

海洋微塑料污染的生物效应研究进展

刘 香^{1,2,3,4,5}, 茹小尚^{1,2,3,4}, 张立斌^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 4. 中国科学院海洋牧场工程实验室, 山东 青岛 266071; 5. 青岛科技大学环境与安全工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 微塑料是粒径小于 5 mm 的各类塑料碎片的总称。在环境领域中, 微塑料污染已经成为人们的关注热点。近年来, 海洋环境中微塑料污染日益严峻, 其引发的生物与环境问题也备受关注。本文系统总结了海洋微塑料污染的生物效应研究进展, 介绍了微塑料的定义、来源、分类、分布特征等研究现状, 分析了微塑料对海洋环境中海水水质和沉积环境的影响, 综述了微塑料对海洋生物的毒性效应, 并基于研究进展提出了未来需关注的研究方向, 以为海洋微塑料对环境与生物的影响研究提供借鉴和参考。

关键词: 微塑料; 海洋环境; 生物积累; 毒性效应

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2021)03-0122-12

DOI: 10.11759/hyqx20200707001

塑料制品是采用以塑料为主要原料加工而成的各种工业、生活用品的总称, 具有使用方便、质量轻、成本低、化学性质稳定等优良的性能^[1]。人类生活与塑料制品关系密切, 例如, 生活中会使用种类繁多的塑料制品, 但塑料制品在环境中自然降解需要上百年的时间。海洋微塑料以其全球广布性和危害严重性而日益受到国际社会关注, 其对海洋环境和生物的影响成为当前的研究热点。微塑料已经被联合国列为一种新型污染物, 与全球气候变化、臭氧污染、海洋酸化等并列为全球重大环境问题, 系统分析微塑料污染的环境与生物效应, 对于科学认识微塑料对海洋环境和生物的影响具有重要意义。

1 微塑料概述

1.1 微塑料定义

近年来, 因塑料制品的大量使用, 导致塑料垃圾污染愈发严重^[2]。在紫外线、机械损伤和微生物降解等理化因子综合作用下, 长期存在的塑料垃圾可被降解为碎小塑料颗粒^[3]。2004 年, 英国 Thompson 教授^[4]首次提出了“微塑料”的概念, 凡是粒径小于 5 mm 的塑料碎片即被认定为微塑料^[5]。自此, 微塑料相关问题在全球范围内得到广泛的关注。

海洋中的微塑料无处不在, 其碎片小到用肉眼难以发现。因此, 微塑料又被称作为海洋中的 PM_{2.5}^[6]。与大颗粒塑料相比, 微塑料更容易随着食物被海洋生物摄入, 而且塑料颗粒持续存在于海洋环境中, 致使其在海洋中不断积累。海洋中的塑料垃圾对海洋生态系统造成了严重的影响, 已经成为全球性的重大环境问题^[7]。

1.2 微塑料来源分析

微塑料主要源于塑料垃圾, 按其产生途径可以分为两类: 初级微塑料和次级微塑料^[8]。初级微塑料是指生产出来粒径就处于微米级别的塑料产品, 例如个人护理用品中的塑料微珠、用于喷砂过程中的塑料微粒等^[9]; 次级微塑料指塑料制品随着时间的推移, 在风力、海洋涡流、湍流与紫外辐射等作用下, 破坏了其本身的结构, 进而裂解形成的微小颗粒^[10]。

Eriksen 等利用数据校准的漂浮物扩散海洋学模

收稿日期: 2020-07-07; 修回日期: 2020-09-21

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0902102)

[Foundation: The National Key Research and Development Plan, No. 2019YFD0902102]

作者简介: 刘香(1997—), 女, 陕西榆林人, 在读研究生, 主要从事微塑料污染对刺参行为和生理影响的相关研究, E-mail: lx974727024@163.com; 张立斌, 男, 通信作者, 研究员, E-mail: zhanglibin@qdio.ac.cn

型估算,在全球近海、大洋、深海和极地海洋表面大约有 5.25 万亿个塑料颗粒漂浮,总重达 2.7×10^5 吨^[11],经代谢活动,微塑料最终会进入水生生物体内并富集在组织内^[12-13]。海洋中微塑料主要源于陆源塑料垃圾输入与海上塑料垃圾的分解^[14-15]。陆源塑料垃圾的输入是海洋中塑料污染的主要来源之一,包括人类生活中有意或者无意丢弃的塑料废弃物,被暴风雨冲到海边的陆地上;化妆品中的磨砂膏、牙膏以及服装中的微塑料颗粒等,这些微塑料颗粒在污水处理过程中由于颗粒小而难以去除,从而会进入海洋^[14]。船舶运输和海上养殖捕捞等过程中塑料制品的使用、老化和过往船舶向海洋丢弃塑料废弃物等都会导致塑料产品进入海洋^[16]。

1.3 微塑料主要分类

据研究,常见的微塑料按其成分划分主要有聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚氯乙烯、聚氨酯与聚酰胺等^[17],如表 1 所示。

表 1 环境中常见的微塑料类型^[18]

Tab. 1 Common types of microplastics in the environment

类型	简称	来源
聚乙烯	PE	塑料袋、塑料瓶、牛奶罐、果汁罐、吸管与渔网等
聚丙烯	PP	绳索、瓶盖与渔网等
聚苯乙烯	PS	塑料餐具与食品容器等
聚氯乙烯	PVC	塑料薄膜、瓶子与杯子等
聚氨酯	PU	油漆、涂料、保温层与家用电器等
聚酰胺	PA	渔网与捕捉器等

1.4 海洋生态系统中微塑料分布特征

海洋生态系统中的塑料碎片可以在风力、河流与洋流等物理外力作用下进行迁移^[9],其分布特征受粒子密度、水源位置和洋流输送的影响显著^[19]。当前,大型塑料碎片和微塑料垃圾存在于全球海洋环境中,有些甚至出现在两极附近海域^[20],主要包括东太平洋^[21]、南太平洋^[22]、北太平洋^[23]、北大西洋^[24]与印度洋^[25],其中,太平洋受污染尤为严重^[26-27],且由于洋流原因,大洋中漂浮的塑料垃圾主要汇集于全球 5 个主要的大洋环流中心^[28]。

我国近海海域塑料垃圾污染也已相当严重,在表层海水、海滩以及近海沉积物中都已监测到微塑料^[29]。沉积物中的微塑料丰度往往高于水体中的丰度,虽然塑料的密度往往比水轻,但是由于风力、

水动力条件和生物富集等因素的作用,水体中的微塑料会沉降到海底^[30]。目前,研究人员主要对我国长江口、渤海海域、东海近岸、黄海海域、南海、椒江、瓯江和岷江江口等区域进行了微塑料污染调查^[29, 31-35]。在渤海海域,海滩上微塑料以粒径为 0.01~10 mm 为主,其丰度为 102.9 个/kg^[31],海水中 0.000 5~23.5 cm 的塑料颗粒含量为 0.01~1.23 个/m³^[32]。在东海海岸,粒径为 0.5~5 mm 的微塑料含量为 0.167 个/m³^[29]。在黄海海域,微塑料粒径为 0.5~5 mm,其丰度为 0.33 个/m³^[33]。对于南海海域,以粒径为 0.02~0.30 mm 的微塑料为主,其丰度为 2 569 个/m³^[34]。在椒江、瓯江和闽江粒径为 5 μm~333 μm 的塑料颗粒含量分别为 956 个/m³、680 个/m³和 1 246 个/m³^[35]。在长江口,粒径为 0.5~5 mm 的微塑料丰度为 4 137 个/m³^[29]。但微塑料的丰度单位尚未标准化且不同的调查采用的方法有区别,所以以上数据只能相对比较,相关标准化工作亟待开展^[36]。不过,可以明显的看出长江口附近微塑料丰度较高,造成此种结果的原因可能是长江口附近的城市中人口密集、经济活动较多。

2 微塑料对海洋环境的影响

密度是影响微塑料最终流向的重要影响因子,例如聚氯乙烯等高密度的微塑料最有可能沉在海底沉积物中,而比海水密度低的微塑料(聚丙烯)一般会漂浮在海面,并逐渐分散在水体中^[37]。不管是悬浮在海水中微塑料,还是沉积到沉积物中的微塑料,由于其特殊的理化性状,其污染对海洋环境造成的影响远比其他塑料显著^[17]。

2.1 微塑料对海水水质的影响

塑料制品在生产过程中会使用各种化学添加剂,这些塑料垃圾进入海洋后会逐渐破碎,从而对海水水质造成一定的影响^[17]。此外,大量的微塑料漂浮在海洋表面、悬浮在各层海水中,因塑料对太阳光有遮挡作用和反射作用,进而导致光线在海水中的传递受阻,最终对藻类的光合作用造成抑制效应,并对其他生物的生存、生长造成间接干扰^[17, 38]。例如, Mao 等将小球藻暴露于聚苯乙烯微塑料环境中,结果发现,随着聚苯乙烯浓度的增加,小球藻的光合作用降低,这归因于微塑料对其造成的物理损伤和氧化应激作用^[39]。而且,藻类能够通过光合作用起到净化海水的作用,因此,海洋中藻类的光合作用受

到影响会导致水体的自净能力变低,从而使海水水质受到一定的影响^[40-41]。

2.2 微塑料对沉积环境的影响

海洋环境中已经发现塑料会堆积在沿海沉积物中,并在世界各地的海洋沉积物中大量积累^[42]。海底塑料碎片的堆积会对海洋生态系统构成潜在威胁。例如,海底塑料碎片堆积会阻碍上层水和沉积物孔隙水之间的气体交换,从而导致底栖生物缺氧或由缺氧而影响正常的生态系统功能^[43]。而且,微塑料会富集周围环境中的有机污染物及重金属,例如, Mato 等对日本海滩收集的聚丙烯微塑料样品进行检测,结果发现,其样品中含有多氯联苯(PCBs)、滴滴涕(DDT)与壬基酚(NP)等有机污染物^[38]; Vedolin 等对巴西圣保罗州海岸的 19 个海滩收集的样品进行检测,结果发现,样品中微塑料表面吸附多种重金属^[44]。发生在沉积物界面上的氧气和水的扩散与交换因吸附在微塑料表面的物质而被阻碍,从而对发生在沉积物界面上的生物化学过程造成影响,进而影响生物地球化学循环,同时,这些富集物最终会与微塑料产生联合毒性效应^[45]。

3 微塑料对海洋生物的影响

3.1 微塑料对海洋动物的影响

3.1.1 微塑料对海洋动物生理状态的影响

微塑料对海洋动物生理的影响主要集中在消化系统、呼吸系统与生殖系统等,进而对海洋生物的消化、呼吸与繁殖等造成影响,相关结果在鱼类、贝类、甲壳类动物、棘皮动物等中都有发现,如表 2 所示。

3.1.1.1 消化生理

在消化生理方面,微塑料可以通过阻断消化道和阻断酶的产生而对水生动物造成伤害^[46-47]。在鱼类中,将斑马鱼(*Danio rerio*)暴露于不同浓度的聚苯乙烯微塑料后,结果发现,微塑料会导致斑马鱼肠道中微生物多样性降低,变形杆菌和融合细菌等致病菌丰度增加,进而导致斑马鱼肠道损伤和肠道菌群失调^[48]。相似的结果同样在以大黄鱼(*Larimichthys crocea*)为实验动物的研究中也报道,将其暴露于纳米塑料环境中后,结果发现,幼鱼肠道生理呈现病理状态,肠道中拟杆菌,变形杆菌和硬毛菌的比例发生了显著变化,同时拟杆菌和阿利培比斯等潜在致病菌显著增加^[49]。对于贝类,将地中海贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)暴露于一定浓度、不同粒径

的聚乙烯微塑料后,结果发现,贻贝消化管上皮细胞的形态趋于变薄且其消化道结构发生改变^[50]。在甲壳类动物中,Chae 等将白虾(*Litopenaeus vannamei*)暴露于聚苯乙烯微塑料环境中,结果发现,其肠道中微生物活性发生改变^[51]。此外,将中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)暴露于聚苯乙烯微塑料环境后,结果发现,其肠道菌群组成和多样性发生改变^[52]。

3.1.1.2 代谢生理

在代谢生理方面,在鱼类中,将雄性斑马鱼(*D. rerio*)暴露于不同浓度的聚苯乙烯微塑料后,结果发现,其对斑马鱼肝脏中碳代谢、脂肪酸代谢和氨基酸代谢均有一定的影响,此研究为了解微塑料对水生生物代谢生理紊乱提供了重要依据^[53]。同时,将斑马鱼(*D. rerio*)幼鱼暴露于一定浓度、不同粒径的聚苯乙烯微塑料后,结果显示,与对照组相比,多种代谢物的含量在斑马鱼幼鱼体内发生变化,且造成其代谢物种类的变化与微塑料粒径有关,这些变化的代谢物集中在碳水化合物、脂肪酸、氨基酸与核酸等。由此可见,暴露于不同粒径的聚苯乙烯微塑料均能对斑马鱼幼鱼的代谢产生影响,且不同尺寸微塑料诱导变化的代谢产物也不同^[54]。在甲壳类动物中,将红螯螯虾(*Cherax quadricarinatus*)暴露于聚苯乙烯微塑料环境后,结果发现,其肝胰腺和血淋巴中的脂质含量和脂肪酸含量显著下降,其脂质代谢受影响^[55]。

3.1.1.3 呼吸作用

在呼吸生理方面,在鱼类中,将青鳉鱼(*Oryzias latipes*)分别暴露于不同浓度聚酯纤维和聚丙烯纤维环境后,结果发现,两组暴露组中均发现青鳉鱼鳃弓表面糜烂、鳃丝融合,造成鳃物理损伤,可能由于微纤维频繁穿过所致,同时还发现鱼鳃腔黏液增加。因此,微纤维与鳃相关结构接触会导致鳃病变,影响鱼类呼吸^[56]。在贝类中,将欧洲牡蛎(*Ostrea edulis*)暴露于不同浓度聚乙烯微塑料后,结果发现,牡蛎呼吸速率与其暴露浓度有关^[57]。相似的结果同样在以贻贝为实验动物的研究中也报道,Rist 等将翡翠贻贝(*Perna viridis*)暴露于聚氯乙烯微塑料环境后,结果发现,贻贝的呼吸速率随着聚氯乙烯浓度的增加而降低,由此可见,微塑料对其呼吸率有一定的影响^[58]。在甲壳类动物中,将普通滨蟹(*Carcinus maenas*)暴露于聚苯乙烯微塑料环境后,结果发现,其氧气消耗量与聚苯乙烯颗粒暴露量呈现剂量-效应关系^[59]。

表 2 微塑料对海洋动物的影响
Tab. 2 The impact of microplastics on marine animals

影响类型	受试生物	微塑料类型	微塑料尺寸	暴露时间	暴露剂量	毒性评价方法	毒性效应	参考文献
消 化 生 理	斑马鱼	聚苯乙烯 ¹	5 μm	21 d	50 与 500 μg/L	偏振光显微镜观察	肠道损伤, 肠道菌群失调	[48]
	大黄鱼	聚苯乙烯 ¹	100 nm	14 d	—	微生物多样性 16S 测序	肠道菌群变化, 肠道呈现不健康状态	[49]
	地中海贻贝	聚乙烯 ¹	50~570 μm	21 d	0.01 mg/mL	显微镜观察	消化管上皮细胞的形态趋于变薄, 消化道结构改变	[50]
	白虾	聚苯乙烯 ¹	44 nm	7、14 与 21 d	50 μg/mL	生化分析	肠道中微生物活性发生改变	[51]
	中华绒螯蟹	聚苯乙烯 ¹	5 μm	7、14 与 21 d	0、0.04、0.4、4 与 40 mg/L	微生物多样性分析	肠道菌群组成和多样性发生改变	[52]
代 谢 生 理	斑马鱼	聚苯乙烯 ¹	5 μm	21 d	0、20 与 100 μg/L	肝生化指标分析	肝脏中碳代谢、脂肪酸代谢和氨基酸代谢均产生影响	[53]
	斑马鱼幼鱼	聚苯乙烯 ¹	5 与 50 μm	7 d	1 000 μg/L	GC/MS 代谢组学分析	代谢物的含量发生了变化(变化的代谢物集中在碳水化合物、脂肪酸、氨基酸与核酸)	[54]
	红螯螯虾	聚苯乙烯 ¹	200 nm	21 d	0、0.5 与 5 mg/L	—	脂质代谢紊乱	[55]
	青鳉鱼	聚酯 ²	10~20 μm	21 d	0.53 mg/L	扫描电镜分析	鳃表面糜烂, 鳃丝融合, 造成鳃物理损伤, 影响呼吸	[56]
	欧洲牡蛎	聚乙烯 ¹	0.48~316 μm	60 d	80 μg/L	溶解氧消耗量	呼吸速率变化	[57]
生 理 方 面 呼 吸 作 用	翡翠贻贝	聚氯乙烯 ¹	1~50 μm	44 d(2 h/d)	0、21.6、216 与 2 160 mg/L	溶解氧消耗量	呼吸速率随暴露浓度的增加而降低	[58]
	普通滨蟹	聚苯乙烯 ¹	8 μm	1 h	106 与 107 个/L	氧气消耗量	氧气消耗量与暴露量呈剂量-效应关系	[59]
	鲈鱼幼虫	聚苯乙烯 ¹	90 μm	21 d	0、10 000 与 80 000 个/m ³	监控孵化数量	抑制鱼类的孵化	[60]
	太平洋牡蛎	聚苯乙烯 ¹	2 与 6 μm	60 d	0.023 mg/L	收集卵母细胞数	幼虫产量和幼虫发育率分别降低	[61]
	美洲钩虾	聚乙烯 ¹	10~27 μm	42 d	—	收集计数	繁殖率显著下降	[62]
效 应	太平洋沙蟹	聚丙烯 ²	—	71 d	—	—	影响胚胎发育率	[63]
	绿海胆	聚丙烯 ¹	—	24 h	—	光学显微镜观察	海胆胚胎的发育异常率显著增加	[64]
	海胆	聚苯乙烯 ¹	40 nm	24 h 与 48 h	—	—	海胆幼虫及其卵有一定的毒害作用	[65]

续表

影响类型	受试生物	微塑料类型	微塑料尺寸	暴露时间	暴露剂量	毒性评价方法	毒性效应	参考文献
摄食行为	鱼类(湿地采集)	—	—	—	—	立体光学显微镜观察	体内堵塞,引起营养不良并导致饥饿	[66]
	黑鲫	聚苯乙烯 ¹	24~27 nm	30 min	—	监控拍摄	摄食时间延长,能量储备降低	[68]
	紫贻贝	聚苯乙烯 ¹	30 nm	—	0、0.1、0.2与0.3 g/L	显微镜观察	滤食速率改变	[70]
	日本新糠虾	聚苯乙烯 ¹	5 μm	3 h	10 mg/mL	立体显微镜观察	降低摄食率,捕食行为减弱	[72]
	海胆	聚苯乙烯 ¹	10 μm	—	0.125、1.25、12.5与25 mg/mL	立体显微镜观察	影响其摄食率,影响营养物质的摄入	[73]
	海胆	聚苯乙烯 ¹	25~32 μm	—	1、10、100与300个/mL	显微镜观察	降低摄食率,对其生长造成影响	[74]
	斑马鱼	聚苯乙烯 ¹	45 nm与50 nm	—	1 mg/L	视频跟踪	运动行为发生改变	[76]
	斑马鱼	聚苯乙烯 ¹	5 μm与50 μm	7 d	100与1 000 μg/L	Zebrafish高通量行为分析	对游泳行为为有一定的抑制作用	[54]
	丰年虾	聚苯乙烯 ¹	0.1 μm	48 h	0.01~10 mg/L	游泳行为记录系统	游泳速度改变	[78]
	日本新糠虾	聚苯乙烯 ¹	5 μm	5 min	10 mg/mL	摄像机记录	对运动行为具有负面影响	[72]
分子水平	刺参	纤维 ²	1~5 mm	12 h	0.003与0.006 g/L	摄像机拍摄	运动速度与移动距离无显著改变	[79]
	斑马鱼	聚苯乙烯 ¹	5 μm	21 d	0、20与100 μg/L	转录组分析技术	基因在暴露后发生变化	[53]
	青鳉鱼	聚苯乙烯 ¹	0.5 mm	60 d	0.008 μg/mL	—	基因表达显著下降	[80]
	斑马鱼	聚苯乙烯 ¹	5与50 μm	7 d	100与1 000 μg/L	GC/MS 代谢组学分析	基因转录水平显著改变	[54]
	斑马鱼	聚苯乙烯 ¹	5 μm	21 d	50与500 μg/L	—	氧化应激反应	[48]
	贻贝	聚苯乙烯 ¹	2与6 μm	7 d	32 μg/L	—	氧化应激通路被激活	[81]
	丰年虾	聚苯乙烯 ¹	0.1 μm	48 h	0.01~10 mg/L	—	氧化应激反应	[78]
	中华绒螯蟹	聚丙烯 ¹	5 μm	7 d	40 000 μg/L	—	肝胰腺中诱发氧化应激反应	[82]
	鰕虎鱼	聚苯乙烯 ¹	1~5 μm	96 h	18.4与184 μg/L	生物标志物测定	降低酶活性,增加鱼类种群的死亡率	[83]
	丰年虾	聚苯乙烯 ¹	1、3、6与10 μm	30 d	1与1 000个/mL	酶标仪	乙酰胆碱酯酶(AChE)活性被显著抑制	[85]
中华绒螯蟹	聚苯乙烯 ¹	5 μm	7、14与21 d	0、0.04、0.4、4与40 mg/L	免疫参数测定	免疫酶活性和免疫相关的基因表达受影响	[52]	
牡蛎	聚苯乙烯 ¹	2与6 μm	60 d	0.023 mg/L	转录组和蛋白质组学分析	mRNA 活性降低	[57]	

注: 微塑料类型列中: 1. 代表微塑料形状为颗粒; 2. 代表微塑料形状为纤维。

3.1.1.4 生殖效应

在生殖生理方面,在鱼类中,将鲈鱼(*Perca fluviatilis*)仔苗暴露于不同浓度的聚苯乙烯微塑料中,结果发现,微塑料会抑制鱼类孵化,由此可见,微塑料可对鱼类的生殖造成一定影响^[60]。在贝类中,Sussarellu 等为了评估聚苯乙烯微塑料对太平洋牡蛎(*Pacific oyster*)生理的影响,将牡蛎暴露于一定浓度、不同粒径的聚苯乙烯颗粒溶液后,结果发现,经暴露后牡蛎的卵母细胞数、直径与精子速度显著下降,其幼虫产量和幼虫发育率降低,由此可见,聚苯乙烯微塑料颗粒可对牡蛎的生理产生干扰^[61]。在甲壳类动物中,将美洲钩虾(*Hyaella azteca*)暴露于不同粒径的聚乙烯微塑料环境后,结果发现,美洲钩虾的繁殖率显著下降^[62]。此外,研究发现将太平洋沙蟹(*Emerita analoga*)暴露于聚丙烯环境后,其胚胎发育率受影响^[63]。在棘皮动物中,Nobre 等评估聚乙烯微塑料对绿海胆(*Lytechinus variegatus*)胚胎发育的毒性作用,研究表明,受聚乙烯微塑料污染的海胆胚胎的发育异常率较对照组显著增加^[64]。此外,将海胆(*Paracentrotus lividus*)受精卵暴露于聚苯乙烯纳米塑料环境中 24 h 和 48 h 后,其 EC₅₀ 值分别为 3.85mg/L 和 2.61mg/L,由此可见,微塑料对海胆幼虫及其卵有一定的毒害作用^[65]。

综上所述,微塑料对鱼类、贝类以及其他海洋动物的生理均产生一定的影响。

3.1.2 微塑料对海洋动物行为的影响

微塑料对海洋动物的影响不止是对生理的影响,对其行为也有一定的影响。

3.1.2.1 摄食行为

众多研究表明,鱼类、贝类、棘皮动物等均可通过直接或间接的方式摄取微塑料,且微塑料可对其摄食行为造成一定影响。对于鱼类,研究者对华南最大红树林湿地采集的鱼类进行实验,结果发现,采集的 32 个鱼类样品中 30 个样品检测出微塑料的存在。通过傅里叶变换红外光谱鉴定,主要聚合物为聚乙烯、聚对苯二甲酸乙二酯、聚丙烯和玻璃纸,这些非营养物质不断积累会导致其体内堵塞,进而减少食物摄取,引起营养不良,最终可能导致鱼类数量大大减少^[66]。同时,研究发现,大多数丰度为 0.2~17.2 个/g,粒径小于 5 mm 的微塑料会影响鱼类摄食,降低摄食率,严重则导致鱼类死亡^[67]。例如, Mattsson 等将黑鲫 (*Carassius carassius*)暴露于聚

苯乙烯微塑料环境后,结果发现,经暴露后其特定时间内摄食时间延长一倍,其原因可能是摄食微塑料导致能量储备降低^[68]。在贝类中,近岸贝类如牡蛎、贻贝与人类生活密切相关,其软体组织含有微塑料将随着饮食进入人体,对人类健康造成潜在威胁^[69]。研究者为了调查聚苯乙烯微塑料对紫贻贝(*Mytilus edulis*)摄食行为的影响,将紫贻贝暴露于不同浓度的聚苯乙烯微塑料后,结果发现,紫贻贝滤食速率改变^[70]。在甲壳类动物中,对澳大利亚东部淡水水体中淡水虾(*Paratya australiensis*)进行取样实验,结果发现,36%样品中检测出微塑料存在,其主要聚合物为纤维^[71]。Wang 等将日本新糠虾(*Neomysis japonica*)暴露于聚苯乙烯微塑料环境后,结果发现,其摄食率降低,捕食行为减弱^[72]。在棘皮动物中, Messinetti 等将海胆(*P. lividus*)幼虫暴露于不同浓度聚苯乙烯微塑料中,结果发现,微塑料在海胆消化道中大量积累,进而影响其摄食率,最终损害海胆营养物质摄入并造成动物死亡^[73]。同时, Kaposi 等发现聚乙烯塑料颗粒可降低海胆(*Tripneustes gratilla*)的摄食率,从而对其生长造成影响^[74]。Mohsen 等发现刺参养殖场中普遍存在微塑料,刺参(*Apostichopus japonicus*)可以直接摄食微塑料颗粒,且刺参摄入微塑料颗粒物随水中颗粒物浓度的增加而增加^[75]。

3.1.2.2 运动行为

将海洋生物暴露于微塑料环境中会影响其运动行为。在鱼类中,将斑马鱼(*D. rerio*)暴露于聚苯乙烯微塑料环境中,用 DanioVision 视频跟踪系统监视其幼虫,结果发现,斑马鱼运动行为发生改变^[76]。此外,将斑马鱼(*D. rerio*)暴露于不同浓度、不同粒径聚苯乙烯微塑料环境后,与对照组相比,斑马鱼幼鱼运动轨迹都有下降的趋势,在黑暗条件下自由游泳的距离和速度都显著下降,表明微塑料会对斑马鱼的游泳行为产生影响^[54]。由此可见,聚苯乙烯微塑料暴露对斑马鱼运动行为均有一定的抑制。在贝类中, Bringer 等将太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)暴露于带有荧光标记的微塑料颗粒环境中,结果发现,经暴露后与对照组相比,其最大游泳速度降低^[77]。在甲壳类动物中, Gambardella 等将丰年虾(*Artemia franciscana*)暴露于不同浓度聚苯乙烯微塑料环境后,结果发现,经暴露后其游泳速度发生改变^[78]。类似的研究成果同样在以日本新糠虾(*N. japonica*)为实验动

物的研究中也报道,将其暴露于聚苯乙烯微塑料环境中,结果发现,其游泳活动范围和速率总体下降,经暴露对其运动行为具有负面影响^[72]。在棘皮动物中,将刺参(*A. japonicus*)暴露于微塑料环境一定时间后,其短期内运动速度与移动距离无显著改变^[79]。

3.1.3 微塑料对海洋动物毒性作用的分子机制

在鱼类中,使用转录组分析技术分析聚苯乙烯微塑料暴露后斑马鱼转录状态,结果发现,成年雄性斑马鱼肝脏中共有 1 388 个基因在暴露后发生变化^[53]。Rochman 等将青鲈鱼(*O. latipes*)暴露于聚乙烯微塑料环境后,结果发现,其体内基因表达发生显著改变^[80]。此外,将斑马鱼(*D. rerio*)暴露于不同浓度、不同粒径聚苯乙烯处理组中,发现其 Gfap、Shha、Elavl3、Gap43 的基因转录水平均显著改变^[54]。

微塑料还可以导致生物体内产生氧化应激反应。在鱼类中,Qiao 等将斑马鱼(*D. rerio*)暴露于不同浓度的聚苯乙烯微塑料后,结果发现,微塑料会导致斑马鱼肠道中出现肠道炎症和氧化应激反应^[48]。Paul-Pont 等发现将贻贝(*M. eduli*)暴露于聚苯乙烯微塑料环境后,可导致其氧化应激通路激活^[81]。类似的研究结果同样在以丰年虾(*A. franciscana*)、中华绒螯蟹(*E. sinensis*)为实验动物的研究中也有所报道,将其暴露于聚苯乙烯微塑料环境后,结果发现,其体内均产生氧化应激反应^[78, 82]。由此可见,微塑料可导致水生生物产生氧化应激反应,进而对其细胞造成损伤。

微塑料对生物体内的酶活性也有一定影响。Oliveira 等发现鰕虎鱼(*Pomatoschistus microps*)的乙酰胆碱酯酶(AChE)和异柠檬酸脱氢酶(IDH)的活性经微塑料与苾的混合物暴露后会降低,从而可能会增加鱼类种群死亡率^[83]。此外,将斑马鱼(*D. rerio*)暴露于聚苯乙烯微塑料环境后,可导致其超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性明显增加^[84]。在甲壳类动物中,将丰年虾(*A. franciscana*)暴露于聚苯乙烯微塑料环境后,结果显示,其乙酰胆碱酯酶(AChE)活性被显著抑制^[85]。Liu 等将中华绒螯蟹(*E. sinensis*)暴露于聚苯乙烯微塑料环境后,结果发现,经暴露后其免疫酶活性和免疫相关的基因表达受影响^[52]。微塑料还可以导致生物体内某些蛋白表达受影响。研究者将牡蛎(*P. oyster*)暴露在聚苯乙烯微塑料中,结果发现,其体内编码胰岛素信号传导的几种蛋白质的转录物 mRNA 活性降低^[57]。

3.2 微塑料对海洋植物的影响

作为对海洋生态系统中功能至关重要的生产者,海洋植物同样受微塑料污染,其会对整个食物网造成严重的影响,从而破坏海洋生态系统的稳定^[86]。相对于海洋动物,微塑料对海洋植物的生态毒性研究较少且集中在对藻类生长、叶绿素含量以及光合作用活性等指标的影响^[87]。Sjollem 等将杜氏藻(*Dunaliella tertiolecta*)暴露于不同粒径的聚苯乙烯微塑料环境中,结果显示,微塑料对其光合作用和生长产生影响,且小粒径微塑料会导致负面作用的加深^[88]。类似的结果同样在以绿藻(*Scenedesmus obliquus*)、扁藻(*Tetraselmis chuii*)等为受试生物的研究中也有报道^[89-90]。Bhattacharya 等研究发现聚苯乙烯纳米球可导致小球藻(*Chlorella Scenedesmus*)藻细胞中叶绿素 *a* 的含量降低,藻细胞内活性氧的产生增加^[91]。此外,藻类是海洋动物的主要食物,微塑料与其他污染物聚合可以增加被海洋动物摄食的机会^[87]。

4 研究展望

微塑料作为一种新型污染物,不仅对海洋环境产生很大的影响,而且广泛存在于海洋生物中,其对海洋生物的影响也备受关注。目前,虽已开展海洋中微塑料的环境与生物效应相关研究工作,但有关微塑料的丰度和理化性质、微塑料对海洋水体环境和沉积环境的影响、微塑料对海洋生物以及人类的影响过程与机制亟待进一步揭示。

(1) 微塑料调查与分析方法标准化

目前,关于各类型微塑料的参数、丰度单位、理化性质等还缺乏系统的研究,对于其调查、采集与分析方法还没有统一的评估标准,未来应加强对微塑料的具体参数、理化性质、调查与分析方法等研究,建立完善的数据库,开展微塑料的调查、采集与分析方法相关标准化研究工作,对于更加全面研究微塑料对海洋环境与生物效应具有重要意义。

(2) 微塑料对海洋水体环境与沉积环境的影响

海洋虽对污染物有着巨大的稀释、扩散、氧化等功能,但当污染物浓度高于它本身的自净能力时,就会产生一系列的负面影响。因此,未来应关注微塑料对海水物理、化学与生物指标的影响,及时评估海洋环境状况,并科学研究微塑料对海洋水体环境和沉积环境具体指标的影响。

(3) 微塑料对海洋生物的毒性效应

目前,微塑料对海洋生物毒性效应研究主要集中在对鱼类与贝类生理、行为等的影响,对其他底栖动物、浮游动物、浮游植物等的研究相对较少,但因其对海洋生态系统的结构和功能也发挥着重要作用。因此,在未来的研究中,需进一步加强微塑料对底栖生物、浮游生物等的影响及其调控途径研究工作。

(4) 微塑料及多种污染物作用对海洋生物的叠加效应

近年来,国内外重点开展了聚苯乙烯、聚乙烯等常见的微塑料对海洋生物的影响研究,目前研究主要集中在单一微塑料对海洋生物的毒性效应,未来研究应该更贴合实际,关注微塑料与其他污染物复合影响对生物的毒性作用,同时结合实际区域的环境特点进行综合研究,这对更加全面地认识微塑料对生物的毒性效应十分重要。

(5) 微塑料对人类健康的影响

微塑料污染已经渗透到几乎所有的生物中,其对人类的潜在危害可通过食物链传递至人体并产生作用,目前已有研究证实微塑料可以通过食物进入人体,但其对人体健康影响的研究还缺乏,所以未来应加强其对人体健康的影响,从基因、细胞、组织各层面揭示其影响机制。

参考文献:

[1] Sutherland W J, Clout M, Cote I M, et al. A horizon scan of global conservation issues for 2010[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(1): 16-22.

[2] Cozar A, Echevarria F, Gonzalezgordillo J I, et al. Plastic debris in the open ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(28): 10239-10244.

[3] 于萍. 微塑料对中华绒螯蟹毒性效应的初步研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.

Yu Ping. Preliminary study on the toxic effect of microplastics on *Eriocheir sinensis*[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.

[4] Thompson R C, Olsen Y S, Mitchell R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic?[J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838-838.

[5] Jambeck J, Geyer R, Wilcox C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347(6223): 768-771.

[6] Rochman C M, Lewison R L, Eriksen M, et al. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in fish tissue may

be an indicator of plastic contamination in marine habitats[J]. *Science of The Total Environment*, 2014, 467-477: 622-633.

[7] Moore C J. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat[J]. *Environmental Research*, 2008, 108(2): 131-139.

[8] Wang T, Hu X, Zhou Q, et al. The research progress in migration, distribution, biological effects and analytical methods of microplastics[J]. *Science Bulletin*, 2017, 63(4): 385-395.

[9] 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.

[10] Zarfl C, Matthies M. Are marine plastic particles transport vectors for organic pollutants to the Arctic[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(10): 1810-1814.

[11] Eriksen M, Lebreton LC, Carson HS, et al. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250, 000 tons afloat at sea[J]. *Plos One*. 2014, 9(12): e111913.

[12] Auta H S, Emenike C U, Fauziah S H, et al. Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions[J]. *Environment International*, 2017, 102: 165-176.

[13] Seltnerich, N. New Link in the Food Chain? Marine Plastic Pollution and Seafood Safety[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, 123(2): 34-41.

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

Sun Chengjun, Jiang Fenghua, Li Jingxi, et al. Research progress on the source, distribution and ecological environmental impact of microplastics in the ocean[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(4): 449-461.

[15] Stolte A, Forster S, Gerdt G, et al. Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast[J]. *Marine pollution bulletin*, 2015, 99(1-2): 216.

[16] Hinojosa I A, Thiel M. Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(3): 341-350.

[17] 纪玉蕊. 海洋微塑料污染研究进展[J]. *天津职业院校联合学报*, 2019, 21(10): 104-109.

Ji Yurui. Research progress of marine microplastic pollution[J]. *Tianjin Vocational Colleges Union Journal*, 2019, 21(10): 104-109.

[18] Andrady A L. Microplastics in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1596-1605.

[19] Kukulka T, Proskurowski G, Moretferguson S, et al. The effect of wind mixing on the vertical distribution of

- buoyant plastic debris[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(7): L07601.
- [20] 包讯. 可怕的微塑料[J]. *绿色包装*, 2020, (1): 90-91.
Bao Xun. Horrible microplastics[J]. *Green Packaging*, 2020, (1): 90-91.
- [21] Lebreton L, Slat B, Ferrari F, et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 4666.
- [22] Eriksen M, Maximenko N, Thiel M, et al. Plastic pollution in the South Pacific subtropical gyre[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 68(5): 71-76.
- [23] Bryant J A, Clemente T M, Viviani D A, et al. Diversity and activity of communities inhabiting plastic debris in the North Pacific gyre[J]. *Msystems*, 2016, 1(3): e00024-16.
- [24] Law K L, Moretferguson S, Maximenko N, et al. Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre[J]. *Science*, 2010, 329(5996): 1185-1188.
- [25] Imhof H K, Sigl R, Brauer E, et al. Spatial and temporal variation of macro-, meso- and microplastic abundance on a remote coral island of the Maldives, Indian Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 116(1): 340-347.
- [26] Maximenko N, Hafner J, Niiler P, et al. Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 65(1): 51-62.
- [27] Lebreton L, Greer S, Borrero J C, et al. Numerical modelling of floating debris in the world's oceans[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(3): 653-661.
- [28] 邵宗泽, 董纯明, 郭文斌, 等. 海洋微塑料污染与塑料降解微生物研究进展[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(4): 490-501.
Shao Zongze, Dong Chunming, Guo Wenbin, et al. Advances in research on marine microplastic pollution and plastic degrading microorganisms[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38(4): 490-501.
- [29] Zhao S, Zhu L, Wang T, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: first observations on occurrence, distribution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 86(1): 562-568.
- [30] Kukulka T, Proskurowski G, S.Morét-Ferguson, et al. The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L07601.
- [31] Yu X, Peng J, Wang J, et al. Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: the Bohai Sea[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 722-730.
- [32] Zhang W, Zhang S, Wang J, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 541-548.
- [33] Wang T, Zou X, Li B, et al. Microplastics in a wind farm area: A case study at the Rudong Offshore Wind Farm, Yellow Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 128: 466-474.
- [34] Cai M, He H, Liu M, et al. Lost but can't be neglected: Huge quantities of small microplastics hide in the South China Sea[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 633: 1206-1216.
- [35] Zhao S, Zhu L, Li D, et al. Microplastic in three urban estuaries, China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 597-604.
- [36] Peng L, Fu D, Qi H, et al. Micro- and nano-plastics in marine environment: Source, distribution and threats — A review[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 698: 134254.
- [37] Chubarenko I P, Bagaev A, Zobkov M, et al. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 108(1): 105-112.
- [38] Mato Y, Isobe T, Takada H, et al. Plastic Resin Pellets as a Transport Medium for Toxic Chemicals in the Marine Environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(2): 318-324.
- [39] Mao Y, Ai H, Chen Y, et al. Phytoplankton response to polystyrene microplastics: Perspective from an entire growth period[J]. *Chemosphere*, 2018, 208: 59-68.
- [40] 姜雅斐, 张继红. 微塑料对海洋生物的影响研究进展[J]. *科技经济导刊*, 2020, 28(7): 78.
Jiang Yafei, Zhang Jihong. Research progress of the impact of microplastics on marine life[J]. *Science and Technology and Economics Guide*, 2020, 28(7): 78.
- [41] 韩佳. 我国微塑料污染问题亟待解决[J]. *科学技术创新*, 2018, (23): 186-187.
Han Jia. The problem of microplastic pollution in my country needs to be solved urgently[J]. *Science and Technology Innovation*, 2018, (23): 186-187.
- [42] Zhao J, Ran W, Teng J, et al. Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 640-641: 637-645.
- [43] Goldberg E D. Diamonds and plastics are forever[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, 28(8): 466.
- [44] Vedolin M C, Teophilo C Y, Turra A, et al. Spatial variability in the concentrations of metals in beached microplastics[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 129(2): 487-493.
- [45] 赵淑江, 王海雁, 刘健. 微塑料污染对海洋环境的影响[J]. *海洋科学*, 2009, 33(3): 84-86.
Zhao Shujiang, Wang Haiyan, Liu Jian. The impact of microplastic pollution on the marine environment[J]. *Marine Sciences*, 2009, 33(3): 84-86.

- [46] Rodriguezseijo A, Lourenco J, Rochasantos T A, et al. Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché[J]. Environmental Pollution, 2017, 220: 495-503.
- [47] Wright S L, Thompson R C, Galloway T S, et al. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review[J]. Environmental Pollution, 2013, 178: 483-492.
- [48] Qiao R, Sheng C, Lu Y, et al. Microplastics induce intestinal inflammation, oxidative stress, and disorders of metabolome and microbiome in zebrafish[J]. Science of The Total Environment, 2019, 662: 246-253.
- [49] Gu H, Wang S, Wang X, et al. Nanoplastics impair the intestinal health of the juvenile large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 397: 122773.
- [50] Brate I L, Blazquez M, Brooks S J, et al. Weathering impacts the uptake of polyethylene microparticles from toothpaste in Mediterranean mussels (*M. galloprovincialis*)[J]. Science of The Total Environment, 2018, 626: 1310-1318.
- [51] Chae Y, Kim D, Choi M, et al. Impact of nano-sized plastic on the nutritional value and gut microbiota of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* via dietary exposure[J]. Environment International, 2019, 130: 104848.
- [52] Liu Z, Yu P, Cai M, et al. Effects of microplastics on the innate immunity and intestinal microflora of juvenile *Eriocheir sinensis*[J]. Science of The Total Environment, 2019, 685: 836-846.
- [53] Zhao Y, Bao Z, Wan Z, et al. Polystyrene microplastic exposure disturbs hepatic glycolipid metabolism at the physiological, biochemical, and transcriptomic levels in adult zebrafish[J]. Science of The Total Environment, 2020, 710: 136279.
- [54] 万志琴. 聚苯乙烯微塑料对斑马鱼菌群和代谢的影响[D]. 浙江杭州: 浙江工业大学, 2019.
Wan Zhiqin. Effect of polystyrene microplastics on zebrafish flora and metabolism[D]. Hangzhou, Zhejiang Province: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [55] Chen Q, Lv W, Jiao Y, et al. Effects of exposure to waterborne polystyrene microspheres on lipid metabolism in the hepatopancreas of juvenile redclaw crayfish, *Cherax quadricarinatus*[J]. Aquatic Toxicology, 2020, 224: 105497.
- [56] 胡玲玲. 小水体微塑料的污染特征及其对水生生物的毒性效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
Hu Lingling. Pollution characteristics of microplastics in small water bodies and their toxic effects on aquatic organisms[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [57] Green D S. Effects of microplastics on European flat oysters, *Ostrea edulis* and their associated benthic communities[J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 95-103.
- [58] Rist S, Assidqi K, Zamani N P, et al. Suspended micro-sized PVC particles impair the performance and decrease survival in the Asian green mussel *Perna viridis*[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 111(1): 213-220.
- [59] Watts A J, Urbina M A, Goodhead R M, et al. Effect of microplastic on the gills of the shore crab *Carcinus maenas*[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(10): 5364-5369.
- [60] Lonnstedt O M, Eklov P. Environmentally relevant concentrations of microplastic particles influence larval fish ecology[J]. Science, 2016, 352(6290): 1213-1216.
- [61] Sussarellu R, Suquet M, Thomas Y, et al. Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(9): 2430-2435.
- [62] Au S Y, Bruce T F, Bridges W C, et al. Responses of *Hyalella azteca* to acute and chronic microplastic exposures[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2015, 34(11): 2564-2572.
- [63] Horn D A, Granek E F, Steele C, et al. Effects of environmentally relevant concentrations of microplastic fibers on Pacific mole crab (*Emerita analoga*) mortality and reproduction[J]. Limnology and Oceanography, 2020, 5(1): 74-83.
- [64] Nobre C R, Santana M F, Maluf A, et al. Assessment of microplastic toxicity to embryonic development of the sea urchin *Lytechinus variegatus* (Echinodermata: Echinoidea)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 92(1): 99-104.
- [65] Torre C D, 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.
- [66] Huang J, Koongolla J B, Li H, et al. Microplastic accumulation in fish from Zhanjiang mangrove wetland, South China[J]. Science of The Total Environment, 2020, 708: 134839.
- [67] Ory N C, Gallardo C, Lenz M, et al. Capture, swallowing, and egestion of microplastics by a planktivorous juvenile fish[J]. Environmental Pollution, 2018, 240: 566-573.
- [68] Mattsson K, Ekvall M T, Hansson L, et al. Altered behavior, physiology, and metabolism in fish exposed to polystyrene nanoparticles[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(1): 553-561.
- [69] 许彩娜, 张悦, 袁骥, 等. 微塑料对海洋生物的影响

- 研究进展[J]. 海洋渔业, 2019, 41(5): 631-640.
- Xu Caina, Zhang Yue, Yuan Qi, et al. Research progress of the impact of microplastics on marine life[J]. Marine Fisheries, 2019, 41(5): 631-640.
- [70] Wegner A, Besseling E, Foekema E M, et al. Effects of nanoplastics on the feeding behavior of the blue mussel (*Mytilus edulis* L.)[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2012, 31(11): 2490-2497.
- [71] Nan B, Su L, Kellar C, et al. Identification of microplastics in surface water and Australian freshwater shrimp *Paratya australiensis* in Victoria, Australia[J]. Environmental Pollution, 2020, 259: 113865.
- [72] Wang X, Liu L, Zheng H, et al. Polystyrene microplastics impaired the feeding and swimming behavior of mysid shrimp *Neomysis japonica*[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 150: 110660.
- [73] Messinetti S, Mercurio S, Parolini M, et al. Effects of polystyrene microplastics on early stages of two marine invertebrates with different feeding strategies[J]. Environmental Pollution, 2017, 237: 1080-1087.
- [74] Kaposi K L, Mos B, Kelaher B P, et al. Ingestion of microplastic has limited impact on a marine larva[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(3): 1638-1645.
- [75] Mohsen M, Wang Q, Zhang L, et al. Microplastic ingestion by the farmed sea cucumber *Apostichopus japonicus* in China[J]. Environmental Pollution, 2019, 245: 1071-1078.
- [76] Chen Q, Gundlach M, Yang S, 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.
- [77] Bringer A, Jérôme Cachot, Grégoire Prunier, et al. Experimental ingestion of fluorescent microplastics by pacific oysters, *Crassostrea gigas*, and their effects on the behaviour and development at early stages[J]. Chemosphere, 2020, 254: 126793.
- [78] Gambardella C, Morgana S, Ferrando S, et al. Effects of polystyrene microbeads in marine planktonic crustaceans[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 145: 250-257.
- [79] Mohsen M, Zhang L, Sun L, et al. Microplastic fibers transfer from the water to the internal fluid of the sea cucumber *Apostichopus japonicus*[J]. Environmental Pollution, 2020, 257: 113606.
- [80] 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.
- [81] Paulpont I, Lacroix C, Fernandez C G, et al. Exposure of marine mussels *Mytilus spp.* to polystyrene microplastics: Toxicity and influence on fluoranthene bioaccumulation[J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 724-737.
- [82] Yu P, Liu Z, Wu D, et al. Accumulation of polystyrene microplastics in juvenile *Eriocheir sinensis* and oxidative stress effects in the liver[J]. Aquatic Toxicology, 2018, 200: 28-36.
- [83] Oliveira M, Ribeiro A, Hylland K, et al. Single and combined effects of microplastics and pyrene on juveniles (0+ group) of the common goby *Pomatoschistus microps* (Teleostei, Gobiidae)[J]. Ecological Indicators, 2013, 34(34): 641-647.
- [84] Lu Y, Zhang Y, Deng Y, 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.
- [85] Eom H J, Nam S E, Rhee J S. Polystyrene microplastics induce mortality through acute cell stress and inhibition of cholinergic activity in a brine shrimp[J]. Molecular and Cellular Toxicology, 2020, 16: 233-243.
- [86] Casado M P, Macken A, Byrne H J. Ecotoxicological assessment of silica and polystyrene nanoparticles assessed by a multitrophic test battery[J]. Environment International, 2013, 51: 97-105.
- [87] 苑文珂. 聚苯乙烯微/纳米塑料对重金属的吸附行为及其对两种典型水生生物的生态毒性研究[D]. 湖北武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2020.
- Yuan Wenke. Study on the adsorption behavior of polystyrene micro/nanoplastics on heavy metals and its ecotoxicity to two typical aquatic organisms[D]. Wuhan, Hubei Province: University of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [88] Sjollem S B, Redondo-Hasselerharm P, Leslie H A, et al. Do plastic particles affect microalgal photosynthesis and growth?[J]. Aquatic Toxicology, 2016, 170: 259-261.
- [89] Besseling E, Wang B, Luerling M, et al. Nanoplastic affects growth of *S. obliquus* and reproduction of *D. magna*[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(20): 12336-12343.
- [90] Prata J C, Lavorante B R B O, B S M Montenegro M, et al. Influence of microplastics on the toxicity of the pharmaceuticals procainamide and doxycycline on the marine microalgae *Tetraselmis chuii*[J]. Aquatic Toxicology, 2018, 197: 143-152.
- [91] Bhattacharya P, Lin S, Turner J P, et al. Physical adsorption of charged plastic nanoparticles affects algal photosynthesis[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2010, 114(39): 16556-16561.

Research progress on the biological effects of marine microplastic pollution

LIU Xiang^{1, 2, 3, 4, 5}, RU Xiao-shang^{1, 2, 3, 4}, ZHANG Li-bin^{1, 2, 3, 4}

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 4. Laboratory of Marine Ranche Engineering, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 5. School of Environment and Safety Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Received: Jul. 7, 2020

Key words: microplastics; marine environment; bioaccumulation; toxic effects

Abstract: Microplastics is a general term for all types of plastic fragments with particle size less than 5 mm. In the field of environment, microplastic pollution has become a trending topic. In recent years, microplastic pollution in the marine environment has become increasingly serious, and the biological and environmental problems caused by it have attracted much attention. This paper reviews the research progress on biological effects of marine microplastic pollution. The definition, source, classification, and distribution characteristics of microplastics have been introduced. The effects of microplastics on marine water quality and sedimentary environment have been analyzed. Furthermore, the toxic effects of microplastics on marine organisms have been summarized. Based on the research progress, the future research directions have been proposed. Our findings provide a reference for studying the impact of marine microplastics on environment and biology.

(本文编辑: 赵卫红)