

海洋微塑料研究挑战与展望

孙承君^{1,2}, 丁金凤¹, 高丰蕾¹, 李景喜¹

(1. 自然资源部第一海洋研究所海洋生物资源与环境研究中心, 山东 青岛 266061;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋药物与生物制品功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 海洋微塑料污染是全球共同面对的重要环境问题之一。过去 10 a, 海洋微塑料研究发展迅速, 但也暴露出一些亟待解决的关键科学问题, 包括突破小粒径微塑料和纳米塑料的检测技术瓶颈、建立标准化的微纳塑料分析检测方法、优化海洋微塑料输运模型以及完善生态风险评估方案等。本文简要概述了近海、大洋和极地微塑料污染的现状, 总结了海洋微塑料研究在样品采集和检测分析方面存在的挑战、在海洋微塑料存量估算和海洋微塑料输运模拟及生态风险评估方面存在的不足等, 并展望了海洋微塑料未来研究方向, 旨在为海洋微塑料常规监测、科学研究、风险评估和治理管控等方面提供借鉴和参考。

关键词: 海洋微塑料; 纳米塑料; 分析方法; 生态风险

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)04-0717-08

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220701002

引用格式: 孙承君, 丁金凤, 高丰蕾, 等. 海洋微塑料研究挑战与展望[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4): 717-724. SUN C J, DING J F, GAO F L, et al. Challenges and perspectives of marine microplastic research[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(4): 717-724.

对微塑料污染的关注最早起源于海洋。早在 20 世纪 70 年代, Carpenter 和 Smith^[1] 研究发现塑料颗粒广泛分布在马尾藻海海水表面, Wong 等^[2] 在太平洋也发现了塑料碎片的广泛分布, 但在当时和之后很长时间内, 这个现象并未引起科研人员的足够重视。直到 2001 年, Moore 等^[3] 在北太平洋海域发现大量塑料垃圾, 估算的塑料丰度高达 33 万个/km², 这些塑料的质量是浮游生物的 6 倍, 至此人们才开始意识到海洋塑料污染的严重性。2004 年, 英国普利茅斯大学教授 Thompson 在海洋塑料研究中首次引入了“微塑料 (Microplastics)”的概念, 用微塑料来描述小尺寸 (< 5 mm) 的塑料碎片^[4]。自 2011 年开始, 联合国环境规划署开始关注海洋中塑料垃圾尤其是海洋微塑料的污染问题^[5], 并在 2014 年发布的年鉴中将海洋微塑料列为全球十大新兴环境问题之一^[6]。自此以后, 海洋微塑料引起全世界的广泛关注, 相关研究开始进入快速发展阶段。

微塑料研究的初始阶段主要集中在样品采集、检测与分析方法的建立方面, 在这一过程中, 众多研究证实了微塑料在海洋环境中的普遍存在, 研究发现海洋环境中的微塑料受到风力、海流、洋流等的影响能远距离迁移^[7], 从近海到远洋海域^[8-9], 从赤道地区到南北两极^[10-11], 从海水表层到深海海沟^[12-13], 全球水域的各个角落都有微塑料的存在。但由于研究目标和手段各异, 目前海洋微塑料研究呈现出采样及分析检测方法多样化、数据单位不统一等现象, 因此不同研究得到的数据相差较大, 导致海洋环境微塑料丰度的可比性较差, 这种现象在水体微塑料检测方面尤为突出, 主要源于微塑料作为一种新污染物, 其采样和检测

收稿日期: 2022-07-01

资助项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费——山东近海典型海区新兴污染物的污染特征与来源解析 (2022QNLMO40002-1); 国家自然科学基金项目——微塑料在北极太平洋扇区的分布特征和迁移机制研究 (42170609); 全球变化与海气相互作用 (二期)——大洋微塑料分布调查评估 (ZY0722044)

作者简介: 孙承君 (1972—), 女, 研究员, 博士, 主要从事海洋微塑料、海洋生物材料、深海环境科学方面的研究。

E-mail: csun@fio.org.cn

(王佳实 编辑)

分析方法常借助其他领域的研究手段,如初期的采样多使用浮游生物研究中的 330 μm 拖网采集表层海水中的微塑料^[14-16],而后期又发展了多种采样方法。此外分析方法也相对受限,缺乏统一的方法。这些差异性阻碍了我们全面系统地认识海洋微塑料的分布和迁移规律,也无法获得环境浓度和特征微塑料毒性暴露试验结果,因此我们尚无法对海洋微塑料可能造成的生态风险做准确的评价。

为此,本文在分析海洋水体微塑料污染研究现状的基础上,对海洋微塑料污染研究面临的挑战进行了综合分析,提倡采取措施增加数据的可比性,呼吁建立并采用标准化的研究方法,完善生态风险评估方案,并积极推进国家间的合作和政策研究。希望能在海洋微塑料污染研究热潮下,认识目前存在的关键科学问题,为海洋微塑料污染的监测和治理管控提供理论指南。需要注意的是由于海洋微塑料不同研究数据可比性的最大差异性体现在对水体的研究上,因此尽管针对海洋沉积物和生物体内微塑料的不同研究也存在不同方法带来的差异,本文仅着重从海洋水体微塑料研究的角度进行讨论。

1 海洋微塑料研究现状

海洋是塑料垃圾的最终归宿,由于塑料产量呈逐年递增的趋势,导致海洋环境中的微塑料数量也在逐渐增加。目前,海洋微塑料研究内容主要涉及海洋微塑料的来源与归趋、海洋微塑料的老化与吸附、微塑料对海洋生物毒性效应、生物膜和生物降解、海洋大气微塑料的传输与沉降、生态风险和健康风险评估、海洋微塑料传输模拟以及海洋微塑料污染法律法规的制定等方面。上述众多研究领域的发展依赖于可靠、有效的环境微塑料浓度数据,但是研究方法的不统一性极大地限制了相关领域的发展。对微塑料真实环境浓度的深入认知是海洋微塑料研究的关键。

已知海洋微塑料污染的特征主要来自于对表层海水的分析。从全球海洋微塑料的分布来看,近海是微塑料污染的重灾区,尤其是海湾、河口、海岛等人类活动密集区域。除 Song 等^[16]在韩国南海岸采集小体积(2.2~2.8 L)微表层海水得到的微塑料丰度高达 1.63×10^4 个/ m^3 外,已报道的全球近海最高微塑料丰度出现在东亚泰国湾^[17],为 9.97×10^3 个/ m^3 。与近海相比,大洋区域微塑料的传输主要受到环流和季风等的影响,在太平洋、大西洋和印度洋的外海区域出现了多个微塑料汇集区^[18-19],如北太平洋海域微塑料平均丰度高达 6.8×10^5 个/ km^2 ^[20]。受到大洋环流及大气运输等的影响,在远离人类活动的南北极地区也存在严重的微塑料污染,最近的研究指出北极海区的海底可能是塑料垃圾重要的“汇”^[21]。

纵观海洋表层海水中微塑料的污染情况,微塑料丰度从小于每立方米一个到每立方米上万个^①,该差异除与不同海域微塑料污染情况不同以及人类活动、大洋环流等的影响有关外,微塑料采样方法、检测技术和计数单位的差异也是主要影响因素^[22]。Gao 等^①通过总结中国近海表层海水中的微塑料丰度结果,发现使用泵抽或取水容器采水(0.05~63.6 个/L)比拖网采水(0.03~5.9 个/ m^3)获得的微塑料丰度高 3~4 个数量级。Song 等^[16]在韩国南海岸分别使用 50 μm 网($1\,143 \pm 3\,353$ 个/ m^3)和 330 μm Manta 网(47 ± 192 个/ m^3)采集表层海水,得到的微塑料丰度也存在 2 个数量级的差异。因此调查采样方法不同可能导致微塑料分析结果的巨大差异,这使得目前难以准确评估海洋环境中微塑料污染的真实状况,这严重制约了海洋微塑料的生态风险评价、微塑料传输模型预测以及相关职能部门的管控与决策。

2 海洋微塑料研究面临的挑战

过去 10 a,大量的野外实验证实了微塑料在海洋环境中的“广泛存在”,然而,当前对于海洋微塑料污染研究也面临众多挑战,包括:①样品采集、微塑料分离和鉴定方法不统一,导致海洋微塑料研究缺乏可

① GAO F L, LI J X, HU J, et al. A review of microplastics in China marine waters. Journal of Ocean University of China, 2022.

有效比较的定性和定量数据; ②由于微塑料鉴定技术的局限性, 目前获得的数据仅代表海洋环境中一部分微塑料; ③由于塑料碎片在海洋环境中受外力影响和生物影响不断发生形态和组分的变化, 其环境行为较难模拟, 真实存量难以估算; ④目前尚缺失环境小粒径微塑料和纳米塑料的数据, 室内毒性和毒理实验多基于“非环境特征微塑料”, 因此难以准确评估海洋微塑料的潜在风险。

2.1 海洋微塑料采样方法和检测技术

海水样品的采集方法主要有拖网采样法、泵采样法和取水容器采样法。不同采样方式可以采集不同深度、不同体积的海水样品。拖网采样法常采用孔径约为 330 μm 的浮游生物拖网, 但是目前研究采用的拖网网衣孔径从 20 μm 到 500 μm 不等^[23-24]; 而泵采样法和取水容器采样法使用的滤膜或筛绢孔径也由 0.2 μm 到 60 μm 不等^[25-26]。Zheng 等^[27] 通过比较 3 种不同采样方式得到的结果, 发现微塑料丰度存在数量级的差异, 平均微塑料粒径随滤膜或网衣孔径的增大而增大, 微塑料的组成比例也存在差异。另外, 不同于小体积水的常规采样, Li 等^[28] 在西太平洋和东印度洋海域采集大体积海水样品 (10 m^3) 测定其微塑料丰度, 获得的深水柱中微塑料的丰度值比小体积采样至少低了 1~2 个数量级。因此, 体积过少的海水样品不能保证对微塑料丰度进行准确估算。Liu 等^[29] 建议在野外调查前应进行体积梯度实验确定采集海水的体积, 并建议采用孔径为 60~90 μm 的网衣或滤膜以最大限度地降低采水体积和孔径差异对海水微塑料定量影响, 但更为重要的是这种方法在条件不是特别友好的环境中比较难实现, 比如大洋、极地和深海等区域。

拖网采样法和其他 2 种方法相比具有采样量大、效率高等优点^[30-32], 但采样结果的稳定性较差, 并且由于网孔偏大, 会遗漏更具生物学意义的小粒径微塑料的含量^[33]。泵采样法具有取水量大、筛绢更换方便等优点^[31], 但其耗能较大, 且不适用于很多特殊环境。取水容器采样法操作简单^[31], 后续使用滤膜直接过滤的方法可保留海水中小粒径的微塑料, 但该方法因取水量小, 样品结果的代表性差, 常用于研究微塑料在海水中的垂向分布。Barrows 等^[33] 在对南大洋海水表面微塑料分布进行调查时, 使用桶采集 1 L 左右的海水样品直接过滤至 0.45 μm 的滤膜上, 结果发现微塑料浓度高达 1.5×10^4 个/ m^3 , 显著高于其他研究报道的南极微塑料数据, 因此该研究指出使用取水器采集少量海水样品会降低数据的准确性。因此, Zheng 等^[27] 建议在采样过程中应根据现场采样条件和可用工具选择合适的采样方法以增大数据结果的可信度, 但更为重要的是, 应建立一套标准的采样方法, 以减少采样过程造成的误差和提高不同区域微塑料丰度结果的可比性。由于不同海洋环境变化特征差异明显, 因此很可能无法采用同一种采样方法, 从这个角度考虑, 提高检测结果的可比性非常重要。

由于微塑料分离方法的非特异性, 仍需要可靠的鉴定技术来识别微塑料类型。目前, 常采用显微镜目检法对可疑微塑料进行观察, 记录其形状、颜色及粒径, 再采用傅里叶变换红外光谱仪 (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)^[34]、拉曼光谱仪 (Raman Spectrometer)^[35] 等对可疑微塑料进行化学鉴定。也有学者采用热分析法包括热裂解气相色谱质谱技术 (Py-GC/MS)、萃取-热脱附气相色谱质谱技术 (TED-GC/MS) 等方法进行微塑料组分检测^[36]。选择不同的定性和定量检测方法可能会产生不同的数据结果。Käppler 等^[37] 研究发现与使用 Raman 光谱相比, FT-IR 低估了约 35% 的微塑料颗粒, 特别是对于粒径小于 20 μm 的微塑料。Raman 光谱比 FT-IR 检出微塑料的粒径小, 能检出粒径为 895 nm 的纳米塑料^[38], 但分析微塑料时容易受到添加剂以及有色化学品等的荧光干扰^[37]。与光谱法相比, 热分析法更适合于初步筛选微塑料, 能快速判断微塑料种类^[39], 但对样品具有一定的破坏性, 无法判别微塑料的形状、颜色和尺寸, 因此, 从破碎的样品中无法获得微塑料的特征与数量相关联的信息。目前, 由于没有高效富集分离小粒径微塑料的方法, 且受限于仪器的分辨率, 很难定性检测野外环境样品中粒径小于 5 μm 甚至是纳米级的塑料。此外, 不同实验室、不同研究人员处理同一野外样品也会产生不同的结果, 可能是因为研究人员专业背景不同, 或者使用的仪器本身存在缺陷^[30]。因此, 我们亟须突破传统检测方法的瓶颈, 实现对环境微塑料定性和定量地精准检测。

2.2 海洋环境中微塑料的存量估算

不同于其他污染物,微塑料是一系列密度、尺寸、形状和组成成分各异的粒子,这些独特的理化性质决定了微塑料在海洋环境中的非均匀分布^[40],并且在风力、洋流、生物等的影响下一直处于动态变化中,会不断发生破碎、裂解、沉降、再悬浮,形成更小粒径的微塑料,甚至是纳米塑料,对这些小粒径微塑料和纳米塑料,我们目前仍缺乏有效的检测分析方法^[41],因此,目前收集到的环境微塑料浓度可能高估或者低估了其真实浓度。此外,已报道的微塑料丰度的计数单位很多,海水微塑料丰度的单位有“个/m³”“个/km²”和“个/L”等,个别计数单位下的丰度结果难以转换成统一单位,因此,目前海洋环境中的微塑料和纳米塑料的存量难以估算。只有在建立可靠的标准监测方法的基础上,突破对海洋环境中小粒径微塑料乃至纳米塑料的监测,并统一浓度量化单位,才能实现对海洋环境中微/纳塑料存量的初步估算。欧盟海洋垃圾技术小组针对欧洲海洋塑料垃圾以及河流垃圾管控^[42-43],提出了建议方案;美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)也推荐了采样和分析方法^[44];我国国家环境监测中心也对微塑料研究方法进行了改进。但是这些推荐的方法在实际操作中受到多种因素的限制,尚难以用于大规模海洋微塑料监测或微塑料环境存量估算。

2.3 海洋微塑料输运模拟

海洋微塑料输运模型是模拟微塑料环境行为,寻找微塑料污染的源和汇以及认识海洋微塑料传输过程的关键工具。模型的建立要基于对微塑料的性质和环境因素的假设条件的成立^[45],微塑料具有颗粒小、比表面积大的特性,表面容易富集微生物或者其他污染物导致其比重增大^[18]、沉降增加,同时海洋微塑料容易被海洋生物误食或携带而改变输运路径^[46]。但目前的输运模型没有充分考虑微塑料自身的动态变化机制,假设条件与实际情况存在一定偏差。由于目前数据有限,输运模型引用的微塑料监测数据缺乏时间和空间的连续性,数据不能代表该区域真实的微塑料含量,且模型多基于球状微塑料颗粒,而对于海洋环境中存量较多的纤维状微塑料输运过程的模拟较少,并且不同形态微塑料的输运参数(例如,粗糙度、沉降速率和再悬浮速率等)也不相同^[47]。准确的输运模型除需要全面考虑微塑料自身特性以外,还应充分考虑海况、地形和天气等外部环境因素对微塑料传输的影响。

2.4 海洋微塑料潜在风险评估体系的建立

与大粒径微塑料相比,小粒径微塑料甚至纳米塑料更容易被海洋生物误食产生毒害作用,而具有更高的生态风险^[48]。但这些微纳塑料目前尚无可靠的分离富集和检测分析的方法^[41],因此,海洋环境中由微纳塑料造成的潜在风险难以评估。尽管野外实验证明了微塑料在海洋环境中广泛分布^[8-13],但目前仍还缺少直接证据证明微塑料对海洋生态系统的影响。同时已有的室内毒理实验多基于“非环境特征的微塑料”(例如,直接合成的聚苯乙烯 PS 颗粒)^[49-50],且使用的微塑料浓度远高于海水中微塑料的浓度^[45],加之海洋环境中不同营养级的海洋生物在食物链传递过程中由微塑料暴露引起的毒性响应并没有完全确定,因此,目前尚不清楚实际环境浓度下具有环境特征的塑料(例如,纤维)对海洋生物可能产生的毒性效应,当前的毒理实验结果尚不能用于准确评估海洋环境中微塑料的生态风险。基于海洋环境中微塑料普遍存在的事实,已有研究初步利用聚合物单体毒性和微塑料的环境浓度对海洋环境中的微塑料进行了生态风险评估^[51-53]。其中,基于聚合物毒性的风险评估方案忽略了添加剂、增塑剂以及吸附污染物(有机污染物和重金属)等的毒性效应,且聚酯纤维、人造丝等毒性数据的短缺可能导致毒性评估结果偏低^[53]。生态风险评价绝非易事,有限的微纳塑料环境浓度数据以及目前存在缺陷的风险评估框架,暂不能支持对海洋环境中微纳塑料风险的全面评价。

3 海洋微塑料污染研究展望

3.1 数据可比性和方法标准化

微塑料在海洋环境中的非均匀分布和研究目标的不同导致在海洋调查中难以使用一套标准化的采样方法。应针对不同的调查目标, 建立相应的标准化采样方法, 并增加不同采样方法下获得的数据的可比性。同时建立标准的分离和检测分析方法也是海洋微纳塑料研究的重要任务, 应平衡不同方法的优缺点, 开发建立针对不同粒径的塑料颗粒的标准分离和检测分析方法, 统一量化和表征微纳塑料丰度和特征参数, 从而提高海洋塑料污染监测和报道的准确性和全面性。常规监测和科学研究可以建立不同的标准方法, 但一定要充分关注不同方法可能带来的差异。

3.2 生态风险评价

构建具有环境浓度和特征的微纳塑料生态毒理学研究方法和量化表征体系。鉴于海洋环境中微塑料处于动态变化中, 实验室内可从研究海洋塑料垃圾到小粒径微塑料和各级纳米塑料的过程入手^[30], 实现根据塑料垃圾排放量估算海洋微纳塑料的存量, 进而完善不同粒径微纳塑料生态风险效应模型。

3.3 国际合作

海洋微塑料跨境污染的特点使其从局部环境问题逐渐演变成一个需要全球各个国家关注的复杂国际环境问题。目前, 国际上正积极推进制定具有全球约束力的海洋塑料垃圾和微塑料污染管控的行动计划^[45]。各个国家都应主动加强与周边国家开展海洋微塑料污染治理的协作, 研究制定区域性海洋微塑料污染监测和管控的行动方案, 共同努力实现可持续发展的目标。

3.4 政策研究

2022年6月举行的联合国海洋大会边会上代表们普遍认为我们应该对海洋垃圾和微塑料问题采取行动, 海洋微塑料问题的解决最终要依靠全球各国相关政策和法规的实施。目前国际社会还没有进行海洋微塑料的相关立法^[54], 各国都应在充分总结海洋微塑料污染现状的基础上明确海洋微塑料治理的重点, 研究相关政策并建立相关机制。中国作为海洋大国和工业化大国, 已经重视利用国内法规控制海洋垃圾和微塑料污染, 在完善海洋微塑料治理法律体系方面充分体现了负责任大国的形象。我们仍需紧跟国际前沿, 促进国内法和国际法协同控制和治理海洋微塑料污染。

参考文献 (References):

- [1] CARPENTER E J, SMITH K L. Plastics on the Sargasso Sea surface[J]. *Science*, 1972, 175(4027): 1240-1241.
- [2] WONG C S, GREEN D R, CRETNEY W J. Quantitative tar and plastic waste distributions in the Pacific Ocean[J]. *Nature*, 1974, 247(5435): 30-32.
- [3] 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.
- [4] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic?[J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838.
- [5] United Nations Environmental Programme. UNEP Year Book 2011: emerging issues in our global environment[M/OL]. United Kingdom: Green Ink Ltd, 2011. (2011-02)[2022-07-01]. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8276>.
- [6] United Nations Environmental Programme. UNEP Year Book 2014: emerging issues in our global environment[M/OL]. Nairobi: UNEP Division of Early Warning and Assessment, 2014. [2022-07-01]. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/9130>.
- [7] COURTENE-JONES W, QUINN B, GARY S F, et al. Microplastic pollution identified in deep-sea water and ingested by benthic invertebrates

- in the Rockall Trough, North Atlantic Ocean[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231(1): 271-280.
- [8] ZHAO S Y, ZHU L X, 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.
- [9] BAKIR A, DESENDER M, WILKINSON T, et al. Occurrence and abundance of meso and microplastics in sediment, surface waters, and marine biota from the South Pacific region[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 160(12): 111572.
- [10] JONES-WILLIAMS K, GALLOWAY T, COLE M, et al. Close Encounters-Microplastic availability to pelagic amphipods in sub-Antarctic and Antarctic surface waters[J]. *Environment International*, 2020, 140: 105792.
- [11] 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.
- [12] RYAN P G, SUARIA G, PEROLD V, et al. Sampling microfibrils at the sea surface: the effects of mesh size, filtered volume and water depth[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 258: 113413.
- [13] PENG X T, CHEN M, CHEN S, et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean[J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2018(9): 1-5.
- [14] LIU M Y, DING Y C, HUANG P, et al. Microplastics in the western Pacific and South China Sea: spatial variations reveal the impact of Kuroshio intrusion[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288(10): 117745.
- [15] LI C J, WANG X H, LIU K, et al. Pelagic microplastics in surface water of the Eastern Indian Ocean during monsoon transition period: abundance, distribution, and characteristics[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 755: 142629.
- [16] 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.
- [17] VIBHATABANDHU P, SRITHONGOUTHAI S. Abundance and characteristics of microplastics contaminating the surface water of the inner Gulf of Thailand[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2022, 233(2): 1-14.
- [18] CÓZAR A, ECHEVARRÍA F, GONZÁLEZ-GORDILLO J I, et al. Plastic debris in the open ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(28): 10239-10244.
- [19] ERIKSEN M, LEBRETON L C M, CARSON H S, 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.
- [20] 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): 1-15.
- [21] CÓZAR A, MARTÍ E, DUARTE C M, et al. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation[J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): e1600582.
- [22] HIDALGO-RUZ V, GUTOW L, THOMPSON R C, et al. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(6): 3060-3075.
- [23] FOK L, LAM T W L, LI H X, et al. A meta-analysis of methodologies adopted by microplastic studies in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 135371.
- [24] LINDEQUE P K, COLE M, COPPOCK R L, et al. Are we underestimating microplastic abundance in the marine environment? A comparison of microplastic capture with nets of different mesh-size[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114721.
- [25] JIANG C B, YIN L S, WEN X F, et al. Microplastics in sediment and surface water of West Dongting Lake and South Dongting Lake: abundance, source and composition[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(10): 2164.
- [26] BAI M Y, LIN Y, HURLEY R R, et al. Controlling factors of microplastic riverine flux and implications for reliable monitoring strategy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 56(1): 48-61.
- [27] ZHENG Y F, LI J X, SUN C J, et al. Comparative study of three sampling methods for microplastics analysis in seawater[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765: 144495.
- [28] LI D J, LIU K, LI C J, et al. Profiling the vertical transport of microplastics in the West Pacific Ocean and the East Indian Ocean with a novel in situ filtration technique[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(20): 12979-12988.
- [29] LIU K, COURTENE-JONES W, WANG X H, et al. Elucidating the vertical transport of microplastics in the water column: a review of sampling methodologies and distributions[J]. *Water Research*, 2020, 186: 116403.
- [30] 蔡慧文, 杜方施, 张微微, 等. 环境微纳塑料的分析方法进展[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(11): 9. CAI H W, DU F N, ZHANG W W, et al. Research progress of microplastics and nanoplastics in environment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(11): 9.
- [31] 刘恢弘, 陈卫, 陶辉, 等. 水中微塑料污染研究进展与热点分析[J]. *净水技术*, 2022, 41(4): 9. LIU H H, CHEN W, TAO H, et al. Research progress and hotspots analysis of microplastics pollution in water[J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(4): 14-22.
- [32] SETÄLÄ O, MAGNUSSON K, LEHTINIEMI M, et al. Distribution and abundance of surface water microlitter in the Baltic Sea: a comparison

- son of two sampling methods[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 110(1): 177-183.
- [33] BARROWS A P W, CATHEY S E, PETERSEN C W. Marine environment microfiber contamination: global patterns and the diversity of microparticle origins[J]. *Environmental pollution*, 2018, 237: 275-284.
- [34] DING J F, LI J X, SUN C J, et al. Detection of microplastics in local marine organisms using a multi-technology system[J]. *Analytical Methods*, 2019, 11(1): 78-87.
- [35] LIN F, ZHANG Q Z, XIE J, et al. Microplastics in biota and surface seawater from tropical aquaculture area in Hainan, China[J]. *Gondwana Research*, 2022, 108: 41-48.
- [36] JUNG S, CHO S H, KIM K H, et al. Progress in quantitative analysis of microplastics in the environment: a review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 422: 130154.
- [37] KÄPPLER A, FISCHER D, OBERBECKMANN S, et al. Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both?[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2016, 408(29): 8377-8391.
- [38] SU L, DU F N, SUN C J, et al. Linking the physical and chemical characteristics of single small microplastics or nanoplastics via photolithographic silicon substrates[J]. *Analytical Methods*, 2022, 14(15): 1547-1552.
- [39] 赵茜茜, 李伟. 环境中微塑料检测方法研究进展[J]. *云南化工*, 2022, 49(3): 9-11. ZHAO X R, LI W. Research progress on detection methods of micro plastics in environment[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2022, 49(3): 9-11.
- [40] 徐向荣, 孙承君, 季荣, 等. 加强海洋微塑料的生态和健康危害研究 提升风险管控能力[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(10): 9. XU X R, SUN C J, JI R, et al. Strengthening ecological and health hazards study of marine microplastics and promoting risk regulatory and control capacities[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(10): 9.
- [41] CAI H W, XU E G B, DU F N, et al. Analysis of environmental nanoplastics: progress and challenges[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 410: 128208.
- [42] GALGANI F, HANKE G, WERNER S, et al. Guidance on monitoring of marine litter in European seas[M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- [43] European Commission, Joint Research Centre. Riverine litter monitoring: options and recommendations? MSFD GES TG marine litter thematic report[M]. Brussels: Publications Office of the European Union, 2016.
- [44] MASURA J, BAKER J, FOSTER G, et al. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments[EB/OL]. (2015-07) [2022-04-11]. https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/noaa_microplastics_methods_manual.pdf.
- [45] 李道季. 海洋微塑料研究焦点及存在的科学认知误区[J]. *科技导报*, 2020, 38(14): 46-53. LI D J. Focus and scientific cognition misconceptions on marine microplastics studies[J]. *Science Guide*, 2020, 38(14): 46-53.
- [46] MÖHLENKAMP P, PURSER A, THOMSEN L. Plastic microbeads from cosmetic products: an experimental study of their hydrodynamic behaviour, vertical transport and resuspension in phytoplankton and sediment aggregates[J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2018, 6: 61.
- [47] 张晨, 王清, 赵建民. 海洋微塑料运输的数值模拟研究进展[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(1): 72-83. ZHANG C, WANG Q, ZHAO J M. Numerical simulation of transportation of marine microplastics: a review[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(1): 72-83.
- [48] DING J F, SUN C J, LI J X, et al. Microplastics in global bivalve mollusks: a call for protocol standardization[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 438: 129490.
- [49] 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.
- [50] HWANG J, CHOI D, HAN S, et al. Potential toxicity of polystyrene microplastic particles[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1-12.
- [51] DING J F, SUN Y M, HE C F, et al. Towards risk assessments of microplastics in bivalve mollusks globally[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(2): 288.
- [52] XU P, PENG G Y, SU L, et al. Microplastic risk assessment in surface waters: a case study in the Changjiang Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 133: 647-654.
- [53] 彭谷雨. 沉积环境中的微塑料——河口区、海岸带及深海的比较研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020. PENG G Y. Microplastics in sedimentation environments: a comparative study in estuaries, coastal zones and the deep sea[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [54] 张相君, 魏寒冰. 海洋微塑料污染的国际法和国内法协同规制路径[J]. *中国海商法研究*, 2021, 32(2): 92-101. ZHANG X J, WEI H B. Collaborative regulating marine micro-plastics with international and domestic law[J]. *Chinese Journal of Maritime Law*, 2021, 32(2): 92-101.

Challenges and Perspectives of Marine Microplastic Research

SUN Cheng-jun^{1,2}, DING Jin-feng¹, GAO Feng-lei¹, LI Jing-xi¹

(1. *Marine Bioresource and Environment Research Center, First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Laboratory of Marine Drugs and Bioproducts, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China*)

Abstract: Marine microplastic pollution is one of the most concerned global environmental problems. In the past ten years, marine microplastic research has developed rapidly, but it faces some unresolved key scientific challenges, including the technical breakthroughs in the detection of small-sized microplastics and nanoplastics, the establishment of standardized detection and analysis methods of microplastics and nanoplastics, the optimization of marine microplastic transportation models, the improvement of ecological risk assessment schemes, and etc. This paper provides an overview of the current status of microplastic pollution in offshore, oceanic and polar regions. We summarize the challenges of marine microplastic research in sample collection, detection, and analysis, as well as the existing deficiencies in the marine microplastic stock estimation, transportation simulation, and ecological risk assessment. We also provide suggestions for future microplastic research, aiming to provide references for marine microplastics' routine monitoring, scientific research, risk assessment, and governance.

Key words: microplastics; nanoplastics; analytical methods; ecological risks

Received: July 1, 2022