

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20201119001

陈璇, 章家恩, 危晖. 环境微塑料的迁移转化及生态毒理学研究进展[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(6): 70-86

Chen X, Zhang J E, Wei H. Research progress and prospect on transportation, transformation and ecotoxicology of microplastics in environment [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(6): 70-86 (in Chinese)

环境微塑料的迁移转化及生态毒理学研究进展

陈璇¹, 章家恩^{1,2,3,4,*}, 危晖^{1,2,3,4}

1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642
2. 广东省生态循环农业重点实验室, 广州 510642
3. 广东省现代生态农业与循环农业工程技术研究中心, 广州 510642
4. 农业农村部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642

收稿日期: 2020-11-19 录用日期: 2021-04-06

摘要: 微塑料作为一种持久性污染物, 对生态环境和人类健康会产生不良的影响, 近年来引起国内外的高度关注。本文对环境微塑料的形态、来源、分布特征、迁移转化、生态毒性以及作用机制进行了系统归纳和评述。环境微塑料主要来源于塑料垃圾、个人洗护品、清洁用品和化妆品等。海洋环境中微塑料的分布已呈全球化趋势, 近岸、大洋、深海和极地都有微塑料的存在, 深海是微塑料的主要汇集区。土壤环境中微塑料则在空间上呈现分布不均的现象。研究证实微塑料可被生物摄取、积累, 并通过食物链传递, 对生物体正常的新陈代谢及繁殖造成影响。因此, 今后需要不断扩大研究广度和深度, 加强微塑料在各环境介质之间、食物链/网中的迁移转化、毒性效应及其对人类健康影响、微塑料中化学添加剂在环境中可释放性和复合污染效应、微塑料对土壤养分迁移转化、循环及植物生长的影响及作用机制研究。同时, 要加强微塑料的源头管控技术、替代技术和污染修复技术研究。本文通过对微塑料在环境中迁移转化及生态毒性综述分析和研究展望, 旨在为微塑料污染及防控研究提供相关参考。

关键词: 微塑料; 生态毒性; 来源; 分布; 迁移; 转化

文章编号: 1673-5897(2021)6-070-17 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Research Progress and Prospect on Transportation, Transformation and Ecotoxicology of Microplastics in Environment

Chen Xuan¹, Zhang Jiaen^{1,2,3,4,*}, Wei Hui^{1,2,3,4}

1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Eco-Circular Agriculture, Guangzhou 510642, China
3. Guangdong Engineering Research Center for Modern Eco-Agriculture and Circular Agriculture, Guangzhou 510642, China
4. Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropic, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510642, China

Received 19 November 2020 accepted 6 April 2021

Abstract: As a persistent pollutant, microplastics have a comprehensive, secretive, and unpredictable impact on the ecological environment and human health, and have been highly concerned at home and abroad in recent years. In this review, the morphology, source, distribution, transportation, transformation, and ecotoxicity of microplastics and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1701236); 广东省现代农业产业技术体系建设项目(2018LM1100)

第一作者: 陈璇(1992—), 女, 博士研究生, 研究方向为农业生态学和土壤生态学, E-mail: 877046204@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: jeanzh@scau.edu.cn

related mechanisms are reviewed and discussed. The results show that the microplastics in the environment mainly come from the disposal of plastic waste, and the use of personal care, cleaning products, and cosmetics in human life. The distribution of microplastics in the marine environment has shown a global trend and has been found in the coastal area, oceans, deep-sea and polar regions, and existing studies have shown that the deep sea is the sink for microplastics. While in the soil environment, the distribution of microplastics is spatially uneven. Some studies have shown that microplastics can be transported and accumulated through the food chain from lower trophic levels to higher ones, and disturb the metabolism and propagation of the organisms. Therefore, it is necessary to expand the breadth and depth of the research in the future, and strengthen the research on transportation and transformation of microplastics among environmental media and their toxic effects, the transfer law of microplastics in food chain/web and the related impact on human health, the assessment of the release ability and compound pollution of chemical additives in microplastics in the environment, ecological effects and mechanisms of microplastics on soil nutrient transfer and circulation and plant growth, and the development of source control and environmental remediation technology. This paper aims to improve some references for future research on microplastics by analyzing the transportation, transformation, and ecotoxicology of microplastics.

Keywords: microplastics; ecotoxicity; source; distribution; transportation; transformation

塑料因其具备轻便、成本低、可塑性强和耐用等优质特性,被广泛应用于航空航天、军事、农业、工业以及日常生活等多个领域^[1]。中国一直是塑料的生产大国^[2],根据国家统计局公布的数据,2017年中国塑料制品产量累计达 7.5155×10^7 t,大约占全球塑料产量的21.5%^[3]。塑料制品在人们的生活中无处不在,给人们带来便利的同时,也造成了严峻的生态环境问题。据调查,到2020年,全球大约产生3.59亿t的塑料垃圾,其中有1.5~2亿t(甚至更多)被丢弃在垃圾填埋场或自然环境中^[4]。丢弃的塑料废弃物最终都会破碎为微塑料颗粒(microplastics, MPs)。

20世纪中后期,科学家们就已经发现了微塑料的存在痕迹,Carpenter和Smith^[5]于1972年在西马尾藻海发现了许多经过风化作用形成的0.25~0.5 cm的塑料颗粒,但是“微塑料”概念的首次提出是在2004年^[6],至此才逐渐引起了重视和警惕。微塑料作为一种新型污染物,是指直径<5 mm的塑料碎片或颗粒,包括碎片、纤维、颗粒、发泡和薄膜等不同形貌类型^[7-8],由于其稳定的化学性质,可在环境中存在数百年到几千年^[9],并且由于微塑料具有粒径小、数量多、分布广等特点,因此极易被生物摄取,并在食物链中积累^[10],同时可进一步降解至纳米级颗粒威胁人体健康^[11]。自2011年起,联合国环境规划署(UNEP)开始持续关注海洋中的塑料垃圾,尤其关注微塑料的污染问题。2014年6月的首届联合国环境大会上,UNEP发布*UNEP Year Book 2014*^[12]和*Valuing Plastic: The Business Case for Measuring,*

Managing and Plastic Use in the Consumer Goods Industry^[13]报告指出,海洋里大量的塑料垃圾给海洋生态系统造成的经济损失每年高达130亿美元。Nature杂志在2014年12月连续2期报道了海面漂浮和海底沉积物中微塑料的研究进展,并呼吁人们关注海洋环境中的微塑料污染及其危害^[14-15]。

本文通过关键词“微塑料”对文献数据库进行检索,发现有关微塑料的论文主要集中发表在近6年,并呈逐年增长趋势(图1(a)和1(b)),特别是2017年以来,国际期刊上每年发表论文都在300篇以上(图1(b)),研究内容主要集中在微塑料对海洋环境的影响及对海洋生物的毒性研究等方面(图2)。在中国,现阶段针对微塑料污染的研究机构虽多于其他国家(图1(c)),但研究内容主要集中在微塑料的调查与生态效应等方面(图3),而有关微塑料在生态环境中迁移转化的报道还相对较少。因此,本文主要通过文献查阅和分析,从微塑料的形态及来源、分布特征、迁移转化、微塑料的生态毒性以及作用机制等方面,综述了近年来的研究进展,并提出了相关研究展望与建议,旨在为开展微塑料研究与防控工作提供参考。

1 微塑料的形态及来源 (Morphology and source of microplastics)

1.1 微塑料的形态(Morphology of microplastics)

微塑料种类繁多,以材质划分,目前环境中检出的微塑料主要包括聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)、聚酯(Pest)和聚对苯二甲酸

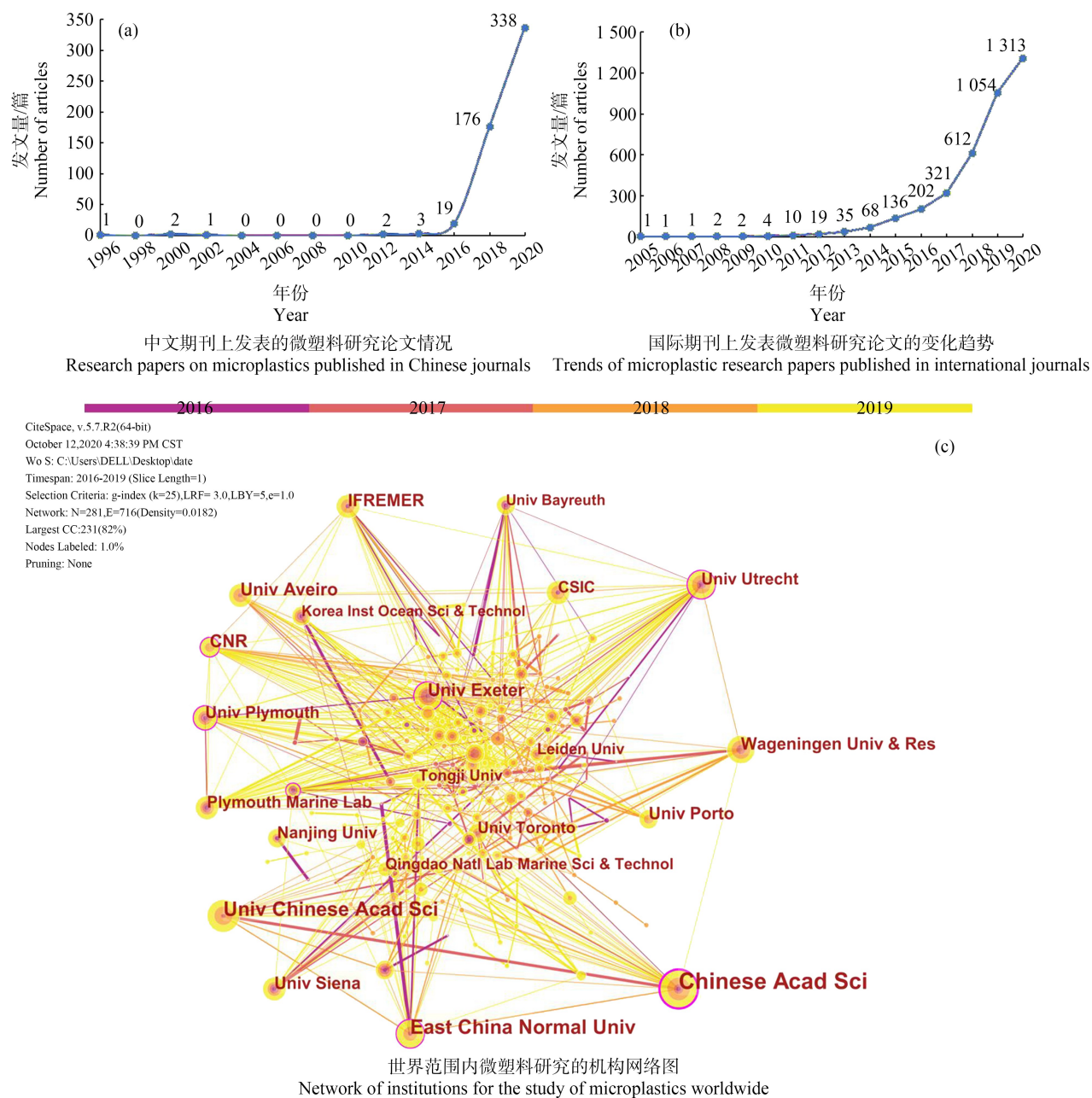


图1 微塑料研究领域发表的论文及相关研究机构情况

Fig. 1 Research papers on microplastics published in journals and related research institutions

类(PET)^[16]。微塑料的外形多为圆柱、圆形和圆盘状,其色彩以透明、白色和灰色较为常见^[17]。微塑料的形态结构复杂,有明显的裂缝孔隙。其孔隙较发达且比表面积大^[18],疏水性强,是众多疏水性有机污染物和重金属的理想载体^[19]。

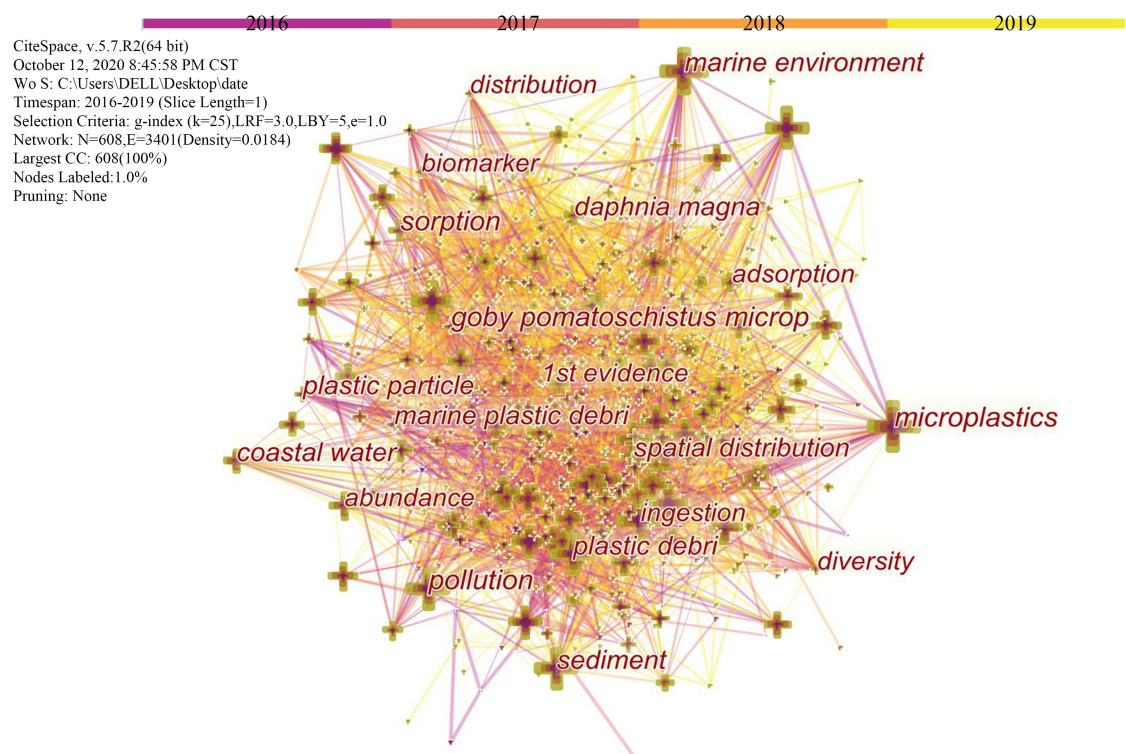
1.2 微塑料的来源(Source of microplastics)

微塑料的来源相当广泛,它主要来自工业、农业及制造业等各个方面,从纺织品、电子设备再到颜料印染行业,到处都有它的踪迹,例如塑料袋、衣物制

品、餐具、汽车以及船舶建筑等方面。

1.2.1 微塑料的主要贡献者——塑料垃圾

塑料制品的主要成分是人工合成塑料,其破碎后会产生大量塑料微粒^[20]。据调查研究报告,塑料的完全降解少则需要几百年时间,多则上千年才能完成^[21]。它们会随着水流、风力等外力作用进入海洋环境。在此过程中经过物理、化学和生物等作用分解产生的塑料颗粒性质稳定,降解困难,可在海洋中存留数百年以上。



从国际期刊看微塑料研究的主题网络图
Subject network of microplastics research from international journals

图 2 微塑料研究的主题分布情况(国际)

Fig. 2 Distribution of topics on microplastics from international journals

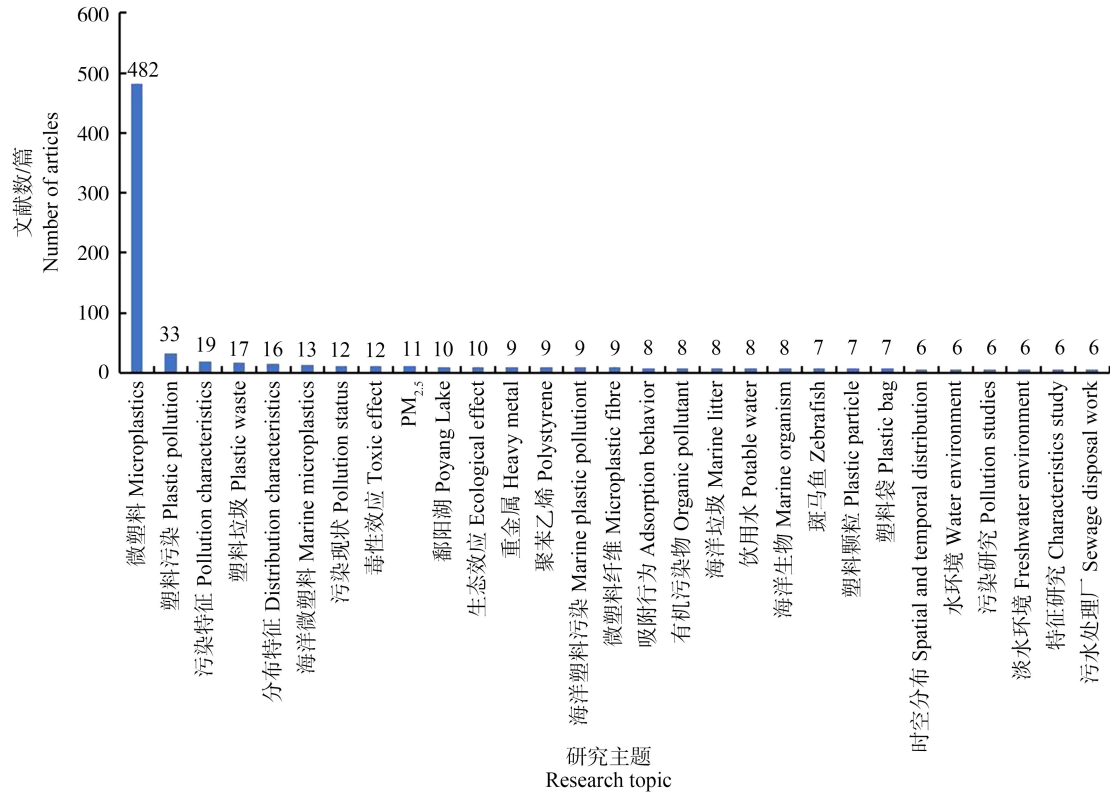


图 3 中文期刊上微塑料研究的主题分布情况

Fig. 3 Distribution of topics on microplastics from Chinese journals

1.2.2 微塑料的生产来源——合成织物

当前,人们穿的衣物主要成分中大约有60%为化纤。有研究表明,每洗一件合成织物大约会有1900个塑料纤维脱落^[21],而现阶段的洗衣机还没有过滤超细纤维的能力,因此,这些超细纤维会随着废水一起进入到水环境中^[22]。

1.2.3 微塑料的生活来源——个人洗护、清洁和化妆品

塑料微粒具有天然去角质的功能,且价格低廉,因此被广泛应用于化妆品、洗衣液、牙膏和洗面奶等皮肤去角质产品中,而明显增加产品的清洁作用^[23-26]。但这些微塑料物质在使用过程中会随着生活废水流入水环境中,最后迁移至海洋,给海洋生态环境带来严重的污染问题。

2 微塑料的分布特征 (Distribution characteristics of microplastics)

2.1 大气圈中微塑料的分布特征 (Distribution of microplastics in the atmosphere)

近年来,国内研究人员在上海^[27]、东莞^[28]和烟台^[29]等地的大气样品中发现了以纤维类为主的微塑料的存在。同时,鉴定出包括聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyester terephthalate, PET)、聚乙烯(polyethylene, PE)等在内的多种微塑料。Liu等^[30]检测了中国39个主要城市的室内外降尘样品,通过分析PET和聚碳酸酯(polycarbonate, PC)的质量浓度发现,室内PET的质量浓度达到 $1\,550 \sim 120\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于室外,而室内PC的质量浓度与室外差别不明显^[31]。

国外研究人员也在法国巴黎^[32]、比利牛斯山区^[33]以及德国汉堡^[34]的大气沉降样品中发现了微塑料的存在,除在巴黎地区的微塑料主要类型为纤维类外,比利牛斯山区和汉堡地区以碎片类微塑料为主。Allen等^[33]通过对比比利牛斯山区的气团运动轨迹进行分析,发现微塑料通过大气传输的距离可达95 km。因此,大气环境中的微塑料污染通过大气传输,已成为陆地环境微塑料污染的一个重要来源。目前,已有的大气环境中微塑料污染研究主要基于单区域或多区域的短周期采样调查,缺少针对多区域、长周期的大气微塑料污染比较研究。海岸带是受全球气候变化和人类活动双重影响的重要区域,研究海岸带城市大气中微塑料污染的时空分布特征具有重要的科学意义。

2.2 水圈中微塑料的分布特征 (Distribution of microplastics in hydrosphere)

2.2.1 微塑料在全球水域分布广泛

风力、河流和洋流等外力作用能将环境中的塑料残体带至偏远地区^[35],是偏远地区微塑料污染的重要途径^[36]。研究表明,无论是北极积雪,还是珠穆朗玛峰最顶峰,以及海底最深处,微塑料碎片几乎遍布每个生态系统^[37-38]。西班牙国家研究委员会马拉斯皮纳(Malaspina)海洋考察队发现,全球海洋中存在五大塑料碎片聚集地,分别是北太平洋、北大西洋、南太平洋、南大西洋和印度洋地区,这些聚集带基本与海洋表面的五大环流所在地重合^[39]。在北太平洋副热带环流区,塑料颗粒含量达到 $3\,276 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $250 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。Cózar等^[38]的研究结果显示,微塑料在这些涡旋区的分布呈外低内高的趋势,涡旋外缘的微塑料含量通常 $<50 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$,接近涡旋中心区域的微塑料含量一般 $>500 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$,而涡旋中心区域微塑料含量通常高达 $1\,500 \sim 2\,500 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2}$,是涡旋外缘的30倍以上。因此,微塑料在海洋中的空间分布变化受到海流影响较大,呈现分布广泛、区域高度集中的现象。Eriksen等^[39]在美国五大湖的21个站点采集样品并分析了其中的塑料碎片,发现其中20个站点样品微塑料含量达 $43\,000 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$ 。法国和比利时研究人员对法国、意大利北部及西班牙的地中海海域表层 $10 \sim 15 \text{ cm}$ 海水取样分析,结果显示90%的样品均含有塑料垃圾碎片,由此推测在整个地中海海域约有2500亿个微塑料垃圾碎片^[40-41]。

2.2.2 微塑料在近海环境分布相对集中

近海海洋环境中的微塑料主要分布在表层海水、海滩与岸滩以及近海沉积物中。通过分析近海、海湾、海峡和海岛周边等^[41-48]不同区域海面漂浮微塑料的颗粒粒径及分布特征,可以发现近岸海域海面漂浮的微塑料污染已相当普遍。就中国而言,主要集中在长江和东海近岸、南海海滩、渤海海滩、香港岛近岸海面及沙滩等(表1)^[49-56]。其中,广东沿海的沉积物中微塑料的主要成分是聚苯乙烯碎片,含量高达 $6\,838 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3[55]}$ 。三峡水库表层水中微塑料的含量也高达 $12.611 \sim 1\,597 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3[53]}$,其主要成分是聚乙烯和聚丙烯纤维。而南海的水样中检测出的微塑料主要成分则是聚酯纤维,含量为 $4.1 \sim 131.5 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3[50]}$ 。目前,我国海洋环境状况公报中每年都有海洋塑料垃圾的相关数据,但尚未见到有关微塑料方面的信息。因此海洋中微塑料的数量和总量及分

表 1 我国近海环境中微塑料污染现状

Table 1 Status of microplastics pollution in offshore environment of China

地点 Place	粒径 Particle size	环境介质 Environmental medium	主要成分 Main constituent	污染程度 Pollution level	参考文献 Reference
长江 The Yangtze River	46.8 ~ 4 968.7 μm	水样和沉积物 Water samples and sediments	纤维、塑料微粒 Fiber, plastic particles	20 ~ 340 n·kg ⁻¹	[49]
南海 The South China Sea	125 ~ 167 μm	浮游动物 Zooplankton	聚酯纤维 Polyester fiber	4.1 ~ 131.5 n·m ⁻³	[50]
渤海 The Bohai Sea	50 ~ 23.5 μm	水样 Water	聚乙烯 Polyethylene	(0.33±0.34) n·m ⁻³	[51]
沿海区域 Coastal areas	<250 μm	贻贝 Mussels	纤维 Fiber	0.9 ~ 4.6 n·g ⁻¹	[52]
三峡水库 Three Gorges Reservoir	<1 mm	表层水 Surface water	聚乙烯、聚丙烯纤维 Polyethylene, polypropylene fiber	12.611 ~ 1 597 n·m ⁻³	[53]
三峡水库 Three Gorges Reservoir	<1 mm	沉积物 Sediments	聚乙烯、聚丙烯纤维 Polyethylene, polypropylene fiber	25 ~ 300 n·kg ⁻¹	[53]
渤海 The Bohai Sea	—	沉积物 Sediments	纤维 Fiber	102.9 ~ 163.3 n·kg ⁻¹	[54]
广东沿海 Coastal areas of Guangdong	<10 mm	沉积物 Sediments	聚苯乙烯碎片 Polystyrene fragments	6 838 n·m ⁻³	[55]
长江 The Yangtze River	0.5 ~ 12.46 mm	水样 Water	纤维颗粒 Fibrous particles	(0.167±0.138) n·m ⁻³	[56]

布特征应作为今后海洋环境监测的内容。

2.2.3 深海成为微塑料的汇

自 2001 年北太平洋垃圾带发现以来,其范围现已扩大 4 倍 ~ 16 倍,并且 94% 的漂浮碎片为微塑料^[7]。学者们通过研究海洋中微塑料的垂直分布发现,碎片的最终归宿不仅仅在海水表层,更在深海或深渊带。中国科学院深海科学与工程研究所彭晓彤团队在对马里亚纳海沟挑战者深渊的微塑料调查中发现,在马里亚纳海沟 2 673 ~ 10 908 m 深的底层海水中,微塑料含量为 2.06 ~ 13.51 个·dm⁻³,比开放大洋表层及次表层水中微塑料的含量高出数倍;在马里亚纳海沟 5 108 ~ 10 908 m 深的表层沉积物中,微塑料含量为 200 ~ 2 200 个·dm⁻³,也明显高于大多数深海表层沉积物中的含量^[58]。绝大部分的塑料密度小于海水,因此进入海洋环境后会首先累积在海水表层^[7]。塑料在海水表层的风化、裂解和破碎会引起微塑料在水柱中的垂直迁移和沉降。导致沉降的因素不仅包括塑料聚合物的密度,也包括微塑料表面的附着生物,最终使微塑料沉降于海底^[59]。已有研究表明在深海区域海底遍布垃圾,其中最常见的是塑料垃圾^[59]。2014 年,Woodall 等^[60]、Law 和

Thompson^[7]的研究结果就已经表明深海是微塑料的主要汇集区。和微塑料相比,在深海下潜的研究中,大块塑料垃圾的报道更广泛。因此,深海微塑料的研究还有待进一步深入。

2.3 土壤圈中微塑料的分布特征(Distribution of microplastics in the soil environment)

由于目前世界各国对土壤微塑料污染的研究有限,因此只能得出部分地区的土壤微塑料污染现状。由表 2 可知,虽然微塑料的丰度在描述上单位不尽相同,在尺度范围上也存在差异,但墨西哥、澳大利亚悉尼以及瑞士的微塑料在主要成分上均含有 PE 和 PS^[61-69]。在我国已检测的几个地区中,黄土高原中微塑料的丰度(<0.54 mg·kg⁻¹)可能是最低的。中国云南作为旅游资源丰富的省份,微塑料含量高达 (7 100 ~ 42 960) 个·kg⁻¹,显著高于中国其他地区。在这些地区中,微塑料的主要成分是 PE 和 PP。从以往的研究可以看出,微塑料在空间上呈现分布不均的现象,这可能与国家或地区的地理特征、发展程度和人口密集程度等相关^[61]。目前,我国微塑料在土壤中的分布研究还处于初级阶段,因此建立健全规范化的计量、测定和修复等指南标准是今后的重要任务。

表 2 世界范围内部分地区土壤中微塑料的分布特征

Table 2 Distribution characteristics of microplastics in soils in some parts of the world

所属洲 Continent	国家地区 Country/region	微塑料丰度 Microplastic abundance	主要成分 Main constituent	尺寸范围 Size range	文献 Reference
北美洲 North America	墨西哥 Mexico	2 770 pcs·kg ⁻¹	PE、PS	5 ~ 150 mm	[62]
澳洲 Australia	澳大利亚悉尼 Sydney, Australia	300 ~ 67 500 mg·kg ⁻¹	PVC、PE、PS	<5 mm	[63]
欧洲 Europe	瑞士 Switzerland	593 pcs·kg ⁻¹	PVC、PE、PS	12.5 ~ 500 μm	[64]
亚洲 Asia	中国上海(表层土) Shanghai in China (top soil)	(78.00±12.91) pcs·kg ⁻¹	PE、PP	0.03 ~ 16 mm	[65]
亚洲 Asia	中国上海(深层土) Shanghai in China (deep soil)	(62.50±12.97) pcs·kg ⁻¹	PE、PP	0.03 ~ 16 mm	[66]
亚洲 Asia	中国黄土高原 The Loess Plateau, China	<0.54 mg·kg ⁻¹	PE、PP	>100 μm	[67]
亚洲 Asia	中国云南 Yunnan, China	7 100 ~ 42 960 pcs·kg ⁻¹	PE、PP	0.05 ~ 10 mm	[67]
亚洲 Asia	中国山东 Shandong, China	1.3 ~ 14.7125 pcs·kg ⁻¹	PE、PP、PS	1 mm	[68]
亚洲 Asia	中国河北 Hebei, China	317 pcs·(500 g) ⁻¹	PE、PP、PVC	(1.56±0.63) mm	[69]

注: pcs 是一种计量单位, 即 pieces 的缩写; PE 表示聚乙烯, PS 表示聚苯乙烯, PVC 表示聚氯乙烯, PP 表示聚丙烯。

Note: pcs is a unit of measure, the abbreviation of pieces; PE means polyethylene; PS means polystyrene; PVC means polyvinyl chloride; PP means polypropylene.

2.4 生物圈中微塑料的分布特征 (Distribution of microplastics in the biosphere)

由于海洋是微塑料污染的重灾区, 许多海洋生物(包括可以食用的鱼类、虾及贝类等)已被证实可以吸收微塑料并将其储存在体内^[70-71]。采集来自红海沙特阿拉伯海岸 4 种不同栖息地的 26 种商业和非商业鱼类, 在 14.6% 的样本鱼类的胃肠道内发现微塑料存在, 体内微塑料浓度最高的鱼类是石斑鱼(底栖动物)^[72]。亚马逊河口的 14 种鱼类中有 13.7% 体内检测出含有微塑料, 且微塑料颗粒数量与鱼体的大小呈正相关^[73]。除了鱼类, 牡蛎等贝类也容易摄入微塑料。研究结果表明, 在中国 17 个城市的养殖牡蛎中均发现了微塑料, 平均每个牡蛎样本中含有 2.93 个^[74]。在加拿大和比利时, 野生的和购买的养殖贻贝也都受到了微塑料纤维的污染。由于贻贝通常养殖在涤纶线(PP 线)上, 而这些塑料线老化时可能会在贻贝体内残留塑料碎片^[75], 这些进入生物体内的微塑料不能得到有效的降解和排出, 会在其体内存留较长时间。van Cauwenberghe 和 Janssen^[76]将从比利时商店购买的牡蛎进行为期 3 d 的净化

后, 其体内依然存留有微塑料。当这些生物被食用后, 其体内的微塑料就会进入人体。Ragusa 等^[77]采用拉曼显微光谱法, 在母体、胎儿和羊膜中均发现了微塑料, 且在母体侧、胎儿侧和绒毛膜 3 个部分都检测出了 5 ~ 10 μm 大小不等的 12 个微塑料碎片, 每个微颗粒上都有色素沉着。研究表明, 这些微塑料所携带的物质会或对人体内分泌系统产生干扰, 并可能对人体健康造成长期影响^[76]。不仅如此, 人体还会通过呼吸作用将微塑料聚集在肺部^[70]。微塑料被吸入人体内会通过呼吸道到达肺泡内, 虽然可吸入颗粒中粒径较大的颗粒会在上呼吸道中被黏膜纤毛清除, 但小粒径的颗粒不受这种作用的限制, 可以到达肺部深处并长时间沉积于此^[76]。

3 微塑料的迁移转化 (Transportation and transformation of microplastics)

3.1 微塑料在各环境介质间的迁移转化 (Transportation and transformation of microplastics among environmental media)

大部分的微塑料密度较小, 会漂浮或悬浮在水

体表面,在洋流、潮汐、风浪和海啸等外力的作用下进行迁移(图4)。在不同环境介质之间,微塑料会发生一定的环境迁移行为。沉降作用及雨水可以将大气中的微塑料带入陆地环境及水体中,但目前陆地环境中的微塑料通过何种途径迁移进入大气还处于初级研究阶段。有研究表明,陆地环境中的微塑料可以通过风力作用迁移至大气中^[78]。积累在陆地环境中的部分微塑料则在植物根系、生物和机械扰动作用下发生迁移。目前对生物扰动驱动下微塑料迁移的研究较多。例如,土壤中的蚯蚓(*L. terrestris*)可将60%以上的聚乙烯小球从表层向下迁移至10 cm以下的土层,其中小粒径(710 ~ 850 μm)微塑料要比大粒径更容易迁移^[79]。Huerta Lwanga 等^[80]的研究也显示微塑料会随蚯蚓迁移至其洞穴中,并且蚯蚓对微塑料的迁移也具有粒径选择性,其中粒径<50 μm 的PE小球要比其他大粒径更容易迁移。除蚯蚓外,弹尾目昆虫白符跳(*Folsomia candida*)和小原等节跳(*Proisotoma minuta*)也能将树脂颗粒(100 ~ 200 μm)和纤维从表层土壤迁移至下层^[81]。微塑料除了受扰动后在土体内迁移外,还可通过侵蚀、地表径流等形式向土体外迁移至淡水系统^[82]。淡水环境

被认为是陆地和海洋环境之间微塑料迁移的纽带,陆地上约80%的微塑料便是通过河流进入到海洋环境^[83]。但当发生潮汐现象或者洪水时,微塑料又能从海洋或河流反向迁移回到陆地环境。微塑料经过废弃塑料碎块降解、排水系统、大气沉降、土壤微塑料污染下渗和农田径流等来源进入陆地水体后,大致有3个去向:(1)沉积在江河、湖泊底部,与河湖底部淤泥掺和在一起,或者随着水流迁移并最终进入海洋;(2)在陆地水环境中降解与转化;(3)被生物摄取吸收累积,从而进入食物链,在不同食物链环节中累积与传递。

微塑料的自身特征(密度、形状和大小)以及外在因素,如天气(风、降雨)、地形和水文(水位、流速)等会影响微塑料的迁移过程。Moore^[84]指出由于微塑料的聚集沉积和斯托克斯沉降作用,中等大小的微塑料更容易从淡水环境中迁移至海洋环境中,而那些较大的微塑料则容易滞留在原地。不管是沉积在河流底部,还是随水流迁移,都会受到外界环境因素的影响,被分解成更小粒径的微塑料,甚至是纳米微塑料,或最终降解转化为 CO_2 、 H_2O 和甲烷^[84]。光降解被认为是最有效的非生物降解方法之一,尤

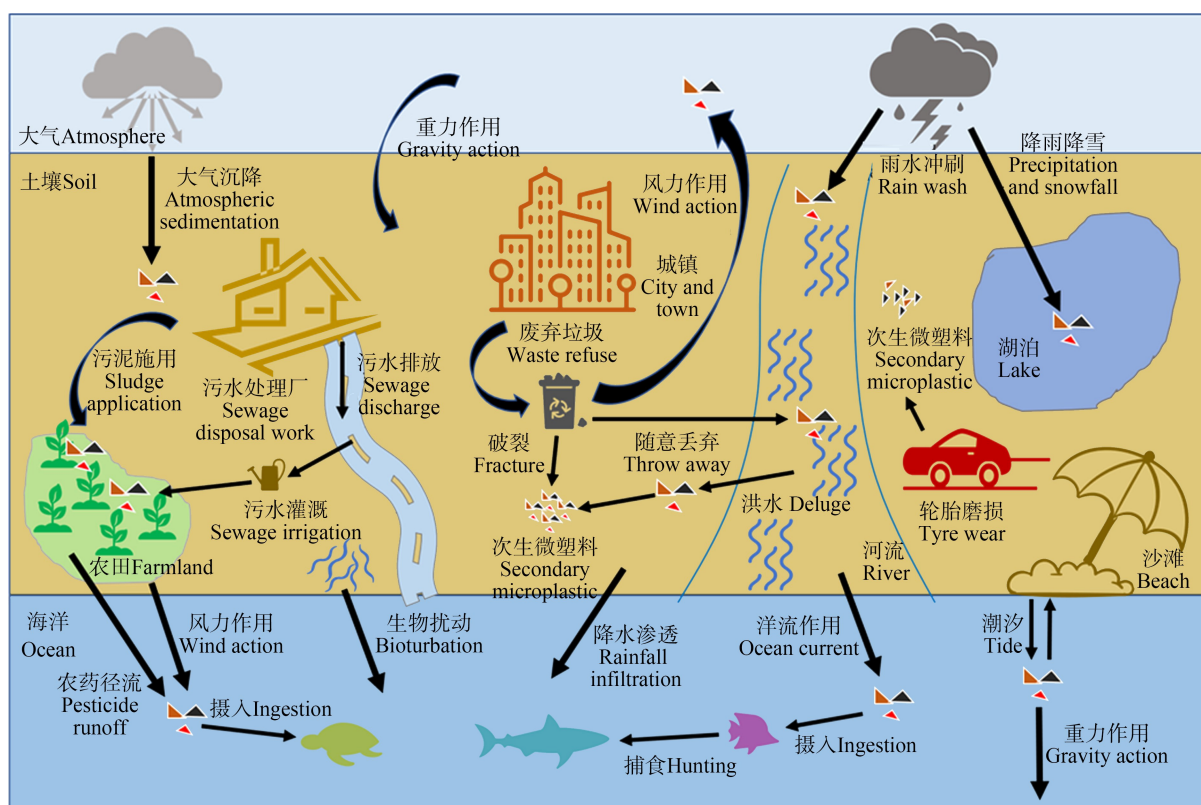


图4 微塑料在生态系统中的环境行为概念示意图

Fig. 4 Conceptual schematic diagram of environmental behavior of microplastics in ecosystems

其是漂浮在水体表面的微塑料,和海滨沙滩上的微塑料一样,其长时间暴露在阳光下,在紫外线和空气中氧气的作用下会逐渐老化分解^[83]。水流的作用、河床及河岸的摩擦、磨损等机械作用也会导致微塑料进一步老化并快速破碎分解。而在微塑料粒径不断变小的过程中,微塑料也可以被微生物利用从而实现完全降解。微生物降解被认为是塑料降解的最理想途径,微生物对聚合物的降解效率几乎能达到100%^[85]。微生物在降解过程中以有机物形式存在的碳转化为无机态碳(主要为 CO_2)。所以,微生物的降解作用又称为生物矿化作用^[85]。在有氧情况下,需氧微生物将塑料降解为 CO_2 和 H_2O ;在无氧环境下,厌氧微生物将塑料降解为 CO_2 、 H_2O 和甲烷^[86]。塑料的微生物降解作用可以分为2个阶段,首先是在生物或非生物作用下将聚合物转化为单体、低聚物或二聚物,然后单体、低聚物或二聚物进入微生物细胞充当碳源和能源,转化为 CO_2 、 H_2O 和甲烷^[83]。微塑料的特性决定了塑料聚合物转化为单体的时间。在生物或非生物作用下聚合链断裂后,塑料原来的结构发生变化,聚合物与聚合物之间,聚合物与塑料添加剂之间失去连接作用,塑料添加剂从塑料中溶出或流失,使塑料的特性发生改变。加上微小化之后的聚合物暴露在外界环境中的比表面积加大,促进了微生物的附着繁殖和物理化学反应的发生,使聚合物进一步降解,分解成更小的微塑料或单体,进而被微生物利用矿化,转化为 CO_2 、 H_2O 和甲烷。

3.2 微塑料在食物链中的迁移转化(Transportation and transformation of microplastics in the food chain)

3.2.1 微塑料在海洋食物链中的迁移转化

对纳米塑料在海洋生物体中的生物效应研究表明,纳米塑料可被多种海洋生物吞食或摄取,并积累在生物体内,且排除缓慢,并可以进入生物体的肠道组织内,造成其消化道的机械损伤和堵塞,或者引起假的饱食感,导致生物体摄取量降低,从而影响生物体内的系统平衡和正常代谢,造成其死亡^[87]。Bhattacharya等^[88]以海洋内重要的初级生产力——单细胞生物绿藻为研究对象,发现带电的PS微球(20 nm)可以吸附聚集在绿藻(2~10 μm)的表面,影响藻类的光合作用。同时,由于这种吸附作用的存在,导致扇贝类对这些藻类表面的纳米塑料的吸收能力大大增强。Della Torre等^[89]研究发现表面带负电的40 nm的PS微球容易聚集在海胆胚胎(*Paracentrotus lividus*)的消化道内,而表面带正电的PS微球表现

出更为明显的毒性。此外,Cedervall等^[90]研究了纳米塑料沿着海洋食物链的转运情况,发现纳米塑料可以沿着斜生栅藻—大型水蚤—鲫鱼的水生食物链发生迁移,并影响鲫鱼的脂质代谢和行为活动。

目前,由于纳米塑料具有颗粒小的特点,且检测生物组织中纳米塑料的方法较少,因此,在纳米塑料的组成、分布及对生态环境和生物的影响等方面的研究还相对较少,今后亟待进一步探究纳米塑料在海洋生物中迁移转化的相关过程与效应。

3.2.2 微塑料在陆地食物链中的迁移转化

土壤中的微塑料也可以通过食物链发生传递、富集,带来健康风险。Huerta Lwanga等^[91]首次报道了微塑料在庭院土壤—蚯蚓和土壤—鸡食物链中的传递,发现微塑料从土壤到蚯蚓粪的富集系数高达12.7,而从土壤到鸡粪的富集系数更是高达105。此外,该研究同时也观测到鸡的砂囊中也有微塑料富集,富集系数为5.1。由于砂囊通常作为食材使用,因此,需要关注该暴露途径下微塑料对人体健康的影响。目前,对土壤中微塑料能否进入植物体内的报道还很少。Qi等^[82]研究了低密度聚乙烯(LDPE)和可生物降解塑料地膜碎片对小麦生长的影响,结果显示2种塑料膜都会干扰小麦的生长,且生物可降解塑料膜对小麦生长影响更大。Bandmann等^[92]通过对烟草细胞的培养研究发现,纳米级塑料微珠可通过细胞内吞作用进入烟草细胞,这表明小粒径的纳米级塑料可通过植物根际吸收进入植物体内。孙晓东^[93]以拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)作为受试生物,研究了不同电荷的聚苯乙烯纳米塑料(PS-NPs)对拟南芥的植物毒性效应及其吸收方式及分布规律,发现PS-NPs可以被成熟区的根毛吸收,并通过质外体途径内化至中柱附近。尽管已有研究报道了微塑料对作物的影响,但它们对陆地生态系统的潜在影响在很大程度上仍然未知,陆地环境中纳米塑料的归趋(图5)和运输亟待进一步研究。

4 微塑料的生态毒性(Ecological toxicity of microplastics)

目前,微塑料的生态毒性研究主要集中在植物、微型和小型生物方面,而对动物和人类的影响研究较少。

4.1 微塑料对植物的影响(Effects of microplastics on plants)

随着塑料薄膜和含有微塑料农业化学品的大量

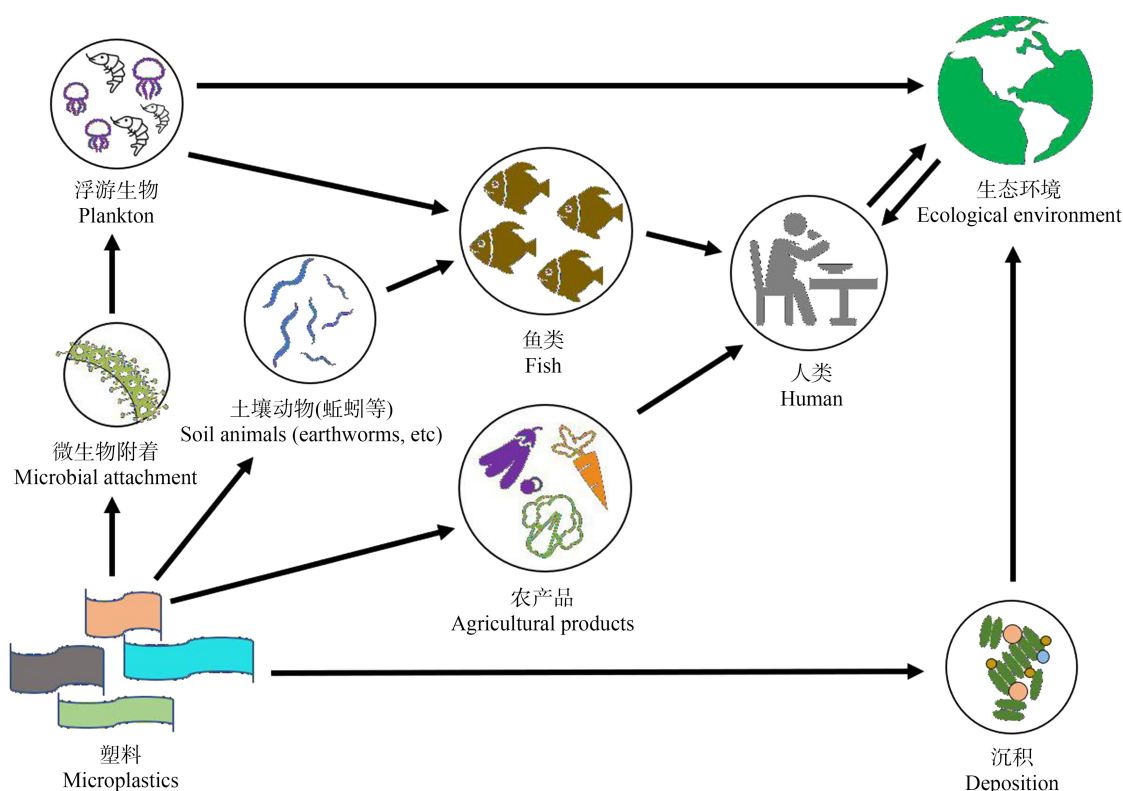


图5 微塑料在生态环境中的归趋

Fig. 5 The fate of microplastics in the environment

使用,农业土壤中的微塑料积累量已超过海洋环境中微塑料的积累量^[94]。但目前有关微塑料的植物生态毒理学效应研究仍处于起步阶段^[95],仅有少数文献开展了微塑料对植物如绿豆(*Vigna radiata*)^[96]、小麦(*Triticum aestivum*)^[97-98]、洋葱(*Allium cepa*)^[99]、水芹(*Lepidium sativum*)^[96]和大豆(*Glycine max*)^[100]等的影响研究。有关研究表明,PVC农膜中的邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯(DEHP)能在弱酸性条件下大量析出^[101],对植物产生潜在的毒理学效应。刘晓丹等^[102]发现塑料中的增塑剂(邻苯二甲酸酯类)能够抑制小麦种子的萌发,甚至在高浓度(1 500~1 800 mg·L⁻¹)下能引发小麦种子细胞的程序性死亡。此外,环境中风化成的微塑料表面粗糙,且具有较大的比表面积、带负电荷,能吸附重金属和有机污染物^[103-105],从而成为污染物的环境载体,进而对植物产生一定的影响,因此农业系统中的微塑料与重金属或农药的联合效应还有待进一步研究。另外,Giorgetti等^[106]报道,50 nm聚苯乙烯纳米塑料能够内化于洋葱根分生区细胞中,引起氧化胁迫,产生细胞毒性(如有丝分裂异常)和基因毒性。因此,开展不同微塑料类型及粒径的研究是深入揭示微塑料的

植物毒性的关键之一。

4.2 微塑料对动物和其他低等生物的影响(Effects of microplastics on animals and other lower organisms)

当微塑料暴露在环境中时,会引起多种生物和人体细胞不同程度的氧化应激反应,其原因可能是因为它们比表面积较大,在其表面会吸附许多氧化物质,这些物质会释放活性氧,同时,产生炎症反应的过程中也会释放活性氧^[107-108]。Schirizzi等^[109]将HeLa和T98G细胞暴露于微塑料并观察细胞活性变化和氧化应激反应,发现在微塑料的浓度较低时,细胞活性没有产生显著性变化,但2种细胞均产生了氧化应激反应。另外,Barboza等^[110]将鲈鱼(*Dicentrarchus labrax*)单独暴露于微塑料96 h后,鱼的鳃和肝脏均出现了氧化应激反应,并且微塑料和汞共同暴露时,两者表现出协同作用。除此之外,有报道称斑马鱼^[111]、河蚬^[112]、轮虫^[113]和小鼠^[114]接触微塑料后均会产生氧化应激反应。当机体内的活性氧足够多时,就会引发炎症反应。有研究表明,在接受塑料内支架治疗患者的关节囊、腔和周围组织中观察到了PE和PET磨损颗粒,这些塑料颗粒会导致急性炎症的发生^[115]。因此,微塑料暴露诱导的氧化应

激反应被认为是其产生生物毒性效应的主要原因。

微塑料也会引起生物细胞内能量平衡和新陈代谢的紊乱,两者均会影响生物的正常生长和繁殖。Lee 等^[116]研究发现,微塑料会影响日本虎斑猛水蚤(*Tigriopus japonicus*)的摄食量,使其食欲下降,繁殖能力下降,生长迟缓甚至出现死亡。微塑料还会导致亚马逊慈鲷(*Amazonian cichlid*)^[117]和老鼠体内乳酸脱氢酶的增加,在老鼠肝脏中还会导致线粒体的功能受损和脂质代谢下降,其肝脏质量也会有明显下降^[114]。此外,Goldstein 等^[118]通过长期研究发现,北太平洋丝海龟(*Halobates sericeus*)的产卵密度与微塑料含量呈正相关关系,这可能是因为丝海龟产卵时需要大量的载体,而微塑料的存在可以作为其卵载体,因而增加了其产卵率。但考虑到微塑料对不同物种的作用效应不同,它的存在可能会改变海洋生物群落的组成和结构,从而产生负面影响。

一些粒径较小的微塑料进入到生物体后,会穿透细胞膜,滞留在周边组织及循环系统内,产生细胞及分子层面的毒性效应^[119]。研究表明,400 ~ 1 000 μm 聚乙烯和聚丙烯能破坏衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)细胞表面的多糖合成及解毒系统,抑制生长调控功能基因的表达^[120]。0.5 mm 的聚乙烯增加了有机污染在日本青鳉(*Oryzias latipes*)体内的积累,使得雌性青鳉的肝脏发生明显的组织病理学改变,雄鱼卵黄蛋白原基因表达量显著下调,生殖细胞增殖^[120]。还有研究表明,1 ~ 50 μm 的聚氯乙烯会增强翡翠贻贝(*Perna viridis*)体内与基本生理过程有关的基因表达,如细胞周期阻滞、凋亡和氧化还原压力等^[121]。当微塑料降解至纳米时,其生物毒性会进一步增强。Kashiwada^[122]发现,在淡水中 39.4 nm 的聚苯乙烯可以穿过青鳉(*Oryzias latipes*)的血脑屏障,并最终进入脑部组织,影响其脑部发育和功能。虽然目前还没有关于微塑料影响人体健康的直接证据,但已有报道称 44 nm 的微塑料被人体胃腺癌细胞内化会影响基因表达,抑制细胞活力,诱导发生促炎反应和形态学改变。此外,纳米塑料容易与蛋白质发生相互作用,从根本上改变这些生物分子至关重要的二级结构,导致蛋白质变性^[92]。因此,微塑料的基因毒性需要通过进一步的研究来进行验证。

微塑料对微生物也会产生一定影响。研究表明,特定的微生物能以微塑料作为基质进行生长繁殖,故微塑料可能作为特定微生物在河流湖泊中传播扩散的媒介^[123]。在污水处理系统中,微生物能够

附着在特定的微塑料上^[124]。Zettler 等^[123]比较以微塑料、悬浮物和水流为基质的微生物群落组成,发现微塑料上的微生物群落组成种类较少,多样性及均匀性均较差。但某些特定微生物选择微塑料为繁殖场所,其潜在原因可能是^[125]:(1)微塑料的表面结构为微生物提供了很好的繁殖场所;(2)微塑料主要由含碳物质组成,能作为某些微生物的碳源而被加以利用,同时,微塑料表面吸附的各种有机物也能为微生物的生长繁殖提供碳源;(3)微生物能依附于微塑料上的多糖生物膜。有研究者发现弯曲杆菌能依附在微塑料上,而弯曲杆菌属中含有某些致病菌^[124],而这些致病菌可能会对生物及人类健康产生不良影响。总体而言,目前关于微塑料携带致病菌的研究数量较少,还不能确定微塑料是否能在自然环境中,在水流、光、热的作用下长时间携带微生物,从而对生物和人类健康产生持续影响。

5 研究展望 (Research prospect)

微塑料污染是一个全球性的生态环境问题,但现有的研究还较为单薄,今后需不断扩大研究的广度和深度,开展系统性深入研究。关于微塑料污染的生态环境行为、生态风险及其管控与修复技术等方面需要加以特别关注和研究。

5.1 加强微塑料在各环境介质之间迁移转化及毒性效应研究 (Study on transportation and transformation of microplastics among environmental media and their toxic effects)

微塑料数量多、质量轻,会随着大气环流、扬尘、风沙、洋流、潮汐、风浪和海啸等在生态环境组分之间进行迁移,导致其分布范围极其广泛,因此,应加强对微塑料在大气-陆地-土壤-水环境中的迁移转化途径、过程和机理、微塑料污染的生态环境效应和生物复合毒性的研究,全面摸清微塑料在生态环境中迁移转化规律、环境行为及其生态毒理效应^[93]。

5.2 加强微塑料在食物链/网中传递规律及其对人类健康影响的研究 (Research on the transfer law of microplastics in food chain/web and the related impact on human health)

已有研究表明,微塑料在食物链中逐级传递及放大作用会对海洋生物甚至人类健康造成影响和威胁。但目前有关微塑料的生物毒性研究大多数都只停留在少数生物以及生物个体水平上,而对微塑料在食物链/网中的传递效应规律及其健康影响研究仍然较少。因此,应针对典型生境和典型生态系统,

运用同位素标记法,重点研究微塑料在典型食物链/网中的传递途径与毒性效应,进而为防控和缓解微塑料对生物多样性及人类健康的影响提供科学依据。

5.3 加强微塑料中化学添加剂在环境中可释放性及其复合污染效应研究(Assessment of the release ability and compound pollution of chemical additives in microplastics in environment)

塑料在生产和加工过程中会加入大量添加剂,比如增塑剂、阻燃剂、抗氧化剂和光热稳定剂等。这些化学物质通常是通过物理混合加入到聚合物结构中,因而非常容易在环境中释放成为新的污染源。因此,加强不同环境条件下微塑料化学添加剂的释放规律研究,以及它们与微塑料形成的复合污染对生态环境的影响及其生物毒害作用效应与机制、风险评估研究,将成为一个新的切入点。

5.4 加强微塑料对土壤养分迁移、循环及植物生长的影响及作用机制研究(Study on ecological effects and mechanisms of microplastics on soil nutrient transfer and circulation and plant growth)

土壤是微塑料的一个重要汇,因此,微塑料的存在势必会改变土壤理化和微生物过程以及植物生长状况,因此,需加强开展农田土壤微塑料对土壤养分有效性、作物养分吸收与循环、土壤肥力保持、植物生长性状、产量及品质等的影响效应及其作用机制研究,该方面的研究可为农业安全和粮食安全生产的风险评估提供科学依据。

5.5 加强微塑料的源头管控和修复技术研究(Development of source control and environmental remediation technology for microplastics)

微塑料来源广泛,迁移途径和介质众多,污染影响和危害严重,因此,需要加强微塑料的源头管控研究,例如,微塑料的源/汇研究、生产端源头管控、新型替代技术研发与应用、动态监测、大数据系统与管理信息系统、溯源系统建设,构建微塑料源头管控的技术体系、监测体系、预测预警体系以及应急防控体系。同时,要大力研发微塑料的降解修复材料、方法和技术,构建土壤微塑料污染治理的技术支撑体系。

6 结语(Conclusion)

塑料在工农业生产和日常生活中无处不在,但由于人们对塑料制品的大量使用、随意丢弃和不当处理,导致大气、土壤和水体受到不同程度的微塑料污染。这些环境介质中的微塑料最终会通过食物链富集在生物体和人体内,对人体及其他生物造成不可

逆转的生物毒性,影响生态环境安全和生物体健康。

微塑料污染日益成为一个全球化的生态环境问题,因此,需要各国采取共同行动,全面管控和治理微塑料污染。因此,要大力加强微塑料在各环境介质之间、食物链/网中的迁移转化及毒性效应及其对人类健康影响研究,加强微塑料中化学添加剂在环境中可释放性和复合污染效应研究,加强微塑料对土壤养分迁移、循环及植物生长的影响及作用机制研究。同时,还需加强微塑料的源头管控技术、替代技术和污染修复技术的研究。

通讯作者简介:章家恩(1968—),男,博士,教授,主要研究方向为农业生态、土壤生态、入侵生态、生态规划、乡村振兴和生态文明建设等。

参考文献(References):

- [1] 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
Xia B, Du Y S, Zhao X G, et al. Research progress on microplastics pollution in marine fishery water and their biological effects [J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(3): 178-190 (in Chinese)
- [2] 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
- [3] 张茜,肖柏青.淡水环境中微塑料污染研究进展[J].应用化工,2020,49(2):435-438
Zhang X, Xiao B Q. Research progress on microplastics pollution in fresh water [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(2): 435-438 (in Chinese)
- [4] Lau W W Y, Shiran Y, Bailey R M, et al. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution [J]. Science, 2020, 369(6510): 1455-1461
- [5] Carpenter E J, Smith K L Jr. Plastics on the Sargasso sea surface [J]. Science, 1972, 175(4027): 1240-1241
- [6] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. Science, 2004, 304(5672): 838
- [7] Law K L, Thompson R C. Microplastics in the seas [J]. Science, 2014, 345(6193): 144-145
- [8] 骆永明,周倩,章海波,等.重视土壤中微塑料污染研究 防范生态与食物链风险[J].中国科学院院刊,2018,33(10):1021-1030
Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, et al. Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks [J]. Bulletin of Chinese A-

- cademy of Sciences, 2018, 33(10): 1021-1030 (in Chinese)
- [9] 骆永明, 周倩, 章海波, 等. 重视土壤中微塑料污染研究 防范生态与食物链风险[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(10): 1021-1030
- Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, et al. Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(10): 1021-1030 (in Chinese)
- [10] Cózar A, Echevarría F, González-Gordillo J I, et al. Plastic debris in the open ocean [J]. PNAS, 2014, 111 (28): 10239-10244
- [11] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46 (12): 6453-6454
- [12] 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
- [13] Smith J. Plastic debris in the ocean [R]// United Nations Environment Programme (UNEP). UNEP Year Book 2014: Emerging Issues in Our Global Environment. Nairobi: UNEP, 2014: 48-53
- [14] Raynaud J. Valuing plastic: The business case for measuring, managing and disclosing plastic use in the consumer goods industry [R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2014
- [15] Marris E. Fate of ocean plastic remains a mystery [J]. Nature, 2014: DOI:10.1038/nature.2014.16508
- [16] Perkins S. Plastic waste taints the ocean floors [J]. Nature, 2014: DOI:10.1038/nature.2014.16581
- [17] 马乃龙, 程勇, 张利兰. 微塑料的生态毒理效应研究进展及展望[J]. 环境保护科学, 2018, 44(6): 117-123
- Ma N L, Cheng Y, Zhang L L. Research progress and prospect of ecotoxicological effects of microplastic [J]. Environmental Protection Science, 2018, 44 (6): 117-123 (in Chinese)
- [18] 扈瀚文, 杨萍萍, 薛含含, 等. 环境微塑料污染的研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(1): 97-102
- Hu H W, Yang P P, Xue H H, et al. Research progress on environmental pollution of microplastics [J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2020, 49(1): 97-102 (in Chinese)
- [19] 周倩, 章海波, 周阳, 等. 滨海潮滩土壤中微塑料的分离及其表面微观特征[J]. 科学通报, 2016, 61(14): 1604-1611
- Zhou Q, Zhang H B, Zhou Y, et al. Separation of microplastics from a coastal soil and their surface microscopic features [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(14): 1604-1611 (in Chinese)
- [20] 王昆, 林坤德, 袁东星. 环境样品中微塑料的分析方法研究进展[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 27-36
- Wang K, Lin K D, Yuan D X. Research progress on the analysis of microplastics in the environment [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1): 27-36 (in Chinese)
- [21] 杨婧婧, 徐笠, 陆安祥, 等. 环境中微(纳米)塑料的来源及毒理学研究进展[J]. 环境化学, 2018, 37(3): 383-396
- Yang J J, Xu L, Lu A X, et al. Research progress on the sources and toxicology of micro (nano) plastics in environment [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(3): 383-396 (in Chinese)
- [22] 陈刘, 邓培煌, 黄凡艳, 等. 微塑料污染现状及控制对策[J]. 环境与发展, 2020, 32(2): 34-35
- Chen L, Deng P H, Huang F Y, et al. Pollution status and control of micro-plastics [J]. Environment and Development, 2020, 32(2): 34-35 (in Chinese)
- [23] 王志鹏, 陈蕾. 陆地水系中微塑料的研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(3): 677-680
- Wang Z P, Chen L. Research progress on microplastics in terrestrial water systems [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(3): 677-680 (in Chinese)
- [24] Fendall L S, Sewell M A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(8): 1225-1228
- [25] Eriksen M, Mason S, Wilson S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 77(1-2): 177-182
- [26] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. Science, 2004, 304 (5672): 838
- [27] Liu K, Wang X H, Fang T, et al. Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai [J]. Science of the Total Environment, 2019, 675: 462-471
- [28] Cai L Q, Wang J D, Peng J P, et al. Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan City, China: Preliminary research and first evidence [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24(32): 24928-24935
- [29] 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
- Zhou Q, Tian C G, Luo Y M. Various forms and deposition fluxes of microplastics identified in the coastal urban atmosphere [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62 (33): 3902-3909 (in Chinese)
- [30] Liu C G, Li J, Zhang Y L, et al. Widespread distribution of PET and PC microplastics in dust in urban China and their estimated human exposure [J]. Environment International, 2019, 128: 116-124

- [31] Wang L, Zhang J J, Hou S G, et al. A simple method for quantifying polycarbonate and polyethylene terephthalate microplastics in environmental samples by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 4(12): 530-534
- [32] Dris R, Gasperi J, Rocher V, et al. Microplastic contamination in an urban area: A case study in Greater Paris [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 12(5): 592
- [33] Allen S, Allen D, Phoenix V R, et al. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(5): 339-344
- [34] Klein M, Fischer E K. Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 96-103
- [35] Mateo-sagasta J, Medlicott K, Qadir M, et al. Proceedings of the UN-water project on the safe use of wastewater in agriculture [J]. *American Heart Journal*, 2013, 161 (6): 1114-1124
- [36] 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
- [37] Mateo-sagasta J, Medlicott K, Qadir M, et al. Proceedings of the UN-water project on the safe use of wastewater in agriculture [J]. *American Heart Journal*, 2013, 161 (6): 1114-1124
- [38] Cózar A, Echevarría F, González-Gordillo J I, et al. Plastic debris in the open ocean [J]. *PNAS*, 2014, 111 (28): 10239-10244
- [39] Eriksen M, Mason S, Wilson S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1-2): 177-182
- [40] Morritt D, Stefanoudis P V, Pearce D, et al. Plastic in the Thames: A river runs through it [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 78(1-2): 196-200
- [41] Cole M, Webb H, Lindeque P K, et al. Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4528
- [42] Frias J P, Otero V, Sobral P. Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal waters [J]. *Marine Environmental Research*, 2014, 95: 89-95
- [43] 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
- [44] Dubaish F, Liebezeit G. Suspended microplastics and black carbon particles in the jade system, southern north sea [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2013, 224(2): 1-8
- [45] Collignon A, Hecq J H, Galgani F, et al. Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean-Corsica) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 79(1-2): 293-298
- [46] Desforges J P, Galbraith M, Dangerfield N, et al. Wide-spread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 79(1-2): 94-99
- [47] Fossi M C, Panti C, Guerranti C, et al. Are baleen whales exposed to the threat of microplastics? A case study of the Mediterranean fin whale (*Balaenoptera physalus*) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(11): 2374-2379
- [48] de Lucia G A, Caliani I, Marra S, et al. Amount and distribution of neustonic micro-plastic off the western Sardinian Coast (Central-Western Mediterranean Sea) [J]. *Marine Environmental Research*, 2014, 100: 10-16
- [49] Peng G Y, Zhu B S, Yang D Q, et al. Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 283-290
- [50] Sun X X, Li Q J, Zhu M L, et al. Ingestion of microplastics by natural zooplankton groups in the northern South China Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 115(1-2): 217-224
- [51] 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(Pt 1): 541-548
- [52] Li J N, Qu X Y, Su L, et al. Microplastics in mussels along the coastal waters of China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 177-184
- [53] Di M X, Wang J. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 1620-1627
- [54] Yu X B, Peng J P, Wang J D, et al. Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: The Bohai Sea [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 722-730
- [55] Fok L, Cheung P K, Tang G D, et al. Size distribution of stranded small plastic debris on the Coast of Guangdong, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220 (Pt A): 407-412
- [56] 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
- [57] 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
- [58] Peng X, Chen M, Chen S, et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean [J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2018, 9: 1-5

- [59] Mordecai G, Tyler P A, Masson D G, et al. Litter in submarine canyons off the west Coast of Portugal [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2011, 58(23-24): 2489-2496
- [60] 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(4): 140317
- [61] 侯军华, 檀文炳, 余红, 等. 土壤环境中微塑料的污染现状及其影响研究进展[J]. 环境工程, 2020, 38(2): 16-27, 15
Hou J H, Tan W B, Yu H, et al. Microplastics in soil ecosystem: A review on sources, fate and ecological impact [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(2): 16-27, 15 (in Chinese)
- [62] Huerta Lwanga E, Mendoza Vega J, Ku Quej V, et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 14071
- [63] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(11): 5774-5780
- [64] Scheurer M, Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(6): 3591-3598
- [65] Liu M T, Lu S B, Song Y, et al. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China [J]. Environmental Pollution, 2018, 242(Pt A): 855-862
- [66] Zhang S L, Yang X M, Gertsen H, et al. A simple method for the extraction and identification of light density microplastics from soil [J]. Science of the Total Environment, 2018, 616-617: 1056-1065
- [67] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 12-20
- [68] Bhattacharya P, Lin S J, Turner J P, et al. Physical adsorption of charged plastic nanoparticles affects algal photosynthesis [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114(39): 16556-16561
- [69] Della Torre C, Bergami E, Salvati A, et al. Accumulation and embryotoxicity of polystyrene nanoparticles at early stage of development of sea urchin embryos *Paracentrotus lividus* [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(20): 12302-12311
- [70] 张羽西, 缪爱军. 微塑料对人体健康的影响概述[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2020, 56(5): 729-736
Zhang Y X, Miao A J. The impact of microplastics on human health: A review [J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 2020, 56(5): 729-736 (in Chinese)
- [71] 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
- [72] Baalkhuyur F M, Bin Dohaish E A, Elhalwagy M E A, et al. Microplastic in the gastrointestinal tract of fishes along the Saudi Arabian Red Sea Coast [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 131(Pt A): 407-415
- [73] Pegado T S E S, Schmid K, Winemiller K O, et al. First evidence of microplastic ingestion by fishes from the Amazon River estuary [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 133: 814-821
- [74] Teng J, Wang Q, Ran W, et al. Microplastic in cultured oysters from different coastal areas of China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 653: 1282-1292
- [75] de Witte B, Devriese L, Bekaert K, et al. Quality assessment of the blue mussel (*Mytilus edulis*): Comparison between commercial and wild types [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 85(1): 146-155
- [76] van Cauwenberghe L, Janssen C R. Microplastics in bivalves cultured for human consumption [J]. Environmental Pollution, 2014, 193: 65-70
- [77] Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta [J]. Environment International, 2021, 146: 106274
- [78] 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
Sun C J, Jiang F H, Li J X, et al. The research progress in source, distribution, ecological and environmental effects of marine microplastics [J]. Advances in Marine Science, 2016, 34(4): 449-461 (in Chinese)
- [79] Rillig M C, Ziersch L, Hempel S. Microplastic transport in soil by earthworms [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1362
- [80] Huerta Lwanga E, Gertsen H, Gooren H, et al. Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris* [J]. Environmental Pollution, 2017, 220(Pt A): 523-531
- [81] Huerta Lwanga E, Mendoza Vega J, Ku Quej V, et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 14071
- [82] Qi Y L, Yang X M, Pelaez A M, et al. Macro- and microplastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth [J]. Science of the Total Environment, 2018, 645: 1048-1056
- [83] 刘治君, 杨凌肖, 王琼, 等. 微塑料在陆地水环境中的迁移转化与环境效应[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(4): 59-65, 90
Liu Z J, Yang L X, Wang Q, et al. Migration and transfor-

- mation of microplastics in terrestrial waters and effects on eco-environment [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(4): 59-65, 90 (in Chinese)
- [84] Moore C J. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat [J]. Environmental Research, 2008, 108(2): 131-139
- [85] Atlas R M, Bartha R. Microbial Ecology: Fundamentals and Applications [M]. 4th Ed. Menlo. Park, California: Benjamin/Cummings Publishing Company, 1998: 50-60
- [86] 李昕玥, 刘卓苗, 薛润泽, 等. 典型塑料的生物降解及其降解机理[J]. 环境通报, 2021, 66(20): 2573-2589
- Li X Y, Liu Z M, Xue R Z, et al. Biodegradation of typical plastics and its mechanisms [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(20): 2573-2589 (in Chinese)
- [87] Shah A A, Hasan F, Hameed A, et al. Biological degradation of plastics: A comprehensive review [J]. Biotechnology Advances, 2008, 26(3): 246-265
- [88] Bhattacharya P, Lin S J, Turner J P, et al. Physical adsorption of charged plastic nanoparticles affects algal photosynthesis [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114(39): 16556-16561
- [89] Della Torre C, Bergami E, Salvati A, et al. Accumulation and embryotoxicity of polystyrene nanoparticles at early stage of development of sea urchin embryos *Paracentrotus lividus* [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(20): 12302-12311
- [90] 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
- [91] Huerta Lwanga E, Mendoza Vega J, Ku Quej V, et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 14071
- [92] Bandmann V, Müller J D, Köhler T, et al. Uptake of fluorescent nano beads into BY₂-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis [J]. FEBS Letters, 2012, 586(20): 3626-3632
- [93] 孙晓东. 不同电荷纳米塑料在拟南芥体内的毒性、吸收和积累[D]. 济南: 山东大学, 2019: 10-25
- Sun X D. Phytotoxicity, uptake and accumulation of differentially charged nanoplastics in *Arabidopsis thaliana* [D]. Jinan: Shandong University, 2019: 10-25 (in Chinese)
- [94] de Souza Machado A A, Kloas W, Zarfl C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems [J]. Global Change Biology, 2018, 24(4): 1405-1416
- [95] Bosker T, Bouwman L J, Brun N R, et al. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum* [J]. Chemosphere, 2019, 226: 774-781
- [96] 刘莹莹, 张旗, 崔文智, 等. 聚乙烯微塑料对绿豆发芽的毒性研究[J]. 环境与发展, 2019, 31(5): 123-125
- Liu Y Y, Zhang Q, Cui W Z, et al. Toxicity of polyethylene microplastics to seed germination of mung bean [J]. Environment and Development, 2019, 31(5): 123-125 (in Chinese)
- [97] 连加攀, 沈玫玫, 刘维涛. 微塑料对小麦种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 737-745
- Lian J P, Shen M M, Liu W T. Effects of microplastics on wheat seed germination and seedling growth [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(4): 737-745 (in Chinese)
- [98] Lian J P, Wu J N, Xiong H X, et al. Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 385: 121620
- [99] Giorgetti L, Spanò C, Muccifora S, et al. Exploring the interaction between polystyrene nanoplastics and *Allium cepa* during germination: Internalization in root cells, induction of toxicity and oxidative stress [J]. Plant Physiology and Biochemistry: PPB, 2020, 149: 170-177
- [100] 吴佳妮, 杨天志, 连加攀, 等. 聚苯乙烯纳米塑料 (PSNPs)对大豆(*Glycine max*)种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 环境科学学报, 2020, 40(12): 4581-4589
- Wu J N, Yang T Z, Lian J P, et al. Effects of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of soybean (*Glycine max*) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(12): 4581-4589 (in Chinese)
- [101] 徐刚, 李发生, 汪群慧. 模拟酸雨对聚氯乙烯农膜中增塑剂析出的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1625-1630
- Xu G, Li F S, Wang Q H. Effect of simulated acid rain on release of plasticizer in PVC film [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(6): 1625-1630 (in Chinese)
- [102] 刘晓丹, 龚一富, 李军, 等. 增塑剂对小麦种子萌发过程中细胞程序性死亡指标的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(2): 350-356
- Liu X D, Gong Y F, Li J, et al. Mechanism of the programmed cell death triggered by plasticizers in the germination process of wheat seeds [J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(2): 350-356 (in Chinese)
- [103] Pascall M A, Zabik M E, Zabik M J, et al. Uptake of polychlorinated biphenyls (PCBs) from an aqueous medium by polyethylene, polyvinyl chloride, and polystyrene films [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(1): 164-169
- [104] Massos A, Turner A. Cadmium, lead and bromine in

- beached microplastics [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 139-145
- [105] Li J, Zhang K N, Zhang H. Adsorption of antibiotics on microplastics [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 237: 460-467
- [106] Giorgetti L, Spanò C, Muccifora S, et al. Exploring the interaction between polystyrene nanoplastics and *Allium cepa* during germination: Internalization in root cells, induction of toxicity and oxidative stress [J]. *Plant Physiology and Biochemistry: PPB*, 2020, 149: 170-177
- [107] Valavanidis A, Vlachogianni T, Fiotakis K, et al. Pulmonary oxidative stress, inflammation and cancer: Respirable particulate matter, fibrous dusts and ozone as major causes of lung carcinogenesis through reactive oxygen species mechanisms [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, 10(9): 3886-3907
- [108] Kelly F J, Fussell J C. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 60: 504-526
- [109] Schirizzi G F, Pérez-Pomeda I, Sanchís J, et al. Cytotoxic effects of commonly used nanomaterials and microplastics on cerebral and epithelial human cells [J]. *Environmental Research*, 2017, 159: 579-587
- [110] Barboza L G A, Vieira L R, Branco V, et al. Microplastics increase mercury bioconcentration in gills and bioaccumulation in the liver, and cause oxidative stress and damage in *Dicentrarchus labrax* juveniles [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 15655
- [111] Lu Y F, Zhang Y, Deng Y F, et al. Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(7): 4054-4060
- [112] Oliveira P, Barboza L G A, Branco V, et al. Effects of microplastics and mercury in the freshwater bivalve *Corbicula fluminea* (Müller, 1774): Filtration rate, biochemical biomarkers and mercury bioconcentration [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 164: 155-163
- [113] Jeong C B, Won E J, Kang H M, et al. Microplastic size-dependent toxicity, oxidative stress induction, and p-JNK and p-p38 activation in the monogonont rotifer (*Brachionus koreanus*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(16): 8849-8857
- [114] Deng Y F, Zhang Y, Lemos B, et al. Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 46687
- [115] Wright S L, Kelly F J. Plastic and human health: A micro issue? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(12): 6634-6647
- [116] Lee K W, Shim W J, Kwon O Y, et al. Size-dependent effects of micro polystyrene particles in the marine copepod *Tigriopus japonicus* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(19): 11278-11283
- [117] Wen B, Zhang N, Jin S R, et al. Microplastics have a more profound impact than elevated temperatures on the predatory performance, digestion and energy metabolism of an Amazonian cichlid [J]. *Aquatic Toxicology*, 2018, 195: 67-76
- [118] Goldstein M C, Rosenberg M, Cheng L N. Increased oceanic microplastic debris enhances oviposition in an endemic pelagic insect [J]. *Biology Letters*, 2012, 8(5): 817-820
- [119] Chen Q Q, Gundlach M, Yang S Y, et al. Quantitative investigation of the mechanisms of microplastics and nanoplastics toward zebrafish larvae locomotor activity [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584-585: 1022-1031
- [120] Anbumani S, Kakkar P. Ecotoxicological effects of microplastics on biota: A review [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25 (15): 14373-14396
- [121] Rochman C M, Kurobe T, Flores I, et al. Early warning signs of endocrine disruption in adult fish from the ingestion of polyethylene with and without sorbed chemical pollutants from the marine environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 656-661
- [122] Kashiwada S. Distribution of nanoparticles in the see-through medaka (*Oryzias latipes*) [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2006, 114(11): 1697-1702
- [123] Zettler E R, Mincer T J, Amaral-Zettler L A. Life in the "plastisphere": Microbial communities on plastic marine debris [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(13): 7137-7146
- [124] McCormick A R, Hoellein T J, London M G, et al. Microplastic in surface waters of urban rivers: Concentration, sources, and associated bacterial assemblages [J]. *Ecosphere*, 2016, 7(11): DOI:10.1002/ecs2.1556
- [125] Lu X M, Lu P Z. Characterization of bacterial communities in sediments receiving various wastewater effluents with high-throughput sequencing analysis [J]. *Microbial Ecology*, 2014, 67(3): 612-623