

海洋微塑料来源、分布及生态效应研究进展

王江涛¹, 赵 婷¹, 谭丽菊¹, 黄文秋¹, 朱晓琳¹, 赵卫红^{2,3}

(1. 中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 微塑料广泛分布于世界范围内的大洋和近海海域。作为新兴的污染物, 微塑料对海洋生态环境威胁巨大。微塑料可以直接或间接被海洋动物摄入, 导致其生长减缓或停滞、繁殖被抑制、寿命减短、进食量降低、耗氧量以及酶活性改变。微塑料与海洋浮游植物相互作用会对其生长、光合作用、氧化应激能力等产生影响。然而, 微塑料对海洋浮游植物的致毒机理尚未完全明朗, 还需更多的相关研究以探明其毒性效应机制。为保护海洋环境安全, 更好的治理微塑料污染问题, 有必要加强微塑料的相关研究, 同时采取一系列有力的政策法规来监管塑料及微塑料的使用。

关键词: 微塑料; 污染; 生态效应; 致毒机制

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2020)07-0079-07

DOI: 10.11759/hyxx20200310003

塑料因其轻质、耐用、惰性、耐腐蚀等优异的性能成为社会必不可少的材料之一, 在商业、工业、医药行业得到普遍应用^[1]。据报道, 全球塑料产出和消耗每年超过 3 亿吨^[2-3]。虽然塑料的社会效益是深远的, 但由于塑料制品的无节制使用和管理政策及措施的不到位致使塑料废弃物经由各种方式进入海洋^[4], 占有海洋垃圾的 80%~85%^[5], 并在海洋环境中不断积累。海洋中的塑料废弃物并不会凭空消失, 而是在一系列物理、化学作用如阳光辐射、生物侵蚀、低温风化、潮汐和海浪冲刷等条件下, 碎化成细小的塑料碎片, 当碎片尺寸小于 5 mm 时, 我们称之为微塑料^[6-8]。微塑料广泛分布于世界范围内的大洋和近海海域, 作为新兴的污染物, 其对海洋生态环境的威胁越来越受到人们的关注。

1 微塑料来源及分布

环境中的微塑料依照来源的差异可以分为两类——初生微塑料和次生微塑料。初生微塑料, 例如为提高洗漱用品清洁能力而加入的塑料微珠, 它们在工业生产过程中便被制备成直径为微米级的塑料颗粒^[9], 城市生活污水和工业污水是初生微塑料的主要来源。次生微塑料是指在物理破碎或光氧化作用下, 由大塑料碎化成的塑料微粒^[10]。海洋中塑料垃圾来源复杂, 既有陆源塑料垃圾的输入, 也有来自海洋中塑料垃圾的海源输入, 如水产养殖、滨海旅

游及船舶航运丢弃的塑料废弃物^[11-12]。这些进入海洋中的塑料垃圾经过一系列的物化作用最终形成次生微塑料。

微塑料广泛分布在世界范围内的大洋和近海中^[13]。研究显示, 目前应用最为广泛的塑料为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等, 约占世界塑料产品种类的 90%^[14], 海水中的微塑料也主要由这几种塑料构成^[15]。

由于洋流作用, 大洋中的微塑料主要分布在环流区。20 世纪 70 年代, Carpenter 和他的团队初次在西北大西洋发现了大量的塑料微球(1~2 mm)^[16], 在大西洋 22°N 到 38°N 之间, 88%塑料碎片小于 10 mm, 99%的微塑料由密度小于海水的 PE 和 PP 两种塑料组成^[17]。在北大西洋(11°—44°N, 55°—71°W), 60%的塑料碎片尺寸在 2~6 mm 之间, 且数量逐年增多^[18]。在东北大西洋, 89%的微塑料粒径小

收稿日期: 2020-03-10; 修回日期: 2020-04-01

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1407802); 国家自然科学基金(41876078); 山东省基金(ZR2018MD016)

[Foundation: National Key Research and Development Project of China, No. 2019YFC1407802; National Natural Science Foundation of China, No. 41876078; Shandong Provincial Natural Science Foundation of China, No. ZR2018MD016]

作者简介: 王江涛(1967—), 男, 河北省承德市人, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋化学和生态学研究, E-mail: jtawang@ouc.edu.cn; 赵卫红, 通信作者, 研究员, 博士生导师, E-mail: whzhao@qdio.ac.cn

于 5 mm, 浓度为 2.46 个/m³[19]。20 世纪 80 年代在太平洋的表层水体同样发现了大量有色塑料碎片, 尤其是在北太平洋环流的中心地带, 发现了大量粒径小于 5 mm 的微塑料[20]。在美国加州南部海域, 风暴过后, 发现了大量微塑料[19]。甚至于在人迹罕至的极地地区, 也发现了存在于极地海滩、水体及沉积物环境中的微塑料[21-22], 冰芯中微塑料的含量为 38~234 个/m³[23]。

近岸海域尤其是工业发达、人口密集的沿海区域, 微塑料污染问题更为突出。有研究认为排放的洗衣废水中的塑料纤维是近岸沉积物中微塑料的重要贡献者[13]。生活用品、洗涤剂、化妆品或一些特殊用途的药物载体也是微塑料污染物的主要来源[24-27]。在英国、葡萄牙、美国、智利、韩国、日本、新加坡和澳大利亚沿岸的沉积物中, 均发现了微塑料, 粒径多小于 1 mm, 浓度变化较大, 为 0.21~77 000 个/m³[12]。加拿大夏洛特皇后湾受人为活动影响, 微塑料浓度达到 7 630 ± 1 410 个/m³[28]。韩国南部海域微塑料的浓度更是达到了 211 000 ± 117 000 个/m³[29], 新加坡周围海域 1 mm 水层也发现了大量 50~60 μm 的 PE, PP 和 PS 碎片[30]。

中国科学家们也开展了大量的微塑料调查工作, 调查区域包括长江口[31]、东海近岸[31]、南海海域[32]、椒江、甌江和闽江流域[33], 黄渤海海域[34], 青岛海水浴场[35], 香港沿海[16], 极地地区等[36]。结果表明, 各调查海域均有微塑料存在, 其中在人类活动干扰较大的长江口附近海域, 微塑料的浓度可达 4 137.3 ± 2 461.5 个/m³[31]。

2 微塑料的生态效应

微塑料作为一种新兴污染物已引起研究人员的重视, 较小尺寸的微塑料可被海洋生物广泛利用。微塑料对海洋生物的影响主要是基于海洋生物对其的摄取[37]并由此引发的一系列毒理作用[38]。

2.1 微塑料对海洋动物的影响

存在于海洋环境中的微塑料不仅有观感的问题[39], 微塑料悬浮于海水中或者沉积到沉积物中, 其大范围污染及特殊的理化性质会对海洋生物的生存造成威胁[40]。微塑料对海洋生物生存造成的负面影响会威胁海洋生态系统的健康与稳定[40]。海洋中的微塑料对海洋动物的影响主要体现在体内摄食[41]。摄食一方面可能导致海洋动物呼吸器官或进食器官的堵

塞, 再者, 进入体内的微塑料会对海洋动物的器官造成机械损伤, 并且让海洋动物产生假的饱腹感, 另一方面微塑料自身或吸附于其上的有毒有害物质的释放也会对海洋动物造成毒害作用[42]。

2.2 微塑料对海洋浮游植物的影响

浮游植物是海洋的主要的初级生产者, 具有生长周期短、便于观察、对有毒物质敏感等优点, 在环境生态毒理分析中有广泛的应用[43], 其种群的破坏可能严重影响整个地球生态系统。微塑料作为一类新兴的污染物, 具有与海洋浮游植物相互作用的巨大潜力。不同于海洋中动物对微塑料的摄食或吞噬行为, 海洋微藻对颗粒物几乎没有吞噬行为。过去的一些研究发现, 微塑料可能会抑制藻类的生长, 如 Casado[44]、Besseling[45]、Bergami[46]等人的研究证明此结论。然而也有关于促进生长的报道, 如 Yokota[47]、Canniff[48]等的结论。目前微塑料对微藻的毒性还存在一定分歧, 也有研究认为微塑料对微藻的生长不产生任何影响[49]。

3 微塑料对海洋生物的致毒机理研究进展

3.1 微塑料对浮游动物的致毒机理研究进展

Chan 等[50]总结了 59 篇文献中关于微塑料颗粒对海洋有机生物体的毒理研究。发现目前关于微塑料对海洋生物的生态效应研究主要集中在对海洋动物的毒性效应。微塑料容易被海洋环境中的浮游动物、底栖生物、鱼类、海洋哺乳动物等吞食而储存在消化道, 甚至直达组织和细胞内, 危害生物体生长。目前海洋食物链中不同层次的海洋动物体内均已发现微塑料的存在, 海洋环境中的微塑料被海洋动物摄入后, 所产生的毒性效应机理大致有行为效应、生殖发育效应、应激效应、基因与遗传效应和复合效应等几大类[40]。

生物个体的行为可能因微塑料的摄入而发生变化。研究发现, 微塑料环境会使桡足类生物的游泳行为受到影响[51], 也会使鲈鱼的嗅觉、活动能力和应激能力迟钝[52]。微塑料还会影响海洋生物的产卵量和繁殖能力[53], 2 μm 和 6 μm 的聚苯乙烯对牡蛎的摄食、生活史、藻消耗吸收率、生长、血细胞数量和形态功能都有明显的影响, 并且能阻碍牡蛎的生殖并影响其后代生长发育[54]。在北太平洋亚热带环流区, 微塑料含量的增加为海龟提供了更多的产卵载

体,产卵密度增加与微塑料多寡之间呈正相关关系,而卵和仔海龟的捕食可以加速不同生物群落之间的能量传递,从而影响到远洋生物群落的结构和组成^[53]。微塑料还会导致海洋动物的免疫应激、氧化应激和炎症反应。Von Moos 等^[55]对高密度聚乙烯暴露下紫贻贝 *Mytilus edulis* L. 的各项指标如摄食、溶酶体膜的稳定性、褐脂质、中性脂和组织诊断进行研究,发现在 96 h 的短期暴露下,微塑料会阻塞贝类的鳃,对消化管造成物理损伤,纳米级的微塑料还会通过贝的肠壁进入到体液中,引发机体的免疫应激及炎症反应。部分海洋动物摄入微塑料会导致基因表达发生变化,出现遗传毒性。2 μm 和 6 μm 的聚苯乙烯会使牡蛎的生殖细胞和卵母细胞的基因表达产生异常,这一异常与牡蛎的能量分配有关,能量中断导致消化腺和生殖腺的基因出现下调^[54]。海洋环境中微塑料表面的理化性质使其容易与海洋中不同类型的有机污染物和重金属结合,微塑料作为污染物与重金属的吸附载体,与其一道进入生物体内产生复合毒性效应^[40, 42]。根据海参暴露于不同类型微塑料(PVC 碎片、尼龙碎片和 PVC 微球)在短时间内(20~25 h)的摄食情况,发现吸附在微塑料表面的多氯联苯对海参的生长有副作用,并且可以通过食物链传递^[56]。

3.2 微塑料对浮游植物的致毒机理研究进展

目前,仅有的研究表明微塑料确实会通过不同的方式对浮游植物产生毒性,笔者所在实验室较为系统地研究了微塑料对海洋浮游植物的生态毒理学效应。根据近 5 年的研究,并结合国内外的相关结果,发现微塑料对微藻的致毒机理可能体现在四个方面:遮蔽效应、团聚损伤、吞噬效应和氧化损伤。

海面上微塑料的遮蔽效应主要为对太阳光的遮挡与反射作用,从而阻碍藻类对光的吸收。笔者实验室相关研究证明微塑料确实可以附着在微藻表面,影响微藻正常生长所需的光合作用和呼吸作用^[57-58]。Besseling^[45]、Mao^[59]等证明微塑料会导致叶绿素含量降低和光合活性。它们还可能吸附到藻体上并引起不良反应,如纳米级微塑料吸附到微藻(小球藻和栅藻)上,会对光合作用产生不利影响^[60]。Mato 等^[61]研究发现纳米级微塑料颗粒可以降低藻细胞叶绿素 *a* 的量。此外,微塑料可能通过影响电子给体位置、光合系统 II 的反应中心(负责能量转换)和

电子传递链来阻碍光合作用^[49]。对微塑料团聚损伤的研究表明,1~5 μm 的塑料小球对朱氏四片藻 (*Tetraselmis chuii*) 种群的生长不能产生显著影响^[62],而小于 100 nm 的微塑料在紫外光照射下还可以再次聚合形成大于 100 nm 的微塑料^[63],微塑料的聚合会造成其所附着微藻的团聚损伤^[57]。微藻对微塑料吞噬效应的研究报道很少^[64-65],但通过我们对其他纳米粒子的研究结果发现,微藻对纳米颗粒物的吞噬作用对微藻的影响程度较大^[66-67],这些研究可以为微藻是否存在对微塑料的吞噬作用提供参考。微塑料会对微藻造成氧化损伤。Mato^[61]等研究发现纳米级微塑料颗粒在降低藻细胞叶绿素 *a* 的量的同时增加了藻细胞内活性氧的产生^[61],Bhattacharya 等^[65]的实验结果表明 1.8 ~ 6.5 mg/L 的 20 nm 的聚苯乙烯颗粒被吸收进入藻细胞内产生氧化损伤,Mao 等^[59]也发现暴露于高浓度聚苯乙烯(PS)环境中的蛋白核小球藻会产生体现小球藻脂质过氧化程度的丙二醛(MDA)。笔者实验室经研究发现,不同粒径的聚苯乙烯微塑料均可对海洋甲藻(米氏凯伦藻)产生氧化损伤,且损伤程度与微塑料粒径的减小而增大^[68]。

4 存在的问题及研究展望

微塑料污染已经成为世界范围内的环境污染问题,因其较小的尺寸和低的“能见度”而使其难以被发现。微塑料产生并进入环境中的速度要远高于其移除的速度。目前,关于这一新型的环境污染物,尚存在一系列科学问题亟需解决。为此,我们有必要加强相关研究并同时采取一系列的有力措施。

毫米级、微米级的塑料微粒可分解成纳米级的塑料,已有研究发现纳米级微塑料比毫米、微米级微塑料的生态风险更大,今后的研究方向在关注微米级微塑料的基础上,更应该关注纳米级微塑料。除了微塑料自身的粒径效应,其本身所添加的塑化剂,以及在环境条件下吸附的无机和有机污染物所形成的复合毒性,也有可能致微塑料的生态毒理效应。

一系列的微塑料毒理实验都是基于实验室基础上完成的,可控的实验用塑料颗粒粒径、形状以及毒理浓度与海洋环境中真实存在的微塑料状况相差甚远,今后的研究方向应多考虑现场环境的真实情况。

塑料乃至微塑料的污染问题,防大于治。沿海国

家应加强关于塑料制品使用的政策法规及监管力度,严格规范塑料及微塑料的使用和处理措施,从源头上控制塑料废弃物向环境输入。

参考文献:

- [1] Liu Z, Yu P, Cai M, et al. Polystyrene nanoplastic exposure induces immobilization, reproduction, and stress defense in the freshwater cladoceran *Daphnia pulex*[J]. *Chemosphere*, 2019, 215: 74-81.
- [2] Browne M A, Crum P, Niven S J, et al. Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21): 9175-9179.
- [3] Plastics Europe. Plastics-the Facts 2014/2015/2016 [EB/OL]. [2016-08-28]. <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-2014.aspx>.
- [4] Rezaia S, Junbom P, Mohd Fadhil M D, et al. Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 133: 191-208.
- [5] Auta H S, Emenike C U, Fauziah S H. 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.
- [6] Moore C J. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat[J]. *Environmental Research*, 2008, 108(2): 131-139.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 邹艳琴, 李钟瑞. 个人护理品和化妆品中塑料微珠的危害与法规要求[J]. *日用化学品科学*, 2015, 38(10): 1-4.
Zou Yanqin, Li Zhongrui. Hazardous properties of microbeads and regulatory requirements in personal care and cosmetic products[J]. *Detergent & Cosmetics*, 2015, 38(10): 1-4.
- [10] Cooper D A, Corcoran P L. Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(5): 650-654.
- [11] 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 Chengjun, Jiang Fenghua, Li Jingxi, 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.
- [12] 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 Qian, Zhang Haibo, Li Yuan, et al. Progress on microplastics pollution and its ecological effects in the coastal environment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(33): 3210-3220.
- [13] Browne M A, Crump P, Niven S J, et al. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(21): 9175-9179.
- [14] Andrady A L, Neal M A. Applications and societal benefits of plastics[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2009, 364(1526): 1977-1984.
- [15] Andrady A L. Microplastics in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1596-1605.
- [16] Carpenter E J, Jr S K. Plastics on the Sargasso sea surface[J]. *Science*, 1972, 175(4027): 1240-1241.
- [17] Law K L, Morétferguson S, Maximenko N A, et al. Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre[J]. *Science*, 2010, 329(5996): 1185-1188.
- [18] Morét-Ferguson S, Law K L, Proskurowski G, et al. The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(10): 1873-1878.
- [19] Lusher A L, Burke A, O'Connor I, et al. Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: validated and opportunistic sampling[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 88(1-2): 325-333.
- [20] Moore C J, Moore S L, Leecaster M K, et al. A comparison of plastic and plankton in the North Pacific central gyre[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42(12): 1297-1300.
- [21] Waller C L, Griffiths H J, Waluda C M, et al. Microplastics in the Antarctic marine system: An emerging area of research[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 598: 220-227.
- [22] 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.
- [23] Obbard R W, Sadri S, Wong Y Q, et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice[J]. *Earths Future*, 2014, 2(6): 315-320.
- [24] Fendall L S, Sewel M A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(8): 1225-1228.
- [25] Patel M M, Goyal B R, Bhadada S V, et al. Getting into

- the brain: Approaches to enhance brain drug delivery[J]. *CNS Drugs*, 2009, 23(1): 35-58.
- [26] 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.
- [27] Auta H S, Emenike C U, Fauziah S H. 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.
- [28] Desforges J P, Galbraith M, Dangerfield N, et al. Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 79(1-2): 94-99.
- [29] Song Y K, Hong S H, Jang M, et al. Large accumulation of micro-sized synthetic polymer particles in the sea surface microlayer[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(16): 9014-9021.
- [30] Ng K L, Obbard J P. Prevalence of microplastics in Singapore's coastal marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52(7): 761-767.
- [31] 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(1-2): 562-568.
- [32] 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.
- [33] Zhao S, Zhu L, Li D. Microplastic in three urban estuaries, China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 597-604.
- [34] Zhao J, Ran W, Teng J, et al. Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 641(1): 637-645.
- [35] 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 等. 青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 141-148. Luo Yadan, Lin Qianhui, Jia Fangli, et al. Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 141-148.
- [36] Fang C, Zheng R, Zhang Y, et al. Microplastic contamination in benthic organisms from the Arctic and sub-Arctic regions[J]. *Chemosphere*, 2018, 209: 298-306.
- [37] Wright S L, Thompson R C, Galloway T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178(1): 483-492.
- [38] 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.
- [39] Law K L, Thompson R C. Microplastics in the seas[J]. *Science*, 2014, 345(6193): 144-145.
- [40] 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 Qiang, Xu Xudan, Huang Wei, et al. Research advances on the ecological effects of microplastic pollution in the marine environment[J]. *Acta Ecologica sinica*, 2017, 37(22): 7397-7409.
- [41] Gall S C, Thompson R C. The impact of debris on marine life[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 92(1-2): 170-179.
- [42] 孙晓霞. 海洋微塑料生态风险研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(6): 560-566. Sun Xiaoxia. Progress and prospect on the study of the ecological risk of microplastics in the ocean[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(6): 560-566.
- [43] Clement L, Hurel C, Marmier N. Toxicity of TiO₂ nanoparticles to cladocerans, algae, rotifers and plants - effects of size and crystalline structure[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(3): 1083-1090.
- [44] 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.
- [45] Besseling E, Wang B, Lüring M, et al. Nanoplastic affects growth of *S. obliquus* and reproduction of *D. magna*[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48: 12336-12343.
- [46] Bergami E, Pugnali S, Vannuccini M L, et al. Long-term toxicity of surface-charged polystyrene nanoplastics to marine planktonic species *Dunaliella tertiolecta* and *Artemia franciscana*[J]. *Aquatic Toxicology*, 2017, 189: 159-169.
- [47] Yokota K, Waterfield H, Hastings C, et al. Finding the missing piece of the aquatic plastic pollution puzzle: Interaction between primary producers and microplastics[J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2017, 2: 91-104.
- [48] Canniff P M, Hoang T C. Microplastic ingestion by *Daphnia magna* and its enhancement on algal growth[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 633: 500-507.
- [49] Yufeng M, Hainan A, Yi C, et al. Phytoplankton response to polystyrene microplastics: Perspective from an entire growth period[J]. *Chemosphere*, 2018, 208: 59-68.
- [50] Chae Y, An Y J. Effects of micro- and nanoplastics on aquatic ecosystems: Current research trends and perspectives[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 124(2): 624-632.
- [51] Hansen B, Hansen P J, Nielsen T G. Effects of large nongrazable particles on clearance and swimming be-

- haviour of zooplankton[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1991, 152(2): 257-269.
- [52] Lonnstedt O M, Eklov P. Environmentally relevant concentrations of microplastic particles influence larval fish ecology[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1213-1216.
- [53] 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.
- [54] 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*, 2016, 113 (9): 2430-2435.
- [55] Moos N V, Burkhardttholm 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): 11327-11335.
- [56] 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.
- [57] Zhang C, Chen X, Wang J, et al. Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between microplastic and algae[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 220(Pt B): 1282-1288.
- [58] Zhao T, Tan L J, Huang W Q, et al. The interactions between micro polyvinyl chloride (mPVC) and marine dinoflagellate *Karenia mikimotoi*: The inhibition of growth, chlorophyll and photosynthetic efficiency[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 247: 883-889.
- [59] 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.
- [60] 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(1): 656-661.
- [61] 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.
- [62] Davarpanah E, Guilhermino L. Single and combined effects of microplastics and copper on the population growth of the marine microalgae *Tetraselmis chuii*[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2015, 167: 269-275.
- [63] Gigault J, Pedrono B, Maxit B, et al. Marine plastic litter: The unanalyzed nano-fraction[J]. *Environmental Science Nano*, 2016, 3(2): 346-350.
- [64] Long M, Paulpont I, Hégaret H, et al. Interactions between polystyrene microplastics and marine phytoplankton lead to species-specific hetero-aggregation[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 228: 454-463.
- [65] 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.
- [66] Cai Z, Wang J, Tan L, et al. Toxic effects of nano-ZnO on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Attention to the accumulation of intracellular Zn[J]. *Aquatic Toxicology*, 2016, 178: 158-164.
- [67] Chen X, Zhang C, Tan L, et al. Toxicity of Co nanoparticles on three species of marine microalgae[J]. *Environmental pollution*, 2018, 236: 454-461.
- [68] Zhao T, Tan L, Zhu X, et al. Size-dependent oxidative stress effect of nano/micro-scaled polystyrene on *Karenia mikimotoi*[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 154: 111074.

Research progress in sources, distributions, and ecological effects of marine microplastics

WANG Jiang-tao¹, ZHAO Ting¹, TAN Li-ju¹, HUANG Wen-qiu¹, ZHU Xiao-lin¹, ZHAO Wei-hong^{2, 3}

(1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Mar. 10, 2020

Key words: microplastics; pollution; ecological effects; toxicity mechanisms

Abstract: Microplastics have been detected in both ocean waters including the coastal areas and are widely distributed in the oceans around the world. As new pollutants, microplastics are a grave threat to the marine ecological environment. They can be directly or indirectly ingested by marine animals, resulting in growth inhibition, feeding decrease, reduced lifespan, and survival and fecundity reduction. They also influence the growth, chlorophyll content, photosynthetic efficiency, and oxidative stress of marine phytoplankton. However, their impacts on phytoplankton are not totally clear, and thus, more relevant studies are needed to explore their toxic mechanisms. To protect the marine environment and control the pollution of microplastics, it is necessary to strengthen the relevant research on microplastics and adopt strong policy and regulatory measures to prohibit plastic discharge.

(本文编辑: 丛培秀)