

微塑料对海洋生物生态毒理学效应研究进展

薄军, 陈梦云, 方超, 郑榕辉, 王素敏, 洪幅坤, 张玉生

(国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要:海洋环境中的微塑料主要来源于陆源塑料垃圾输入、海上船只塑料垃圾的丢弃和水产养殖业漂浮装置的废弃等。微塑料的大小、形状和颜色与海洋生物的食物相似, 容易被海洋生物误食, 由于微塑料自身的毒性及其表面吸附的有毒化学物, 对海洋生物及其生态系统具有直接和潜在的危害。本研究主要综述了微塑料对海洋生物产生影响的途径、毒性效应及其效应机制的研究进展状况; 提出未来应重点加强微塑料环境浓度的长期效应、微塑料与其他污染物的联合效应及其机制、微塑料效应的生物标志物筛选以及生态风险评估技术的研究等。

关键词:海洋生物学; 微塑料; 海洋生物; 毒性效应; 效应机制

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2018. 04. 016

中图分类号: P735

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972(2018)04-0594-07

1 微塑料概况

微塑料通常是指直径小于 5 mm 的碎片、纤维、薄膜和颗粒^[1-5]。按来源可分为在微尺寸范围内生产的初级微塑料(如洗面奶和牙膏中的塑料颗粒)和大块塑料垃圾在物理、化学和生物等作用下分解形成的次级微塑料^[6]。海洋环境中的微塑料主要是通过陆源塑料垃圾输入、海上船只塑料垃圾的丢弃、水产养殖业漂浮装置的废弃等途径进入海洋环境^[7]。微塑料的主要种类有高/低密度聚乙烯、聚乙烯对苯二甲酸酯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚氯乙烯和源于渔业生产的尼龙纤维等^[8]。

尽管人类社会使用塑料制品已有近 80 a 的历史, 然而由于微塑料粒径太小, 人们一直没有意识到其对生物和生态系统可能产生直接或潜在的危害。国际上针对微塑料的研究始于 20 世纪 70 年代, 但真正引起重视是在 2000 年之后。Thompson 等(2004)首次提出 microplastic(微塑料)这一英文术语^[9]。近年来关于微塑料作为海洋污染物相关的研究报道逐年增长, 特别是 2014 年以来, 研究人员分别在 Science 和 Nature 等期刊上发表了一系列关于

海洋塑料/微塑料在世界范围内污染状况及其潜在的生态危害研究。因此, 微塑料对海洋生物的效应及其生态系统的影响越来越受到国内外的广泛关注^[10-16]。

2 微塑料对海洋生物影响途径

微塑料进入海洋环境后, 首先, 因其大小、形状和颜色与海洋生物的食物相似, 容易引起海洋动物误食; 其次, 塑料本身含有的有毒物质能够随着塑料降解而释放出来, 并且微塑料的性质及其比表面积大, 能够吸附更多的海水中有毒化学物质; 此外, 微塑料可以作为有毒化学物质和微生物的载体, 海洋动物误食后, 这些有毒物质和有害微生物进而对生物产生有害效应。

2.1 微塑料被海洋动物的误食

由于微塑料大小、形状和颜色与普通海洋动物的食物相似^[17], 海洋动物在摄食过程中将微塑料一同摄入体内, 可能会对生物体产生机械损伤, 堵塞食物通道, 或者引起假的饱食感, 进而减少对其它营养物质的摄入, 导致摄食效率降低、能量缺乏、功能受损甚至死亡^[1]。研究表明, 浮游动物、底栖无脊椎动

收稿日期: 2018-02-09

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费资助项目(海三科 2016013); 福建省自然科学基金资助项目(2016Y0062, 2016J01191); 厦门市海洋垃圾监测、评估与防治技术业务化研究资助项目(2016-ZS159); 国家海洋局双边海洋国际事务合作资助项目

作者简介: 薄军(1978—), 男, 博士, 副研究员; E-mail: bojun@tio.org.cn

通讯作者: 张玉生(1956—), 男, 研究员; E-mail: zhangyusheng@tio.org.cn

物、双壳类、鱼类和大型海洋哺乳动物等不同种类的生物均能够摄食微塑料. Carpenter 等(1972)在发表的关于鱼类摄取海洋废弃物的报告中,就已经记录了塑料粒子在幼鱼和成鱼体内的存在^[18]. Boerger 等(2010)对捕自北太平洋环流食浮游生物的中层鱼类进行解剖发现,微塑料占鱼类胃含物的35%^[19]. 此外,低营养级生物中许多类群不能有效区分塑料颗粒和食物颗粒的差异,而且低密度的塑料容易漂浮聚集在海洋的表层,因此浮游生物更容易受到微塑料的影响. 法国卡尔维海湾海水中微塑料含量与浮游动物体内含量的比例达到2.73,高浓度的微塑料广泛分布在海洋表层,引起了上层捕食者对微塑料的误食^[20]. 室内实验同样发现了海洋动物摄食微塑料的现象. 将糠虾(*Neomysis integer*)、桡足类(*Acartia* spp.、*Limnocalanus macrurus*、*Eurytemora affinis*)、枝角类(*Bosmina coregoni*、*Evadne nordmannii*)、轮虫(*Synchaeta* spp.)、多毛类幼体(*Marenzelleria* spp.)和纤毛虫(*Tintinnopsis lobiancoi*)暴露于含有直径为10 μm的不同浓度聚苯乙烯微塑料颗粒(1 000、2 000、10 000 个/cm³)水体中,所有受试生物都表现出对微塑料的摄食行为^[21]. 比较实验的结果表明,4种海参(*Thyonella gemmata*、*Holothuria floridana*、*Holothuria grisea*、*Cucumaria frondosa*)暴露于微塑料与沉积物的混合物中20~25 h后,其摄入体内的微塑料与沉积物的占比比其暴露环境中的微塑料与沉积物的占比更高,说明微塑料也能够被不同种类海参误当作食物摄入体内^[22]. Besseling 等(2013)的研究也证明了这一点,暴露在水体中聚苯乙烯微塑料含量(0.000%、0.074%、0.220%、0.740%、2.200%和7.400%)越高,海蚯蚓(*Arenicola marina*)对微塑料颗粒误食也越多^[23]. 然而,微塑料对有些种类生物摄食与积累的影响并不明显. 滤食性生物如海胆(*Tripneustes gratilla*)幼虫^[24]、太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)幼虫^[25-26]和欧洲扁平牡蛎(*Ostrea edulis*)^[27],以及腐屑食性生物如等足类动物^[28]和端足目动物^[29]摄食微塑料后,能够在数小时内迅速从肠胃中排出.

2.2 塑料降解过程释放的有毒物质

尽管塑料被认为是惰性的,但是由于其较大的比表面积,亚微米添加剂越来越多地应用于商业热塑性中^[30]. 大多数添加剂如塑化剂、表面活性剂、颜料、分散剂、润滑剂、抗静电剂、纳米粒子、纳米纤维、惰性填料、甚至香料分子量都很小,并且不是化学性质的聚合物. 因此,塑料在降解过程中,添加剂很容易从塑料中浸出. 从海洋环境中收集到的塑料颗粒

物中已经检测到塑化剂的存在^[31-32]. 除添加剂外,塑料生产中还使用其他化学品,如辅助物质聚合催化剂和引发剂等,可能在塑料降解过程中释放到环境中^[33]. 同时,添加剂可以与聚合物混合或化学结合,显著地改变它们的浸出能力和塑料颗粒的潜在毒性^[34]. 这些化合物能够渗透动物的细胞膜,参与生化反应和诱导毒性效应^[35];但是由于植物细胞壁的存在,这些效应在植物细胞中不太明显^[36].

2.3 微塑料作为有毒化学物和有害微生物的载体

微塑料对海洋生物的效应,除了塑料本身有害作用之外,还涉及吸附在其表面的化学污染物对生物体的危害. 由于微塑料具有大的比表面积和疏水特性,使其在海洋环境中能够富集较高浓度的持久性有机污染物和重金属等,如多氯联苯^[37]、滴滴涕^[38]、多环芳烃^[39-40]和重金属^[41-42]等. 这些有毒有害物质可以随着微塑料被摄食而进入生物体内. Browne 等(2013)用预先吸附了污染物(壬基酚和菲)和添加剂(三氯生和多溴二苯醚)的聚氯乙烯微塑料与沙子混合(微塑料占比为5%)后,将蠕虫(*Arenicola marina*)暴露于混合物中,结果发现,随着微塑料被蠕虫摄食进入蠕虫肠道后,污染物和添加剂在蠕虫肠道体壁累积^[43]. Avio 等(2015)将紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)暴露于吸附芘的微塑料水体中,微塑料被摄食后,转移到血淋巴、鳃和消化道中,并在这些组织中观察到芘显著积累的现象,表明微塑料可以吸附并将污染物转移到生物体内^[44].

细菌可以在物质表面上形成生物膜,获得营养物质,从而不断地增殖和扩散. 弧菌是形成塑料生物膜的常见海洋细菌^[45],也是许多种类海洋生物的致病菌. 通过分析来源于海洋表层风化微塑料碎片表面的生物群落结构,发现了异养生物、自养生物、捕食者和共生菌的存在^[46]. 因此,微塑料可以作为弧菌等有害微生物的载体,进而对生态系统带来潜在威胁.

3 微塑料对海洋生物的毒性效应及其机制

微塑料被海洋动物误食后,微塑料自身的毒性和其表面吸附的有毒化学污染物会对生物体产生一定的有害效应. 目前,表征微塑料毒性效应的指标主要包括摄食率、死亡率、生长情况、繁殖力、细胞及分子水平效应等^[47].

3.1 微塑料对海洋生物毒性效应

生物体长时间接触微塑料,降低了其摄食能力,导致能量不足,降低了生长作用和繁殖力等^[48]. 微塑料在肠道通道滞留的时间越长,就会对生物体产

生越多的不利影响。性成熟的太平洋牡蛎在整个生殖周期连续 8 周暴露于直径为 2 μm 和 6 μm 的聚苯乙烯微球(质量浓度为 0.023 mg/dm^3),导致了其精子活力下降、卵子数量减少和卵子粒径变小;受精后,牡蛎幼虫停止微塑料暴露,但其从母体携带的微塑料降低了存活率,生长受阻,后代幼体数量比对照组减少了 41%^[26]。此外,日本虎斑猛水蚤(*Tigriopus japonicus*)^[49]、海岛哲水蚤(*Calanus helgolandicus*)^[50]、朝鲜臂尾轮虫(*Brachionus koreanus*)^[51]、海洋桡足动物(*Paracyclops nana*)^[52] 经 0.05、0.50、6.00 μm 3 种直径的聚苯乙烯微塑料(质量浓度为 0.1、1.0、10.0、20.0 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$) 暴露 12 d 后,繁殖力、卵子大小、孵化成功率和后代存活率也均下降。当鰕虎鱼(*Pomatoschistus microps*) 幼鱼同时接触到与饵料卤虫大小、数量均相近的聚乙烯微球时,捕食卤虫的数量下降了 65%,摄食率降低了 50%^[5]。研究表明,40 nm NH_2 和 50 nm COOH 涂层的聚苯乙烯纳米颗粒(质量浓度为 5 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$) 损害了卤虫(*Artemia franciscana*) 幼体的摄食和运动能力,并引发卤虫多次蜕皮^[53]。自然环境中,微塑料的含量从几十到几千个/ m^3 (或者 mg/m^3),如东北大西洋的平均塑料丰度为 2.46 个/ m^3 ^[54],北太平洋副热带环流区的塑料颗粒含量为 3 276 个/ m^3 和 250 mg/m^3 ^[55]。而实验室中常采用远高于环境浓度的微塑料开展毒性试验,微塑料甚至可以导致生物的死亡。翡翠贻贝(*Perna viridis*) 暴露于质量浓度为 2 160 mg/dm^3 聚氯乙烯(直径为 1 ~ 50 μm) 中 91 d,其死亡率为 100%^[56];大型蚤(*Daphnia magna*) 暴露于含量为 10^5 个/ cm^3 聚乙烯(直径为 1 ~ 5 μm) 中 14 d,其死亡率达到 50%^[57]。然而,至今关于微塑料对生物 LC_{50} 值研究报道甚少。

此外,微塑料被摄食后,能够在生物体不同组织和器官中富集和转移,进而对生物产生有害作用。贻贝(*Mytilus edulis*) 摄取直径分别为 3、10 μm 的聚苯乙烯微球,进入肠道后可以转移到血淋巴中;而且发现直径较小的粒子比较大的粒子更容易转移^[58]。微塑料颗粒(直径小于 80 μm) 能够进入贻贝消化系统的上皮细胞中,暴露 3 h 后引起强烈的炎症反应^[2]。Kashiwada (2006) 报告了日本青鳉(*Oryzias latipes*) 暴露于 10 mg/dm^3 聚苯乙烯微塑料(直径为 39.4 nm) 7 d 后,体内聚苯乙烯微塑料颗粒的积累主要在鳃丝和肠道,且在精巢、肝脏和血液中也发现有少量存在;令人关注的是,在日本青鳉的大脑中也发现了这些粒子,提示纳米粒子能够通过血脑屏障,进而可能对生物体产生不利影响^[59]。

微塑料浸出物和表面吸附的化学物质对生物同样具有有害作用。Nobre 等(2015)将绿海胆(*Lytechinus variegatus*) 胚胎暴露于塑料颗粒,并模拟了 2 种添加剂脱附微塑料的方式,利用微塑料颗粒分析了添加剂浸出液的潜在毒性。结果表明,两种方式浸出的添加剂都表现出胚胎发育异常的毒性效应,异常率分别增加了 58.1% 和 66.5%^[60]。此外,塑料的沥出物甚至能够造成海洋桡足类动物死亡^[61]。

3.2 微塑料对海洋生物毒性效应机制

目前关于微塑料毒性效应机制方面的研究报道较少,已报道的主要集中在以下 3 方面。

3.2.1 诱导氧化应激损伤机制 不同表面涂层的聚苯乙烯微球(直径为 8 μm) 的急性暴露普通滨蟹(*Carcinus maenas*),对其鳃裂功能具有显著但短暂的影响:暴露 1 h,对氧气消耗量与吸入鳃腔内的聚苯乙烯微球表现出显著性的剂量效应关系;暴露 16 h 后,恢复到正常水平;暴露 24 h 后,血淋巴细胞浓度显著下降,而钙离子浓度升高^[62]。Paul-Pont (2016) 将贻贝暴露于直径为 2 ~ 6 μm 的聚苯乙烯微球水体中(质量浓度为 2 000 个/ dm^3) 7 d,亚细胞氧化应激通路被激活^[63]。Jeong 等(2016、2017) 分析了朝鲜臂尾轮虫和矮小拟镖剑水蚤(*Paracyclops nana*) 分别在 0.05、0.50、6.00 μm 聚苯乙烯荧光微球暴露下几种与抗氧化相关的酶活性和丝裂原活化蛋白激酶的磷酸化状况,首次提出了微塑料的有害结局路径:微塑料在细胞中的毒性主要通过产生活性氧引起的氧化应激反应,导致细胞损伤,进而降低生长率和繁殖力;与直径为 0.50、0.60 μm 微塑料球相比,更小直径的 0.05 μm 微塑料球能够渗透细胞膜,可以导致更强的氧化应激反应^[51-52]。

3.2.2 免疫毒性效应机制 许多种类环境污染物可以通过损害生物免疫系统功能,引起生物免疫力下降,最终导致生物个体的死亡。已有研究发现,将海洋动物暴露于微塑料水体中,其肝脏组织病理损伤水平增加^[64-65]。Greven 等(2016) 通过体外实验也发现呆鲱鱼(*Pimephales promelas*) 中性粒细胞经聚苯乙烯微塑料(直径为 41.0 nm,质量浓度为 100.0 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$) 和聚碳酸酯微塑料(直径为 158.7 nm,质量浓度为 0.1 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$) 分别暴露 2 h 后,通过测定中性粒细胞功能,发现微塑料暴露后引发初级颗粒的去颗粒作用、刺激氧化爆发的活性和增加中性粒细胞胞外陷阱的释放,其先天性免疫功能受到显著性抑制,进而可能影响鱼群对疾病的抵抗能力^[66]。

3.2.3 干扰内分泌作用机制 塑料生产过程中许多添加剂是内分泌干扰物,可能严重影响生物体的

正常功能。比如,邻苯二甲酸酯和双酚 A 等塑化剂能够影响动物的发育和繁殖过程,诱发遗传畸变^[67]。此外,现场实验结果也显示,鱼类摄食富集了海水中有有机污染物的微塑料,干扰了鱼类内分泌标志物基因的表达:雄性个体的卵壳前体蛋白重链(Cechoriogenin H, Chg H)基因显著下调;雌性个体的卵黄蛋白原 I 基因、Chg H 基因和雌激素受体 α 基因表达也都显著下调^[64]。Karami 等(2016)将革胡子鲶(*Clarias gariepinus*)幼鱼暴露于低密度聚乙烯(50、500 mg/dm³)和菲(10、100 mg/dm³)混合物的水体 96h,也发现鱼类体内分泌水平受到干扰:革胡子鲶大脑中叉头盒 L2(Forkhead box L2)和色氨酸羟化酶 2 两种基因的转录水平显著降低。叉头盒 L2 是调节合成雌激素的关键酶——芳香化酶基因转录的转录因子。色氨酸羟化酶是色氨酸转化为 5-羟色胺过程中一种重要催化酶。5-羟色胺主要调节促性腺激素释放激素的转录水平。色氨酸羟化酶 2 的转录水平降低导致促性腺激素释放激素转录水平降低。因此,叉头盒 L2 和色氨酸羟化酶 2 转录水平降低可能进一步导致生物体激素失衡,从而影响繁殖过程^[65]。

4 总结和展望

微塑料由于颗粒小、分布广、比表面积大、能吸附更多污染物,降解过程释放的有毒物质,以及作为有毒化学物质和有害微生物的载体,对海洋生物及其生态系统造成直接或潜在的危害作用,目前已经成为国际社会共同关注的新兴海洋环境污染物之一。微塑料被海洋生物误食后,其自身携带的添加剂及表面吸附的有毒化学物也随之进入海洋生物体内,进而通过诱导氧化应激反应、损害生物免疫系统功能和干扰内分泌正常机制等对海洋生物产生毒性效应,影响海洋生物生长和繁殖。目前国内外对微塑料的研究主要集中于微塑料在海洋环境不同介质中的分布特征和对生物摄食的影响。然而,关于海洋微塑料的生物学效应,特别是对海洋生物的低剂量长

期效应、单独和联合效应的毒理学机制、指示毒理学效应的生物标志物筛选和生态风险评估技术等诸多方面仍然需要进一步研究。因此,未来应该加强如下几个方面的微塑料海洋生态毒理学研究:

(1) 微塑料对生物的低剂量长期效应研究。目前关于微塑料生物学效应研究采用的浓度大多远高于环境中实际浓度,并且暴露时间比较短,实验结果可能会“夸大”微塑料生物效应的认识,因此利用环境浓度的微塑料开展长、短期,尤其是长期慢性暴露,对于客观而且更加全面地认识微塑料生物学效应具有重要意义。

(2) 微塑料单独和联合效应及其效应机制研究。微塑料等污染物进入生物体内,它本身及其添加剂中有害物质以及从环境中吸附的有毒化学物质和携带的有害微生物等,可能对生物及其生态系统带来直接或者间接有害影响。微塑料本身的单独效应以及微塑料与其他相关种类污染物的联合效应对海洋生物直接和潜在的毒性效应及其效应机制,目前也尚缺乏系统的解析。未来应加强从基因、细胞、组织、个体和种群等不同水平开展系统性研究,从而揭示微塑料单独和联合的毒性效应的规律和机制。

(3) 微塑料效应的生物标志物筛选研究。生物标志物不仅可以监测污染物早期生物效应状况,而且还能警示生物个体、种群和生态系统的健康水平。然而,指示微塑料生物效应的特异性标志物尚处于初步阶段。因此,筛选指示海洋微塑料污染效应特异的生物标志物,对于监测和预警生物种群和生态系统的健康状况,评价海产品质量安全具有重要的应用价值。

(4) 微塑料的生态风险评估研究。目前微塑料对海洋生态系统风险评估尚未形成成熟的技术体系,主要是缺乏有效模型和分级标准,因此需要加强相关模型和标准的研究,并构建微塑料对海洋生态系统风险评估的技术体系,为评估微塑料生态风险提供技术支撑。

参考文献:

- [1] ANDRADY A L. Microplastics in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8):1 596-1 605.
- [2] VON M N, BURKHARDTHOLM P, KÖHLER A. Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(20):11 327-11 335.
- [3] MATHALON A, HILL P. Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 81(1):69-79.
- [4] 龙邹霞, 余兴光, 金翔龙, 等. 海洋微塑料污染研究进展和问题[J]. *应用海洋学学报*, 2017, 36(4):586-596.
- [5] CARLOS D S L, LUÍS L G, GUILHERMINO L. Effects of microplastics on juveniles of the common goby (*Pomatoschistus microps*): confusion with prey, reduction of the predatory performance and efficiency, and possible influence of developmental con-

- ditions[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 196:359-362.
- [6] DUIS K, COORS A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2016, 28(1):2.
- [7] 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.
- [8] WAGNER M, SCHERER C, ALVAREZ-MUÑOZ D, et al. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2014, 26(1):12.
- [9] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, 304 (5 672):838.
- [10] LAW K L, THOMPSON R C. Oceans. Microplastics in the seas[J]. *Science*, 2014, 345(6 193):144-145.
- [11] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347 (6 223):768-771.
- [12] ROCHMAN C M, BROWNE M A, UNDERWOOD A J, et al. The ecological impacts of marine debris: unraveling the demonstrated evidence from what is perceived[J]. *Ecology*, 2016, 97(2):302-312.
- [13] GALLOWAY T S, LEWIS C N. Marine microplastics spell big problems for future generations[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(9):2 331-2 333.
- [14] COLE M. A novel method for preparing microplastic fibers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:34 519.
- [15] GALLOWAY T S, COLE M, LEWIS C. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(5):116.
- [16] HAHLADAKIS J N, VELIS C A, WEBER R, et al. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 344:179-199.
- [17] SHAW D G, DAY R H. Colour- and form-dependent loss of plastic micro-debris from the North Pacific Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, 28(1):39-43.
- [18] CARPENTER E J, ANDERSON S J, HARVEY G R, et al. Polystyrene spherules in coastal waters[J]. *Science*, 1972, 178 (4 062):749-750.
- [19] BOERGER C M, LATTIN G L, MOORE S L, et al. Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(12):2 275-2 278.
- [20] 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):293-298.
- [21] SETÄLÄ O, FLEMING-LEHTINEN V, LEHTINIEMI M. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185(4):77-83.
- [22] GRAHAM E R, THOMPSON J T. Deposit- and suspension-feeding sea cucumbers (Echinodermata) ingest plastic fragments [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2009, 368(1):22-29.
- [23] BESSELING E, WEGNER A, FOEKEMA E M, et al. Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the lugworm *Arenicola marina* (L.) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(1):593-600.
- [24] KAPOSÍ 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):1 638-1 645.
- [25] COLE M, GALLOWAY T S. Ingestion of nanoplastics and microplastics by Pacific oyster larvae[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(24):14 625-14 632.
- [26] 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):2 430-2 435.
- [27] GREEN D S. Effects of microplastics on European flat oysters, *Ostrea edulis*, and their associated benthic communities[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216:95-103.
- [28] HÄMER J, GUTOW L, KÖHLER A, et al. Fate of microplastics in the marine isopod *Idotea emarginata*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(22):13 451-12 458.
- [29] BLARER P, BURKHARDT-HOLM P. Microplastics affect assimilation efficiency in the freshwater amphipod *Gammarus fossarum*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(23):23 522-23 532.
- [30] SHERMAN L M. Sub-micron additives make strides (just don't say 'Nano')[J]. *Plastics Technology*, 2012, 58(7):26-31.
- [31] TEUTEN E L, SQUING J M, KNAPPE D R U, et al. Transport and release of chemicals from plastics to the environment

- and to wildlife [J]. *Philosophical Transactions Biological Sciences*, 2009, 364(1 526):2 027-2 045.
- [32] HIRAI H, TAKADA H, OGATA Y, et al. Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8):1 683-1 692.
- [33] COSTA J P D, SANTOS P S M, DUARTE A C, et al. (Nano) plastics in the environment; Sources, fates and effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566:15-26.
- [34] EPA. Plastics pellets in the aquatic environment[R]. Washington: Environmental Protection Agency, 1992:1-109.
- [35] HAMMER J, KRAAK M H S, PARSONS J R. Plastics in the marine environment: the dark side of a modern gift [C]// HAMMER J, KRAAK M H S, PARSONS J R. *Reviews of environmental contamination and toxicology*. New York: Springer, 2012:1-44.
- [36] FANG I J. Cellular membrane trafficking of mesoporous silica nanoparticles[D]. Ames: Iowa State University, 2012.
- [37] 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.
- [38] FRIAS J P, SOBRAL P, FERREIRA A M. Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(11):1 988-1 992.
- [39] HIRAI H, TAKADA H, OGATA Y, et al. Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8):1 683-1 692.
- [40] VAN A, ROCHMAN C M, FLORES E M, et al. Persistent organic pollutants in plastic marine debris found on beaches in San Diego, California[J]. *Chemosphere*, 2012, 86(3):258-263.
- [41] ASHTON K, HOLMES L, TURNER A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(11):2 050-2 055.
- [42] HOLMES L A, TURNER A, THOMPSON R C. Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 160:42-48.
- [43] BROWNE M A, NIVEN S J, GALLOWAY T S, et al. Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity[J]. *Current Biology*, 2013, 23(23):2 388-2 392.
- [44] AVIO C G, GORBI S, MILAN M, et al. Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 198:211-222.
- [45] DE TENDER C A, DEVRIESE L I, HAEGEMAN A, et al. Bacterial community profiling of plastic litter in the Belgian part of the North Sea[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(16):9 629-9 638.
- [46] ZETTLER E R, MINCER T J, AMARAL-ZETTLER L A. Life in the “plasticsphere”: microbial communities on plastic marine debris[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(13):7 137-7 146.
- [47] ZHOU Q, ZHANG H B, YUAN L I, et al. Progress on microplastics pollution and its ecological effects in the coastal environment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(33):3 210.
- [48] GALLOWAY T S, COLE M, LEWIS C. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(5): 116.
- [49] 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):11 278-11 283.
- [50] COLE M, LINDEQUE P, FILEMAN E, et al. The impact of polystyrene microplastics on feeding, function and fecundity in the marine copepod *Calanus helgolandicus*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2):1 130-1 137.
- [51] 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):8 849-8 857.
- [52] JEONG C B, KANG H M, LEE M C, et al. Adverse effects of microplastics and oxidative stress-induced MAPK/Nrf2 pathway-mediated defense mechanisms in the marine copepod *Paracyclopsina nana*[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:41 323.
- [53] BERGAMI E, BOCCI E, VANNUCCINI M L, et al. Nano-sized polystyrene affects feeding, behavior and physiology of brine shrimp *Artemia franciscana* larvae[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2016, 123:18-25.
- [54] LUSHER A L, BURKE A, OCONNOR I, et al. Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: validated and opportunistic sampling [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 88(1/2):325-333.
- [55] GOLDSTEIN M C, ROSENBERG M, CHENG L. Increased oceanic microplastic debris enhances oviposition in an endemic pelagic insect[J]. *Biology Letters*, 2012, 8(5):817-820.
- [56] RIST S E, ASSIDQI K, ZAMANI N P, et al. Suspended micro-sized PVC particles impair the performance and decrease sur-

- vival in the Asian green mussel *Perna viridis*[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 111(1/2):213-220.
- [57] OGONOWSKI M, SCHUR C, JARSEN A, et al. The effects of natural and anthropogenic microparticles on individual fitness in *Daphnia magna*[J]. *PLOS ONE*, 2016, 11(5):e0155063.
- [58] BROWNE M A, AWANTHA D, GALLOWAY T S, et al. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(13):5 026-5 031.
- [59] KASHIWADA S. Distribution of nanoparticles in the see-through medaka (*Oryzias latipes*) [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2006, 114(11):1 697-1 702.
- [60] NOBRE C R, SANTANA M F M, 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(1/2):99-104.
- [61] BEJGARN S, MACLEOD M, BOGDAL C, et al. Toxicity of leachate from weathering plastics: An exploratory screening study with *Nitocra spinipes*[J]. *Chemosphere*, 2015, 132:114-119.
- [62] WATTS A J R, URBINA M A, GOODHEAD R, et al. Effect of microplastic on the gills of the Shore Crab *Carcinus maenas* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(10):5 364-5 369.
- [63] PAUL-PONT I, LACROIX C, FERNÁNDEZ 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.
- [64] 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.
- [65] KARAMI A, ROMANO N, GALLOWAY T, et al. Virgin microplastics cause toxicity and modulate the impacts of phenanthrene on biomarker responses in African catfish (*Clarias gariepinus*) [J]. *Environmental Research*, 2016, 151:58-70.
- [66] 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): 3 093-3 100.
- [67] OEHLMANN J, SCHULTEOEHLMANN U, KLOAS W, et al. A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2009, 364(1 526):2 047-2 062.

Advance in the study on ecotoxicological effects of microplastics on marine organisms

BO Jun, CHEN Meng-yun, FANG Chao, ZHENG Rong-hui, WANG Su-min,
HONG Fu-kun, ZHANG Yu-sheng
(Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China)

Abstract: Microplastics in marine environment mainly terrigenous plastic debris or those from marine vessel dumping and discarded floating devices in aquaculture, etc. Microplastics are easily taken unexpectedly by marine organisms due to the food similarity of their size, shape and color. Microplastics have direct and potential effects to marine organisms and ecosystems due to the toxicities of microplastics and toxic chemicals adsorbed on their surfaces or released from microplastics. This paper reviews research progress in the effect pathways, toxic effects and mechanisms of microplastics on marine organisms. Furthermore, we propose that the following studies on microplastics in future should be focused on the long-term toxic effects under environmental concentrations, the effects and mechanisms of microplastic alone and its mixture with other pollutants, the biomarker selection and the ecological risk assessment.

Key words: marine biology; microplastics; marine organism; toxic effects; mechanism

DOI:10.3969/J. ISSN.2095-4972.2018.04.016