

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20201009002

熊飞, 黄庆辰, 何玉虹, 等. 微塑料污染现状及其毒性效应和机制研究进展[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(5): 211-220

Xiong F, Huang Q C, He Y H, et al. Research progress on current status of microplastics pollution and its toxic effects and mechanisms [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(5): 211-220 (in Chinese)

## 微塑料污染现状及其毒性效应和机制研究进展

熊飞<sup>1</sup>, 黄庆辰<sup>1</sup>, 何玉虹<sup>2</sup>, 汤铭杰<sup>2</sup>, 孙蓉丽<sup>1,\*</sup>

1. 东南大学公共卫生学院, 环境医学工程教育部重点实验室, 南京 210009

2. 东南大学医学院, 南京 210009

收稿日期: 2020-10-09 录用日期: 2021-02-28

**摘要:** 微塑料(microplastics, MPs)作为一种新型的环境污染物近年来逐渐引起全世界的关注,除了对生态环境的影响,微塑料对生物体的毒性效应及其潜在的健康风险也日益成为环境领域的研究热点。本文基于已有研究,阐述微塑料的污染现状,总结微塑料进入机体的分布,归纳微塑料的生物毒性作用和机制,分析微塑料毒性效应的影响因素,并展望了未来的研究方向,为进一步开展微塑料的生物毒性效应、机制研究和健康风险评估提供科学线索和参考。

**关键词:** 微塑料; 污染现状; 毒性效应; 作用机制

文章编号: 1673-5897(2021)5-211-10 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## Research Progress on Current Status of Microplastics Pollution and Its Toxic Effects and Mechanisms

Xiong Fei<sup>1</sup>, Huang Qingchen<sup>1</sup>, He Yuhong<sup>2</sup>, Tang Mingjie<sup>2</sup>, Sun Rongli<sup>1,\*</sup>

1. Key Laboratory of Environmental Medicine Engineering of Ministry of Education, School of Public Health, Southeast University, Nanjing 210009, China

2. Medical School of Southeast University, Nanjing 210009, China

Received 9 October 2020 accepted 28 February 2021

**Abstract:** As a new type of environmental pollutant, microplastics have gradually attracted worldwide attention in recent years. In addition to its impact on the ecological environment, the toxic effects of microplastics on organisms and their potential health risks have increasingly become research hotspots in the environmental field. Based on the existing research, this article describes the current status of microplastics pollution, summarizes the biological toxicity effects and related mechanisms of microplastics, analyzes the factors affecting their toxic effects, and proposes the future research direction. Our review can provide scientific clues and references for further exploring the mechanisms of biological toxicity effects and health risk assessment of microplastics.

**Keywords:** microplastics; status of pollution; toxic effects; mechanisms of action

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(81703265); 东南大学至善青年学者项目(2242019R40050); 东南大学大学生创新创业训练项目(202042039, 202142028)

第一作者: 熊飞(1999—), 男, 本科生, 研究方向为环境毒理学, E-mail: 213171061@seu.edu.cn

\* 通讯作者( Corresponding author ), E-mail: 101012172@seu.edu.cn

微塑料(microplastics, MPs)作为一种新型污染物引起的环境问题日益严重,由此造成的生物毒性效应和健康风险也备受关注<sup>[1]</sup>。我国是塑料垃圾排放大国,仅沿海地区,在2017年排放塑料垃圾高达132~353万t<sup>[2]</sup>,排放量居全球首位。微塑料定义为直径<5 mm的塑料碎片、颗粒<sup>[3]</sup>,按其来源划分可分为工业直接生产的初生微塑料和废弃塑料垃圾经降解形成的次生微塑料<sup>[4]</sup>;以材质划分主要包括聚乙烯微塑料(polyethylene microplastics, PE-MPs)、聚苯乙烯微塑料(polystyrene microplastics, PS-MPs)、聚丙烯微塑料(polypropylene microplastics, PP-MPs)、聚酰胺微塑料(polyamides microplastics, PA-MPs)和聚氯乙烯微塑料(polyvinyl chloride microplastics, PVC-MPs)等。

微塑料可借助各类介质扩散到水体、土壤和大气等环境,造成环境污染。其化学性质稳定、不易分解、粒径小且分布范围广,可在环境中持久存在,吸附多种污染物,难以有效收集与处理<sup>[5-6]</sup>。此外,环境中的微塑料也可被动植物吞食或携带,继而经食物链传递,对生物体造成危害。近年来,在饮用水体及食物中也检测到微塑料,提示微塑料可能危害人体健康<sup>[7]</sup>。笔者查阅了近年来微塑料相关的文献,在此重点阐述微塑料的环境污染现状及其对生物体的毒性作用和机制,为今后相关的研究提供科学参考。

以下将从微塑料的污染现状、微塑料的摄入与器官分布、微塑料的生物毒性作用及机制、微塑料毒性作用影响因素4个方面进行阐述。

## 1 微塑料污染现状 (Current situation of microplastics pollution)

微塑料来源于人类活动,主要分布在水体、土壤和大气中,受风力、江河和降雨等因素影响而迁移,最终汇集在深海<sup>[2]</sup>。近年来微塑料的污染现状研究主要集中于水体环境,尤其是海洋,土壤环境次之,大气环境较少。其中海洋中微塑料的污染分布受洋流作用影响大,土壤中微塑料的污染研究多集中在农田,地表水体与大气中微塑料的污染研究则侧重于沉积物<sup>[2,4]</sup>。

### 1.1 水体中的微塑料分布

水体中的微塑料主要分布在地表水体、近海海滨和海洋中。地表水体与近海海滨的微塑料主要来源于人类生活污水排放,其丰度与人口密度呈正相关<sup>[1]</sup>。李爱峰等<sup>[8]</sup>研究发现,中国上海城市河道沉积物中微塑料丰度达(1 600±191) 颗·kg<sup>-1</sup>,远高于人口密度较低的其他城市,如英国的伯明翰(250~300

颗·kg<sup>-1</sup>)。而少数城市海滨微塑料浓度受地理条件的影响较大。例如,人口较少的比利时的黎波里(Tripoli)微塑料丰度达4 680 颗·kg<sup>-1</sup>,推测为地中海特殊的封闭环境所致,不宜与其他近海地区作比较<sup>[9]</sup>。地表水体中的微塑料丰度还受雨季影响,调查发现韩国洛东江中微塑料丰度雨季后为雨季前的3倍有余,提示降雨起到了促沉积作用<sup>[10-11]</sup>。海洋中的微塑料主要来源于废弃塑料的分解、陆地环境微塑料随江河等水流被带入,分布广泛,甚至在人迹罕至的北冰洋也检出了微塑料的污染<sup>[12]</sup>。此外,微塑料在海洋中的分布与洋流运动关系密切<sup>[6,8]</sup>。孙承君等<sup>[6]</sup>研究发现,南太平洋副热带环流区微塑料含量达0.396 颗·m<sup>-2</sup>,而加勒比海微塑料丰度仅为0.001414 颗·m<sup>-2</sup>,洋流区的微塑料丰度明显高于其他非洋流区的微塑料丰度。

### 1.2 土壤中的微塑料分布

土壤中微塑料的主要来源包括市政污泥的土地利用、塑料垃圾的填埋、有机肥的施用、农用地膜的残留分解、大气微塑料的沉降、地表径流和农用灌溉水的带入等<sup>[13]</sup>。土壤微塑料可进入植物茎叶,继而经食物链进入机体引起健康风险,因此,土壤微塑料污染不容忽视。目前研究表明,人类活动与土壤环境中的微塑料污染联系密切。Scheurer和Bigalke<sup>[14]</sup>在瑞士洪泛平原上的取样调查结果表明土壤中微塑料含量与取样地人口密度存在正相关性。多项研究表明全球农业用地的土壤微塑料污染严重<sup>[15]</sup>。在欧洲和北美地区,每年经污泥、有机肥和地膜等投入农田的微塑料均超过了全球海洋表层水微塑料的年排放量<sup>[16]</sup>。我国农田微塑料污染现状也不容乐观。Liu等<sup>[17]</sup>采集了中国上海周边20块农田样品进行分析,发现表层和深层土壤中的微塑料分别为(78.00±12.91) 颗·kg<sup>-1</sup>和(62.50±12.97) 颗·kg<sup>-1</sup>。Zhang和Liu<sup>[18]</sup>调查发现,中国云南滇池附近耕地土壤中微塑料浓度为7 100~42 960 颗·kg<sup>-1</sup>,粒径范围为0.05~1 mm。此外,在工业区土壤中也存在微塑料污染。Fuller和Gautam<sup>[19]</sup>等检测发现澳大利亚悉尼某个工业区土壤微塑料含量为300~67 500 mg·kg<sup>-1</sup>(<1mm)。

### 1.3 大气中的微塑料分布

已有的调查数据显示,大气中存在微塑料,但目前研究较少。大气中的微塑料通过沉降的方式进入土壤、水体以及人类居住地,不同地区大气微塑料平均丰度差异较大。在欧洲城市地区,多项研究得到

的平均微塑料沉降通量在  $118 \sim 275 \text{ 颗} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ <sup>[20]</sup>。中国东莞市城区大气中微塑料的调查显示,该地大气中有 PE-MPs、PS-MPs 和 PP-MPs 分布,大气沉降物中微塑料的沉降通量范围为  $175 \sim 313 \text{ 颗} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ <sup>[21]</sup>。而另一项研究表明,中国烟台市大气微塑料沉降通量可达  $484 \sim 602 \text{ 颗} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ <sup>[22]</sup>。值得注意的是,在比利牛斯山脉的无人区及北极地区大气中均检测出了微塑料<sup>[23-24]</sup>,提示大气微塑料污染已成为全球性问题。目前,大气微塑料污染研究中还存在一些问题有待解决,如:由于缺乏数据和方法的统一或标准化导致研究的不可比、没有考虑到气象条件和样本周期性的影响等。

## 2 微塑料的摄入与器官分布 (Microplastics intake and organ distribution)

水体和土壤环境中的微塑料可通过食物链进入到植物和动物,且具有生物放大和生物富集作用,存在健康风险。Setälä 等<sup>[25]</sup>用预先摄取微塑料的绕足类或者多毛类浮游动物喂食糠虾,发现微塑料可在糠虾的肠道中积累。我国近海地区的海鱼和淡水鱼也检出了微塑料<sup>[7]</sup>。Huerta Lwanga 等<sup>[26]</sup>研究了微塑料在陆生食物链中的迁移(园土-蚯蚓-鸡),发现微塑料的浓度随着营养级的升高而增加,在鸡的砂囊中检测到微塑料,而砂囊可作为人类的食物。机体

经消化道摄入含有微塑料的食物和水后,直径  $< 20 \mu\text{m}$  的微塑料可穿过肠上皮粘膜,经血管和淋巴管进入体循环<sup>[27]</sup>,随血液分散到各个器官中。已有研究表明,小鼠经微塑料暴露后,在其肠道、心脏、肝脏和肾脏中均发现微塑料<sup>[28-29]</sup>。

## 3 微塑料对生物体的毒性作用及机制 (Toxicity and mechanism of microplastics to organisms)

目前,研究发现微塑料进入生物体内发挥多种毒性作用,包括影响生长发育、造成肠道损伤、代谢紊乱、氧化应激、免疫毒性、神经毒性和生殖毒性等,如图 1 所示。大量研究表明微塑料的毒性作用与浓度和剂量相关。除此之外,不同物种对微塑料暴露的毒性反应不同<sup>[30]</sup>。

### 3.1 影响生长发育

微塑料可抑制动植物生长发育,包括使生物生长迟缓,繁殖率降低,寿命缩短等<sup>[31-33]</sup>。孙晓东<sup>[34]</sup>发现 PS-MPs 诱导拟南芥根部和芽部中参与氧化应激、跨膜转运和盐胁迫等过程的基因下调,同时引起温度刺激、昼夜节律和含花青素的化合物代谢等过程的基因上调,进而影响拟南芥的生长发育和代谢。此外,微塑料也可影响动物的生长发育。一方面,微塑料被吞食、累积造成物理损伤以及粘液分泌的减少,阻碍食物的消化和吸收,导致营养不良、能量缺

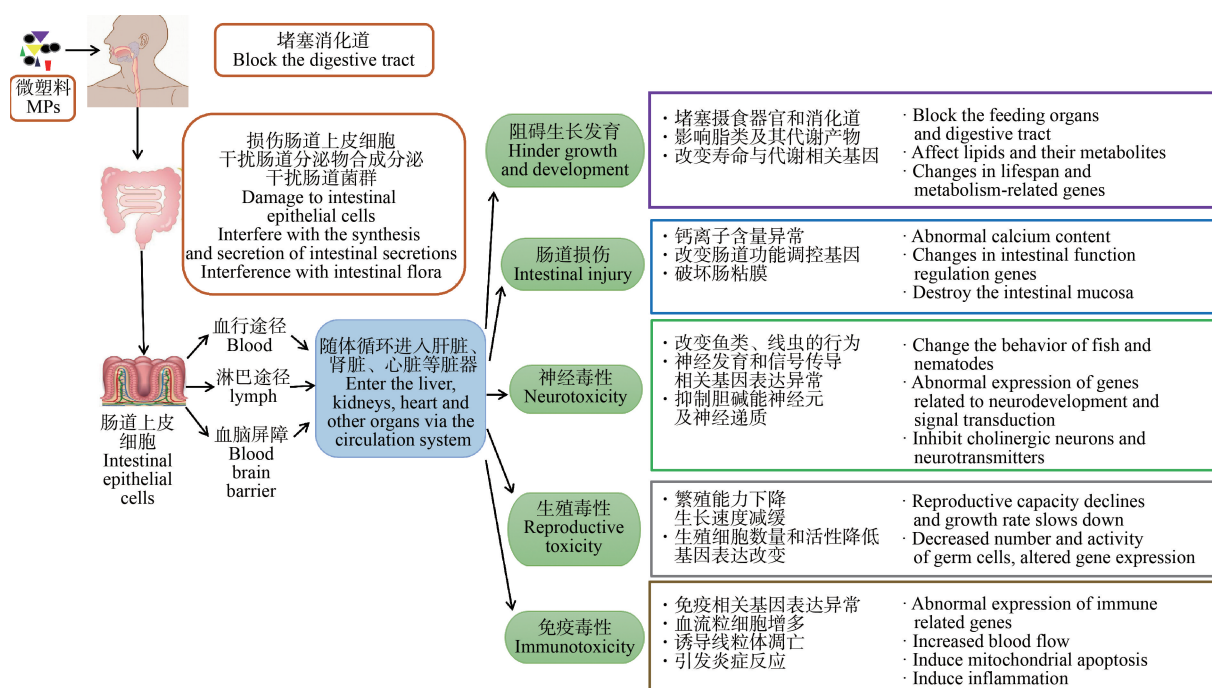


图 1 微塑料在体内的转移及其毒性作用

Fig. 1 Transfer and toxicity of microplastics *in vivo*

失、生长和繁殖能力减弱<sup>[35-37]</sup>。另一方面,粒径小的微塑料会在脂质含量高的组织中积累,通过消化道上皮细胞进入血液淋巴和组织中,甚至通过血脑屏障进入脑内,阻碍相关神经递质的释放,从而阻碍正常生命活动和发育<sup>[38-40]</sup>。此外,微塑料诱导的氧化应激反应损伤DNA,或微塑料直接进入细胞核内引起的DNA的损伤也可造成发育阻滞<sup>[37,41]</sup>。

### 3.2 肠道损伤

无论是模式动物、鱼类还是哺乳动物,摄入微塑料的途径大多为经口摄入,因此胃肠道是其累积最多的部位,也是微塑料毒性效应的主要靶器官。目前已有较多研究表明,微塑料会对肠道造成损伤,包括破坏肠道黏膜、干扰肠道分泌物的合成及分泌、扰乱肠道菌群等<sup>[42-46]</sup>。有研究表明,微塑料引起线虫肠道黏膜和上皮细胞损伤可能与微塑料干扰钙离子代谢有关<sup>[45]</sup>。Jin等<sup>[43]</sup>和Lu等<sup>[46]</sup>发现小鼠经口暴露不同剂量、不同粒径的PS-MPs 5~6周后肠道粘液分泌均减少,粘液分泌相关基因转录水平下调。肠道微生物群对宿主的健康至关重要,在消化、发育和免疫调节中发挥重要作用。万志琴<sup>[44]</sup>的研究表明,在含有 $1\ 000\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $5\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 的PS-MPs水体中饲养7d后,斑马鱼幼鱼肠道微生物的多样性显著降低,拟杆菌门和 $\gamma$ -变形杆菌丰度增加,厚壁杆菌门丰度降低。在微塑料暴露的小鼠中,研究者同样发现微塑料干扰小鼠肠道功能和肠道微生物平衡,显著影响胆汁酸循环、糖脂代谢及细菌侵袭上皮细胞的过程<sup>[43,47]</sup>。此外,微塑料也可通过氧化应激、扰乱线粒体膜电位等产生细胞毒性作用,损伤人类肠道细胞<sup>[48]</sup>。综上,微塑料进入体内可通过诱导氧化应激、干扰钙离子代谢、影响粘液分泌基因表达水平和扰乱肠道菌群等多种途径造成肠道损伤。

### 3.3 微塑料影响体内物质代谢

微塑料进入生物体可通过影响糖脂代谢和能量代谢等物质的代谢和合成过程发挥毒性作用<sup>[28,43,49-50]</sup>,机制包括微塑料/纳米塑料(MPs/NPs)干扰细胞运输载体向胞外转运、代谢物质转运和信号传导等<sup>[51-52]</sup>。洪文秀<sup>[49]</sup>的研究表明,于微塑料沉积泥中饲养7d可导致霍甫水丝蚓排泄物中脂肪酸的类型及相对含量改变,从而造成霍甫水丝蚓营养不良、消化不良和摄食障碍。此外,PS-MPs可引起斑马鱼脂类和脂类代谢物含量改变,脂质合成和脂滴形成过程中相关蛋白质和酶的水平改变<sup>[44]</sup>。小鼠经微塑料暴露后血中腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)水平显

著下降,肝脏乳酸脱氢酶(LDH)活性呈剂量依赖性显著增加,血清总胆固醇(TCH)水平降低,小鼠糖脂代谢受到干扰<sup>[28,43,50]</sup>。综上所述,微塑料暴露能造成机体代谢紊乱,进一步影响小鼠的生长发育等。

### 3.4 免疫毒性

进入生物体循环中的微塑料通过在组织、器官间的转移和富集进入免疫系统并产生免疫毒性,包括影响免疫基因表达、炎症因子的释放和活性氧(ROS)诱导的炎症反应等。NPs是鱼类先天免疫系统的应激源<sup>[53]</sup>,有研究表明微塑料能诱导包括人类在内的哺乳动物的免疫反应。附着于虹鳟鳃上的微塑料使鳃组织部分免疫基因表达发生变化,包括 $\gamma$ 干扰素的上调及白介素- $1\beta$ 、S100A1重组蛋白和血清淀粉样蛋白A的下调,导致虹鳟出现免疫反应<sup>[54]</sup>。PS-MPs经口暴露后斑马鱼幼鱼体内白细胞介素-10(IL-10)和血清补体C3水平降低,相关基因在转录水平下调<sup>[44]</sup>。小鼠暴露于 $600\ \mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 的微塑料5周后,血清中白细胞介素-1(IL-1)水平显著升高,辅助性T-17(Th-17)细胞和调节性T(Treg)细胞百分比下降<sup>[42]</sup>。此外,微塑料处理人源细胞的体外研究也表明微塑料会引起促炎因子和炎症相关细胞因子改变<sup>[55-56]</sup>。Xu等<sup>[56]</sup>的研究表明,直径25nm的PS-MPs诱导II型人肺泡上皮细胞白细胞介素-8(IL-8)、核因子 $\kappa\text{B}$ (NF- $\kappa\text{B}$ )和肿瘤坏死因子- $\alpha$ (TNF- $\alpha$ )显著上调。而Yong等<sup>[30]</sup>总结了微塑料对体外培养人类细胞毒性作用的11项研究,发现微塑料对人类细胞的毒性作用主要集中在增加ROS的产生和诱导炎症反应。综上所述,微塑料暴露后调节炎症因子相关基因表达改变,同时改变促炎因子水平。微塑料诱导的长期慢性炎症可能会造成机体其他脏器的代谢异常和慢性疾病,如肺、肝脏和肾脏等。

### 3.5 神经毒性

大量研究发现,微塑料可能引起生物行为学的改变,小粒径微塑料通过血脑屏障进入脑内抑制神经发育和信号传导相关基因的表达和转录,抑制神经元和神经递质合成相关酶的活性,影响神经递质释放,从而导致神经毒性<sup>[28,57-58]</sup>。研究发现, $1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、粒径为 $0.1\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 的微塑料可引起线虫的兴奋性活动以及身体无法正常收缩等异常行为,机制可能是微塑料引起 $unc-17::GFP$ 和 $unc-47p::GFP$ 表达降低,阻碍了乙酰胆碱酯酶(AchE)的转运,导致胆碱能神经元树突萎缩、断裂和 $\gamma$ -氨基丁酸(GABA)能神经元功能的抑制<sup>[45]</sup>。摄食微塑料的鲈鱼幼鱼的

嗅觉敏感性和活动能力变差,对外来刺激的反应能力下降<sup>[58]</sup>。万志琴<sup>[44]</sup>发现经不同浓度微塑料暴露7 d后,斑马鱼游泳距离和速度均下降,血清中 AchE 活性显著降低、多巴胺(DA)含量显著减少,同时神经发育和信号传导相关基因转录水平发生改变。除鱼类和模式动物,微塑料暴露对哺乳动物也有神经毒性。小鼠饲喂含有微塑料的饲料后,可出现行进距离变短、行动迟缓、焦虑指数增高、防御性聚集和危险评估能力下降等行为学异常,伴随着 AchE 活性增强,血清中黄碱、阿斯巴酸和牛磺酸等神经递质水平升高,神经递质前体苯丙氨酸减少<sup>[28, 57]</sup>。

### 3.6 生殖毒性

目前,已发现的微塑料生殖毒性包括繁殖能力下降、生殖细胞数量降低、精子活性降低、子代存活率下降及生长速度减缓等<sup>[59]</sup>。Choi 等<sup>[60]</sup>研究发现,20 mg·L<sup>-1</sup> 50 nm PS-MPs 可引起桡足动物繁殖力下降,且具有尺寸依赖性。Sussarellu 等<sup>[61]</sup>研究发现,用含微塑料的饲料喂养2个月导致雌性牡蛎卵母细胞数目和体积降低、雄性牡蛎精子活性降低,且子代的生长速率明显减缓。此外,小鼠经微塑料暴露后精子细胞萎缩、脱落和凋亡,生精细胞脱落、排列紊乱,生精小管中出现多核性腺细胞,且睾丸激素水平下降<sup>[62-63]</sup>。已有部分研究探讨了微塑料损伤生殖细胞的机制,包括氧化应激、丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)信号通路的参与和炎症等。Xie 等<sup>[64]</sup>发现微塑料通过氧化应激途径和激活 p38 MAPK 信号通路诱导小鼠生殖毒性。Hou 等<sup>[63]</sup>发现,经 60~70 μg·d<sup>-1</sup> 的 PS-MPs 饮水暴露 35 d,小鼠生殖细胞受到损伤,Nrf2/HO-1/NF-κB 途径介导的促炎作用可能是其生殖毒性的机制之一。目前已明确微塑料可能对包括人类在内的哺乳动物生殖功能造成影响,但损伤机制仍不明确,有待进一步研究。

### 3.7 氧化损伤

微塑料及其吸附的环境污染物引起生物体内 ROS 生成增加、抗氧化酶活性下降,进而诱导氧化应激是其生物毒性的主要机制之一。一方面,微塑料进入细胞后诱导氧化应激、破坏质膜或诱导细胞凋亡<sup>[30]</sup>。微塑料主要通过损伤线粒体电子传输链(ETC)或 NADPH 氧化酶(NOXs)氧爆发引起 ROS 产生增多<sup>[65]</sup>。Yang 等<sup>[50]</sup>建立了小鼠微塑料器官生物累积和生物标志物反应的毒性/毒力动力学(TBTK/TD)模型,发现 PS-MPs 与小鼠氧化应激反应之间具有协同作用,进一步应用外推算法推测出微塑料能

诱导包括人体在内的哺乳动物发生氧化应激反应。Deng 等<sup>[28]</sup>发现用 0.1 mg·d<sup>-1</sup> 的 PS-MPs 暴露 28 d 后,小鼠氧化应激反应相关代谢物苏氨酸、赖氨酸和丙酮酸盐水平发生显著改变。另一方面,微塑料暴露导致机体一系列抗氧化酶活性和含量改变,包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性下降和还原型谷胱甘肽(GSH)含量减少等<sup>[49]</sup>。但目前关于微塑料导致 ROS 产生的机制、ROS 增加与微塑料造成的其他损伤之间联系的研究仍较少。

## 4 微塑料毒性作用的影响因素 (Influence factors of microplastics toxicity)

微塑料的毒性作用较为复杂,受到其自身理化性质以及与多种环境污染物联合作用的影响。

### 4.1 微塑料理化性质

微塑料的理化特征包括材质类型、颗粒大小和表面形态等,均可影响其毒性。微塑料除了其原材料(如聚乙烯、聚苯乙烯、聚氯乙烯和聚酰胺等),还可检测到双酚 A、苯甲醛和多氯联苯等添加剂<sup>[66]</sup>。这些物质可随微塑料进入体内,发挥多种毒性作用,如影响生长发育和繁殖、干扰内分泌功能和诱发遗传畸变等<sup>[67]</sup>。微塑料的大小和形状影响其毒性作用,粒径小的微塑料颗粒容易进入组织和细胞中并积累,影响细胞生理活动<sup>[68]</sup>。体积小的微塑料能通过水生植物细胞壁,降低叶绿素含量,诱导 ROS 产生,对植物细胞造成严重损伤。Nolte 等<sup>[69]</sup>研究发现微塑料可以通过对光和空气的物理堵塞抑制藻类的光合作用。Zhang 等<sup>[70]</sup>发现,尺寸约 1 μm 的 PVC-MPs 对海洋中肋骨条藻的生长具有显著抑制作用,而尺寸约 1 mm 的 PVC-MPs 的塑料碎片对其生长没有抑制效应,说明微塑料颗粒与藻细胞相互作用形成杂聚体对其生长产生毒性效应。此外,研究证实直径<0.2 μm 的微塑料可以经由食用蔬菜吸收和积累<sup>[71]</sup>,有进入食物链的可能。不同粒径微塑料对于动物的毒作用也有区别。研究者发现 0.5 μm 的 PS-MPs 处理后的小鼠肠道微生物变化数量明显高于 50 μm 的 PS-MPs 处理的小鼠<sup>[72]</sup>。

### 4.2 微塑料和环境污染物的复合毒性

微塑料因其理化性质容易吸附重金属、有机污染物等环境污染物,进而对机体产生复合毒性作用。这种吸附取决于物理、化学和环境多种因素。其中,物理吸附主要因为微塑料的比表面积较大,化学吸附主要因为有机污染物对微塑料的疏水性表面亲和

力较大,而光照、风化和微生物膜的形成等环境因素可增强其吸附力<sup>[67]</sup>。吸附后的污染物以微塑料为载体在环境和物体间迁移,包括空间和生物体间的转移,被吸附的物质可通过增加摄入浓度、加剧组织损伤、降低机体抗性等方式增强微塑料的毒性<sup>[73]</sup>。

#### 4.2.1 微塑料吸附重金属

重金属离子可通过静电作用或络合作用吸附到微塑料表面的带电点位<sup>[7]</sup>。微塑料吸附重金属颗粒的能力受到微塑料的大小、环境温度和 pH 等影响<sup>[74]</sup>,小尺寸的微塑料因其比表面积大、稳定性差,吸附能力更强。孙聪惠<sup>[75]</sup>的研究结果显示,渤海湾沉积物中微塑料吸附的重金属 Hg 和 Cd 的含量均高于背景值。Hg、Cd 和 Pd 等多种重金属可随微塑料进入机体,在生物体内累积,引起毒性效应。

#### 4.2.2 微塑料吸附持久性有机污染物

微塑料可以吸附多环芳香烃、多氯联苯和滴滴涕等多种持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs),联合暴露导致的毒性大多高于微塑料单独引起的毒性作用,表明存在微塑料与其他有机污染物共同暴露的健康风险。Gandara e Silva 等<sup>[76]</sup>收集了沿海区域沉积的微塑料,发现其浸出液毒性远高于原始微塑料,原因可能是微塑料吸附持久性有机污染物。同时,有研究发现,微塑料可加重有机磷阻燃剂对小鼠的氧化应激和神经毒性作用<sup>[77]</sup>。

### 5 总结与展望 (Summary and perspective)

微塑料污染情况日趋严峻、分布广泛,对生态系统的影响及引起的健康风险日益受到关注。正如文中所述,目前关于微塑料的研究还处于初期阶段,主要集中在微塑料污染的环境分布现状及特征,微塑料对水生动植物及线虫、斑马鱼和小鼠等模式生物的毒性效应及机制,微塑料毒性作用影响因素等研究方面。虽然目前已有大量研究,但是由于微塑料在环境中存在的广泛性、不易降解性及其毒性效应的复杂性和持久性等特点,增加了相关研究的难度,还有很多问题亟待阐明。首先,目前尚无有效去除和治理微塑料的措施,因此,易降解的新型塑料研发以及环境微塑料识别、分类、定量和评估治理技术的开发是从根源上解决微塑料污染的关键策略。其次,微塑料进入环境中具有生物放大作用,并可经食物链进入哺乳动物及人体,但相关研究较少,有必要进一步研究微塑料对哺乳动物尤其是人类的潜在毒性及相关机制。同时,环境中微塑料常与多种污染物共存,微塑料毒性也受到多种因素影响,对其毒性

作用及机制的研究应当在以下 3 个方面有所侧重:(1)不同材质、粒径、形态的微塑料在不同温度、pH 等条件组合下毒性作用的异同;(2)微塑料同其吸附的重金属、持久性有机污染物等的复合毒性及作用机制;(3)使用环境暴露浓度进行毒性作用及机制的研究。上述领域的深入研究将有助于制定微塑料在环境及生物体内转归的监测方案,为进一步发展精确的微塑料风险评估提供科学依据。

通讯作者简介:孙蓉丽(1985—),女,博士,副教授,主要研究方向为环境毒理学。

#### 参考文献 (References):

- [1] 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)
- [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] 丁剑楠,张闪闪,邹华,等. 淡水环境中微塑料的赋存、来源和生态毒理效应研究进展[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1619-1626  
Ding J N, Zhang S S, Zou H, et al. Occurrence, source and ecotoxicological effect of microplastics in freshwater environment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(9): 1619-1626 (in Chinese)
- [4] 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 (in Chinese)
- [5] 张霁琦. 微塑料在海洋中的分布特征及对生物的影响[J]. 资源节约与环保, 2018(12): 128-129
- [6] 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)
- [7] 叶李嘉,吴南翔. 微塑料的检测及其生态环境影响研究进展[J]. 环境与职业医学, 2019, 36(12): 1161-1167,

- 1174  
Ye L J, Wu N X. Progress on detection of microplastics and their effects on ecosystem [J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2019, 36(12): 1161-1167, 1174 (in Chinese)
- [8] 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 (in Chinese)
- [9] Kazour M, Jemaa S, Issa C, et al. Microplastics pollution along the Lebanese Coast (Eastern Mediterranean Basin): Occurrence in surface water, sediments and biota samples [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 133933
- [10] 武芳竹, 曾江宁, 徐晓群, 等. 海洋微塑料污染现状及其对鱼类的生态毒理效应[J]. *海洋学报*, 2019, 41(2): 85-98
- Wu F Z, Zeng J N, Xu X Q, et al. Status of marine microplastic pollution and its ecotoxicological effects on marine fish [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(2): 85-98 (in Chinese)
- [11] Cózar A, Echevarría F, González-Gordillo J I, et al. Plastic debris in the open ocean [J]. *PNAS*, 2014, 111(28): 10239-10244
- [12] Lusher A L, Tirelli V, O' Connor I, et al. Microplastics in Arctic polar waters: The first reported values of particles in surface and sub-surface samples [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14947
- [13] 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)
- [14] Scheurer M, Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(6): 3591-3598
- [15] Ng E L, Huerta Lwanga E, Eldridge S M, et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 1377-1388
- [16] 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
- [17] 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: 855-862
- [18] 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
- [19] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5774-5780
- [20] 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
- [21] Cai L Q, Wang J D, Peng J P, et al. Correction to: Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan City, China: Preliminary research and first evidence [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(35): 36074-36075
- [22] 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)
- [23] 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
- [24] 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
- [25] Setälä O, Fleming-Lehtinen V, Lehtiniemi M. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185: 77-83
- [26] 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
- [27] Kashiwada S. Distribution of nanoparticles in the see-through medaka (*Oryzias latipes*) [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2006, 114(11): 1697-1702
- [28] 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
- [29] 孙尚. 微塑料对仓鼠的生物毒理效应[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 30-35

- Sun S. Biological toxicological effects of microplastics on hamsters [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 30-35 (in Chinese)
- [30] Yong C, Valiyaveetil S, Tang B. Toxicity of microplastics and nanoplastics in mammalian systems [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(5): 1509
- [31] 姜航, 丁剑楠, 黄叶菁, 等. 聚苯乙烯微塑料和罗红霉素对斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)和大型溞(*Daphnia magna*)的联合效应研究[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(7): 1457-1465
- Jiang H, Ding J N, Huang Y J, et al. Combined effects of polystyrene microplastics and roxithromycin on the green algae (*Scenedesmus obliquus*) and waterflea (*Daphnia magna*) [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(7): 1457-1465 (in Chinese)
- [32] 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)
- [33] 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 等. 微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4661-4667
- Liao Y C, Nazygul·Jahitbek, Li M, et al. Effects of microplastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4661-4667 (in Chinese)
- [34] 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: 28-33
- Sun X D. Phytotoxicity, uptake and accumulation of differentially charged nanoplastics in *Arabidopsis thaliana* [D]. Ji'nan: Shandong University, 2019: 28-33 (in Chinese)
- [35] Pannetier P, Morin B, Le Bihanic F, et al. Environmental samples of microplastics induce significant toxic effects in fish larvae [J]. *Environment International*, 2020, 134: 105047
- [36] Yang H, Xiong H R, Mi K H, et al. Toxicity comparison of nano-sized and micron-sized microplastics to Goldfish *Carassius auratus* larvae [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 122058
- [37] Cong Y, Jin F, Tian M, et al. Ingestion, egestion and post-exposure effects of polystyrene microspheres on marine medaka (*Oryzias melastigma*) [J]. *Chemosphere*, 2019, 228: 93-100
- [38] Ding J N, Zhang S S, Razanajatovo R M, et al. Accumulation, tissue distribution, and biochemical effects of polystyrene microplastics in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 1-9
- [39] Barboza L G A, Vieira L R, Branco V, et al. Microplastics cause neurotoxicity, oxidative damage and energy-related changes and interact with the bioaccumulation of mercury in the European seabass, *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2018, 195: 49-57
- [40] 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
- [41] Poma A N, Vecchiotti G, Colafarina S, et al. *In vitro* genotoxicity of polystyrene nanoparticles on the human fibroblast Hs27 cell line [J]. *Nanomaterials*, 2019, 9(9): 1299
- [42] Li B Q, Ding Y F, Cheng X, et al. Polyethylene microplastics affect the distribution of gut microbiota and inflammation development in mice [J]. *Chemosphere*, 2020, 244: 125492
- [43] Jin Y X, Lu L, Tu W Q, et al. Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 308-317
- [44] 万志琴. 聚苯乙烯微塑料对斑马鱼菌群和代谢的影响[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019: 18-50
- Wan Z Q. Effects of polystyrene microplastics on the microbiota and metabolism in zebrafish [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019: 18-50 (in Chinese)
- [45] 雷丽丽. 微塑料颗粒对秀丽线虫和斑马鱼的毒性效应及其机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2019: 17-57
- Lei L L. Toxic effects and mechanisms of microplastic particles on *Caenorhabditis elegans* and *Danio rerio* [D]. Shanghai: East China Normal University, 2019: 17-57 (in Chinese)
- [46] Lu L, Wan Z Q, Luo T, et al. Polystyrene microplastics induce gut microbiota dysbiosis and hepatic lipid metabolism disorder in mice [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631-632: 449-458
- [47] Luo T, Wang C Y, Pan Z H, et al. Maternal polystyrene microplastic exposure during gestation and lactation altered metabolic homeostasis in the dams and their F<sub>1</sub> and F<sub>2</sub> offspring [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(18): 10978-10992
- [48] Domenech J, Hernández A, Demir E, et al. Interactions of graphene oxide and graphene nanoplatelets with the *in*



- vitro* Caco-2/HT29 model of intestinal barrier [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 2793
- [49] 洪文秀. 典型微塑料对优势底栖动物的毒性效应研究 [D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2019: 44-53
- Hong W X. Toxic effects of typical microplastics on dominant benthic animals [D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2019: 44-53 (in Chinese)
- [50] Yang Y F, Chen C Y, Lu T H, et al. Toxicity-based toxicokinetic/toxicodynamic assessment for bioaccumulation of polystyrene microplastics in mice [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 366: 703-713
- [51] Treyer A, Pujato M, Pechuan X, et al. Iterative sorting of apical and basolateral cargo in Madin-Darby canine kidney cells [J]. Molecular Biology of the Cell, 2016, 27(14): 2259-2271
- [52] Horstmann H, Ng C P, Tang B L, et al. Ultrastructural characterization of endoplasmic reticulum—Golgi transport containers (EGTC) [J]. Journal of Cell Science, 2002, 115(22): 4263-4273
- [53] Greven A C, Merk T, Karagöz F, et al. Polycarbonate and polystyrene nanoplastic particles act as stressors to the innate immune system of fathead minnow (*Pimephales promelas*) [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2016, 35(12): 3093-3100
- [54] 曹露, 李永, 梁瑞峰, 等. 微塑料颗粒对虹鳟免疫基因表达的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(8): 3347-3352
- Cao L, Li Y, Liang R F, et al. Effects of microplastic particles on immune gene expression of rainbow trout [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(8): 3347-3352 (in Chinese)
- [55] Hwang J, Choi D, Han S, et al. An assessment of the toxicity of polypropylene microplastics in human derived cells [J]. Science of the Total Environment, 2019, 684: 657-669
- [56] Xu M K, Halimu G, Zhang Q R, et al. Internalization and toxicity: A preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell [J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133794
- [57] da Costa Araújo A P, Malafaia G. Microplastic ingestion induces behavioral disorders in mice: A preliminary study on the trophic transfer effects via tadpoles and fish [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 401: 123263
- [58] Lönnstedt O M, Eklöv P. Environmentally relevant concentrations of microplastic particles influence larval fish ecology [J]. Science, 2016, 352(6290): 1213-1216
- [59] Lee K W, Shim W J, Kwon O Y, et al. Size-dependent effects of micro polystyrene particles in the marine copepod *Tigriopus japonicas* [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(19): 11278-11283
- [60] Choi J S, Hong S H, Park J W. Evaluation of microplastic toxicity in accordance with different sizes and exposure times in the marine copepod *Tigriopus japonicas* [J]. Marine Environmental Research, 2020, 153: 104838
- [61] Sussarellu R, Suquet M, Thomas Y, et al. Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics [J]. PNAS, 2016, 113(9): 2430-2435
- [62] Jin H B, Ma T, Sha X X, et al. Polystyrene microplastics induced male reproductive toxicity in mice [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 401: 123430
- [63] Hou B L, Wang F Y, Liu T, et al. Reproductive toxicity of polystyrene microplastics: *In vivo* experimental study on testicular toxicity in mice [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 405: 124028
- [64] Xie X M, Deng T, Duan J F, et al. Exposure to polystyrene microplastics causes reproductive toxicity through oxidative stress and activation of the p38 MAPK signaling pathway [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 190: 110133
- [65] Bedard K, Krause K H. The NOX family of ROS-generating NADPH oxidases: Physiology and pathophysiology [J]. Physiological Reviews, 2007, 87(1): 245-313
- [66] 万升理, 郑新宇, 潘星任, 等. 微塑料的环境行为与生物毒性研究[J]. 广东化工, 2019, 46(3): 101-102, 110
- Wan S L, Zheng X Y, Pan X R, et al. Research on the environmental behavior and biological toxicity of microplastics [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(3): 101-102, 110 (in Chinese)
- [67] 徐擎擎, 张弢, 邹亚丹, 等. 微塑料与有机污染物的相互作用研究进展[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(1): 40-49
- Xu Q Q, Zhang G, Zou Y D, et al. Interactions between microplastics and organic pollutants: Current status and knowledge gaps [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2018, 13(1): 40-49 (in Chinese)
- [68] 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)
- [69] Nolte T M, Hartmann N B, Kleijn J M, et al. The toxicity of plastic nanoparticles to green algae as influenced by surface modification, medium hardness and cellular adsorption [J]. Aquatic Toxicology, 2017, 183: 11-20
- [70] Zhang C, Chen X H, Wang J T, et al. Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between microplastic and algae [J]. Environ-

- mental Pollution, 2017, 220: 1282-1288
- [71] 李连祯, 周倩, 尹娜, 等. 食用蔬菜能吸收和积累微塑料[J]. 科学通报, 2019, 64(9): 928-934  
Li L Z, Zhou Q, Yin N, et al. Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(9): 928-934 (in Chinese)
- [72] Lu L, Wan Z Q, Luo T, et al. Polystyrene microplastics induce gut microbiota dysbiosis and hepatic lipid metabolism disorder in mice [J]. Science of the Total Environment, 2018, 631-632: 449-458
- [73] 王一飞, 李森, 于海瀛, 等. 微塑料对环境中有有机污染物吸附解吸的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(4): 23-30  
Wang Y F, Li M, Yu H Y, et al. Research progress on the adsorption and desorption between microplastics and environmental organic pollutants [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(4): 23-30 (in Chinese)
- [74] 周瑛, 徐博凡, 王萍亚, 等. 微塑料对水体中痕量砷、铅的吸附[J]. 浙江工业大学学报, 2019, 47(6): 648-653  
Zhou Y, Xu B F, Wang P Y, et al. Study on the adsorption of trace arsenic and plumbum ion by microplastics [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2019, 47(6): 648-653 (in Chinese)
- [75] 孙聪惠. 渤海湾滨海潮间带微塑料和重金属污染及生态风险[D]. 天津: 天津师范大学, 2018: 20-22  
Sun C H. Microplastics and heavy metal pollution in the intertidal zone of Bohai Bay and its ecological risks [D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2018: 20-22 (in Chinese)
- [76] Gandara e Silva P P, Nobre C R, Resaffe P, et al. Leachate from microplastics impairs larval development in brown mussels [J]. Water Research, 2016, 106: 364-370
- [77] Deng Y F, Zhang Y, Qiao R X, et al. Evidence that microplastics aggravate the toxicity of organophosphorus flame retardants in mice (*Mus musculus*) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 357: 348-354 ◆