

微塑料对水生生物的毒理学研究进展

姜晓业 邱晓丽

沈阳师范大学, 中国·辽宁 沈阳 110034

摘要: 微塑料因其微小的尺寸和广泛的分布, 已经成为全球环境中一个重要的污染问题。它们不仅存在于海洋环境中, 也广泛分布在淡水生态系统中, 对水生生物构成了严重的威胁。微塑料对水生生物的毒理学影响不容忽视, 它们对生物的生长、发育、繁殖等方面都有潜在的负面影响。但目前对于微塑料的毒理学研究尚处于起步阶段。基于国内外已有研究, 论文综述了微塑料对藻类、鱼类和其他水生动物的毒理学影响, 同时也对未来微塑料的相关毒理学研究提出了一些设想与建议。

关键词: 藻类; 水生动物; 毒理学; 微塑料

Progress in the Toxicology of Microplastics on Aquatic Organisms

Xiaoye Jiang Xiaoli Qiu

Shenyang Normal University, Shenyang, Liaoning, 110034, China

Abstract: Due to their minuscule size and extensive distribution, microplastics have emerged as a critical environmental pollution issue on a global scale. They are not only prevalent in marine ecosystems but also extensively dispersed in freshwater systems, thereby posing a significant threat to aquatic organisms. The toxicological impacts of microplastics on these organisms warrant serious attention, as they potentially impair growth, development, and reproductive capabilities. However, the current state of toxicological research on microplastics remains nascent. Drawing upon existing domestic and international studies, this paper systematically reviews the toxicological effects of microplastics on algae, fish, and other aquatic animals, while also proposing insights and recommendations for future research in this domain.

Keywords: algae; aquatic animal; toxicology; microplastics

0 前言

塑料是一种有机合成高分子材料, 以其轻质、耐用和低成本等优势被广泛应用。自 20 世纪 50 年代以来, 全球塑料产业快速发展, 预计到 2050 年, 其产量将达到 330 亿吨。

由于塑料产业的快速发展虽然为人类的生活带来了便利, 但也带来了严重的环境问题。自 20 世纪 50 年代开始大规模生产塑料产品以来, 短短几十年时间里, 塑料碎片已经在陆地环境以及海洋各层甚至南北极区域中逐渐积累。景美琪等指出 2010 年 192 个沿海国家产生了 2.75 亿吨塑料垃圾, 其中 480 万吨~1270 万吨流入海洋。预计到 2025 年, 可从陆地进入海洋的塑料废物的累积数量将增加 1 个数量级^[1]。

微塑料通常指直径小于 5 毫米的塑料碎片或颗粒。根据其化学成分, 主要可分为聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)、聚丙烯 (PP)、聚乙烯 (PE)、聚苯乙烯 (PS)、聚氯乙烯 (PVC)、聚酰胺 (PA) 以及丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (ABS) 等。从来源上看, 微塑料可分为两类: 一类是初级微塑料, 如化妆品、洗涤剂等产品中添加的塑料微珠; 另一类是次级微塑料, 由较大塑料经过外力作用 (如海浪冲刷、紫外线照射、环境风化、生物降解等) 分解形成。

由于微塑料具有难降解、疏水性等特点, 导致其在水体中长期存在并易在生物体内富集, 对水生动物的正常生

长造成危害。浓度为 2 $\mu\text{g/L}$ 、20 $\mu\text{g/L}$ 和 200 $\mu\text{g/L}$ 的 PS 小球会延迟海洋青鳉鱼雌鱼的生殖系统成熟, 降低其繁殖能力。陈纪韬发现随着聚乙烯微塑料颗粒投加量增大, 红斑马鱼的鳃、肠、肝干重也增大的浓度效应, 而且微塑料颗粒浓度越大, 摄入量也越大。且由于微塑料颗粒的摄入堵住了食道, 导致进食变慢与食道损伤。舌齿鲈成鱼在暴露于尺寸小于 0.3mm 的 PVC 微球中, 30 天后, 67% 的个体肠道组织出现中等程度的损伤, 表现为绒毛缩短和肿胀、固有层加宽、肠细胞空泡化等现象。

1 微塑料对水生生物的毒理学效应

1.1 微塑料对藻类的毒性效应进展

现有研究表明, 藻类生长速率与藻类和微塑料的接触时间有关, 微塑料对藻类的毒理学效应与微塑料的种类、浓度、大小和与微塑料接触的时间有关。例如, 三角褐指藻生长受 PP、PE、PET 和 PVC 四种微塑料 (74 μm , 200mg/L) 的抑制作用较为明显, 而 PE、PET 和 PVC 对小球藻生长有促进作用, 仅 PP 对其有抑制作用。Sjollema 等的研究表明, 在不同尺寸 PS (0.05 μm 、0.5 μm 和 6 μm) 的实验设置浓度下暴露 72h, 特氏杜氏藻生长受到明显抑制, 并且这种负面影响随 PS 粒径的减小而增加。微塑料对藻类的作用不是完

全不利,李宇佳等^[2]研究发现,低浓度、规格较大的 PS 微塑料在一定程度上对藻类生长起促进作用。王琳等研究表明,当 PS、PVC 微塑料浓度较低或规格大于 1 μm 时,对小球藻抑制作用不明显。

微塑料附着的微藻可能由于遮光效应导致微藻营养和气体交换效率降低,进而影响藻类呼吸作用和光合作用。有研究显示,不同微塑料暴露浓度(0~100mg/L)和暴露时间(10~21d)条件下,藻类光合作用均被抑制^[3-4]。并致使参与藻类光合作用的基因表达受到抑制^[5]。PS 对不同生长周期的小球藻影响不同,小球藻的光合作用在滞后期到对数期初期受到抑制作用,对数期结束到固定期通过自身生理活动得到修复。叶绿素含量直接反映藻类含量,PP 和 PVC 的存在明显抑制了叶绿素含量的增长,抑制作用随微塑料浓度增加而增强,并且 PVC 对叶绿素含量抑制作用明显强于 PP^[6]。PVC 微塑料通过吸附作用限制细胞与外界环境物质交换和能量交流,从而干扰中肋骨条藻生长,微塑料对该种藻类的光合作用具有阻碍作用,叶绿素含量和光合效率均呈现降低趋势,研究证实遮光效应不是微塑料对藻类产生毒性效应的原因。

微塑料对藻类的生态毒性机制归因于物理损伤(细胞膜损伤)和氧化应激。表示毒性的常用生物指标为 SOD 和 CAT 活性以及 MDA 含量。微塑料对藻类生长产生抑制作用时,抗氧化酶系统发生相应变化以应对微塑料的生态毒性^[7]。刘思彤选取粒径 6.5 μm 的 PE、PVC、PS 和 PA 浓度梯度设置为 0mg/L、5mg/L、10mg/L、20mg/L、40mg/L、80mg/L。胁迫实验 72h,研究表明 PVC 对小球藻的生长抑制程度大于 PE。低浓度 PVC 暴露可显著提高小球藻细胞内的 SOD 活性和 CAT 活性。而高浓度 PE 暴露显著提高小球藻细胞内的 SOD 活性和 CAT 性。在 PS 作用下,铜绿微囊藻和牟氏角毛藻 MDA 含量、SOD 活性和 ROS 含量也显著增加^[8-9]。

1.2 微塑料对鱼类的毒理学进展

李文华等^[10]研究表明不同生态位的鱼类均有摄入微塑料,且种类繁多,在颜色、形状和聚合物类型上有很大差异。纤维和碎片是鱼体内最常检测到的微塑料形状,这与它们在全球水域中处于主导地位相符。杨兵坤等将剑尾鱼放入含有不同粒径与浓度的聚乙烯微塑料水环境中暴露 72 小时,发现不同粒径微塑料均可引起剑尾鱼肠道破损,且粒径越大的微塑料对剑尾鱼的肠道损伤程度越大。

研究表明,暴露于微塑料中的鱼类,会产生摄食量变小或者进食时间变长,运动能力减弱或者运动活跃度异常增加等现象,长时间的暴露会使鱼体质量增长缓慢甚至下降。蓝益添等的实验结果表明,微塑料浓度 > 0.12g/L 时能显著抑制淡水鱼体质量的生长,微塑料的浓度 > 0.18g/L 时能显著抑制淡水鱼体长的增长。有研究发现,生物体摄入微塑料颗粒后会导致肠道阻塞,抑制胃部酶的分泌,减少了食欲,减少了固醇类激素的水平,并导致排卵期延后,繁殖力减弱

等现象。同时,摄入和排出微塑料颗粒需要代谢过程并消耗能量但微塑料颗粒本身并没有带来营养价值。微塑料颗粒在消化道中存在的时间越长,就需要更多的能量把微塑料颗粒排出体外,并导致额外的饥饿。

2 微塑料对其他水生动物的毒理学效应研究进展

研究表明浮游动物对微塑料吸入的研究表明微塑料的粒径大小、浓度高低等条件都会影响浮游动物对其的摄入,且其对浮游动物的毒性影响也与这些条件有关。摄食行为是微塑料进入浮游动物体内的主要途径,将海胆幼虫置于浓度为 300 个/mL 聚乙烯微塑料的环境中,5d 后即在其胃中检测到聚乙烯微塑料的存在(10~45 μm)。浮游动物的呼吸作用下,也会有大部分微塑料通过鳃进入机体内部。而等足类浮游动物摄入微塑料时,微塑料全部都会以排泄物的形式排出,因此微塑料对等足类浮游动物几乎无不良影响。

微塑料对大型蚤有显著的生态毒性,且纳米级微塑料毒性远大于微米级微塑料。10 μm 的微塑料在 100ppm 浓度下并未产生显著的致死效果,但是 50nm 的微塑料在 15.4ppm 时即造成了大型蚤的半数致死。关于微塑料与其他污染物联合毒性的研究表明,在低浓度的纳米级微塑料存在的情况下,有机污染物(菲)对大型蚤的急性毒性显著增加,纳米级微塑料与有机污染物(菲)对大型蚤的毒性具有叠加作用,研究推测可能是微塑料表面吸附了大量的有机污染物(菲),增加了微塑料进入大型蚤体内的浓度,或者是微塑料对大型蚤造成的损伤降低了大型蚤对其他有毒物质的耐受能力。

3 结论与展望

微塑料对水生生物的毒性作用主要体现在物理和化学两个方面。在物理层面,微塑料对水蚤等微生物的影响尚不明显,但对藻类的影响较为显著。微塑料能够穿透藻类的细胞壁和细胞膜,在细胞内积累,干扰其光合作用,进而影响藻类的生长和发育。对于鱼类,微塑料主要影响其消化和呼吸系统,可能导致绒毛结构异常、肠细胞空泡化等现象。在化学层面,微塑料对浮游生物的影响表现为抑制其生长、繁殖和寿命,降低存活率。对藻类而言,微塑料会破坏其抗氧化系统,抑制其生长。对于鱼类,微塑料可能导致行为异常、代谢紊乱、生长迟缓、排卵期延迟以及繁殖能力下降等问题。

目前,全球范围内关于微塑料毒理机制的研究仍显不足,尤其是长期暴露于低浓度微塑料环境对生物的影响,尚缺乏系统的实验方法和手段。为了在实验中更显著地观察到微塑料的效应,一些研究者倾向于使用远高于实际环境浓度的微塑料进行实验。这种做法虽然能够加速研究进程并获得明显的结果,但却不利于确定微塑料的毒性阈值,也难以构建科学的生态风险评估框架。为了更好地评估微塑料对生态

和健康的潜在威胁,未来研究应从以下几个方面展开深入探讨。

①研究微塑料对不同物种和生态系统的长期影响,包括基因突变、物种多样性下降等潜在风险。

②研究微塑料与其他环境污染物(如重金属)的联合毒性,以更全面地评估微塑料的生态风险。

③探索实际环境中微塑料浓度的危害,建立科学的生态风险评估体系。

④提倡使用可降解的塑料替代品,减少塑料垃圾的产生,减轻塑料对环境和生物的负面影响。

参考文献:

- [1] 景美琪,李焯然,王隆清,等.微塑料的毒理学研究进展——微塑料对微生物、藻类、鱼类和哺乳动物类的毒理学效应[J].生态毒理学报,2022,17(4):265-280.
- [2] 李宇佳,孙萍,张翔宇,等.微塑料对浮游植物群落的影响研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2022,45(5):107-116.
- [3] Chen Y X, Ling Y, Li X Y, et al. Size-dependent Cellular Internalization and Effects of Polystyrene Microplastics in Microalgae *Phaeodactyloides tsingtaoensis* and *Squadricauda*[J]. Journal of Hazardous Materials,2020(99):123092.
- [4] Lin W, Su F, Lin M Z, et al. Effect of Microplastics PAN Polymer and/or Cu²⁺Pollution on the Growth of *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Environmental Pollution,2020(265):114985.
- [5] Li S X, Wang A P P, Zhang C, et al. Influence of Polystyrene Microplastics on the Growth, Photosynthetic Efficiency and Aggregation of Freshwater Microalgae *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Science of the Total Environment,2020(714):136767.
- [6] Wu Y, Guo P, Zhang X, et al. Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae[J]. Journal of Hazardous Materials,2019(374):219-227.
- [7] 王月,李家科,莫淑红,等.微塑料与藻类相互作用研究现状和热点追踪的可视化分析[J].生态与农村环境学报,2023,39(7):839-852.
- [8] Zheng X W, Zhang W Z, Yuan Y, et al. Growth Inhibition, Toxin Production and Oxidative Stress Caused by Three Microplastics in *Microcystis aeruginosa*[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2021(208):111575.
- [9] Wang S C, Gao Z Y, Liu F F, et al. Effects of Polystyrene and Triphenyl Phosphate on Growth, Photosynthesis and Oxidative Stress of *Chaetoceros muelleri*[J]. Science of the Total Environment,2021(797):149180.
- [10] 李文华,简敏菲,余厚平,等.鄱阳湖流域饶河河口入湖段优势淡水鱼类对微塑料及重金属污染物的生物累积[J].湖泊科学,2020,32(2):357-369.

作者简介: 姜晓业(2001-),女,中国辽宁大连人,硕士,从事生态学研究。