

海洋微塑料物理迁移过程研究进展与展望

李 嘉^{1,2}, 李艳芳¹, 张 华¹

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 微塑料作为一种新型污染物, 在海洋中广泛分布, 给海洋生态系统带来潜在的生态风险。充分认识海洋微塑料迁移途径和归趋行为, 掌握其运移规律及影响因素, 能够为治理海洋微塑料污染提供理论指导和科学依据。本文综述了微塑料在海洋中物理迁移过程的研究进展, 系统分析了影响微塑料运移过程的各种影响因素, 包括风、浪、流等海洋动力过程, 生物作用和塑料的粒径、形状等物理性质; 并对该领域未来的研究工作进行了展望。

关键词: 微塑料; 迁移过程; 影响因素

中图分类号: X55 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-3096(2018)05-0155-08

DOI: 10.11759/hyxx20171026001

塑料作为一种有机合成高分子材料, 在日常生产和生活中应用十分广泛。全球塑料制品年产量超过 2.6 亿吨^[1]。塑料制品的大规模使用产生大量塑料垃圾, 最终以不同途径进入海洋。据估算, 到 2015 年被排入海洋环境中的塑料垃圾超过 900 万吨。海洋中的塑料垃圾主要分为塑料大颗粒和微型塑料^[2]。Thompson 等^[3]首次使用“微塑料”一词来描述直径小于 20 μm 的塑料碎片。目前关于微塑料的尺寸大小还没有统一的定义, 一般将尺寸小于 5 mm 的塑料统称为微塑料(microplastics)。依据来源不同, 海洋微塑料被分为初生微塑料和次生微塑料^[4]; 前者指的是被直接排放至海洋中的微型塑料, 后者指的是由大型塑料裂解而成的微小塑料碎片。

世界各国的研究人员相继在表层海水^[5-7]、中层海水^[8-10]和海底沉积物^[11-13]中发现了微塑料的存在。在海洋环境中广泛分布的微塑料对海洋生物健康构成严重威胁^[14]。微塑料能够粘附在藻类细胞表面并影响藻类进行光合作用^[15]。由于微塑料的尺寸范围与砂粒和藻类的相近, 微塑料很容易被浮游生物、双壳类或鱼类摄入体内^[16], 影响水生生物成活率及生长发育。微塑料本身含有的添加剂在其老化过程中会快速释放到海水中^[17], 毒害海洋生物。微塑料还能够富集和携带海水中的疏水性有机污染物^[18]或重金属^[19], 共同对海洋生物产生复合毒性效应。研究表明, 富集在微塑料表面的有机污染物在生物肠道环境下的解吸量是其在海水环境中的两倍^[20]。此外, 微

塑料能够通过食物网进行传递, 在食物网顶端生物体内富集^[21-22]。因此, 微塑料污染已经成为国际广泛关注的紧迫环境问题, 也成为海洋科学领域的研究热点。文献数据库(Web of Science)的检索结果显示, 有关微塑料的论文发表数量超过 1 200 篇, 并呈逐年增长趋势, 近 3 年发表的论文数量占总数的 45.9%。

目前, 关于海洋微塑料的研究内容主要集中在其来源、环境浓度、生物效应和化学反应过程等方面^[23], 而关于微塑料物理迁移过程的研究相对较少。研究微塑料在海洋环境中的物理迁移过程, 加深对微塑料迁移规律的认识, 能够准确锁定微塑料在海洋中的汇集区域, 提高海洋垃圾的清理效率, 为治理海洋微塑料污染提供理论指导。国外学者已经开始研究微塑料在环境中的迁移过程, 并在数值模拟和理论计算等方面取得了一定成果; 相对而言, 国内在微塑料领域的研究处于刚起步阶段, 关注点主要集中在国内微塑料污染调查及其生态效应方面。本文通过文献检索的方式, 对现有的关于海洋微塑料物理迁移的研究成果进行总结。首先, 对海洋环境

收稿日期: 2017-10-26; 修回日期: 2018-02-28

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2016YFC1402202); 中国科学院对外合作重点项目(KYSB20160003)

[Foundation: National Key R & D projects, No. 2016YFC1402202; The Key Projects of International Cooperation of Chinese Academy of Sciences, No. KYSB20160003]

作者简介: 李嘉(1990-), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 从事新型污染物在河口区域的迁移模拟研究, Email: jiali@yic.ac.cn; 张华, 通信作者, 研究员, 从事水文过程模拟研究, Email: hzhang@yic.ac.cn

中微塑料可能发生的物理迁移过程进行系统综述。其次,探讨了外部环境因素对海洋环境中微塑料迁移过程的影响。最后,对微塑料迁移过程的未来发展方向进行展望。

1 微塑料在海洋环境中的物理迁移过程

微塑料在海洋中的迁移过程包括漂流、悬浮、沉降(缓慢沉降和快速沉降)、再悬浮、搁浅、再漂浮和埋藏等(图 1)。这些过程可以循环往复地发生,也可能自发终止。例如,漂浮微塑料由于表面生物附着或泥沙絮凝等原因导致其密度逐渐增大,发生悬浮、沉降过程;沉入海底的微塑料在海流的作用下可能发生再悬浮或漂浮,也可能在海底发生水平方向的移动或者被沉积物埋藏。这些复杂的迁移过程导致微塑料在海洋中呈现明显的垂向分布特征:底层沉积物中的微塑料数量远大于表层水,中层水中微塑料的含量最少^[24],海岸沉积物中的微塑料含量高于深海沉积物^[25]。此外,微塑料可能在洋流和风力的作用下进入大洋^[26],也可能被海浪冲刷上岸发生搁浅,搁浅的微塑料可能发生再漂浮,重新进入海洋中。总之,由于受自身物理性质和环境因素(风应力,波浪,生物作用等)的共同影响,微塑料在海洋环境中的输运过程十分复杂。

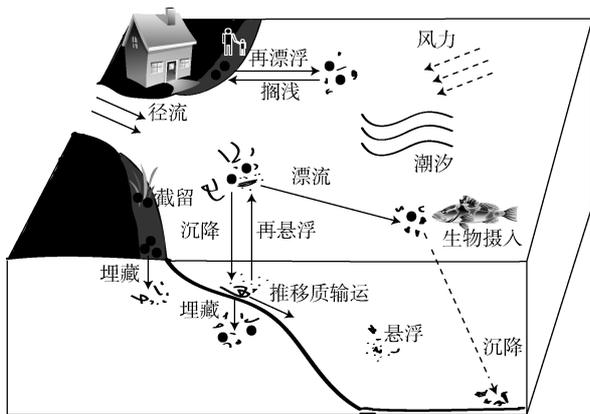


图 1 海洋微塑料的迁移过程

Fig. 1 The physical transportation processes of marine microplastics

1.1 微塑料的漂流过程

密度低于海水的微塑料进入海洋后,将浮在海水表面进行漂流。漂浮微塑料具有可视性,这为观测其迁移途径提供了可能。早期研究中,人们在海洋中

大型漂浮物体的迁移模拟及海洋溢油污染模拟研究方面积累了较为丰富的经验,并开发了多种数学模型用于研究漂浮物体的归趋过程。在此基础上,通过数值模拟的方式似乎可以揭示漂浮微塑料的输运过程。但是,由于微塑料尺寸较小,受力复杂,研究漂浮微塑料的迁移过程成为一项具有挑战性的工作。

目前,人们对漂浮微塑料迁移过程的研究主要集中于海流和风漂流过程,而水动力模型和溢油模型的充分发展,为系统阐明漂浮微塑料在海洋中的运移提供了关键技术。考虑海流和风场的共同影响,结合原位监测数据和卫星遥感数据,以及模拟海洋流场的水动力学模型,可以实现对漂浮微塑料迁移过程的模拟。目前,用于研究漂浮塑料迁移过程的海洋环流模型主要包括 NLOM/NCOM, HYCOM, SODA, ECCO 和 ECMWF ORA-S3 等^[27]。Le Henaff 等^[28]假设塑料碎片的迁移速度等于水流速和风漂移速度的矢量和,发现溢油模型的建模方法非常适用于漂浮塑料碎片。目前,在漂浮微塑料模拟研究中常用的溢油模型主要有 GNOME^[29]和 OSCAR^[30]。

研究漂浮微塑料的迁移过程,通常需要考虑风应力的影响;而对于那些被表层海水淹没的微塑料,风应力的影响则可以忽略不计。Le Henaff 等^[28]利用 HYCOM-CMS 模型研究粒径范围为 1~500 μm 的漂浮粒子在墨西哥湾的输运情况,结果表明,海流和风漂流是影响粒子迁移轨迹的重要参数。此外,微塑料在尺寸,形状和密度等方面差异较大,除了选择合适的模型框架之外,还需要考虑微塑料自身物理性质的影响。Isobe 等^[31]利用二维粒子追踪模型研究了濑户内海西侧沿岸不同尺寸塑料的迁移。结果表明,微塑料的粒径越小,其向海洋方向扩散的距离越远;而大型塑料在 Stokes 漂移的作用下发生选择性向岸移动。然而,在这项研究中,作者假设微塑料的数量在一定范围或时间内是恒定不变的,即忽略了陆源负荷量及微塑料的自身裂解速率。Critchell 等^[32]利用 SLIM 模型研究了不同情景中微塑料在澳大利亚大堡礁区域的迁移规律,发现微塑料污染源的位置是影响其迁移的最重要因素。例如,在靠近岸边的顺风向(风吹向海洋)的地方释放的微塑料在风应力和波浪的作用下漂向海洋;而在靠近岸边的逆风向(风吹向陆地)的地方释放的大部分微塑料很快被冲刷上岸,剩下的微塑料则滞留在释放点附近。同时,他们还发现塑料在海里的裂解速度比在沙滩上的分解速度对模拟结果的影响更大。各种物理过程

对微塑料运移的影响依赖于数值模型中的相应参数, 目前已有的研究结果中, 大部分模型参数都是经验值或理论值。在未来的研究中, 还需开展相关的模拟实验来确定微塑料的物理迁移过程参数, 从而提高模拟结果的准确度。

1.2 微塑料的沉降过程

在所有的塑料制品中, 大约有一半塑料的密度大于海水密度^[33], 这些微塑料在海洋环境中以垂向运动为主。因此, 沉降是高密度微塑料在海洋中的主要运动形式。沉降速度是模拟和表征高密度微塑料在自然水体中迁移扩散的关键参数^[34]。如果沉降速度很大, 高密度微塑料会在其释放点附近迅速沉降; 如果沉降速度很小, 高密度微塑料将会随波浪移动到远海沉降^[23]。由于高密度微塑料不像漂浮塑料那样具有可视性的特点, 所以很难直观地研究高密度微塑料在自然海水中的迁移过程。为此, 相关学者对高密度微塑料的沉降过程进行了理论模拟和实验模拟研究。

高密度微塑料与天然沉积物颗粒在几何特性上具有相似性, 所以国外学者将沉积物颗粒的沉降速率公式应用到微塑料沉降速度的计算中。例如, Chubarenko 等^[23]使用沉积物沉降公式计算球形塑料颗粒的沉降速度, 在理想条件下, 直径为 5 mm 的微塑料颗粒沉到波罗地海海底(深度为 250 m)的时间不超过 0.5 h; 直径为 0.5 mm 的微塑料颗粒沉到海底的时间不超过 18 h。但他们也指出, 沉积物颗粒沉降公式只适用于球形塑料颗粒, 并不适用于纤维状和片状的塑料颗粒。由于高密度微塑料颗粒的物理性质(密度和形状)与泥沙颗粒存在很大差异, 需要对传统泥沙沉降和输移模型进行改进才能应用于高密度微塑料沉降输移模拟, 沉降控制方程中沉降速度和临界剪切应力等关键参数, 需要建立在充分的理论分析和实验观测基础上。Kowalski 等^[35]利用沉降柱实验测试了不同形状的微塑料的沉降速度, 并建立了一个新公式, 该公式适用于计算长度范围为 0.5~5 mm 的纤维状微塑料和直径范围为 0.15~0.71 mm 的球形微塑料的沉降速度。

目前用来测算颗粒沉降速度的装置包括沉降柱和大型水槽。Kowalski 等^[35]利用矩形玻璃沉降柱和秒表分别研究了不同类型微塑料在纯水和海水中的沉降速率。结果表明, 微塑料的沉降速率不仅仅受微塑料类型、密度和尺寸的影响, 形状对其沉降速度的影响也非常大。然而, 沉降柱装置并不能准确预测微

塑料在自然水体中的沉降规律。首先, 沉降柱实验处于静止状态^[36], 并不能体现波浪和剪切应力的影响。其次, 利用秒表记录单个颗粒的移动时间, 效率较低, 误差较大。大型水槽装置常被用于水利学研究, 可动态研究微塑料颗粒在不同流速、不同水位和有波浪等条件下的沉降速率; 同时可以研究不同底质类型(砂底、泥底)的影响。因此, 水槽实验的模拟结果更接近自然海水条件。由于微塑料颗粒较小, 当大量微塑料颗粒同时在水槽中移动时, 很难通过尺子和秒表等工具来测量其迁移速度。随着计算机技术的发展和图像采集处理技术的创新, 不少学者已经借助流动显示和图像处理相结合的手段来研究颗粒的移动规律。例如, Ballent 等^[37]利用视频分析的方法计算了尺寸约为 5 mm 的高密度黑色塑料颗粒在沉降柱中的平均沉降速度, 大大提高了沉降速率的计算效率和准确度。

目前, 已有国外学者尝试利用数值模型预测高密度微塑料在海洋中的迁移过程。例如, Ballent 等^[37]应用 MOHID Water 模型预测了葡萄牙纳托雷峡谷底部高密度微塑料的迁移规律, 结果表明直径约为 5 mm 的高密度塑料颗粒在纳托雷峡谷海域的沉降速度非常小(<1 km/a), 受潮汐底部剪切力的作用, 沉降在峡谷上部的微塑料会缓慢向峡谷底部移动。Critchell 等^[32]利用 SLIM 模型研究了高密度微塑料在澳大利亚大堡礁区域的迁移规律, 结果表明大部分高密度微塑料在释放点附近海域沉降。

1.3 微塑料的推移质输运过程

微塑料沉降到海底后, 在海流的作用下可能发生推移质输运。其在海底的传输方式可能随海流流动强度的大小而变化, 当流速较小时, 微塑料颗粒在海底主要以滑动或滚动为主; 随着流速增大, 滑动或滚动颗粒可变为跳跃, 跳跃可变为悬浮。Ballent 等^[37]通过实验研究了剪切应力与高密度微塑料推移质输运之间的关系, 结果表明, 平均密度为 $1055 \text{ kg/m}^3 \pm 36 \text{ kg/m}^3$ 的微塑料颗粒表现出统一的再悬浮行为。当剪切应力为 0.014 N/m^2 时, 沉降的高密度微塑料开始在海底发生横向移动; 当剪切应力为 0.025 N/m^2 时, 大约 50% 的微塑料颗粒开始移动; 当剪切应力为 0.14 N/m^2 时, 75% 的微塑料发生再悬浮; 当剪切应力减小至 0.087 N/m^2 时, 悬浮的微塑料又发生沉降。

1.4 微塑料的搁浅及再漂浮过程

海洋中的漂浮微塑料可能随洋流进入远海, 也

可能在涨潮期间被冲到海滩, 并发生搁浅。然而, 搁浅在海滩上的微塑料可能在风力和潮汐的作用下, 重新回到海洋中, 即发生再漂浮过程^[38]。Kataoka 等^[38]通过标记——回收实验研究了大型搁浅塑料的迁移过程, 结果表明海滩上的大多数漂浮塑料沿岸迁移并汇聚在汇合区, 然后被近岸流卷入海水中。同时, 他们还指出搁浅塑料在海滩上的停留时间不到 1 a。由于大型塑料可以在沙滩发生老化, 并裂解成次生微塑料, 所以这些搁浅的微塑料也能像大型塑料一样发生再漂浮过程。Isobe 等^[31]通过野外调查和模型计算证实了这一过程, 即搁浅的微塑料可以发生再漂浮。

1.5 微塑料的埋藏过程

海滩被认为是微塑料的汇集区^[6]。首先, 由于高温和强太阳辐射的双重作用, 大型塑料在海滩上的裂解速度更快, 因此在沙滩上可以发现高丰度的微小塑料碎片^[6]; 其次, 在潮汐的作用下, 海水中的微塑料能够在海滩发生搁浅。这些搁浅的微塑料除了再次进入海洋之外, 还可能发生埋藏过程^[38]。Carson 等^[13]调查了美国夏威夷卡米罗海滩不同深度塑料碎片的含量。结果表明, 0~5 cm 深的沙滩中微塑料(0~5 mm)数量最少, 而 20~25 cm 深的海滩中微塑料的数量最多。说明随着时间的延长, 被埋藏的微塑料可能会逐渐向地下移动。Costa 等^[39]在巴西东北海岸的潮间带沙滩中也发现了被埋藏的高度风化的微塑料。此外, 有研究证实了微塑料可以被埋藏在沉积物中^[40]。当流速长期较低时, 即微塑料的沉降时间远大于其再悬浮时间, 沉入海底的微塑料也将被不断沉降的悬浮颗粒物所覆盖, 并发生埋藏^[41]。

2 影响微塑料运移过程的因素

2.1 形状

海洋中的微塑料在阳光和波浪等外力的侵蚀下, 最终会呈现出多种多样的形状。据报道, 海洋中微塑料的常见形状包括球形、薄膜状、纤维状、扁平状和不规则的几何形^[6]。微塑料的形状会影响其在海洋中的漂流过程。Ter Halle 等^[42]指出, 立方体的微塑料在漂浮过程中受风力的影响将发生不停的翻转; 而扁平状微塑料与水面接触面积大, 所以很难发生翻转。此外, 形状对高密度微塑料的沉降行为有较大影响, 沉降实验表明, 圆柱形高密度微塑料在沉降过程中会发生旋转和摇摆, 因此其沉降轨迹不是直线型; 纤维状高密度微塑料则沿着它们长轴的垂直

方向下沉^[34]。不同形状的微塑料具有不同的表面积, 其表面生物膜的附着速度会随形状发生改变, 进而影响沉降速度。由于生物附着, 不同形状漂浮塑料的密度最先超过海水密度并开始下沉的时间倍数关系为 63(球形)/2(纤维状)/1(薄膜状), 即薄膜状微塑料最先下沉, 其次是纤维状, 而球形微塑料的沉降速度最慢^[23]。调查研究也表明河口沉积物和深海底层沉积物中的微塑料形状以纤维状为主^[43-45]。另外, 形状也可能对微塑料的其它物理迁移过程构成影响。例如, 搁浅的立方体状微塑料颗粒在风力或海浪作用下, 容易发生翻滚, 这可能会加速其再漂浮过程。沉入海底的立方体状微塑料颗粒相比于片状微塑料而言, 可能也更易发生推移质输运。然而, 目前还没有具体的研究揭示微塑料形状对除漂浮和沉降之外的物理迁移过程的影响。

2.2 尺寸

“尺寸”是界定微塑料的主要标准。海洋中的微塑料包含了一个宽泛的尺寸范围(<5 mm)。现有的调查结果显示, 海洋中漂浮塑料的尺寸范围呈正态分布, 且集中在 1.5~2.0 mm^[8]。不同尺寸微塑料通常具有不同的沉降速率, 即尺寸可以影响微塑料的沉降过程。这是因为, 微塑料的尺寸大小可以影响其雷诺系数(R_e), 雷诺系数又影响着拖曳系数(C_d)的取值, 而拖曳系数是决定颗粒沉降速率的关键参数。雷诺系数通常被用来界定物体周围流的类型。有研究表明, 在相同条件下, 微塑料的尺寸越大, 其雷诺系数越大^[34]。尺寸介于 0.5~5 mm 的微塑料的雷诺系数为 2.5~625, 处于过渡流的范围^[23-24, 41]。对于同种类型的微塑料而言, 其沉降速率随尺寸增大而加快^[34]。Isobe 等^[31]通过调查发现, 微塑料的粒径越小, 其离岸的距离越远。Besseling 等^[46]通过模型计算得出, 粒径约为 5 μm 的塑料颗粒在河水中发生沉降的概率最低(18%~25%), 表明这些微塑料容易随河水进入海洋中; 而比之小或比之大的微塑料在河流中容易发生沉降。

2.3 生物作用

生物作用可改变微塑料的迁移途径和输运方式。一方面, 微塑料可以被水生生物摄入体内, 从而改变微塑料原有的迁移途径。被生物摄入体内的微塑料可能沿着食物链发生远距离传输。另一方面, 生物附着可改变微塑料密度, 从而影响微塑料的输运方式。在无表面附着的情况下, 微塑料的密度范围为 0.008~2.3 g/cm^3 ^[23]。密度低于海水的微塑料通常漂浮

在海面,在风场和海流的共同作用下发生远距离迁移,并在副热带涡旋区汇集^[43]。随着暴露时间的延长,漂浮微塑料表面会附着生物膜^[33],导致其密度不断增大^[47]。当其密度接近甚至超过海水密度时,这些微塑料将悬浮在中层水体并逐渐向海底沉降^[8]。野外调查结果证实了这一过程的存在。例如,瑞典渔民在斯加拉克海峡底部发现了大量表面附着海藻的低密度聚乙烯^[48]。因此,不少学者认为深海是微塑料的主要汇集区,海洋表层的微塑料最终会沉积到深海。然而,也有研究指出,部分表面附着生物膜的漂浮微塑料被海水浸没后,其表面附着的生物膜能够快速消除,在浮力的作用下,这些微塑料又重新回到海水表面进行漂流^[49]。

滨海植被对于微塑料的迁移具有拦截作用。海洋中的微塑料在天文大潮或风暴潮期间可能被冲至潮上带区域。在风的作用下,这些微塑料可能会进一步向陆地方向移动,最后进入滨海沙生植被区而被拦截,从而限制其水平方向的移动。Garrity 等^[50]通过标记——回收实验证实了植被可以拦截塑料颗粒。我们前期的调查发现,广西钦州湾潮上带沙生植物中夹杂着大量聚苯乙烯泡沫碎屑(数据未发表)。此外,Nor 等^[51]在红树林沉积物中也发现了较多数量的微塑料,说明红树林也能干扰微塑料在海水中的迁移。

2.4 极端天气

极端天气,例如强风和风暴潮可以影响海流运动,加剧水体垂向交换,从而影响微塑料在海洋环境中的迁移过程。Kukulka 等^[52]发现风速与漂浮微塑料丰度之间存在负相关关系,即风速增加可以提高漂浮塑料的移动速度;Browne 等^[43]通过收集表层水体中的微塑料发现,下风向水域的漂浮微塑料数量往往高于上风向区域。Yonkos 等^[53]发现暴风雨过后,美国切萨皮克海湾表层水中的微塑料数量明显增多,可能是由暴雨期间陆源微塑料随径流大量汇入或者是由沉入海底的高密度微塑料受波浪扰动发生再悬浮所引起的。Lattin 等^[54]也认为,强风会加剧海水垂向交换,从而使沉降微塑料发生再悬浮。受暴风雨影响,密度为 1.05~1.09 g/cm³ 的微塑料可以从 25~30 m 深的水层迁移至潮间带沙滩^[23]。这说明极端天气也能影响高密度微塑料在海洋中的迁移过程。

2.5 水质及水动力特征

自然水体的水质特征和水动力条件也能影响微

塑料的迁移方式。例如,某些海域可发生海水层结,海水密度在垂向上变化明显,甚至出现密度跃层,这将影响微塑料的垂向移动。盐度的变化可影响水体的浮力大小,从而间接控制特定密度范围的微塑料的迁移过程。水体流速的变化可影响底层剪切应力的变化,从而控制着高密度微塑料的推移及再悬浮过程。流向的改变将影响微塑料的漂流方向,河口区域由于受径流和潮汐影响,其盐度、流速和流向均呈现明显的变化,这将对河口水体中的微塑料的迁移过程造成影响。此外,Stokes 漂移、Langmuir 环流、风漂流、碎波浪及洋流等复杂的海洋水动力特征直接控制着微塑料在海洋中的输运。

3 研究展望

微塑料作为一种新型污染物,正逐渐引起人们的关注。当它们进入海洋环境后,由于物理、化学和生物作用的综合效应,其行为变化十分复杂,很难直接研究它们在海水环境中的迁移规律。目前,人们对于海洋中微塑料迁移过程的研究仍处于起步阶段。在未来的研究中,应该注重加强以下几个方面:

(1) 确定影响微塑料迁移的关键过程

微塑料的物理迁移过程受其自身物理性质和环境因素的共同影响,其物理迁移过程十分复杂,在一定外界条件下,同种微塑料可能发生多种迁移过程。在未来的研究中,需要对微塑料进行分类研究,通过室内模拟实验,探究裂解,聚合和附着等作用对微塑料输运的影响,计算不同物理过程对微塑料迁移的贡献率,从而确定影响微塑料迁移的关键过程。

(2) 模拟自然环境中微塑料的迁移过程

室内模拟实验与自然环境中存在较大差异,所以其模拟结果很难准确再现微塑料在真实环境中的输运方式。为此,需要在特定研究区开展相应的标记-捕获或者原位示踪实验。例如,利用具有时间序列的沉积物捕获器获取原位监测数据,辅助分析微塑料在自然海水中的沉降过程;通过释放带有荧光标记的塑料微球的方式,并结合大尺度颗粒图像测速(Large-scale Particle Image Velocimetry, LSPIV)技术,研究漂浮微塑料在自然水体中的扩散及迁移过程。同时,借助 LSPIV 技术研究大量微塑料的漂流、沉降和再悬浮等过程,获取接近真实条件下的物理过程参数,有助于揭示环境因素对微塑料迁移过程的影响。

(3) 开发新型微塑料迁移过程模型

随着计算机技术的发展,数学模型在模拟水体污染物迁移转化方面取得了长足进步。然而,现有的大多数模型的通用性较差,传统模型很难满足新型或特殊污染物模拟的要求。在未来的研究中,应该结合微塑料本身特殊的性质,尝试开发和构建适合微塑料的新型模型框架,同时涵盖水动力模块和微塑料的环境过程模块;从而提高微塑料迁移模拟结果的准确度,并为准确预测微塑料的输运提供可能。

(4) 评估微塑料在海洋中的传输通量

加强微塑料在河口区域及分层海域的迁移研究,建立合理有效的评估体系,估算微塑料入海通量和沉降通量。同时,需要进一步揭示微塑料物理性质(密度,形状及尺寸分布)、海洋动力条件和海底沉积物特性对微塑料传输通量的影响。

参考文献:

- [1] Heap B. Plastics, the environment and human health[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2009, 364(1526): 1971-1971.
- [2] Barnes D K A, Galgani F, Thompson R C, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2009, 364(1526): 1985-1998.
- [3] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic?[J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838-838.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Fok L, Cheung P K, Tang G, et al. Size distribution of stranded small plastic debris on the coast of Guangdong, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 407-412.
- [7] Ivar do Sul J A, Costa M F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185: 352-364.
- [8] Cozar A, Echevarria F, Ignacio Gonzalez-Gordillo J, et al. Plastic debris in the open ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(28): 10239-10244.
- [9] Ng K L, Obbard J P. Prevalence of microplastics in Singapore's coastal marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52(7): 761-767.
- [10] Doyle M J, Watson W, Bowlin N M, et al. Plastic particles in coastal pelagic ecosystems of the Northeast Pacific ocean[J]. *Marine Environmental Research*, 2011, 71(1): 41-52.
- [11] Van Cauwenberghe L, Vanreusel A, Mees J, et al. Microplastic pollution in deep-sea sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 495-499.
- [12] Claessens M, De Meester S, Van Landuyt L, et al. Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(10): 2199-2204.
- [13] Carson H S, Colbert S L, Kaylor M J, et al. Small plastic debris changes water movement and heat transfer through beach sediments[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1708-1713.
- [14] Bouwmeester H, Hollman P C H, Peters R J B. Potential health impact of environmentally released micro- and nanoplastics in the human food production chain: Experiences from nanotoxicology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(15): 8932-8947.
- [15] 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.
- [16] 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]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(19): 11278-11283.
- [17] Koelmans A A, Besseling E, Foekema E M. Leaching of plastic additives to marine organisms[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 187: 49-54.
- [18] Koelmans A A, Besseling E, Wegner A, et al. Plastic as a carrier of POPs to aquatic organisms: A model analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(14): 7812-7820.
- [19] Turner A, Holmes L A. Adsorption of trace metals by microplastic pellets in fresh water[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 12(5): 600-610.
- [20] Bakir A, Rowland S J, Thompson R C. Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185: 16-23.
- [21] Setälä O, Fleming-Lehtinen V, Lehtiniemi M. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185: 77-83.
- [22] Batel A, Linti F, Scherer M, et al. Transfer of benzo(a)pyrene from microplastics to *Artemia nauplii* and further to zebrafish via a trophic food web experiment: CYP1A induction and visual tracking of persistent organic pollutants[J]. *Environmental Toxicology and Chem-*

- mistry, 2016, 35(7): 1656-1666.
- [23] Chubarenko I, Bagaev A, Zobkov M, et al. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 108(1-2): 105-112.
- [24] 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.
- [25] Imhof H K, Ivleva N P, Schmid J, et al. Contamination of beach sediments of a subalpine lake with microplastic particles[J]. *Current Biology*, 2013, 23(19): R867-R868.
- [26] Edyvane K S, Dalgetty A, Hone P W, et al. Long-term marine litter monitoring in the remote great Australian Bight, South Australia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(11-12): 1060-1075.
- [27] Potemra J T. Numerical modeling with application to tracking marine debris[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 65(1-3): 42-50.
- [28] Le Henaff M, Kourafalou V H, Paris C B, et al. Surface evolution of the deepwater horizon oil spill patch: Combined effects of circulation and wind-induced drift[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(13): 7267-7273.
- [29] Beegle-Krause C J, Mts M T S. GNOME: NOAA's next-generation spill trajectory model[J]. *Oceans '99 Mts/Ieee: Riding the Crest into the 21st Century*, 1999, 1-3: 1262-1266.
- [30] Reed M, Aamo O M, Daling P S. Quantitative-analysis of alternate oil-spill response strategies using oscar[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 1995, 2(1): 67-74.
- [31] Isobe A, Kubo K, Tamura Y, et al. Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 89(1-2): 324-330.
- [32] Critchell K, Lambrechts J. Modelling accumulation of marine plastics in the coastal zone; what are the dominant physical processes?[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 171: 111-122.
- [33] Moret-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.
- [34] Khatmullina L, Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes[J]. *Marine pollution bulletin*, 2016, 114(2): 871-880.
- [35] Kowalski N, Reichardt A M, Waniek J J. Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 109(1): 310-319.
- [36] Hettler E N, Gulliver J S, Kayhanian M. An elutriation device to measure particle settling velocity in urban runoff[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(24): 5444-5453.
- [37] Ballent A, Pando S, Purser A, et al. Modelled transport of benthic marine microplastic pollution in the Nazare Canyon[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(12): 7957-7970.
- [38] Critchell K, Grech A, Schlaefer J, et al. Modelling the fate of marine debris along a complex shoreline: Lessons from the Great Barrier Reef[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 167: 414-426.
- [39] Costa M F, Silva-Cavalcanti J S, Barbosa C C, et al. Plastics buried in the inter-tidal plain of a tropical estuarine ecosystem[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011, 64(1): 339-343.
- [40] Ryan P G, Moore C J, van Franeker J A, et al. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2009, 364(1526): 1999-2012.
- [41] Nizzetto L, Bussi G, Futter M N, et al. A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments[J]. *Environmental Science-Processes & Impacts*, 2016, 18(8): 1050-1059.
- [42] ter Halle A, Ladirat L, Gendre X, et al. Understanding the fragmentation pattern of marine plastic debris[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(11): 5668-5675.
- [43] Browne M A, Galloway T S, Thompson R C. Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(9): 3404-3409.
- [44] 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.
- [45] Woodall L C, Sanchez-Vidal A, Canals M, et al. The deep sea is a major sink for microplastic debris[J]. *Royal Society Open Science*, 2014, 1(4): 1-8.
- [46] Besseling E, Quik J T K, Sun M, et al. Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: A modeling study[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 220: 540-548.
- [47] Oberbeckmann S, Loeder M G J, Labrenz M. Marine microplastic-associated biofilms-a review[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 12(5): 551-562.
- [48] Holmstrom A. Plasticfilms on bottom of skagerck[J]. *Nature*, 1975, 255(5510): 622-623.
- [49] Song Y, Andrady A L. Fouling of floating plastic debris under Biscayne Bay exposure conditions[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1991, 22(12): 608-613.
- [50] Garrity S D, Levings S C. Marine debris along the acribbean coast of Panama[J]. *Marine Pollution Bulletin*

- tin, 1993, 26(6): 317-324.
- [51] Nor N H M, Obbard J P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 79(1-2): 278-283.
- [52] Kukulka T, Proskurowski G, Moret-Ferguson S, et al. The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39: 1-6.
- [53] Yonkos L T, Friedel E A, Perez-Reyes A C, et al. Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, USA[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(24): 14195-14202.
- [54] Lattin G L, Moore C J, Zellers A F, et al. A comparison of neustonic plastic and zooplankton at different depths near the southern California shore[J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 49(4): 291-294.

Progress and prospect on the study of physical transportation of marine microplastics

LI Jia^{1, 2}, LI Yan-fang¹, ZHANG Hua¹

(1. Key Laboratory of Coastal Environment Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research (YIC), Chinese Academy of Sciences (CAS), Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Oct. 26, 2017

Key words: microplastics; transport processes; influencing factors

Abstract: As a class of emerging contaminants, microplastics are ubiquitous and abundant in the ocean. Pollution caused due to microplastics has been posing a great threat to the entire marine ecosystem. Therefore, there is an urgent need to understand the fate and transportation behaviors of microplastics in the ocean environment. A better understanding of the transportation of microplastics helps not only in identifying the location of marine microplastics but also in providing theoretical guidance and basis for the management of pollution caused due to marine microplastics. In this article, we summarize the research progress in the physical transportation of marine microplastics in the ocean and discuss the effects of different factors on transportation, including environmental factors such as wind, wave, vegetation, and water dynamics and the size and shape of plastic debris. Finally, we put forward further research on this topic.

(本文编辑: 李晓燕)