应逐步加强科普宣传教育活动,激发公众的海洋环保意识,以改变人们的生活方式和习惯的改变。

7.3 提高污水处理厂对微塑料垃圾的处理效率

目前运行的污水处理厂均没有设置专门针对微塑料污染物的处理工艺,导致微塑料污染物收集、处理效率不高,大量微塑料颗粒排入水体,最终排入海洋水体环境。建议今后城市污水处理厂提标改造或新建污水处理厂时,增加针对微塑料污染物的深度处理工艺。考虑到微塑料质量较轻,粒径较小以及难生物降解的特点,增加气浮处理,膜过滤处理或者活性炭吸附处理等单个或多个工艺组合,强化污水中微塑料污染物的去除。

7.4 在重点地区推行“零废行动”

“零废”是指通过负责任的生产、消费、再回收和利用所有产品、包装和材料,而不是通过燃烧,向土地、水或空气排放对环境或人类健康构成威胁的方式来保护所有资源。建议开始在重点地区推行“零废行动”,确定零废战略,树立短期目标和长期目标,实现废物的循环利用最大化与可持续发展。

很显然,解决海洋微塑料污染的问题不是一项单个国家就能解决的工程,需要各国政府的共同参与,在全球范围内开展广泛的国际合作。

8 结束语

海洋微塑料作为海洋环境中的一类新型污染物,受到各界人士的广泛关注,本文通过归纳、分析和总结前人的研究成果,结合我国在微塑料治理领域

的工作实际,提出了4条海洋微塑料的防控建议,以期在未来一段时间内,为海洋生态环境保护尤其是海洋微塑料治理提供参考。

[基金项目]

国家重点研发计划项目(No.2018YFC1407600)。

[参考文献]

[1] Zhang Kai, Su Jing, Xiong Xiong, Wu Xiang, Wu Chenxi, Liu Jiantong. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet plateau, China[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 450-455.

[2] Richard C. Thompson, Ylva Olsen, Richard P. Mitchell, Anthony Davis, Steven J. Rowland, Anthony W.G. John, Daniel McGonigle, Andrea E. Russell. Lost at Sea: Where Is All the Plastic?[J]. Science, 2004, 304(5672): 838.

[3] Crawford C B, Quinn B. Microplastics, standardisation and spatial distribution[J]. Microplastic Pollutant. 2017, 101-130.

[4] 刘沙沙. 微塑料的环境行为及其生态毒性研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(05): 957-969.

[5] 刘婷婷, 林羽轲. 《海洋微塑料来自哪里? 数据全面看!》[EB/OL]. [2020-5-1]. https://www.sohu.com/a/205971832_726549.

[6] Li Q, Sun X. Progress on microplastics research in the Yellow Sea, China 1[J]. Anthropocene Coasts, 2020, 3(1): 43-52.

[7] Ryan P G, Moore C J, Van Franeker J A, et al. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2009, 364(1526): 1999-2012.

[8] 王西西, 曲长风, 王文字, 等. 中国海洋微塑料污染的研究现状与展望[J]. 海洋科学, 2018, 42(03): 131-141.

[9] Jenna R. Jambeck, Roland Geyer, Chris Wilcox, Theodore R. Siegler, Miriam Perryman, Anthony Andrady, Ramani Nara

yan, Kara Lavender Law. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. Science, 2015, 347(6223): 768-771.

[10] Thompson R C. Plastic debris in the marine environment: Consequences and solutions[J]. Marine Nature Conservation in Europe, 2007, 193: 107-115.

[11] KUNZ, ALEXANDER, WALTHER, BRUNO A., LOWEMARK, LUDVIG, et al. Distribution and quantity of microplastic on sandy beaches along the northern coast of Taiwan[J]. Marine pollution bulletin, 2016, 111(1/2): 126-135.

[12] 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]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 86(1/2): 562-568.

[13] Zhao S, Zhu L, Li D. Microplastic in three urban estuaries, China[J]. Environmental Pollution, 2015, 206(NOV.): 597-604.

[14] Zhu L, Bai H, Chen B, et al. Microplastic pollution in North Yellow Sea, China: Observations on occurrence, distribution and identification[J]. Science of The Total Environment, 2018, 636: 20-29.

[15] Zhang W, Zhang S, Wang J, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China[J]. Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987), 2017, 231: 541.

[16] Zhou P, Huang C, Fang H, et al. The abundance, composition and sources of marine debris in coastal seawaters or beaches around the northern South China Sea (China)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(9): 1998-2007.

[17] Zhao S, Zhu L, Li D. Characterization of small plastic debris on tourism beaches around the South China Sea[J]. Regional Studies in Marine Science, 2015, 1: 55-62.

[18] Fok L, Cheung P K. Hong Kong at the Pearl River Estuary: A hotspot of

microplastic pollution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 99(1-2): 112-118.

[19] 孙承君, 蒋凤华, 李景喜, 等. 海洋中微塑料的来源、分布及生态环境影响研究进展[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(4): 449-461.

[20] Kühn S, Bravo E L, Franeker J A V. Deleterious effects of litter on marine life[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 75-116.

[21] Rani M, Shim W J, Han G M, et al. Qualitative Analysis of Additives in Plastic Marine Debris and Its New Products[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, 69(3): 352-366.

[22] Guo X, Wang J. The chemical behaviors of microplastics in marine environment: A review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 142: 1-14.

[23] Bakir A, Rowland S J, Thompson R C. Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 140: 14-21.

[24] Zhan Z, Wang J, Peng J, et al. Sorption of 3,3',4,4'-tetrachlorobiphenyl by microplastics: A case study of polypropylene[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 110(1): 559-563.

[25] Lee H, Shim W J, Kwon J H. Sorption capacity of plastic debris for hydrophobic organic chemicals[J]. Science of The Total Environment, 2013, 470-471(2): 1545-1552.

[26] Wang F, Shih K M, Li X Y. The partition behavior of perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanesulfonamide (FOSA) on microplastics[J]. Chemosphere, 2015, 119: 841-847.

[27] 张智, 邹亚丹, 徐擎擎, 等. 微塑料与水中污染物的联合作用研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2019, (02): 59-69.

[28] 贺亮, 范必威. 海洋环境中的重金属及其对海洋生物的影响[J]. 广州化学, 2006, (03): 63-69.

- [29]朱晓桐.微塑料在潮滩湿地的分布沉降及生物富集研究[D].上海:华东师范大学,2018:113.
- [30]Holmes L A,Turner A,Thompson R C.Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment[J].Environmental Pollution,2012,160(none):42-48.
- [31]Ashton K,Holmes L,Turner A.Association of metals with plastic production pellets in the marine environment[J].Marine Pollution Bulletin,2010,60(11):2050-2055.
- [32]Besseling E,Wegner A,Foekema E M,et al.Effects of Microplastic on Fitness and PCB Bioaccumulation by the Lugworm *Arenicola marina*(L).[J].Environmental Science & Technology,2013,47:593-600.
- [33]Cole M,Lindeque P,Fileman E,et al.Microplastic ingestion by zooplankton. Environmental Science & technology,2013,47(12):6646-6655.
- [34]Tanaka K,Taka Da H, Yamashita R,et al. Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics[J]. Marine Pollution Bulletin,2013,69(1-2):219-222.
- [35]Ugolini A,Ungherese G,Ciofini M,et al.Microplastic debris in sandhoppers[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science,2013,129(3):19-22.
- [36]Pedà,Cristina,Caccamo L,Fossi M C,et al.Intestinal alterations in European sea bass *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus,1758)exposed to microplastics: Preliminary results[J].Environmental Pollution,2016,212:251-256.
- [37]Rochman C M,Hoh E, Kurobe T,et al.Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress[J].Scientific Reports.2013,3:3263.
- [38]夏斌,杜雨珊,赵信国,等.微塑料在海洋渔业水域中的污染现状及其生物效应研究进展[J].渔业科学进展,2019,40(3):178-190.
- [39]赵淑江,王海雁,刘健.微塑料污染对海洋环境的影响[J].海洋科学,2009,33(3):84-86.
- [40]Cosmetics Europe.Cosmetics Europe recommendation on solid plastic particles (plastic microparticles)[EB/OL].(2015-10-21)[2018-07-05].https://www.cosmeticseurope.eu/files/3714/7636/5652/Recommendation_on_Solid_Plastic_Particles.pdf.
- [41]FRANCE L.Banning microbeads in cosmetics in France by 2018 [EB/OL].[2018-08-15].<https://www.ecomundo.eu/en/blog/ban-microbeads-cosmetics-france-2018>.
- [42]美国正式立法禁止在洗护产品中添加塑料微珠[J].中国洗涤用品工业,2016,(03):76-77.
- [43]California State Legislature. California proposition 67, plastic bag ban veto referendum(2016)[EB/OL].(2017-08-01)[2018-07-05].[https://ballotpedia.org/California_Proposition_67,_Plastic_Bag_Ban_Veto_Referendum_\(2016\)](https://ballotpedia.org/California_Proposition_67,_Plastic_Bag_Ban_Veto_Referendum_(2016)).
- [44]李道季,朱礼鑫,常思远,等.海洋微塑料污染研究发展态势及存在问题[J].华东师范大学学报(自然科学版),2019,(03):174-185.
- [45]孙晓霞,郑珊,李庆洁,等.山东省重点行业海洋微塑料污染防治对策研究[R].2020.08

作者简介:

于晓霞(1981--),女,汉族,山东济南人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:环境治理、生态环境保护规划。

通讯作者:

王静静(1988--),女,汉族,山东济宁人,硕士研究生,工程师,研究方向:环境治理、生态环境保护规划。