



气候变化与海洋微塑料污染的相互影响研究进展

陈昱霏¹, 夏斌^{1,2*}, 朱琳^{1,2}, 孙雪梅^{1,2}, 徐雪梅³, 薛亮⁴, 朱小山⁵

1. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071

2. 青岛海洋科技中心海洋生态与环境科学功能实验室, 青岛 266237

3. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023

4. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061

5. 海南大学生态与环境学院, 海口 570228

*通讯作者, E-mail: xiabin@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2023-12-27; 接受日期: 2024-02-02; 网络版发表日期: 2024-06-26

国家自然科学基金(U2106213, 41976143), 崂山实验室科技创新项目(LSKJ202203903), 山东省重点研发计划(2022CXPT013), 山东省泰山学者专项(tsqn202211267), 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2023TD13)资助

摘要 气候变化和海洋微塑料污染已成为全球关注的热点问题, 两者在相当长的一段时间内会同时存在。然而, 基于文献报道的实验结果和环境监测数据, 关于气候变化和海洋微塑料污染的研究大多是相互独立的, 缺乏对两者相互影响的清晰认知。本文通过综述全球气候变化状况和海洋微塑料的污染现状, 总结了气候变化下海洋生态环境的改变, 特别是海水升温、酸化、低氧等与海洋微塑料污染之间的相互影响, 发现气候变化会加剧海洋微塑料污染, 改变微塑料的海洋环境行为, 同时海洋微塑料污染也会影响气候变化, 加剧气候变暖、海洋酸化和低氧, 所以两者是密切相关的。本文还展望了未来的研究方向和前景, 以期有效应对全球气候变化和海洋微塑料污染提供重要的理论基础。

关键词 气候变化, 微塑料, 海水升温, 海洋酸化, 相互影响

1 引言

气候变化是指平均气候条件或长期气候变化(通常为30年或更长时间)的显著统计变化^[1]。当前地球已进入了全新的“人类世”阶段^[2], 政府间气候变化专门委员会第六次评估报告(IPCC AR6)指出人类活动已成为全球气候变化的主要驱动力量^[3]。工业革命以来, 由于化石燃料燃烧、农业生产、森林砍伐等频繁的人类活动, 大量的二氧化碳(CO₂)等温室气体被排放到大气中, 其中至少三分之一被海洋吸收, 引发海水升温、

海平面上升、海水酸化、水层改变和海表紫外线(UV)辐射增强等一系列海洋生境的改变^[4], 最终影响海洋生态系统的健康和稳定。所以, 全球气候变化已成为严峻的环境问题。

塑料的大规模生产和使用以及塑料废弃物管理不善导致越来越多的塑料垃圾被释放到环境中, 最终会进入海洋, 目前海洋中的塑料垃圾已超过7000万吨^[5]。塑料废弃物难降解, 在海洋环境中易大量累积, 并在物理、化学或生物作用下破碎分解成尺寸小于5 mm的微塑料^[6]。此外, 微塑料具有尺寸小、密度低、分布

引用格式: Chen Y, Xia B, Zhu L, Sun X, Xu X, Xue L, Zhu X. Research progress on the interaction between climate change and marine microplastic pollution. *Sci Sin Chim*, 2024, 54: 1027–1037, doi: 10.1360/SSC-2023-0250

广、耐腐蚀、难降解、比表面积大等特性, 这些特征决定了它易受水流、洋流和风力的影响, 从而发生再悬浮和长距离迁移, 微塑料已遍布全球海域^[7], 因此, 海洋微塑料污染问题已成为全球关注的热点问题。

气候变化与海洋微塑料污染将在相当长的一段时间内同时存在, 两者的相互影响已逐渐受到各国政府和科学家的关注。气候变化引起海洋生境的改变, 不可避免地会影响海水中微塑料的环境行为与生物效应^[8]。同时, 微塑料污染对气候变化的影响也不容忽视, 海洋中持久存在的微塑料具有独特的表面结构和理化性质, 会影响海洋生物泵和碳酸盐系统, 从而引起海水温度、酸碱度、溶解氧(DO)等参数的改变。然而, 当前主要集中在对气候变化或海洋微塑料污染的单一研究^[9,10], 缺乏对气候变化与微塑料污染相互影响的深入探讨。本文综述了气候变化对海洋微塑料污染的作用, 以及海洋微塑料污染对气候变化的影响, 提出当前气候变化与海洋微塑料污染相互影响研究所面临的问题, 展望了未来的研究方向, 从而更加客观全面地认识气候变化与海洋微塑料污染之间的影响机制, 为科学评估气候变化和微塑料污染对海洋生态系统的影响提供参考依据。

2 全球气候变化概述

近年来, 人类活动引起的全球温室气体浓度增加, 导致大气圈、海洋圈、冰冻圈和生物圈均发生了广泛而显著的变化, 其规模和现状是过去几个世纪甚至几万年来所未有的。全球气候变化给海洋环境带来了不可忽视的改变, 具体表现为: 随着全球气候变暖, 预计全球海水表层到21世纪末大约升温1~3℃^[11]; 随着大气CO₂含量持续增加, 更多的大气CO₂被表层海水吸收以维持海-气界面的CO₂分压平衡, 进而导致全球表层海水酸碱度(pH)值降低, 引起海洋酸化^[12]; 海洋温度和密度改变, 导致水体层化加剧^[13]; 海洋低氧区的数量和面积也不断增加^[14]; 人为影响下全球变暖加速, 海洋热膨胀和冰川冰盖融化导致全球海平面上升^[15]。自1900年以来, 海平面上升速率超过3000年内的任何一个世纪; 极端高温、海洋热浪、强降水的频率和强度以及强热带气旋的比例均增加, 预计全球每升温1℃, 极端日降水事件将增加约7%^[12]; 氟氯代烃(CFCs)、臭氧(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)增多, 导致臭氧

层变薄, 到达海表的B族紫外线(UV-B)(280~320 nm)辐射增强^[16]; 海水温度升高会加剧矿化和厌氧呼吸, 大量的CH₄、CO₂和N₂O释放到大气中, 从而又加剧了全球气候变暖^[17]。

3 海洋微塑料污染概述

海洋中的微塑料主要分为初生微塑料和次生微塑料。初生微塑料是指工业制备的粒径<5 mm的塑料颗粒, 主要用于工业原料、个人护理和清洁产品等; 次生微塑料是指大型塑料垃圾破碎分解形成的粒径<5 mm的塑料碎片。海洋中的微塑料主要以次生微塑料为主^[18]。陆源径流、滨海旅游、船舶航运、渔业捕捞、海水养殖和大气沉降等是海洋中微塑料的主要来源。微塑料的化学性质较为稳定, 可广泛存在于海洋环境中数百至数千年, 从南极到北极、从近海到远洋、从浅海到深海, 都发现不同程度的微塑料污染, 对海洋生态系统造成了潜在的影响。

微塑料污染在全球海洋环境中表现出“广泛而集中”的特点。“广泛”是指受洋流、环流、盛行风的影响, 微塑料分布于远洋、极地和深海等全球各个海域。例如, 在南极和北极的冰川、马里亚纳海沟都发现了微塑料。“集中”是指受大风、降雨、洋流和潮汐等自然因素的影响, 大量微塑料汇集并滞留在沿海等人类生产生活、周边人口密度高和工业化密集的区域^[19]、封闭/半封闭海域和洋流环流区。如珠江三角洲、地中海、加勒比海、北太平洋和北大西洋的亚热带环流区, 都易形成高丰度微塑料污染区, 显示了微塑料污染“汇”的特征。此外, 海洋环境中的化学污染物、微生物等会黏附在微塑料表面, 导致微塑料的密度超过海水密度, 从而发生沉降最终聚集在底层海水和沉积物中^[18]。研究发现, 太平洋底层海水中的微塑料含量比表层海水中的微塑料含量高出数倍^[20]。海洋中微塑料既是污染物, 可以直接对海洋生物产生毒性效应, 也是有毒污染物和病原微生物的传播载体, 对海洋生物产生间接影响, 所以, 微塑料的海洋环境效应已成为国内外研究热点^[21]。

4 气候变化对海洋微塑料污染的影响

至21世纪末, 全球气候变化导致海水升温、酸

化、层化、低氧、海平面上升、极端天气加剧,在百年至千年时间尺度上不可逆转,这些变化对海洋微塑料的理化性质和时空分布特征产生一系列影响:海水升温加速了海洋中塑料垃圾破碎分解成微塑料的进程,促进微塑料老化,并会改变微塑料的分布;海洋酸化改变了微塑料的悬浮性能;海水层化改变了微塑料的垂直分布;海洋低氧增加了微塑料在海洋环境中的持久性等(图1)。

4.1 海水升温对微塑料污染的影响

海洋储存了全球气候变暖90%以上的热量,所以随着全球气温的上升,海水温度也会升高,过去10年(2011~2020年)平均海表温度高于1870年以来的任何一个10年,并且,全球0~700米海洋热含量呈显著增加趋势,2020年达到历史新高^[22]。据IPCC第六次评估报告预测,到2100年,北大西洋、南冰洋和北冰洋3000~6000米深处区域温度将升高0.5~1℃,200~3000米深处温度的升幅将更大^[23]。海水升温会改变水体的密度、表面张力、黏性、存在形态以及水温层分布,加速水体中化学反应和生物降解速率等。

海水升温会加速海洋中塑料垃圾老化破碎形成微塑料的进程^[24](图1,过程①),这主要是因为热能可以改变塑料的氧化机理,塑料分子结构中的—C—C—键在高温条件下可以快速氧化成—C=O—和—C—O—键,从而提高塑料的破碎率^[25]。研究还发现,高温诱导塑料产生裂纹,其比表面积增大,促进高密度聚乙烯塑料分裂破碎形成微塑料^[26]。同时,海水升温可通过增强微生物的生长和活动,微生物分泌的水解酶与微塑料表面进行结合,促进微塑料的生物降解,将较高分子量的聚合物降解为羧酸等低分子量产物,生物降解后的微塑料中羰基减少、双键增多,导致微塑料表面更易于破碎且颗粒数量增加^[27]。海水升温还加剧了微塑料的老化程度,羰基指数和比表面积增加,其中比表面积从 $3.43 \pm 0.09 \text{ m}^2/\text{g}$ 增加到 $5.78 \pm 0.25 \text{ m}^2/\text{g}$ ^[28],同时,老化增加微塑料的破碎和表面裂纹,促进了光和氧气(O₂)进入内部,从而又加速了老化进程,显著改变了微塑料的表面特性,如含氧官能团增强^[29]、产生更多的活性氧自由基(ROS)^[30]和持久性氧自由基(PFRs)^[31]。

海水升温还可改变微塑料在海洋环境中的分布特征。气温升高,北极海冰融化,导致冻结在海冰中的微塑料被释放到海水中^[32]。此外,海水温度升高,浮游植

物生长加快^[33],引起藻华,导致大量的浮游植物附着在微塑料上,形成致密的生物膜而降低其浮力,加速微塑料下沉,使微塑料埋藏在海洋沉积物中^[34](图1,过程②)。海水升温还会改变水流方向和流速^[2],从而使沉积物发生再悬浮,导致大量微塑料进入上覆水,影响微塑料在海水和沉积物中的再分配^[35](图1,过程③)。更重要的是,被埋藏的微塑料会被重新“激活”,这可能导致潜在的环境威胁,因为“老旧微塑料”通常比“新鲜微塑料”携带更多的有毒化学物质^[36]。另外,温度是影响颗粒布朗运动的重要因素,温度越高,颗粒布朗运动则越明显。海水温度升高,微塑料通过强烈的布朗运动导致颗粒之间相互碰撞,在短时间内会迅速聚集并沉降^[37]。

4.2 海洋酸化对微塑料污染的影响

由于大气和海洋之间的气体交换作用,更多大气CO₂被表层海水吸收以维持海-气界面的CO₂分压平衡。CO₂作为一种弱酸性气体,一部分以溶解态CO₂溶解在海水中,另一部分溶于海水后会形成碳酸(H₂CO₃),H₂CO₃解离出HCO₃⁻和H⁺,使海水中H⁺浓度升高,引起海洋酸化^[38]。据预测到2100年,表层海水的pH值将下降至7.80~7.70;到2300年,表层海水的pH值将下降至7.40~7.30^[38,39]。

微塑料的悬浮性能与海水pH等环境介质参数密切相关^[40]。根据胶体稳定性(DLVO)理论,静电斥力起源于电子双层围绕等电荷粒子的重叠,当静电斥力小于范德华吸引力时,胶体颗粒发生聚集^[41]。pH会影响微塑料的表面电荷,改变微塑料颗粒间的静电斥力,最终影响微塑料的悬浮性能^[42]。研究发现,聚苯乙烯微塑料在pH 2.0~3.0条件下随着pH的增加水力直径显著降低,而在pH 3.0~8.0条件下水力直径保持稳定,这主要是因为低pH条件下,pH越小,颗粒间的静电斥力越小,微塑料越容易团聚;在高pH条件下,颗粒间的静电斥力增强,微塑料越容易分散^[43]。因此,海洋酸化会改变微塑料的悬浮性能(图1,过程④)。此外,对于粒径更小的纳塑料而言,海洋酸化也会影响纳塑料的环境行为。研究发现,在酸化海水中,PS-NH₂纳塑料的平均水力直径约为 $1286.73 \pm 27.69 \text{ nm}$,PS-COOH纳塑料的平均水力直径约为 $604.15 \pm 26.40 \text{ nm}$,前者比后者更容易聚集,这主要是由于海水酸化能抑制PS-COOH纳塑料在水体中的团聚,其平均水力直径减小,分散情况较

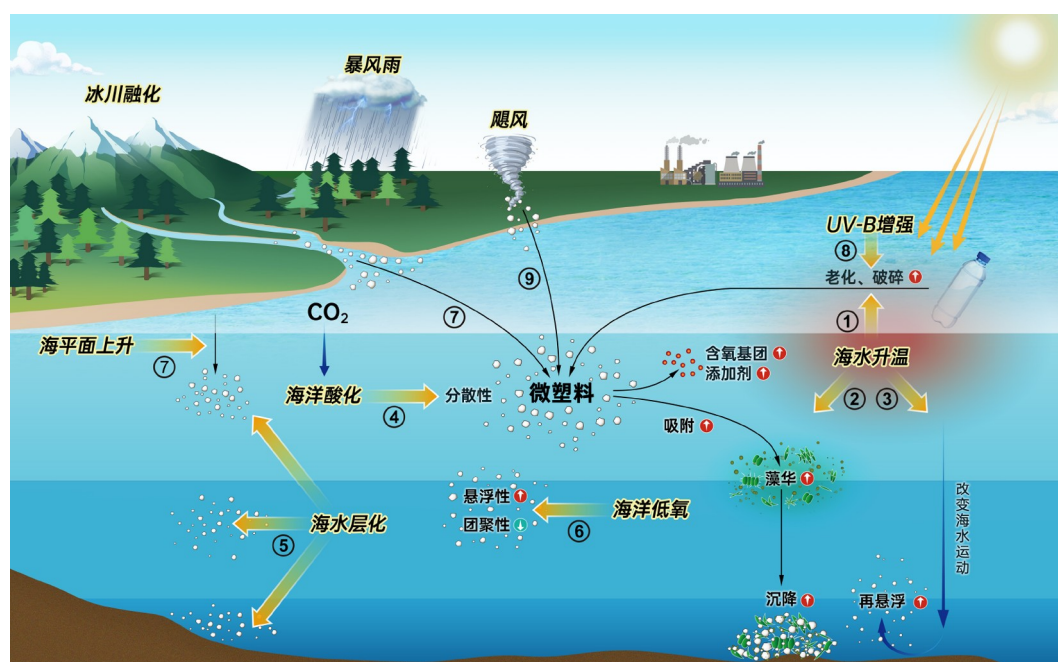


图1 气候变化对海洋微塑料污染的影响. ① 海水升温加速塑料垃圾老化破碎形成微塑料; ② 海水升温引发藻华, 导致大量的浮游植物附着在微塑料上, 加速微塑料下沉; ③ 海水升温改变水流方向和流速, 使沉积物发生再悬浮, 导致大量微塑料进入上覆水; ④ 海洋酸化改变了微塑料的分散性; ⑤ 海水层化改变微塑料的垂直分布和丰度; ⑥ 海洋低氧增加微塑料的悬浮性; ⑦ 冰川融化、海平面上升将沿海沉积物中的微塑料释放到海洋环境中; ⑧ UV-B辐射增强加速塑料老化破碎形成微塑料; ⑨ 风力增强促进微塑料从陆地进入海洋环境, 改变其分布和丰度(网络版彩图)

Figure 1 Influences of climate change on marine microplastic pollution. ① Ocean warming accelerated the aging and breaking of plastic waste into microplastics; ② ocean warming triggered algal blooms that caused large amounts of phytoplankton to attach to the microplastics, accelerating their sinking; ③ ocean warming changed the direction and velocity of the water flow, causing the sediment to resuspend, resulting in a large number of microplastics into the overlying water; ④ ocean acidification changed the dispersion of microplastics; ⑤ ocean stratification altered the vertical distribution and abundance of microplastics; ⑥ Ocean hypoxia increased the persistence and suspension of microplastics; ⑦ melting glaciers and rising sea levels released microplastics from coastal sediments into the marine environment; ⑧ UV-B radiation enhancement accelerated the aging and breaking of plastics into microplastics; ⑨ wind enhancement promoted microplastics from land into the marine environment, altering their distribution and abundance (color online).

好, 而海水酸化会促进PS-NH₂纳塑料在海水的团聚. 这主要是因为纳塑料表面电荷与pH值有关, 当pH接近等电点时, 绝对Zeta电位降低, 导致静电排斥力降低^[44].

4.3 海水层化对微塑料污染的影响

由于全球变暖, 表层水体温度升高, 导致水体上、下层温差增大, 温跃层变大, 从而使水体上、下层的密度梯度增大, 使得上、下层水体之间气体交换受阻, 深层水体无法获得充足的DO^[45], 易形成还原环境, 氧化态物质易被还原, 在底层积累, 在一定条件下可能随着水体垂向交换而释放到表层水体, 导致表层水体受到污染^[46].

海水层化会影响微塑料的垂直分布. 在夏季(如

5~7月), 由于风应力较小且海水高度分层, 微塑料集中分布在海水表层; 而在冬季(如1~2月), 由于风势增大且海水分层减少, 海水中微塑料则遍布不同水层, 甚至下降至底层^[46](图1, 过程⑤). 模拟结果证实, 由密度分层引起的湍流阻尼引起负浮力微塑料的下沉, 并在水体底部积聚^[47]. 密度较小的海水在上层, 密度较大的海水位于下层, 且高密度层越来越薄, 从而可能促进微塑料下沉^[48]. 而且, 在埃布罗河也观察到了类似的现象^[48]. 还有研究表明, 海水层化能改变大西洋环流的方向, 而强烈的垂直混合极大削弱了海洋分层, 引发海洋不同深度的反气旋环流, 导致微塑料的分布和丰度复杂多变^[49]. 例如, 波罗的海的微塑料分布表现出强烈的分层现象, 在夏季, 微塑料集中分布在30~60 m深度的盐跃层, 其含量比0~30 m的上层高出

几个数量级; 而波罗的海冬季的垂直温盐结构与夏季相反, 在0~30 m的盐跃层检测到较高浓度的微塑料^[50]. 因此, 微塑料受海水垂直温盐结构的影响广泛分布在海水的不同层级中. 考虑到海水微塑料丰度的垂直分布可变性, 只采集某一水层的微塑料可能高估或低估海水中微塑料丰度^[51].

4.4 海洋低氧对微塑料污染的影响

全球气候变暖会导致海水DO含量下降, 这主要是由于海水升温加剧了海水分层, 降低了垂直交换率, 从而削弱了从大气和表层水引入海洋内部的O₂的再补给速率. 海水升温还提高了海洋生物的新陈代谢, 增加了通过呼吸消耗O₂的速度, 从而导致海水DO减少. 此外, 随着人口和农业生产的增加, 进入沿海水域的营养负荷升高, 过量的营养物质(如氮、磷)导致富营养化, 促进藻类生长, 并最终消耗大量的DO, 导致DO减少. 一般当海水中DO浓度<2 mg/L时, 即为“海洋低氧”^[52]. 据大气-海洋环流耦合模型预测, 到2100年, 全球海洋的DO含量将降低1%~7%^[53].

海洋低氧会增加微塑料在海洋环境中的持久性. 研究发现, 在低氧至缺氧的水环境中, 聚乙烯微塑料在辐照条件下产生多种脂肪烃降解产物, 吸附在微塑料表面, 为微塑料表面老化提供了一种保护机制, 自由基优先与这些吸附在微塑料表面的脂肪烃降解产物发生反应, 从而导致微塑料的环境寿命延长^[54]. 还发现在海水缺氧条件下, 微塑料的表面Zeta电位降低^[55], 电荷绝对值增加, 因此, 微塑料在低氧海水中不易团聚, 悬浮性增加, 海水中的微塑料含量增加(图1, 过程⑥). 此外, 缺氧导致生物体内的ROS水平过高, 诱导微塑料表面碳链断裂, 随后引发自由基链式反应, 改变了微塑料的表面电荷和比表面积, 促进了海洋生物对微塑料的吸收, 从而加剧微塑料对海洋生物的毒性效应^[56]. 目前关于海洋低氧对微塑料的影响研究还较少, 未来亟需深入研究.

4.5 其他类型气候变化对微塑料污染的影响

全球气候变暖引起极地冰川消退、冻土融化、上层海水热膨胀, 从而导致全球海平面上升. 海平面上升引起沿海地区风暴潮频繁发生、洪涝灾害加剧、沿海低地和海岸受到侵蚀. 海平面上升可能将潮上带的微塑料释放到海洋环境中^[57](图1, 过程⑦). 洪水风险高

发地区往往会在洪水爆发期间成为大量塑料垃圾的聚集地, 使得更多的陆地塑料迁移到海洋环境中^[58]. 此外, 作为海洋微塑料的次级扩散源, 海平面上升引发的海岸侵蚀过程可能会导致埋藏的微塑料释放到海洋环境中^[59].

全球UV辐射增强会加速塑料老化破碎形成微塑料的进程, 这主要是因为太阳光中的UV易被含有醛酮羰基的聚合物所吸收, 引起光化学反应, 加速塑料中的分子双键断裂(图1, 过程⑧). 例如, UV-B辐射增强导致微塑料更加脆化^[60], 分解形成更小尺寸的微塑料, 甚至纳塑料, 并且加速链断裂和裂纹扩展, 又增加了暴露于UV-B辐射的面积^[61]. 此外, UV-B辐射增强诱导微塑料老化会改变微塑料的表面形态和微观结构, 导致微塑料表面出现裂纹和更多的含氧官能团, 增加了海水中微塑料的负表面电位和稳定性, 从而增强了微塑料对环境污染物的吸附能力^[62]. 例如, UV-B辐射增强导致聚乙烯微塑料老化, 其对金霉素和阿莫西林的吸附量增加了1.08~14.24倍^[63]. 此外, 在UV-B的作用下, 微塑料发生老化, 使微塑料中抗氧化剂、增塑剂、阻燃剂等更多的添加剂释放到海洋环境中^[60].

热带气旋(热带风暴和台风)等极端风暴事件也会对海洋微塑料污染产生影响. 研究发现, 台风可能会改变微塑料的丰度、组成和分布^[64], 风力增强会促进微塑料从陆地环境进入海洋环境中(图1, 过程⑨), 微塑料以类似于生物地球化学循环的方式在环境中进行运输. 此外, 强烈的风暴潮导致海洋沉积物中的微塑料发生再悬浮, 使微塑料进入到上覆水体中, 从而导致微塑料的分布范围扩大并且悬浮性和持久性增加^[64]. 例如, 台风过后, 我国桑沟湾海水和沉积物中的微塑料平均丰度、大小、颜色、形状发生改变, 并且微塑料成分更加多样化. 海水中0.05~0.1 mm尺寸范围内的微塑料显著增加; 海水中透明微塑料显著增加, 而在沉积物中透明微塑料大幅下降; 沉积物中纤维状微塑料显著减少, 而碎片和颗粒的比例增加; 海水中聚丙烯、聚苯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯的比例增加^[65].

5 海洋微塑料污染对气候变化的影响

气候变化会加剧海洋微塑料污染, 反过来, 海洋微塑料也会对气候变化产生影响. 一方面, 海洋中持久存在的微塑料在降解过程中会直接产生大量的温室气

体, 加剧气候变暖; 另一方面, 微塑料通过干扰海洋生物泵和微型生物碳泵的固碳能力, 影响海洋生态系统的碳循环, 从而间接释放更多的 CO_2 , 引起海洋低氧和海洋酸化(图2).

5.1 微塑料污染对气候变暖的影响

海洋微塑料对气候变暖的影响可归纳为两个方面. 一方面, 海洋微塑料在降解过程中直接释放温室气体, 加剧气候变暖(图2, 过程①). 塑料垃圾的碳排放不仅限于生产阶段, 海洋微塑料在高温、 O_2 和紫外线的作用下会发生长碳链降解, 微塑料的断裂增加了可用于光降解的比表面积, 表面形成裂缝和凹坑, 使微塑料的尺寸减小, 微塑料会向大气中排放更多的温室气体, 如 CO_2 、甲烷(CH_4)等, 具有显著的气候升温效应^[66]. 研究发现, 低密度聚乙烯微塑料产生的温室气

体随着时间的推移而增加, 在孵育212天后, CH_4 的日均产量为 5.8 nmol/g ^[66]. 微塑料的形态和老化程度影响其释放温室气体的速度, 而且温室气体的释放量随着时间的推移而增加, 海洋环境中越来越多的微塑料对加速全球气候变暖具有潜在影响^[67].

另一方面, 海洋微塑料还可以通过干扰生物泵的固碳功能, 间接地影响海洋碳循环, 导致气候变暖(图2, 过程②). 首先, 海洋微塑料污染会影响浮游植物的光合作用, 抑制浮游植物的生长, 从而降低浮游植物的固碳能力. 研究表明, 莱茵衣藻暴露于聚苯乙烯微塑料(100 mg/L) 5天后的生长抑制率为49.2%^[68]. 此外, 大量微塑料被浮游动物摄入后, 造成浮游动物营养不良, 导致浮游动物排泄物颗粒的尺寸减小, 减缓其向下输送的速率^[69], 影响浮游动物的固碳能力. 其次, 微塑料表面覆盖的生物膜可以改变微塑料在海水中的浮力和黏

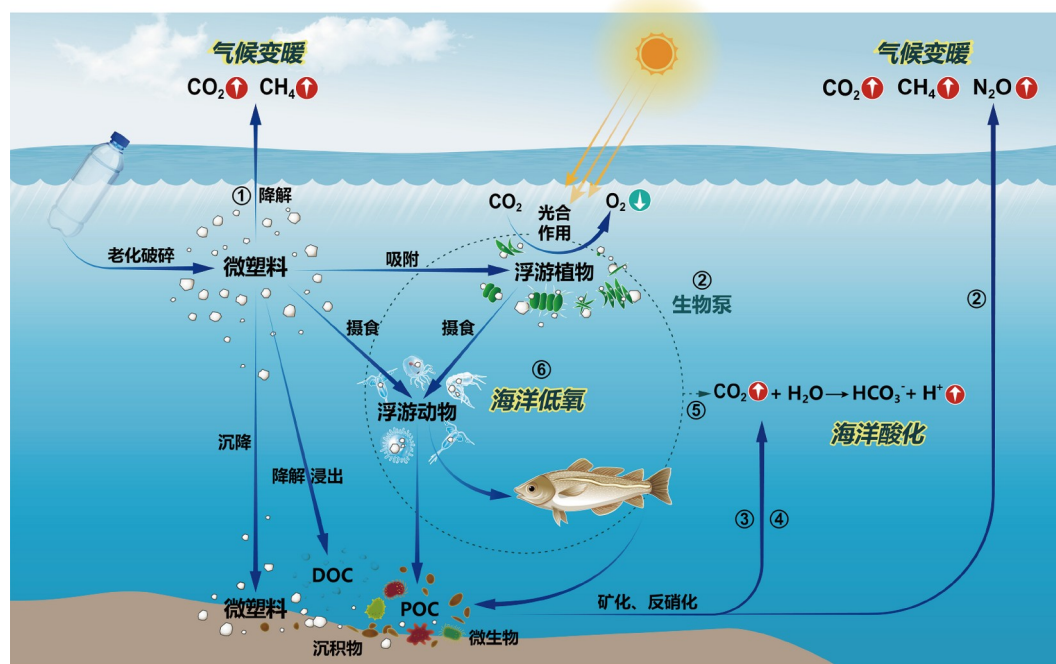


图2 海洋微塑料污染对气候变化的影响. ① 微塑料降解直接释放温室气体, 加剧气候变暖; ② 微塑料通过干扰生物泵的固碳功能, 间接导致气候变暖; ③ 微塑料降解浸出DOC, 通过矿化作用产生 CO_2 并进入海水中, 导致海水pH值降低, 加剧海洋酸化; ④ 微塑料团聚并沉降到沉积物中, 干扰沉积物环境中的碳循环, 阻碍碳封存, 间接导致海洋酸化; ⑤ 微塑料影响浮游植物的光合作用, 导致海洋中 CO_2 增多, 加剧海洋酸化; ⑥ 微塑料加剧海洋DO的流失, 造成海洋低氧(网络版彩图)

Figure 2 Influences of marine microplastic pollution on climate change. ① The degradation of microplastics directly released greenhouse gases, exacerbating climate warming; ② microplastics indirectly contributed to climate warming by interfering with the carbon sequestration function of biological pumps; ③ microplastics affected photosynthesis of phytoplankton, leading to more CO_2 dissolving in the ocean, which turned the water acidic; ④ microplastics aggregate and settle into sediments, interfering with the carbon cycle in the sediment environment, impeding carbon sequestration and indirectly contributing to ocean acidification; ⑤ microplastics degraded and leach dissolved organic carbon, produced CO_2 through mineralization and dissolved in the ocean, resulting in a decrease in seawater pH and increasing ocean acidification; ⑥ microplastics contributed to the loss of dissolved oxygen from the ocean, resulting in ocean hypoxia (color online).

度,从而减弱微塑料的漂浮动力和疏水性,导致微塑料沉降到海洋底部,干扰海洋沉积环境中营养物质的循环,促进海底沉积物的矿化和反硝化过程,释放更多的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O ^[9].此外,微塑料通过重塑微生物群落的多样性和溶解有机物的化学多样性影响碳循环,促进温室气体的排放.研究发现,微塑料改变了细菌群落结构,蓝藻等自养细菌受微塑料释放的双酚A(BPA)、邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯(DEHP)等添加剂的影响,光合作用减少,这导致自养细菌比例下降,异养细菌比例上升, CO_2 排放通量增加,排放到大气中,加剧气候变暖^[70].最后,覆盖在沉积物表面的微塑料也能促进沉积物中的颗粒有机碳(POC)被异养微生物矿化为 CO_2 或 CH_4 ,释放更多的温室气体^[71].

5.2 微塑料污染对海洋酸化的影响

海洋微塑料降解会浸出溶解有机碳(DOC),DOC通过矿化作用产生 CO_2 并进入海水中,直接影响海洋碳酸盐系统,导致海水pH值降低,加剧海洋酸化^[72,73](图2,过程③).此外,塑料中作为增塑剂的邻苯二甲酸酯、乙酰柠檬酸酯等有机酸酯添加剂也能随着塑料降解而释放到海水中,并发生水解反应产生有机酸,从而使海水碱度降低,引起海洋酸化^[74].研究发现,在塑料碎片大量堆积的沿海地区,微塑料浸出的DOC可能导致海水的pH值降低0.5个单位^[72].而且,微塑料降解通常会出现划痕和断裂,这增加了塑料中DOC的浸出^[75],从而加剧海水pH下降.

海洋沉积物中微生物在生物地球化学循环方面起着重要作用.海水中大量微塑料团聚并沉降到海洋沉积物中,通过影响沉积物的理化特性或营养条件等改变微生物群落结构和代谢功能^[76],从而阻碍沉积物环境中的碳循环和碳封存,间接导致海水酸化(图2,过程④),主要表现为两个方面.一方面,微塑料可能促进沉积物呼吸和酶活性(如葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶等),加速微生物分解和矿化沉积物中的POC,从而产生 CO_2 并释放到海洋中^[77],引起海洋酸化;另一方面,微塑料通过影响海洋沉积物的孔隙结构和微生物功能,降低沉积物容重,减少水稳定性聚合物,增强沉积物通气性和呼吸,从而促进 CO_2 释放,导致海水pH降低^[78].

浮游植物通过光合作用吸收 CO_2 、释放 O_2 ,然而,微塑料会影响海洋浮游植物的光合作用和生长繁殖,

导致海洋中 CO_2 增多,加剧海水酸化^[79](图2,过程⑤).例如,漂浮的微塑料通过遮蔽藻细胞孔隙、阻碍气体交换、嵌入藻细胞等途径抑制蓝藻细胞的生长^[80].微塑料还会对小球藻产生物理损伤和氧化胁迫,抑制其生长和光合活性^[10].研究发现,在海水升温条件下,微塑料导致藻类的体型减小,并且叶绿素a含量和光合效率分别显著降低32.5%和10.86%^[81].因此,海洋微塑料污染对海洋初级生产者造成一定程度的危害,这可能会导致海洋生态系统通过初级生产者吸收 CO_2 的能力下降,从而加剧海洋酸化.

5.3 微塑料污染对海洋低氧的影响

微塑料污染会加剧海洋DO的流失,造成海洋缺氧^[82],主要包括两个方面:一方面,漂浮的微塑料能够阻碍阳光进入水体,对藻细胞产生遮蔽效应,进而抑制浮游植物的光合作用和生长^[83],从而产生的 O_2 减少(图2,过程⑥).另外,由于微塑料体积小、比表面积大、具有较强的物理吸附性,能够吸附藻细胞形成较大的异质团聚体,从而改变藻细胞或种群在水体中的垂直分布状态^[84],可能沉降至深水无光区,且阻塞藻细胞与外界环境的气体交换,从而影响藻细胞的光合作用和呼吸作用^[85],干扰浮游植物的正常生长,从而导致海水DO含量下降.另一方面,微塑料暴露下微藻的生长受到抑制,但甲藻相对于硅藻等生长能力较强,受到的抑制作用较小,可能使甲藻成为优势物种,并占据一定生态位,导致赤潮爆发.大量赤潮藻死亡后,在分解过程中会消耗大量 O_2 ,导致海水缺氧.例如,在暴露于聚氯乙烯微塑料($1\text{ }\mu\text{m}$, 50 mg/L)96 h后,中肋骨条藻的生长抑制率为39.7%,而对米氏凯伦藻的生长抑制作用较小^[80,85].所以,微塑料对藻细胞的影响可能具有物种差异性,对不同浮游植物种群的影响也不相同,释放出的生态位有利于赤潮藻的暴发,导致海水缺氧^[86,87].

6 总结与展望

本文概述了气候变化特征和海洋微塑料污染现状,较为全面地总结了气候变化和海洋微塑料污染之间的相互影响.一方面,气候变化导致海洋中的微塑料丰度增加,环境行为发生改变,分布范围更加广泛,加剧了海洋微塑料污染及其对海洋生态系统的潜在危

害; 另一方面, 海洋微塑料在降解过程中释放出大量的温室气体, 还可通过影响海洋生物泵和微型生物碳泵, 干扰海洋碳循环, 导致海水中 CO_2 增加, DO降低, 最终加剧海洋酸化、低氧和气候变暖。相对而言, 关于海洋微塑料对气候变化的影响研究较少, 但目前仅有的研究已证明海洋微塑料对气候变化具有一定贡献, 因此, 鉴于海洋塑料垃圾的日益增加, 我们应重视海洋微塑料污染对气候变化的影响。目前, 关于气候变化和海洋微塑料污染之间相互作用的研究刚刚起步, 尚不足以科学评估气候变化条件下海洋微塑料污染的生态和健康风险。随着全球气候变化的加剧和海洋环境中微塑料含量的持续增加, 在今后的研究中要更加重视气候变化和海洋微塑料污染之间的相互作用以及两者对海洋生态系统的耦合效应。因此, 我们提出以下研究展望。

(1) 目前有限的关于气候变化对海洋微塑料污染影响的研究主要集中于海水升温、海洋酸化、海洋低氧、海水层化、海平面上升、UV-B辐射增强等单一条件下海洋微塑料污染的变化, 缺少多种海洋生境条件下海洋微塑料污染特征和生物毒性效应方面的研究。而在实际海洋环境中, 气候变化引起的多种海洋生境条件的改变是同时存在的, 因此, 未来的研究可通过建立海洋中宇宙模拟生态系统, 研究气候变化引起的多种海洋生境条件对海洋微塑料污染的影响, 从而更

加真实、客观地评价海洋微塑料的生态和健康风险。

(2) 目前关于海洋微塑料污染的研究内容主要集中于其来源归趋、污染特征、生物效应和生态风险等方面, 缺乏未来在全球气候变化影响下海洋微塑料动态迁移的预测模型。目前的模型主要是针对重金属等溶解态污染物和持久性有机物等疏水性污染物, 难以满足微塑料等颗粒态污染物模拟的需求。全球气候变化在未来相当长的时间内仍会呈加剧趋势, 微塑料的迁移过程和生态风险会更加复杂严峻。因此, 在未来的研究中, 亟需通过建立模型, 预测海洋微塑料在全球气候变化影响下的迁移归趋, 加深对微塑料迁移规律的认识, 能够准确判定未来微塑料在海洋中扩散和汇集的区域, 为科学治理海洋微塑料污染提供理论指导。

(3) 目前关于全球气候变化下微塑料和其他环境污染物的复合毒性效应研究还很少。微塑料的表面疏水性强、密度低和比表面积大等特性决定了微塑料可作为持久性有机污染物等其他环境污染物的载体, 影响其他污染物在海洋环境中的迁移转化和毒性效应。在全球气候变化条件下微塑料对其他环境污染物的载体作用会更加复杂。因此, 开展海洋酸化、低氧、暖化等条件下微塑料与其他环境污染物的耦合效应研究, 有助于更加科学全面地认识海洋污染物的环境行为和生物效应。

参考文献

- 1 Steffen W, Crutzen PJ, McNeill JR. *AMBIO-J Hum Environ*, 2008, 36: 614–621
- 2 Climate Change 2021—the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2023
- 3 Harvell CD, Mitchell CE, Ward JR, Altizer S, Dobson AP, Ostfeld RS, Samuel MD. *Science*, 2002, 296: 2158–2162
- 4 Kawecki D, Scheeder PRW, Nowack B. *Environ Sci Technol*, 2018, 52: 9874–9888
- 5 From pollution to solution: a global assessment of marine litter and plastic pollution. Report. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2021
- 6 Zhang K, Xiong X, Hu H, Wu C, Bi Y, Wu Y, Zhou B, Lam PKS, Liu J. *Environ Sci Technol*, 2017, 51: 3794–3801
- 7 Möhlenkamp P, Purser A, Thomsen L. *Elementa Sci Anthropol*, 2018, 6: 61
- 8 Elliott JE, Elliott KH. *Science*, 2013, 340: 556–558
- 9 Shen M, Ye S, Zeng G, Zhang Y, Xing L, Tang W, Wen X, Liu S. *Mar Pollution Bull*, 2020, 150: 110712
- 10 Mao Y, Ai H, Chen Y, Zhang Z, Zeng P, Kang L, Li W, Gu W, He Q, Li H. *Chemosphere*, 2018, 208: 59–68
- 11 Climate Change 2007—The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. The Energy and Resources Institute Press, 2008
- 12 Doney SC, Fabry VJ, Feely RA, Kleypas JA. *Annu Rev Mar Sci*, 2009, 1: 169–192
- 13 Feely R, Doney S, Cooley S. *Oceanography*, 2009, 22: 36–47

- 14 Diaz RJ, Rosenberg R. *Science*, 2008, 321: 926–929
- 15 Deconto RM, Pollard D. *Nature*, 2016, 531: 591–597
- 16 Kerr JB, Fioletov VE. *Atmosphere-Ocean*, 2008, 46: 159–184
- 17 Li H, Song CL, Cao XY, Zhou YY. *Sci Total Environ*, 2016, 572: 280–288
- 18 Guo X, Wang J. *Mar Pollution Bull*, 2019, 142: 1–14
- 19 Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law KL. *Science*, 2015, 347: 768–771
- 20 Peng X, Chen M, Chen S, Dasgupta S, Xu H, Ta K, Du M, Li J, Guo Z, Bai S. *Geochem Perspect Lett*, 2018: 1–5
- 21 Xia B, Du YS, Zhao XG, Zhu L, Chen BJ, Sun XM, Qu KM. *Prog Fish Sci*, 2019, 40: 178–190 (in Chinese). [夏斌, 杜雨珊, 赵信国, 朱琳, 陈碧鹃, 孙雪梅, 曲克明. 渔业科学进展, 2019, 40: 178–190]
- 22 CMA Climate Change Centre. *Blue Book on Climate Change in China*. Beijing: Science Press, 2021 [中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书. 北京: 科学出版社, 2021]
- 23 H. O. Pörtner DCRH. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. IPCC Sixth Assess, 2022
- 24 UNEP. Regional action plan on marine litter management (RAPMaLi) for the wider Caribbean region. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2014
- 25 Chen Z, Zhao W, Xing R, Xie S, Yang X, Cui P, Lü J, Liao H, Yu Z, Wang S, Zhou S. *J Hazard Mater*, 2020, 384: 121271
- 26 Ariza-Tarazona MC, Villarreal-Chiu JF, Hernández-López JM, Rivera De la Rosa J, Barbieri V, Siligardi C, Cedillo-González EI. *J Hazard Mater*, 2020, 395: 122632
- 27 Albertsson AC, Erlandsson B, Hakkarainen M, Karlsson S. *J Polym Environ*, 1998, 6: 187–195
- 28 Luo H, Zhao Y, Li Y, Xiang Y, He D, Pan X. *Sci Total Environ*, 2020, 714: 136862
- 29 Zhu K, Jia H, Sun Y, Dai Y, Zhang C, Guo X, Wang T, Zhu L. *Water Res*, 2020, 173: 115564
- 30 Zhu K, Jia H, Sun Y, Dai Y, Zhang C, Guo X, Wang T, Zhu L. *Environ Int*, 2020, 145: 106137
- 31 Zhu K, Jia H, Jiang W, Sun Y, Zhang C, Liu Z, Wang T, Guo X, Zhu L. *Environ Sci Technol*, 2022, 56: 779–789
- 32 Obbard RW, Sadri S, Wong YQ, Khitun AA, Baker I, Thompson RC. *Earths Future*, 2014, 2: 315–320
- 33 Moss B. *Inland Waters*, 2011, 1: 101–105
- 34 Leiser R, Jongsma R, Bakenhus I, Möckel R, Philipp B, Neu TR, Wendt-Potthoff K. *Water Res*, 2021, 189: 116582
- 35 Hu S, Sprintall J, Guan C, McPhaden MJ, Wang F, Hu D, Cai W. *Sci Adv*, 2020, 6: eaax7727
- 36 Xia F, Yao Q, Zhang J, Wang D. *Environ Pollution*, 2021, 286: 117403
- 37 Sun H, Jiao R, Wang D. *Environ Pollution*, 2021, 268: 115942
- 38 Caldeira K, Wickett ME. *Nature*, 2003, 425: 365
- 39 Climate Change 2013—the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- 40 Sharma VK, Ma X, Guo B, Zhang K. *Chemosphere*, 2021, 271: 129597
- 41 Butler JAV. *Nature*, 1948, 162: 315–316
- 42 Wang X, Bolan N, Tsang DCW, Sarkar B, Bradney L, Li Y. *J Hazard Mater*, 2021, 402: 123496
- 43 Lu S, Zhu K, Song W, Song G, Chen D, Hayat T, Alharbi NS, Chen C, Sun Y. *Sci Total Environ*, 2018, 630: 951–959
- 44 Chen Y, Wang X, Sui Q, Chang G, Sun X, Zhu L, Chen B, Qu K, Xia B. *Sci Total Environ*, 2023, 865: 161248
- 45 Hammond D, Pryce AR. Climate change impacts and water temperature. Bristol: Environment Agency. 2007
- 46 Chevalier C, Vandenberghe M, Pagano M, Pellet I, Pinazo C, Tesán Onrubia JA, Guilloux L, Carlotti F. *Mar Pollution Bull*, 2023, 189: 114674
- 47 Defontaine S, Sous D, Tesan J, Monperrus M, Lenoble V, Lancelleur L. *Mar Pollution Bull*, 2020, 160: 111688
- 48 Simon-Sánchez L, Grelaud M, Garcia-Orellana J, Ziveri P. *Sci Total Environ*, 2019, 687: 1186–1196
- 49 Zhang JL, Steele M. *J Geophys Res Oceans*, 2007, 112: C04S04
- 50 Zobkov MB, Esiukova EE, Zyubin AY, Samusev IG. *Mar Pollution Bull*, 2019, 138: 193–205
- 51 Li D, Liu K, Li C, Peng G, Andrady AL, Wu T, Zhang Z, Wang X, Song Z, Zong C, Zhang F, Wei N, Bai M, Zhu L, Xu J, Wu H, Wang L, Chang S, Zhu W. *Environ Sci Technol*, 2020, 54: 12979–12988
- 52 Schmidtko S, Stramma L, Visbeck M. *Nature*, 2017, 542: 335–339
- 53 Long MC, Deutsch C, Ito T. *Glob Biogeochem Cycle*, 2016, 30: 381–397

- 54 Peller JR, Mezyk SP, Shidler S, Castleman J, Kaiser S, Horne GP. *Water*, 2021, 13: 3120
- 55 Lee Y, Kim MS, Park JJC, Lee YH, Lee JS. *Mar Pollution Bull*, 2022, 181: 113933
- 56 Lei L, Liu M, Song Y, Lu S, Hu J, Cao C, Xie B, Shi H, He D. *Environ Sci-Nano*, 2018, 5: 2009–2020
- 57 van Sebillé E, Aliani S, Law KL, Maximenko N, Alsina JM, Bagaev A, Bergmann M, Chapron B, Chubarenko I, Cózar A, Delandmeter P, Egger M, Fox-Kemper B, Garaba SP, Goddijn-Murphy L, Hardesty BD, Hoffman MJ, Isobe A, Jongedijk CE, Kaandorp MLA, Khatmullina L, Koelmans AA, Kukulka T, Laufkötter C, Lebreton L, Lobelle D, Maes C, Martínez-Vicente V, Morales Maqueda MA, Poulain-Zarcos M, Rodríguez E, Ryan PG, Shanks AL, Shim WJ, Suaria G, Thiel M, van den Bremer TS, Wichmann D. *Environ Res Lett*, 2020, 15: 023003
- 58 Roebroek CTJ, Harrigan S, van Emmerik THM, Baugh C, Eilander D, Prudhomme C, Pappenberger F. *Environ Res Lett*, 2021, 16: 025003
- 59 Andriolo U, Gonçalves G. *Mar Pollution Bull*, 2022, 174: 113307
- 60 Masry M, Rossignol S, Gardette JL, Therias S, Bussiére PO, Wong-Wah-Chung P. *Mar Pollution Bull*, 2021, 171: 112701
- 61 Philip M, Al-Azzawi F. *J Polym Environ*, 2018, 26: 3139–3148
- 62 Lin J, Yan D, Fu J, Chen Y, Ou H. *Water Res*, 2020, 186: 116360
- 63 Fan X, Gan R, Liu J, Xie Y, Xu D, Xiang Y, Su J, Teng Z, Hou J. *Sci Total Environ*, 2021, 771: 145451
- 64 Lo HS, Lee YK, Po BHK, Wong LC, Xu X, Wong CF, Wong CY, Tam NFY, Cheung SG. *Sci Total Environ*, 2020, 716: 137172
- 65 Wang J, Lu L, Wang M, Jiang T, Liu X, Ru S. *Sci Total Environ*, 2019, 667: 1–8
- 66 Royer S, Ferrón S, Wilson ST, Karl DM. *PLoS One*, 2018, 13: e200574
- 67 Tammeorg O, Niemistö J, Möls T, Laugaste R, Panksep K, Kangur K. *Aquat Sci*, 2013, 75: 559–570
- 68 Li S, Wang P, Zhang C, Zhou X, Yin Z, Hu T, Hu D, Liu C, Zhu L. *Sci Total Environ*, 2020, 714: 136767
- 69 Wieczorek AM, Croot PL, Lombard F, Sheahan JN, Doyle TK. *Environ Sci Technol*, 2019, 53: 5387–5395
- 70 Liu X, Wang S, Mu L, Xie Y, Hu X. *Environ Sci Technol*, 2023, 57: 10415–10425
- 71 Arias-Andres M, Rojas-Jimenez K, Grossart HP. *TrAC Trends Anal Chem*, 2019, 112: 234–240
- 72 Romera-Castillo C, Lucas A, Mallenco-Fornies R, Briones-Rizo M, Calvo E, Pelejero C. *Sci Total Environ*, 2023, 854: 158683
- 73 Kuliński K, Hammer K, Schneider B, Schulz-Bull D. *Mar Chem*, 2016, 181: 10–17
- 74 Hahladakis JN, Velis CA, Weber R, Iacovidou E, Purnell P. *J Hazard Mater*, 2018, 344: 179–199
- 75 Romera-Castillo C, Birnstiel S, Álvarez-Salgado XA, Sebastián M. *Front Mar Sci*, 2022, 9: 861557
- 76 Fei Y, Huang S, Zhang H, Tong Y, Wen D, Xia X, Wang H, Luo Y, Barceló D. *Sci Total Environ*, 2020, 707: 135634
- 77 Chia RW, Lee JY, Lee M, Lee GS, Jeong CD. *Sci Total Environ*, 2023, 887: 164112
- 78 Jannesarahmadi S, Aminzadeh M, Raga R, Shokri N. *Chemosphere*, 2023, 311: 137023
- 79 Shen M, Huang W, Chen M, Song B, Zeng G, Zhang Y. *J Cleaner Production*, 2020, 254: 120138
- 80 Zhang C, Chen X, Wang J, Tan L. *Environ Pollution*, 2017, 220: 1282–1288
- 81 Hou X, Mu L, Hu X, Guo S. *J Hazard Mater*, 2023, 447: 130775
- 82 Oschlies A, Brandt P, Stramma L, Schmidtko S. *Nat Geosci*, 2018, 11: 467–473
- 83 Bhattacharya P, Lin S, Turner JP, Ke PC. *J Phys Chem C*, 2010, 114: 16556–16561
- 84 Nava V, Leoni B. *Water Res*, 2021, 188: 116476
- 85 Zhao T, Tan L, Huang W, Wang J. *Environ Pollution*, 2019, 247: 883–889
- 86 van Erk MR, Meier DV, Ferdelman T, Harder J, Bussmann I, de Beer D. *Limnology Oceanography*, 2020, 65: 3066–3084
- 87 Gudasz C, Bastviken D, Steger K, Premke K, Sobek S, Tranvik LJ. *Nature*, 2010, 466: 478–481

Research progress on the interaction between climate change and marine microplastic pollution

Yufei Chen¹, Bin Xia^{1,2*}, Lin Zhu^{1,2}, Xuemei Sun^{1,2}, Xuemei Xu³, Liang Xue⁴, Xiaoshan Zhu⁵

¹ State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China

² Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China

³ National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

⁴ First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

⁵ College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China

*Corresponding author (email: xiabin@ysfri.ac.cn)

Abstract: Climate change and marine microplastic pollution have emerged as prominent global issues, coexisting concurrently for an extended period. However, based on experimental results and environmental monitoring data reported in the literature, studies on climate change and marine MP pollution are mostly independent of each other, lacking a clear understanding of their interactions. Our review synthesized the current state of global climate change and marine microplastic pollution, summarizing alterations in marine habitats under climate change, particularly the reciprocal impacts between factors such as ocean warming, acidification, hypoxia, and marine microplastic pollution. We discovered that climate change exacerbated marine microplastic pollution, changing the behavior of microplastics in the marine environment. Concurrently, marine microplastic pollution also influenced climate change, intensifying global warming, ocean acidification, and hypoxia. Hence, these two phenomena are intricately interconnected, yet there is currently a lack of research on the marine microplastic pollution characteristics and biotoxic effects in diverse marine habitat conditions. Our review looked forward to future research directions and prospects, in order to provide an important theoretical basis for effectively responding to global climate change and marine microplastic pollution.

Keywords: climate change, microplastics, ocean warming, ocean acidification, interaction

doi: [10.1360/SSC-2023-0250](https://doi.org/10.1360/SSC-2023-0250)