

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20201108002

秦潇, 周颖, 黄艺. 微塑料的人群暴露途径及其健康危害[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(5): 221-227

Qin X, Zhou Y, Huang Y. A review of population exposure routes of microplastics and their possible health hazards [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(5): 221-227 (in Chinese)

微塑料的人群暴露途径及其健康危害

秦潇, 周颖, 黄艺*

北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871

收稿日期: 2020-11-08 录用日期: 2021-03-06

摘要: 微塑料污染是近几年来出现的新环境问题,但目前对人群的微塑料暴露途径及其可能的健康危害并不清楚。本文基于现有微塑料研究的相关文献,重点分析了人类通过食物摄取、饮水以及空气接触的微塑料暴露途径,估算了中国人通过海鲜和食盐可能摄取的微塑料量,并对微塑料的多种潜在生理毒性进行了综述。进一步提出了今后需要系统研究微塑料的人体暴露途径、探索自然环境微塑料浓度下的人体健康风险、关注微塑料对人体肠道微生物的影响等优先研究方向,为正确评价微塑料的人体健康风险提供了理论依据。

关键词: 微塑料;暴露途径;健康危害

文章编号: 1673-5897(2021)5-221-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

A Review of Population Exposure Routes of Microplastics and Their Possible Health Hazards

Qin Xiao, Zhou Ying, Huang Yi*

Institute of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

Received 8 November 2020 accepted 6 March 2021

Abstract: Microplastic is an emerging environmental pollution source in recent years. It is very significant to understand microplastic exposure pathway and its possible human health hazards. Based on the current literature on microplastics, this review mainly focuses on the exposure pathways of microplastics through food intake, drinking water and air contact. The exposure amount of microplastics through seafood and salt ingestion by Chinese people are estimated, and the potential cytotoxicity and phytotoxicity of microplastics are summarized. Future studies on the priority research topics are suggested, such as further systematic study on human exposure pathway of microplastics, exploration of human health risk under the background concentration of microplastics in natural environment, and the impact of microplastics on human gut microbiome. All these topics will provide a theoretical basis for further research on evaluating the human health risks of microplastics.

Keywords: microplastics; exposure route; health hazards

微塑料(microplastics)为直径<5 mm 的微小塑料颗粒的统称,其包括了不同形状、大小和聚合物类

基金项目:环境模拟与污染控制国家重点联合实验室项目(8102000268)

第一作者:秦潇(1995—),男,硕士,研究方向为海洋微塑料污染, E-mail: 1301254937@qq.com

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

型^[1]。微塑料根据形成过程可分为原生微塑料和次生微塑料2种。原生微塑料是由人类制造的粒径<5 mm的塑料颗粒、碎片等,大量存在于日常洗涤用品与个人护理用品中,例如磨砂洗面奶、牙膏中;次生微塑料是由自然界中的大块塑料经过碎裂或降解形成,其形态往往不规则,如塑料微粒、碎片和纤维等^[2]。

近年来,在海洋、土壤和大气环境中均发现了微塑料。考虑到塑料的不可降解特性以及生产过程中的有害添加物,微塑料作为新型污染物受到了学者的广泛关注,成为了环境研究领域的焦点问题之一。海洋中的微塑料问题最早被提出,根据 Thompson^[3]在2006年欧洲海洋自然保护会议的报告中估算,约10%左右的塑料最终会排放于海洋中,且可能持续存在并不断积聚。至今从海岸带到海洋环流中,从远离大陆的岛屿和极地区域都发现了微塑料^[4],甚至在深海沉积物中也发现了微塑料的踪迹^[5]。全球范围内的河流、海滩等其他类型水体中也发现了微塑料的存在^[6-7]。相对于水体来说,土壤环境中微塑料的研究相对较少,但有研究估计进入陆地生态系统的微塑料是释放到海洋中的4倍~23倍^[8],如欧洲和北美区域每年就有70万t以上的微塑料进入土壤^[9]。因此,2012年 Rillig^[10]呼吁开展土壤环境中微塑料污染的研究,并着重提出要研究土壤微塑料污染的潜在生态风险。近年来有少量文献开始报导大气中的微塑料,认为微塑料占全部大气悬浮颗粒及纤维的92%^[11]。除了上述不同环境界面,还在水生生物、陆生生物、饮料和食盐等中发现了微塑料残留^[12],显示人类面临着微塑料污染中的全方位环境暴露风险。然而,除了有限的研究通过塑料特性和微粒特性,推论了微塑料的可能健康影响,如 Wright 和 Kelly^[13]认为微塑料作为有机物可能被人体吸收,并在人体局部组织中积累而产生生理毒性,还没有发现以微塑料的人体健康影响为直接研究对象的工作。因此,本综述通过梳理人类对微塑料可能的暴露途径,在归纳微塑料对其他生物负面影响的基础上,讨论微塑料对人体健康的可能危害,为进一步研究和评估微塑料污染的人体健康风险提供科学基础。

1 微塑料的暴露途径 (Exposure route of microplastics)

暴露途径是指污染物从污染源经由土壤、水或食物等方式到达人体或其他被暴露生物个体的路线。根据现有研究,微塑料进入人体的途径主要有

食物摄取、饮水以及空气接触3种微塑料暴露途径。

1.1 微塑料通过食物进入人体

微塑料被水生生物摄取而进入食物链,进而通过食物进入人体,可能是人类微塑料暴露的主要途径之一。研究显示,一些低营养级的水生生物,如贻贝、牡蛎和扇贝等在摄食过程中只能够判断颗粒物的大小,摄取一定尺寸范围内的颗粒物^[14],因此微塑料可能被当作与藻类等相似大小的食物被低营养级生物摄取;滤食性动物在摄食的过程中,会被动地摄入水体中的微塑料^[15];此外,颜色、密度等因素都会导致生物误食微塑料。部分微塑料的颜色特征与海洋生物食物相似,使海洋动物在摄食时一同摄入体内,而低密度微塑料容易聚集在海洋表层,更容易被浮游动物等低营养级海洋生物摄取^[16],从而进入食物链。

对水环境中的生物取样研究证实,微塑料确实存在于人类食用的水生物体内,比如在荷兰、比利时和法国等多个国家的贻贝(*Mytilus edulis*)中都检测出了一定量的微塑料^[17-19],在西班牙-大西洋-地中海海岸的研究中,也发现一些底栖鱼的体内含有微塑料,平均每条鱼体内可达 (1.56 ± 0.5) 片^[20]。南威尔士峡谷河流中的无脊椎动物四节蜉科(Baetidae)、纹石蛾科(Hydropsychidae)和扁蜉科(Heptageniidae)体内也检测到了微塑料的存在^[21]。实验室的研究显示,贻贝(*Mytilus edulis*)暴露在微塑料污染的水体中3~48 h后,其肝脏和血淋巴组织中检测到42颗·L⁻¹ 9.6 μm大的聚苯乙烯系塑料小球^[22];较长时间(96 h)暴露在小颗粒的高密度聚乙烯(HDPE)后,贻贝的腮、胃和消化腺中都能够检测到HDPE塑料粒,粒径<80 μm的颗粒浓度可达2.5 g·L⁻¹^[20]。贻贝通过鳃捕捉海水中的微塑料,并将其困在腮部粘液和消化系统中^[23]。此外,水产养殖贝类中也发现了微塑料^[24]。而最近中国科学院南京土壤研究所的Li等^[25]发现,植物对微塑料也具有吸收作用。这个研究使得微塑料食物暴露途径从水生动物扩大到了陆地植物。

生物体内发现的微塑料,可源于直接吞食,也可以通过食物链传递所获得。在野外和实验室2种条件下,均发现了微塑料在食物网中转移富集的现象^[26-27]。微塑料通过食物网在食物链中传递放大的现象,可能增加作为顶级捕食者的人类的微塑料暴露量。

值得指出的是,已有研究在海盐中发现了微塑

料的存在。研究者推测,如果普通人每天摄入的盐量为 5 g,人们通过海盐摄取的微塑料可达每年 216 粒^[28]。食盐作为食物中必不可少的调料,其中的微塑料加大了食物摄取暴露对人体健康的危害。

海产品和食盐都是中国人餐桌上的必备食物。根据已有的研究估算,中国人每年通过鱼类和贝类摄取的总微塑料量可达 $1.06\times10^{13}\sim6.11\times10^{13}$ 粒(表 1),按每颗微塑料 0.001 g 估算,每年约吃掉 $1\times10^4\sim6\times10^4$ t 塑料。

1.2 通过饮水/饮料进入人体

水是人体代谢的基础物质和必要环境,存在于河流、湖泊等自然水体中的微塑料,成为人体微塑料的重要暴露源之一。在山东胶州湾,研究者在海湾沉积物中测到了碎片状、颗粒状、薄膜状、纤维状和发泡塑料 5 种微塑料的类型^[29]。在长江口,检测到微塑料丰度高达 $(4\ 137.3\pm2\ 461.5)$ 个 $\cdot\text{m}^{-3}$ ^[30]。太湖和鄱阳湖等水域沉积物中的微塑料丰度为 $500\sim25\ 800$ 个 $\cdot\text{m}^{-3}$ ^[31-32]。虽然从自然水体获得的水需要经过沉淀、消毒、软化、淡化和除盐等一系列复杂的处理工艺后,才可能成为饮用水,但 2020 年的一项研究表明,在城市饮用水中也已检测出微塑料。研究者检测了中国多个城市的自来水样品,均发现存在有碎片状、纤维状和球形等不同形状的微塑料^[33]。存在于饮用水中的微塑料,成为最危险的直接暴露源。

一项最新的研究显示,婴儿奶瓶在冲泡配方奶粉过程中会释放出高水平的微塑料。例如使用聚丙烯奶瓶配制配方奶时,平均每天使世界各地的婴儿暴露在 100 万个塑料微粒中。该研究还表明温度与微塑料释放之间存在强相关性,高温下微塑料释放量更大^[34]。因此,通过饮水进入人体这一方式,已经成为

不同地域不同年龄段人群的主要微塑料暴露途径。

1.3 通过呼吸进入人体

与前 2 种微塑料人体暴露的方式不同,空气中微塑料是近期研究的新发现。伦敦市中心人口密集地区大气样品中微塑料的研究显示,在所有大气样品中均发现了微塑料,其中纤维微塑料占绝大多数(92%)^[35]。

针对大气微塑料传输的研究发现,大气中悬浮的微塑料可通过大气沉降进入人类生活的地表环境区域。微塑料随大气进入地表的过程可分为湿沉降和干沉降,湿沉降是指微塑料通过降雨和降雪等天气过程沉降至地表,干沉降是指微塑料由于自身重力沉降至地表。研究表明,微塑料通过沉降到达地表的量可达 $575\sim1\ 008$ 个 $\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,其中以纤维类为主^[35]。而刮风、降雨及降雪强度都可能影响微塑料的沉降速率^[11],进而可能影响通过呼吸进入人体的微塑料量。因此,系统研究雾霾程度常年较高的城市中,人类暴露于大气微塑料的健康风险,是评估微塑料生态环境危害的关键点。

2 微塑料的潜在健康危害 (Potential health hazards of microplastics)

综上所述,微塑料无处不在,人体能通过摄取食物、饮水和呼吸暴露于微塑料。目前,对于微塑料是否一定会危害人体健康这一问题,尚无实验研究证实,也没有流行病学的调查结果。但通过对动物所进行微塑料暴露实验,证实了微塑料对生物体可能产生多方面的健康危害。虽然微塑料对动物生理影响的研究,不能直接证明其对人类健康的影响,但微塑料表现出的生理毒性,在一定程度上表征了其对人类健康的潜在威胁。

表 1 在中国通过海产品直接进入人体的微塑料量估算^[19-20, 29]
Table 1 Estimates of the amount of microplastics directly entering the human body through seafood in China^[19-20, 29]

被污染食物种类	塑料含量	中国消费量/t	全国每年可能进入人体总量
Contaminated food types	/(粒 $\cdot$ 生物 $^{-1}$)	China consumption/t	/(粒 $\cdot$ a $^{-1}$)
	Plastic content		The total amount that may enter the
	/(grains $\cdot$ organism $^{-1}$)		human body every year/(grains $\cdot$ a $^{-1}$)
贝类 Shellfish	30 ~ 170	1 073	$1.05\times10^{13}\sim6.09\times10^{13}$
鱼类 Fishes	1.56 ± 0.5	5 740	$1.12\times10^{11}\sim2.24\times10^{11}$
食盐 Salt	约 118 粒 $\cdot\text{kg}^{-1}$	700	约 8.26×10^{11}
	About 118 particles $\cdot\text{kg}^{-1}$		About 8.26×10^{11}

2.1 微塑料可引起生物的炎症与应激反应

微塑料本身的形状特性,如塑料纤维或者塑料片尖锐的边缘,可能会擦伤生物体内组织,而消化道内过多的微塑料,也存在堵塞消化系统,导致生物体产生饱食感或者炎症而减少进食的风险^[36]。虾虎鱼(*Pomatoschistus microps*)的幼体易将白色微塑料误认为食物,将其暴露在聚乙烯(PE)环境中 96 h 后,在高 PE 浓度环境的幼体捕食量比对照组显著降低^[35]。

虽然越来越多的生物体内检测到微塑料,但大部分只存在于生物的消化系统中,并随代谢排出体内^[21]。也有研究指出,胃肠道内的微塑料能够进入周边组织甚至是循环系统中。Browne 等^[22]研究发现,暴露 48 d 后,贻贝(*Mytilus edulis*)的血淋巴组织中能够检测到微塑料,表明贻贝能够摄入 3 ~ 10 μm 的聚苯乙烯塑料小球,并将其运输达到循环系统中。此外,最近一项对人体大脑和上皮细胞的体外研究,首次证明了微塑料可诱导人体细胞发生氧化应激,从而产生细胞毒性效应^[37]。

2.2 微塑料可产生生殖与发育毒性

对小鼠投喂微塑料,发现食用微塑料小鼠体质量与对照组相比明显减少,且其细胞的细胞器存在明显受损现象,平均每只母鼠产幼崽的数量、幼崽的性别比和幼崽的体质量均发生了显著变化,推测微塑料可能具备生殖和发育毒性^[38]。将成熟期太平洋牡蛎长期暴露于微米级聚苯乙烯微塑料,可观察到实验组牡蛎精子活力下降,卵子数量减少、粒径变小;牡蛎后代幼体数量显著减少^[39]。因此,一旦大剂量微塑料通过食物链进入人体,有可能对人体生殖细胞产生损害,甚至影响精子、卵子质量,最终对子代胚胎形成、胎儿发育和出生后发育产生不良影响。

2.3 微塑料可改变肠道微生物的组成和功能

动物肠道中的微生物群落组成对动物适应环境具有至关重要的作用。土壤动物肠道中的许多细菌,可以使动物获得额外的代谢能力,例如有研究发现聚苯乙烯可使得蚯蚓肠道菌群中有关氮循环和有机物降解的菌群相对丰度发生变化,从而影响蚯蚓对氮和有机物的代谢能力和代谢过程^[40]。人体肠道微生物对人类健康也起着极其重要的作用,甚至被称为人体的“第二套基因组”^[41]。人体肠道微生物在人体的消化、代谢和调解免疫功能等方面都具有重要作用。比如人体的肥胖、肠炎等疾病与肠道微生物的群落组成具有相关性^[38]。

考虑到微塑料材料自身的惰性性质及其主要分

布在消化系统中特征^[21],微塑料可能具有很小的直接危害人体的毒性,但很可能通过影响肠道微生物群落结构和功能,对人体健康形成巨大的潜在威胁。

2.4 协同毒性

除以上微塑料有可能对人体健康产生的直接和间接负面影响外,微塑料与其他污染物的协同毒性,是一个值得注意的问题。微塑料具备粒径小、比表面积大和疏水性等特性,容易吸附环境中的污染物,与之产生协同毒性。目前相关的研究集中在微塑料与疏水性有机污染物、重金属和抗生素的复合污染,例如 2020 年一项研究表明,摄入不同粒径聚苯乙烯塑料(300 nm ~ 6 μm)的结肠癌细胞在吸附双酚 A 后,微塑料与双酚 A 产生了协同毒性,导致对结肠癌细胞的毒性增强^[42]。而由于微塑料在紫外线照射过程中会发生老化,不同老化程度的微塑料对重金属、抗生素的吸附能力不同,所形成的协同毒害作用也会有所不同。有研究表明,老化的聚苯乙烯系塑料碎片在未达到平衡的情况下,可积累更多的铜和锌,对照组未经老化的塑料片在 14 d 后才会达到恒定的铜浓度^[43]。而一项微塑料吸附抗生素的研究表明,微塑料老化过程中孔隙结构的出现和氢键键合的形成,是微塑料富集抗生素的 2 个主要因素^[44]。

2.5 微塑料对有害微生物的富集

本课题组研究发现,河流中漂浮的微塑料表面附着一些条件致病菌,如假单胞菌。定量 PCR 结果显示,微塑料可以选择性地富集抗生素耐药基因^[45]。而这些携带抗性基因的微塑料进入人体肠道,有可能增加人体肠道微生物对抗生素的抗性,如果这些抗性基因转移到病原菌中,将直接降低抗生素治疗的有效性。

3 微塑料环境健康威胁的研究展望 (Research prospects on environmental health threats of microplastics)

微塑料概念的首次提出至今不过 16 年,对于微塑料在环境中的分布、迁移、转化和影响的研究方兴未艾。而作为一种新污染物,微塑料对人体健康的影响也应该受到特别的关注和系统研究。

(1) 系统研究微塑料人体暴露途径

虽然本文在现有微塑料分布研究的基础上,梳理了微塑料的人体暴露途径,但现有的研究还远远没有覆盖所有的可能暴露途径。比如,还没有任何研究关注微塑料是否通过包扎、缝合材料的释放,直接进入接触皮肤;是否通过塑料针筒的使用经注射

进入人体等。根据微塑料的特性,并结合其他有机污染人体暴露途径的研究成果,我们认为微塑料的暴露途径应该包括如图 1 所示的所有途径。

因此,需要系统研究微塑料的人体暴露途径、暴露量和安全阈值,为控制微塑料人体健康风险提供科学基础。

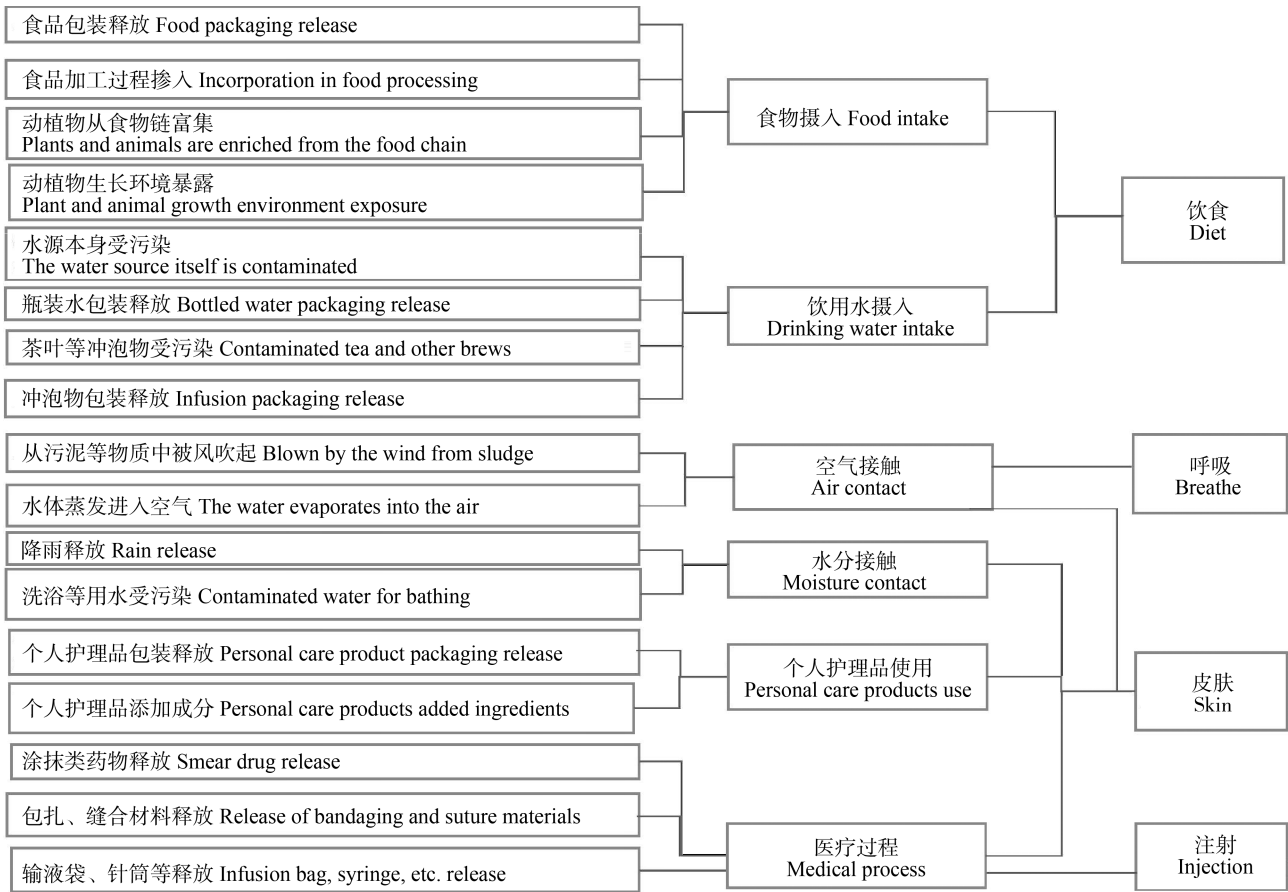


图 1 微塑料的可能人体暴露途径
Fig. 1 Possible human exposure routes of microplastics

(2)关注微塑料对人体肠道微生物的影响
微塑料作为惰性物质,在环境中可成为微生物的携带体,被生物吞食后进入消化系统,影响和改变生物/人体肠道微生物的群落结构和功能。尤其是作为抗生素抗性基因的携带体,在肠道这种细菌密度极高且营养丰富的环境中,可能增加抗生素抗性基因水平转移的风险。这就意味着如果微塑料携带的耐药基因进入肠道后,可能转移到人体病原菌中,使病原菌具备更强的耐药性,增加临床抗感染治疗的风险。因此,应在实验室条件下,通过模式动物研究微塑料表面生物膜的特性,以及其与肠道微生物菌群的关系。

(3)研究自然浓度下微塑料的生物毒性,增加对微塑料直接毒性的了解
目前,大部分的微塑料毒性研究是在实验室条件

下进行的,研究主要针对单一生物,使用远高于环境浓度的微塑料剂量,短时间暴露。这样的研究方案容易得到明显的影响结果,但与自然条件下实际的人体微塑料暴露水平相差较大,所获得的微塑料毒性效应和机理,并不能解释自然环境中微塑料污染性状和对人体的影响。需要通过系统研究自然环境中微塑料的影响,尤其是在实际人体暴露量下微塑料的特性和生物毒性,为评估微塑料对人体的可能危害与制定微塑料环境基准和标准提供科学的数据和理论依据。

通讯作者简介:黄艺(1964—),女,博士,教授,主要研究方向为水环境控制与微生物生态。

参考文献(References):
[1] Lambert S, Scherer C, Wagner M. Ecotoxicity testing of

- microplastics: Considering the heterogeneity of physico-chemical properties [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2017, 13(3): 470-475
- [2] Cole M, Lindeque P, Halsband C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(12): 2588-2597
- [3] Thompson R C. Plastic debris in the marine environment: Consequences and solutions [C]. Stralsund, Germany: Marine Nature Conservation in Europe, Federal Agency for Nature Conservation, 2006: 107-115
- [4] Bergmann M, Mützel S, Primpke S, et al. White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic [J]. Science Advances, 2019, 5(8): eaax1157
- [5] Mathalon A, Hill P. Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 81(1): 69-79
- [6] Andrady A L. Microplastics in the marine environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(8): 1596-1605
- [7] Nuelle M T, Dekiff J H, Remy D, et al. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments [J]. Environmental Pollution, 2014, 184: 161-169
- [8] Horton AA, Walton A, Spurgeon D J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities [J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 127-141
- [9] Nizzetto L, Bussi G, Futter M N, et al. A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments [J]. Environmental Science Processes & Impacts, 2016, 18(8): 1050-1059
- [10] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(12): 6453-6454
- [11] 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
- [12] Barboza L G A, Dick Vethaak A, Lavorante B R B O, et al. Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 133: 336-348
- [13] Wright S L, Kelly F J. Plastic and human health: A micro issue? [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(12): 6634-6647
- [14] Catarino A I, Thompson R, Sanderson W, et al. Development and optimization of a standard method for extraction of microplastics in mussels by enzyme digestion of soft tissues [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2017, 36(4): 947-951
- [15] Rios L M, Moore C, Jones P R. Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2007, 54(8): 1230-1237
- [16] 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
- [17] Karlsson T M, Vethaak A D, Almroth B C, et al. Screening for microplastics in sediment, water, marine invertebrates and fish: Method development and microplastic accumulation [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 122(1-2): 403-408
- [18] 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
- [19] Vandermeersch G, Van Cauwenberghe L, Janssen C R, et al. A critical view on microplastic quantification in aquatic organisms [J]. Environmental Research, 2015, 143(Pt B): 46-55
- [20] Bellas J, Martínez-Armenttal J, Martínez-Cámara A, et al. Ingestion of microplastics by demersal fish from the Spanish Atlantic and Mediterranean coasts [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 109(1): 55-60
- [21] Windsor F M, Tilley R M, Tyler C R, et al. Microplastic ingestion by riverine macroinvertebrates [J]. Science of the Total Environment, 2019, 646: 68-74
- [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]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(13): 5026-5031
- [23] Kolandhasamy P, Su L, Li J N, et al. Adherence of microplastics to soft tissue of mussels: A novel way to uptake microplastics beyond ingestion [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610-611: 635-640
- [24] Lusher A, Hollman P, Mendoza-Hill J. Microplastics in fisheries and aquaculture: Status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety [R]. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, 2017
- [25] Li L Z, Luo Y M, Li R J, et al. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode [J]. Nature Sustainability, 2020, 3(11): 929-937
- [26] Welden N A, Abylkhani B, Howarth L M. The effects of trophic transfer and environmental factors on microplastic uptake by plaice, *Pleuronectes platessa*, and spider crab,

- Maja squinado* [J]. Environmental Pollution, 2018, 239: 351-358
- [27] Nelms S E, Galloway T S, Godley B J, et al. Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators [J]. Environmental Pollution, 2018, 238: 999-1007
- [28] Sathish M N, Jeyasanta I, Patterson J. Microplastics in salt of tuticorin, southeast Coast of India [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, 79(1): 111-121
- [29] 周倩, 章海波, 李远, 等. 海岸环境中微塑料污染及其生态效应研究进展[J]. 科学通报, 2015, 60(33): 3210-3220
- Zhou Q, Zhang H B, Li Y, et al. Progress on microplastics pollution and its ecological effects in the coastal environment [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(33): 3210-3220 (in Chinese)
- [30] 赵子科, 赵利容, 陈春亮, 等. 海洋环境微型塑料的研究现状和问题[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(4): 99-106
- Zhao Z K, Zhao L R, Chen C L, et al. Research status and problems of marine microplastics [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2018, 38(4): 99-106 (in Chinese)
- [31] Su L, Cai H W, Kolandhasamy P, et al. Using the Asian clam as an indicator of microplastic pollution in freshwater ecosystems [J]. Environmental Pollution, 2018, 234: 347-355
- [32] Su L, Xue Y G, Li L Y, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 711-719
- [33] Tong H Y, Jiang Q Y, Hu X S, et al. Occurrence and identification of microplastics in tap water from China [J]. Chemosphere, 2020, 252: 126493
- [34] Li D Z, Shi Y H, Yang L M, et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation [J]. Nature Food, 2020, 1(11): 746-754
- [35] Wright S L, Ulke J, Font A, et al. Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport [J]. Environment International, 2020, 136: 105411
- [36] Bolton T F, Havenhand J N. Physiological versus viscosity-induced effects of an acute reduction in water temperature on microsphere ingestion by trochophore larvae of the serpulid polychaete *Galeolaria caespitosa* [J]. Journal of Plankton Research, 1998, 20(11): 2153-2164
- [37] 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
- [38] Wang Q Q, Bai J L, Ning B A, et al. Effects of bisphenol A and nanoscale and microscale polystyrene plastic exposure on particle uptake and toxicity in human Caco-2 cells [J]. Chemosphere, 2020, 254: 126788
- [39] Sussarellu R, Suquet M, Thomas Y, et al. Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics [J]. PNAS, 2016, 113(9): 2430-2435
- [40] Zhu B K, Fang Y M, Zhu D, et al. Exposure to nanoplastics disturbs the gut microbiome in the soil oligochaete *Enchytraeus crypticus* [J]. Environmental Pollution, 2018, 239: 408-415
- [41] 马明. 人体肠道微生物组学与大健康产业[J]. 科学, 2018, 70(6): 23-28, 69
- Ma M. Human gut microbiome and health industry [J]. Science, 2018, 70(6): 23-28, 69 (in Chinese)
- [42] 王琳琳, 陈卫, 张灏. 人类肠道共生微生物与疾病[C]. 天津: 第九届乳酸菌与健康国际研讨会, 2014
- [43] Brennecke D, Duarte B, Paiva F, et al. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 178: 189-195
- [44] Li J, Zhang K N, Zhang H. Adsorption of antibiotics on microplastics [J]. Environmental Pollution, 2018, 237: 460-467
- [45] Wang J, Qin X, Guo J B, et al. Evidence of selective enrichment of bacterial assemblages and antibiotic resistant genes by microplastics in urban rivers [J]. Water Research, 2020, 183: 116113
- ◆