

海洋中微塑料的来源、分布及生态环境影响研究进展^{*}

孙承君^{1,2}, 蒋凤华¹, 李景喜¹, 郑立^{1,3}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所海洋生态中心, 山东 青岛 266237;

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 266237;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要:微塑料(粒径 <5 mm 的塑料)作为海洋环境中一类新型污染物正受到越来越多的关注。我们从微塑料来源、分布和生态影响等方面总结分析了近年来海洋微塑料研究的进展。结果表明,海洋中的微塑料主要来源于在阳光、风浪和海流等作用下的海上塑料垃圾的分解,陆源塑料垃圾输入、海上船只塑料垃圾的丢弃、水产养殖业漂浮装置的废弃等是海洋中塑料垃圾的主要来源。海洋微塑料分布呈全球化趋势,近岸、大洋、深海和极地都有微塑料的存在,已有研究表明深海是微塑料的主要汇集区。微塑料不但会影响藻类的光合作用,还会影响一些海洋生物的产卵量和繁殖能力,甚至会引起某些海洋生物的营养不良甚至死亡;微塑料自身含有和表面富集的污染物会在水动力作用下影响污染物的全球分布并对海洋生物产生复合毒性影响。为减少海洋塑料垃圾,控制海洋微塑料污染并为污染防治提供支撑,保护海洋环境安全和人类健康,今后的研究方向将主要包括:不同粒径微塑料的快速分离和在线鉴别方法的建立;水动力对微塑料全球迁移变化的影响;微塑料复合毒性对海洋生态环境的污染效应及机制;管理和技术体系以及相关政策法规的制定等。

关键词:微塑料;塑料污染;微塑料来源;生态影响;海洋污染;海洋垃圾

中图分类号:X55

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2016)04-0449-13

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2016.04.001

塑料是海洋垃圾的主要组成部分,约占海洋垃圾的 60%~80%,在某些地区甚至达到 90%~95%^[1],并且以每年递增的趋势增长。据报道全球每年生产的塑料超过 3 亿 t^[2],其中约有 10%的塑料会进入海洋^[3],而事实上我们所消耗的每一片塑料最终都有可能进入大海。难以降解的塑料在环境中会存在百年以上,因而会对环境造成持久影响。世界绿色和平组织 2016-08-25 发表的报告显示全世界每秒有超过 200 kg 塑料被倒入海洋^[4]。尽管对进入海洋的塑料的具体量估算存在差异,但是塑料作为海洋垃圾和污染的重要来源已经是公认的事实。随着人们环保意识的提升和科技的进步,可降解塑料的生产和使用都在增加,但其产量仍相对较少,使用时间也相对较短,并且目前还未见到海洋中塑料垃圾内可降解塑料的报道,因此在本文我们将主要讨论非可降解塑料,即普通塑料。

有关海洋塑料垃圾的最早报道在 20 世纪 70 年代^[5-6],目前在大西洋^[7]、太平洋^[8-9]、极地^[10]和深海^[11-12]都已发现存在塑料碎片污染,这些碎片主要来源于风浪和海流等外力协同作用下的大片塑料的分解。海洋中的塑料在太阳辐射下可产生光降解和破碎,形成粒径 <1 cm 甚至更小的碎片^[13-14],2004 年 Thompson 和 Russell^[14]使用微塑料描述小尺寸的塑料,此后关于微塑料的研究开始引起越来越多的科研人员关注。

* 收稿日期:2016-09-20

资助项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——海洋环境中微塑料分离鉴定技术及负载污染物特征研究(2016Q02);国家重点基础研究发展计划——超深渊生物群落及其与关键环境要素的相互作用机制研究(2015CB755904);泰山学者海外创新人才项目

作者简介:孙承君(1972-),女,山东荣成人,研究员,博士,硕士生导师,主要从事海洋生物化学、生物材料、海洋环境科学方面的研究。
E-mail:csun@fio.org.cn

(高峻 编辑)

微塑料指粒径 <5 mm的塑料碎片,其化学性质较为稳定,可在海洋环境中存在数百至数千年^[13, 15]。海洋中漂浮的微塑料不仅能够给各种微生物提供生存和繁殖场所^[16],还可以富集多种有毒化学物质^[17]。目前对微塑料潜在危害的研究刚刚起步,很多结果也仅仅限于实验室研究。因此,在全球塑料生产仍在逐年增加和微塑料污染逐步累积加重的形势下,研究微塑料的环境行为、生态影响以及微塑料污染的控制手段等已经成为海洋生态研究的重要内容和发展趋势。

1 微塑料的来源和分布

1.1 海洋微塑料污染形势严峻

海洋中的塑料垃圾近 40 a 增加了上百倍^[18]。据估算在 2010 年来自沿海国家的约 800 万 t 塑料垃圾最终会进入海洋^[19]。2004—2014 年,全球塑料产量增加了 38%。绿色和平组织专家估计,到 2020 年塑料废弃物的生产速度将达到 1980 年的 9 倍^[20],每年的产量将达到 5 000 万 t。如果处理不当,这些塑料垃圾会破碎分解成为更小的塑料颗粒,进入海洋之后将贻害无穷。目前,东亚海域已经是塑料污染的重灾区,日本海塑料污染密度是世界其他地方的 27 倍^[21],我国近海虽然仅有少量微塑料的相关数据,但已有数据显示我国近海微塑料污染已经不容忽视^[22-25]。

1.2 海洋微塑料污染源多元化

目前已知的微塑料来源包括陆源输入、滨海旅游业、船舶运输业和海上养殖捕捞业等。

陆源塑料垃圾的输入是海洋中塑料污染的主要来源之一,主要是人类生活中有意或者无意丢弃的塑料废弃物、被暴风雨冲刷到海洋的陆地上掩埋的塑料垃圾等;常用的一些洗涤剂、生活护肤品^[26]以及工业原料等均含有大量微塑料成分,这些微塑料颗粒在污水处理过程中由于颗粒小而难以去除,从而会随陆源垃圾输入进入海洋。研究表明,日常清洗衣物过程中,每次清洗可产生 1 900 多个纤维颗粒进入废水中,废水中的纤维数量可达到 100 个/L 以上^[27]。这些塑料垃圾进入到海洋后逐渐发生光降解或破碎,形成不同形貌的微塑料。塑料制品在加工、成型和储运过程中也会造成微塑料颗粒泄露。

游客在海滩上或海洋里随意丢弃的塑料产品(塑料袋、塑料瓶等)以及海上过往船舶向海洋丢弃塑料废弃物是导致海洋塑料污染增加的另一主要原因。近年来,水产业的迅速发展导致泡沫聚苯乙烯漂浮装置的大量使用,而漂浮装置的老化或者使用过程中发生的破损、破裂等都会导致这些塑料产品进入海洋而成为塑料漂浮垃圾的一个重要来源^[28]。其次,水产养殖产生的大量饲料垃圾袋的丢弃也增加了海洋环境中的塑料量及其潜在污染危害。越来越多的渔船采用塑料渔网进行捕鱼,渔具更新导致大量的破旧塑料渔网被遗弃在海洋中。据美国方面统计,渔船和商船每年要向海洋倾倒高达 29 800 多万磅塑料捕鱼用具(包括绳索、渔网等),并丢弃 5 200 多万磅的塑料包装材料^[18]。此外,突发的海上航运事故有时也会造成大量的塑料产品进入海洋。

1.3 海洋环境中微塑料的分布特征

1.3.1 微塑料在全球水域分布广泛

环境中的塑料残体可以通过风力、河流、洋流等外力进行远距离迁移^[29],污染地球上的偏远角落^[13],上到高山湖泊,下到深海沉积物,到处都有塑料污染的存在。在大洋,尤其是北大西洋和太平洋表面以及深海均存在着塑料碎片污染^[30-31]。大洋上的塑料碎片主要分布在大洋的环流区(图 1)。西班牙国家研究委员会马拉斯皮纳(Malaspina)海洋考察队发现,全球海洋中存在的五大塑料碎片聚集地基本与海洋表面的五大环流所在地重合^[13]。在北太平洋副热带环流区,塑料颗粒含量达到 3 276 个/ m^3 和 250 mg/ m^3 ^[32]。Cózar 等^[13]的研究结果显示微塑料在这些涡旋区的分布呈外低内高的趋势:涡旋外缘的微塑料含量通常小于 50 g/ km^2 ,接近涡旋中心

区域的微塑料含量一般大于 $500 \text{ g}/\text{km}^2$,而涡旋中心区域微塑料含量通常高达 $1\,500\sim 2\,500 \text{ g}/\text{km}^2$,是涡旋外缘的 30 倍以上(图 1)。因此,微塑料在海洋中的空间分布变化受到海流影响较大,呈现分布广泛、区域高度集中的现象。Eriksen 等在美国五大湖的 21 个站点采集样品并分析了其中的塑料碎片,发现其中 20 个站点样品微塑料含量达 $43\,000 \text{ 个}/\text{km}^2$ [8]。法国和比利时研究人员对法国、意大利北部及西班牙的地中海海域表层 $10\sim 15 \text{ cm}$ 海水取样分析,结果显示 90% 的样品均含有塑料垃圾碎片,由此推测在整个地中海海域约有 2 500 亿个微塑料垃圾碎片[33]。英国自然历史博物馆与伦敦大学的科学家沿泰晤士河口上游的河床进行调查,对 7 个地点进行了为期 3 个月的塑料垃圾采样研究,结果共捕捞到 8 490 件垃圾,主要包括香烟塑料包装、食品包装和塑料杯等[34],这些河流和湖泊中的微塑料最终都有可能进入海洋,加重海洋中的微塑料污染。

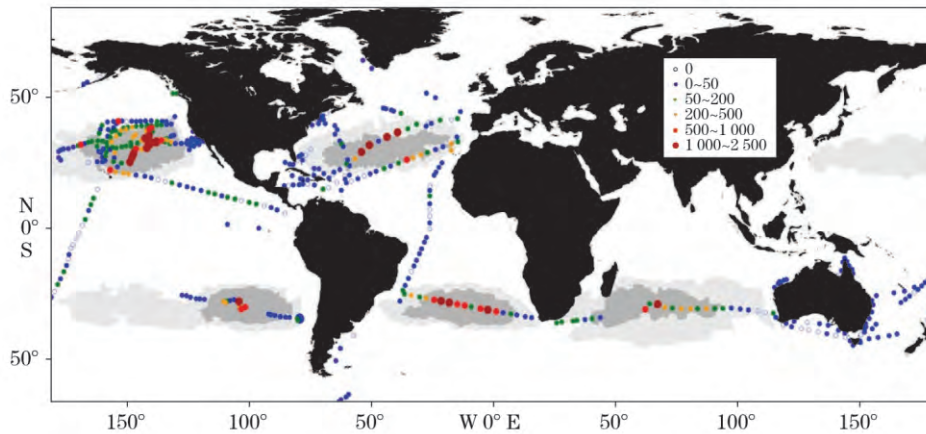


图 1 全球海洋表层水中塑料碎片分布示意图($\text{g} \cdot \text{km}^{-2}$)^[13]

Fig. 1 The distribution of plastic debris concentrations in the surface waters of global oceans($\text{g} \cdot \text{km}^{-2}$)^[13]

1.3.2 微塑料在近海环境分布相对集中

近海海洋环境中的微塑料主要分布在表层海水、海滩与岸滩以及近海沉积物中;通过分析近海、海湾、海峡、海岛周边等^[22,35-42]不同区域海面漂浮微塑料的颗粒粒径及分布特征,可以发现近岸海域海面漂浮的微塑料污染已相当普遍;中国长江口的微塑料含量较高^[22],仅次于加拿大夏洛特皇后湾^[40]。从微塑料颗粒大小来看,粒径为 $0.5\sim 1 \text{ mm}$ 的微塑料较为普遍^[30],也有些海岸以粒径 $< 50 \mu\text{m}$ 的微塑料为主^[39]。

有关海岸及近海沉积物中微塑料调查研究主要集中在休闲海滩、岛屿周边海域沉积物、港湾、自然潮滩湿地等方面^[11,27,43-48]。结果表明:海岸沉积物中微塑料含量要高于深海沉积物中的,其范围为 $0.21\sim 77\,000 \text{ 个}/\text{m}^2$ ^[49],并且存在较大的空间分异,这可能与潮滩地理位置和季节差异有关。例如香港地区滨海潮滩潮上带沉积物中微塑料含量要远高于潮间带沉积物中的^[48],韩国洛东江河口沉积物中雨季后的微塑料含量要高于雨季前的^[50]。在微塑料颗粒粒径分布方面,沉积物中的微塑料颗粒大小多集中在 1 mm 以下,有的甚至小于几十微米。

我国近海也有大量的塑料垃圾存在,目前的报道主要集中在长江和东海近岸、南海海滩、渤海海滩、椒江、甌江和岷江江口、香港岛近岸海面及沙滩等开展的微塑料调查研究^[22-25,51]。其中,长江口和东海海岸 $0.5\sim 5 \text{ mm}$ 塑料颗粒含量分别约为 $4\,137 \text{ 个}/\text{m}^3$ 和 $0.167 \text{ 个}/\text{m}^3$,椒江、甌江和闽江塑料颗粒($333 \mu\text{m}\sim 5 \text{ mm}$)含量分别达到 $956 \text{ 个}/\text{m}^3$, $680 \text{ 个}/\text{m}^3$ 和 $1\,246 \text{ 个}/\text{m}^3$ 。目前,中国海洋环境状况公报每年都有海洋塑料垃圾的相关数据,但尚未见到有关微塑料方面的公报,因此,海洋中微塑料的数量和总量及分布特征也将是今后海洋环境监测的重要内容。值得注意的是由于调查方法和计算方法的不同,其计算结果可比性不高,如目前文献报道的单位有 $\text{个}/\text{m}^3$ 、 $\text{个}/\text{m}^2$ 、 g/km^2 、 g/m^3 等。

1.3.3 深海是微塑料的汇

Goldstein 等报道北太平洋副热带涡旋富集区的微塑料 1999—2000 年比 1972—1987 年在数量和总量

上都增加了 2 个数量级^[32]。但是在西北大西洋和加勒比海塑料富集区的调查结果显示,1986—2008 年表层水体中塑料没有明显的增加^[7],在东北太平洋海区的塑料调查研究中也未发现表层水体中塑料随时间的变化趋势^[9,52]。鉴于海洋塑料垃圾的输入逐年增加而表层水体中塑料并没有发生明显的变化,因此塑料垃圾很可能在被分解成微塑料后进入海洋深处。此外还有研究表明,大洋表层水中漂浮的微塑料总量与实际的环境污染排放量也存在较大差异,其主要原因可能是表层水体中的微塑料在富集微生物或其他化合物后比重增加,最后导致微塑料沉降于海底^[13]。2014 年 Woodall 等^[12]和 Law 等^[52]的研究结果已经表明深海是微塑料的主要汇集区^[12,52],海洋表层的微塑料最终会沉降到深海,深海微塑料还有待进一步地深入研究。

2 微塑料对生态环境的影响

海洋微塑料的来源之一是大型塑料垃圾的分解。塑料垃圾进入海洋后,在热、光、化学等环境因素作用下逐渐发生光降解或破碎形成微塑料,其弹性强度、颜色、形状、尺寸等方面均发生变化,从而容易被海洋环境中的浮游动物、底栖生物、鱼类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。大型塑料垃圾(如合成纤维绳、塑料布、捆扎带、渔网、拖网等废弃渔具)对海洋生物的主要影响是缠绕生物、限制运动和摄食导致死亡^[53]。有些海洋动物误食塑料垃圾后消化系统物理堵塞,营养吸收减少^[54-58],引起饥饿或者消化系统损伤,导致死亡^[53]。发生在海鸟、海龟和海洋哺乳动物身上的惨痛事件受到较多的关注^[59-62],而其他生物如鱼类和无脊椎动物遭受的缠绕和摄食影响事件也越来越多。目前海洋食物链中不同层次的生物体内均已发现微塑料的存在^[63-64],调查结果显示,在所调查的野生生物种类中,受塑料(包括微塑料)影响的海龟、海洋哺乳动物和海鸟的种类分别从 1997 年的 86%,43%和 44%增加到 2015 年的 100%,66%和 50%^[65],因此海洋塑料垃圾和微塑料已经成为海洋生态系统的重要威胁^[29,66-68]。

2.1 微塑料对生物的影响

微塑料会影响海洋中藻类的光合作用。海面上的微塑料对太阳光的遮挡与反射作用会阻碍藻类对光的吸收,纳米级塑料颗粒可以降低藻细胞 Chl-*a* 的量,并增加藻细胞内活性氧的产生^[69]。实验结果表明 1.8~6.5 mg/L 的 20 nm 聚苯乙烯颗粒可以抑制藻类(*Scenedesmus* spp.)的光合作用,并被吸收进入藻细胞内产生氧化压力^[70]。

微塑料会影响暴露在其中的海洋生物的产卵量和繁殖能力^[32]。在北太平洋亚热带环流区,微塑料含量的增加为海龟(*Halobates sericeus*)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结构和组成^[32]。然而微塑料对有些生物的卵和幼虫则表现出明显的毒性效应。实验表明,氨基酸修饰过的聚苯乙烯纳米颗粒对海胆(*Paracentrotus lividus*)受精卵的 24 h 和 48 h EC₅₀ 值分别为 3.85 和 2.61 mg/L^[71]。传代慢性毒性实验中,将桡足类(*Tigriopus japonicus*)暴露于 50 nm 的聚苯乙烯颗粒,其 F0 和 F2 代无节幼体的致死质量浓度分别为 12.5 和 1.25 mg/L^[72]。当暴露在环境相当质量浓度的聚苯乙烯微塑料颗粒(90 μm)中时,欧洲鲈鱼的孵化率会受到抑制,生长速度减慢,幼鱼的进食偏好改变,并且对捕食威胁的提示也无法做出回应,从而增加被捕食的危险^[73]。Rossi 等^[74]采用分子模拟实验方法评估了纳米尺寸的聚苯乙烯对于生物膜性质的影响,结果表明纳米颗粒可以很容易地穿过脂质膜,改变细胞膜结构、膜蛋白活性,从而改变细胞功能。

微塑料容易在海底沉积物中富集,因此,微塑料会极大地影响具有沉积物滤食特征的底栖生物,而捕捉和摄食是这些生物的主要暴露方式^[75]。实验室暴露实验研究结果表明底层无脊椎动物会直接滤食微塑料颗粒,底栖海参甚至直接摄食微塑料颗粒^[29,76-77],海蚯蚓、海参、海鞘等的消化道中都会不同程度地出现微塑料。而在贻贝和螃蟹中,微塑料不仅会在消化道中出现,还可以通过消化道上皮细胞进一步转移到血淋巴和组织中^[78]。我国近海贻贝体内小于 250 μm 微塑料颗粒占微塑料总量的 17%~79%^[79]。暴露实验结果表明,在 100 mg/L 的 30 nm 聚苯乙烯暴露下环境下,贻贝滤食速率会显著降低^[80];而贻贝(*Mytilus edulis*)和

牡蛎(*Crassostrea virginica*)对分散的 100 nm 聚苯乙烯微球的生物利用率低于聚合形态的聚苯乙烯纳米微球^[75]。Sussarellu 等将牡蛎(*Crassostrea gigas*)暴露于不同粒径(2 和 6 μm)的聚苯乙烯颗粒溶液中,发现其产生卵细胞数量和大小、精子的运动速度、D-幼体产量和幼虫数量均显著低于对照组,表明聚苯乙烯微塑料颗粒对牡蛎的摄食和繁殖产生干扰^[81]。此外,沉积物中微塑料的分布会增加沉积物的渗透性,降低热扩散性能,这会影响到跟温度有关的生物发育和生长过程。如海龟孵化过程中,温度的改变会影响到海龟卵的性别比例^[82]。

由于海鸟从海洋中摄取食物,因而也受到微塑料的影响。研究表明,海鸟的消化道中会不同程度地含有微塑料。海鸟所摄食的塑料颗粒与海鸟的天然食物相似度密切相关,形状、大小以及颜色与天然食物相似度越高的微塑料在海鸟体内含量越高^[83-84]。同时,生物对塑料的误食与摄食方式和生物的年龄等也有关系,如年龄小的短尾剪嘴鸥由于食物的判断和选择能力相对弱,其体内塑料较年龄大的个体体内塑料多^[85-86];鱼类、糠虾、海豚等多种游泳动物的摄食器和消化道中都能检测到微塑料,其多寡与动物的年龄和体型等因素相关^[87]。由此可见,体内塑料的积累正在威胁越来越多的生物的生存。

塑料在带来物理污染的同时,还会带来复合污染。塑料中的有机单体和有毒添加剂,如塑化剂、阻燃剂、抗菌剂等也会被释放进入海洋引起污染^[52]。同时,微塑料在迁移过程中会从周围环境富集持久性有机污染物及重金属等^[88];富集的污染物与微塑料一起会对海洋生物产生复合污染毒性效应,在生物体内富集并进一步随食物链传递^[89-93],从而对海洋生物的生存以及人类健康造成严重威胁^[76]。如,当鰕虎鱼暴露于含有微塑料颗粒的苜蓿溶液时,微塑料的存在可以显著降低鰕虎鱼乙酰胆碱酯酶和异柠檬酸脱氢酶的活性,增加鱼类的死亡率^[94];利用吸附了苜蓿的聚乙烯、聚苯乙烯微塑料颗粒对贻贝进行暴露实验,可在贻贝血淋巴、鳃组织中发现微塑料颗粒,同时有显著的苜蓿富集^[95];而非被微塑料吸附后可以显著提高沙蚕对菲的富集量,表明微塑料对于疏水污染物进入底栖生物体内具有重要的增效作用^[90]。日本青鳉鱼(*Oryzias latipes*)摄食结合多环芳烃、多氯联苯和多溴联苯醚的聚乙烯颗粒后,引起吸附污染物的转移,并产生肝脏毒性和异常^[96]。此外一些细菌、病毒、微藻等也可以在微塑料表面产生生物膜并进行栖息和聚集,这些表面富集微生物的微塑料还会进入生物体,使生物体受到感染^[97]。

2.2 微塑料对污染物富集和迁移的影响

微塑料的颗粒小、比表面积大、疏水性强、表面会附着微生物等特点使其富集持久性有机污染物和重金属等污染物的能力增强,从而成为污染物的载体。微塑料材料和表面结构是影响其表面结合污染物的重要因素。Guo 等研究了 4 种有机污染物(菲、萘、林丹、1-萘酚)在聚乙烯、聚苯乙烯、聚苯醚三种微塑料颗粒上的吸附行为,结果显示微塑料材料的分子结构对有机物吸附起着关键作用^[98];聚乙烯型和聚丙烯型对多环芳烃和多氯联苯的吸附能力要高于聚对苯二甲酸乙酯型和聚氯乙烯型^[88,90];聚乙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯对全氟辛酸磺酰胺的分配系数(K_d)依次降低^[99]。此外微塑料粒径大小和环境条件(如 pH、盐度等)也会影响到其结合污染物的能力。Velzeboe 等的研究表明,纳米级聚苯乙烯塑料颗粒(直径 70 nm)对多氯联苯的吸附量要比微米级聚苯乙烯塑料颗粒(直径为 10~180 μm)高 1~2 个数量级,且低 pH 和高盐条件下吸附量增加^[100]。但是,另有研究发现,微塑料与滴滴涕和菲的结合能力与水体中相应污染物浓度有关,而与盐度相关性较小^[101]。同种塑料对不同有机污染物的吸附能力也有差异。如菲、萘、林丹、1-萘酚四种污染物在聚乙烯、聚苯乙烯、聚苯醚等每种塑料上的吸附系数均不同^[98];聚乙烯型微塑料对邻苯二甲酸酯的吸附能力要强于对全氟辛酸铵^[102]。

污染物被吸附到塑料上以后,可以在洋流作用下长距离迁移^[103-104],影响污染物的全球分布^[92,105-107]。调查结果显示,葡萄牙沿岸微塑料颗粒中多氯联苯和多环芳烃分别为 273~307 ng/g 和 100~300 ng/g^[107],而北太平洋环流系统微塑料颗粒主要成分是聚丙烯和聚乙烯,吸附的多氯联苯为 1~223 ng/g^[92]。不同国家和地区微塑料样品中有机污染物存在差异,这些差异体现了多氯联苯和有机氯农药的使用区域差异^[17]。实验室模拟实验表明,海滩来源的塑料颗粒结合重金属量要高于原始塑料颗粒^[106]。同时塑料表面

附着细菌、病毒等生物后,比重增大,会经重力作用沉降到海底,同时将污染物带入沉积物。沉积物中污染物的释放成为深海区域污染物的来源^[105]。

2.3 微塑料污染对经济和社会影响

由于低成本和广泛适用性,塑料在人类社会中的应用越来越广泛。据估计,到 2050 年,地球上的塑料制品还会增加 330 亿 t^[108],大量塑料进入到环境中必定会给环境带来较大的压力。塑料包装、塑料容器甚至越来越多的医用塑料输液管极大地增加了人类与塑料的直接接触,这种直接和持续接触会通过摄入、皮肤和呼吸作用等增加人体内与塑料相关的化学品的累积^[108],进而对人类健康产生影响。2014-06 在首届联合国环境大会上,UNEP 发布的《UNEP Year Book 2014》^[109]和《Valuing Plastic》^[110]两项报告中指出,海洋中大量塑料垃圾对海洋生物生存的威胁日益加剧,保守估计每年给海洋生态系统造成的经济损失高达 130 亿美元。

根据国家海洋局发布的中国海洋环境状况公报^[111],2011—2015 年我国近海包括漂浮垃圾和海滩

垃圾在内的海洋垃圾中塑料垃圾的比例一直在 70% 以上。由于塑料难以降解,所以海底垃圾中塑料垃圾的比例也在逐年升高,由 2011 年的 57% 上升到 2015 年的 87% (图 2),这一比例将随着海底塑料垃圾的积累继续呈上升趋势,导致海底微塑料对海洋生态环境的影响逐渐加剧。

3 未来研究发展和展望

我们所消耗的每一片塑料,最终都有可能进入大海。微塑料在海洋环境中经过破碎、降解、沉降和迁移等过程,将影响到海洋生物的生存和海洋生态环境,并最终对人类造成影响(图 3)。

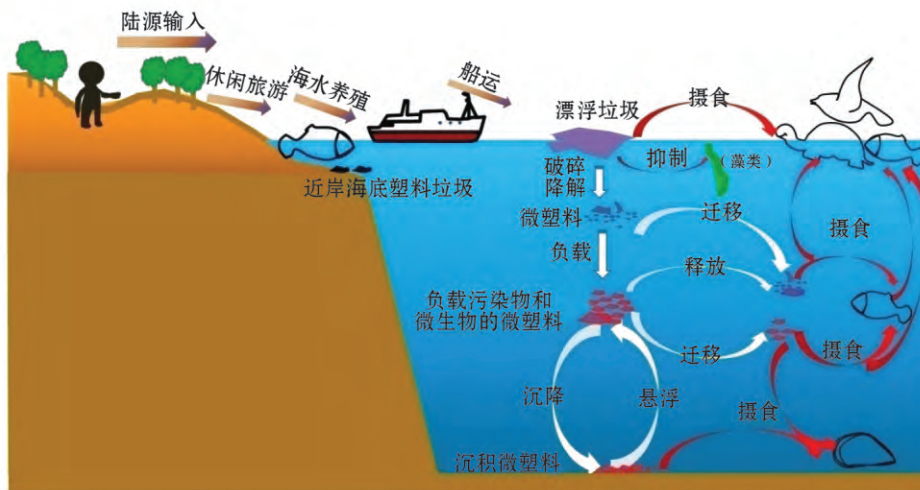


图 3 微塑料的来源、分布及生态影响示意图

Fig. 3 The schematic illustration of the source, distribution, and ecological and environmental effects of microplastics

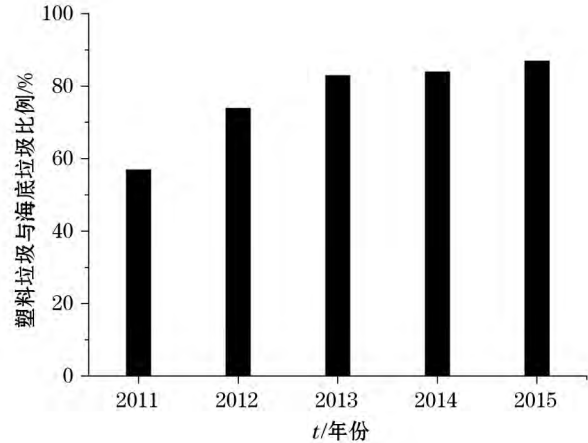


图 2 2011—2015 年我国近海海底垃圾中塑料垃圾的比例 (根据文献^[111]数据计算整理)

Fig. 2 The ratio of plastic/marine litter in our coastal bottom area from 2011 to 2015 (based on data from reference^[111])

为应对和减少微塑料的影响,未来应加强 5 个方面的研究:

1) 纳米尺寸微塑料研究

最新研究表明毫米级微塑料在紫外光照射下很容易形成纳米级塑料,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^[112]。但是目前对纳米微塑料的研究较少,基于纳米尺寸效应、材料组成及其负载污染物等的单一和共同作用对环境和人类的影响还有待于深入研究。

2) 针对不同粒径微塑料的标准分离方法的研究

目前,微塑料样品的分离方法主要包括密度分离、氧化消解、浮选等^[113],水体样品微塑料的分离相对简单,可以通过拖网或过滤的方法进行分离,而沉积物和沙质样品中微塑料的分离相对复杂很多,因此亟待建立针对不同来源样品的微塑料分离方法。同时目前微塑料的研究还主要集中在<5 mm 的塑料,随着人们对微塑料研究的深入,对微塑料进行毫米级、微米级和纳米级的分级需求愈显突出,因此也需要建立针对不同介质、不同尺寸的微塑料的快速分离方法并标准化,以便对不同来源的研究数据进行比对分析。此外在分离方法标准化的基础上,应该使用统一的浓度单位,从而增加不同来源数据的可比性。

3) 微塑料鉴别方法的研究

目前微塑料鉴别较为通用的方法是傅立叶变换红外光谱法^[37,93,114-116],这种方法需要在样品分析前进行干燥,不是特别适用于对沉积物和生物样品的分析。高温裂解气相色谱/质谱法^[117]也可用于微塑料的分析,但这种方法还会受到塑料成分、添加剂及其他污染物的影响,并且会完全破坏样品。拉曼光谱^[11,37,118-119]可以满足湿样和纳米级微塑料的检测并提供样品化学组成的空间分布图,但拉曼光谱会受到塑料颜色、添加剂和其他污染成份的影响。因此需要建立适用于不同样品中的微塑料的鉴别方法。在此基础上,建立在线的结合单颗粒形貌观察与微区成分和结构分析联用的技术,对微塑料的组分和负载污染物特征进行分析,这对研究不同形貌和降解度的微塑料在成分、结构以及负载污染物等方面的差异,促进环境中微塑料的研究具有极为重要的意义。

4) 动力环境对微塑料迁移与分布的影响研究

大洋环流会直接影响到塑料在海洋中的迁移。密度低的塑料可以随大洋表层环流移动并可在大洋涡旋处汇集^[7],密度高的塑料在下沉过程中可以被海洋深层流运输移动^[104],目前认为深海是微塑料的最终汇集地^[12],因此海洋动力过程将直接影响塑料和微塑料的迁移和沉降等环境过程和行为。海洋微塑料的研究需要与海洋动力环境结合以更好地监测其迁移分布及环境行为。

5) 微塑料的复合毒性效应研究

微塑料的环境效应包括材料本身的效应以及材料携带的化学物质、小型生物和微生物的效应。微塑料的环境效应是一种复合的效应,需要结合其分布区域的环境特点来进行综合研究,其中包括微塑料与环境污染物(微生物)的相互作用、迁移运输及转化等。

在今后还应加强政策法规的制定和监管力度。由于海洋微塑料主要来源于陆源输入,因此需要控制源头输入,例如减少难降解塑料的使用,鼓励和支持可降解塑料的生产应用,持续监测海洋和海岸环境中的微塑料污染的分布与量的变化。我国作为塑料生产和使用的大国,更需要完善管理和技术体系,加强监控,并将微塑料的相关研究成果汇总至相关管理部门,制定控制和减少微塑料污染的政策和法规,减少塑料垃圾向环境的输入。

参考文献(References):

- [1] MOORE C. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 108(2): 131-139.
- [2] PlasticsEurope. Plastics-the Facts 2014/2015/2016[EB/OL]. [2016-08-28]. <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-2014.aspx>.

- [3] THOMPSON R C. Plastic debris in the marine environment: Consequences and solutions[M]//KRAUSE J C, NORDHEIM H, GERS B R. Marine nature conservation in Europe. Stralsund, Germany: Bundesamt für Naturschutz, 2006: 107-115.
- [4] AGENCIA E F E. Oceans face environmental crisis from rising amount of plastic waste[EB/OL]. [2016-05-21]. <http://www.efe.com/efe/english/technology/oceans-face-environmental-crisis-from-rising-amount-of-plastic-waste/50000267-2874479>.
- [5] CARPENTER E J, SMITH K L Jr. Plastics on the Sargasso sea surface[J]. *Science*, 1972, 175(4027): 1240-1241.
- [6] WONG C S, GREEN D R, CRETNEY W J. Quantitative tar and plastic waste distributions in the Pacific Ocean[J]. *Nature*, 1974, 247: 30-32.
- [7] LAW K L, MORÉ T-FERGUSON S E, MAXIMENKO N A, et al. Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre[J]. *Science*, 2010, 329(5996): 1185-1188.
- [8] ERIKSEN M, MASON S, WILSON S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1-2): 177-182.
- [9] LAW K L, MORÉ T-FERGUSON S E, GOODWIN D S, et al. Distribution of surface plastic debris in the eastern Pacific Ocean from an 11-year data set[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(9): 4732-4738.
- [10] BERGMANN M, SANDHOP N, SCHEWE I, et al. Observations of floating anthropogenic litter in the Barents Sea and Fram Strait, Arctic[J]. *Polar Biology*, 2016, 39(3): 553-560.
- [11] VAN CAUWENBERGHE, VANREUSEL A, MEES J, et al. Microplastic pollution in deep-sea sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182(6): 495-499.
- [12] 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): 140317.
- [13] CÓZAR A, ECHEVARRA F, GONZÁLEZ-GORDILLO J I, 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.
- [14] THOMPSON R C, RUSSELL A E. Lost at sea: where is all the plastic[J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838-838.
- [15] BARNES D K, GALGANI F, THOMPSON R C, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2009, 364(1526): 1985-1998.
- [16] ZETTLER ER, MINCER T J, AMARALZETTLER L A, et al. Life in the "plastisphere": microbial communities on plastic marine debris[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(13): 7137-7146.
- [17] OGATA Y, TAKADA H, MIZUKAWA K, et al. International Pellet Watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters—1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(10): 1437-1446.
- [18] WANG H H, LIANG G Z. Study on effects of plastic pollution on marine environment and mitigations[J]. *Journal of Nantong Vocational University*, 2014, 28(1): 68-72. 王慧卉, 梁国正. 塑料垃圾对海洋污染的影响及控制措施分析[J]. *南通职业大学学报*, 2014, 28(1): 68-72.
- [19] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347(6223): 768-771.
- [20] China Environmental Protection Online. Solid waste is "breaking the heart of the earth", and marine pollution is becoming a global topic [EB/OL]. [2016-09-20]. <http://www.hbzhan.com/news/detail/110111.html>. 2016-08-29. 中国环保在线. 固体垃圾伤透“地球之心” 海洋污染成全球话题[EB/OL]. [2016-09-20]. <http://www.hbzhan.com/news/detail/110111.html>.
- [21] China Daily. UN warning: marine microplastic pollution is becoming a global threat[EB/OL]. (2016-05-22). http://world.chinadaily.com.cn/2016-05/22/content_25412481.htm. 中国日报网. 联合国警告: 海洋塑料微粒污染危害全球[EB/OL]. (2016-05-22). http://world.chinadaily.com.cn/2016-05/22/content_25412481.htm.
- [22] 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.
- [23] ZHAO S Y, ZHU L X, LI D J. Characterization of small plastic debris on tourism beaches around the South China Sea[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2015, 62(1): 55-62.
- [24] ZHAO S Y, ZHU L X, LI D J. Microplastic in three urban estuaries, China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 597-604.
- [25] QIU Q, TAN Z, WANG J, et al. Extraction, enumeration and identification methods for monitoring microplastics in the environment [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2016, 176: 102-109.
- [26] FENDALL L S, SEWELL M A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(8): 1225-1228.
- [27] 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.
- [28] HINOJOSA I A, THIEL M. Floating marine debris in fjords, gulfs and channels of southern Chile[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009,

- 58(3): 341-350.
- [29] 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.
- [30] UNEP. *Marine litter: An analytical overview*[R]. Nairobi, Kenya: UNEP, 2005.
- [31] KRISTINAM. *Ecosystems and biodiversity in deep waters and high seas*[R]. Nairobi, Kenya: UNEP, 2006.
- [32] 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.
- [33] PHYS. ORG. 250 billion plastic fragments in Mediterranean[EB/OL]. [2010-12-30]. <http://phys.org/news/2010-12-billion-plastic-fragments-mediterranean.html>.
- [34] MORRITT D, STEFANOUDIS P V, PEARCE D, et al. Plastic in the Thames: A river runs through it[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 78(1-2): 196-200.
- [35] COLE M, WEBB H, LINDEQUE P K, et al. Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(3): 4528.
- [36] FRIAS J P G L, OTERO V, SOBRAL P. Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal waters[J]. *Marine Environment Research*, 2014, 95(4): 89-95.
- [37] SONG Y K, HONG S H, MI J, et al. Large accumulation of micro-sized synthetic polymer particles in the sea surface microlayer[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(16): 9014-9021.
- [38] DUBAISH F, LIEBEZEIT G. Suspended microplastics and black carbon particles in the Jade system, southern North Sea[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2013, 224(2): 1-8.
- [39] COLLIGNON A, HECQ J H, GALGNI F, et al. Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean-Corsica)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 79(1-2): 293-298.
- [40] DESFORGES J P W, 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.
- [41] FOSSI M C, PANTI C, GUERRANTI C, et al. Are baleen whales exposed to the threat of microplastics? — A case study of the Mediterranean fin whale (*Balaenoptera physalus*)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(11): 2374-2379.
- [42] DE LUCIA G A, CALIANI I, MARRA S, et al. Amount and distribution of neustonic micro-plastic off the western Sardinian coast (Central-Western Mediterranean Sea)[J]. *Marine Environmental Research*, 2014, 100(3): 10-16.
- [43] CLAESSENS M, MEESTER S D, LANDUYT L V, et al. Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(10): 2199-2204.
- [44] LIEBEZEIT G, DUBAISH F. Microplastics in beaches of the East Frisian islands Spiekeroog and Kachelotplate[J]. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 2012, 89(1): 213-217.
- [45] BAZTAN J, CARRASCO A, CHOUINARD O, et al. Protected areas in the Atlantic facing the hazards of micro-plastic pollution: First diagnosis of three islands in the Canary Current[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 80(1-2): 302-311.
- [46] COLLIGNON A, HECQ J H, GLAGANI F, et al. Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64(4): 861-864.
- [47] NOR N H M, OBBARD J P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 79(1-2): 278-283.
- [48] ZURCHER N A. *Small plastic debris on beaches in Hong Kong: an initial investigation*[D]. Hong Kong: The University of Hong Kong, 2009.
- [49] 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): 867-868.
- [50] LEE J, HONG S, SONG Y K, et al. Relationships among the abundances of plastic debris in different size classes on beaches in South Korea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1-2): 349-354.
- [51] YU X B, PENG J P, WANG J D, et al. Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: the Bohai Sea[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 722-730.
- [52] LAW K L, THOMPSON R C. Microplastics in the seas[J]. *Science*, 2014, 345(6193): 144-145.
- [53] DERRAIK J G B. The pollution on the marine environment by plastic debris: A review[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 44(9): 842-852.
- [54] RYAN P G. Seabirds indicate changes in the composition of plastic litter in the Atlantic and South-Western Indian Oceans[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(8): 1406-1409.

- [55] BOND A L, PROVENCHER J F, ELLIOT R D, et al. Ingestion of plastic marine debris by common and thick-billed murrelets in the northwestern Atlantic from 1985 to 2012[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1-2): 192-195.
- [56] CAMPANI T, BAINI M, GIANNETTI M, et al. Presence of plastic debris in loggerhead turtle stranded along the Tuscany coasts of the Pelagos Sanctuary for Mediterranean Marine Mammals (Italy)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 74(1): 225-230.
- [57] CODINA-GARC A M, MILIT O T, MORENO J, et al. Plastic debris in Mediterranean seabirds[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1-2): 220-226.
- [58] SCHUYLER Q A, WILCOX C, TOWNSEND K, et al. Mistaken identity—Visual similarities of marine debris to natural prey items of sea turtles[J]. *BMC Ecology*, 2014, 14(1): 1-7.
- [59] BOREN L J, MORRISSEY M, MULLER C G, et al. Entanglement of New Zealand Fur Seals in man-made debris at Kaikoura, New Zealand[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52(4): 442-446.
- [60] VOTIER S C, ARCHIBALD K, MORGAN G, et al. The use of plastic debris as nesting material by a colonial seabird and associated entanglement mortality[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(1): 168-172.
- [61] CASALE P, AFFRONTE M, INSACCO G, et al. Sea turtle strandings reveal high anthropogenic mortality in Italian waters[J]. *Aquatic Conservation Marine & Freshwater Ecosystems*, 2010, 20(6): 611-620.
- [62] VÉLEZ-RUBIO GM, ESTRADES A, FALLABRINO A, et al. Marine turtle threats in Uruguayan waters: insights from 12 years of stranding data[J]. *Marine Biology*, 2013, 160(11): 2797-2811.
- [63] DANTAS D V, BARLETTA M, DA COSTA M F. The seasonal and spatial patterns of ingestion of polyfilament nylon fragments by estuarine drums (*Sciaenidae*)[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2012, 19(2): 600-606.
- [64] JANTZ L A, MORISHIGE C L, BRULAND G L, et al. Ingestion of plastic marine debris by longnose lancetfish (*Alepisaurus ferox*) in the North Pacific Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 69 (1-2): 97-104.
- [65] KÜHN S, BRAVO E L, FRANEKER J A V. Deleterious effects of litter on marine life[M]//BERGMANN M, GUTOW L, KLAGES M. *Marine Anthropogenic Litter*. Berlin: Springer International Publishing, 2015:75-116.
- [66] ANDRADY A L. Microplastics in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1596-1605.
- [67] DEPLEDGE M H, GALGANI F, PANTI C, et al. Plastic litter in the sea[J]. *Marine Environmental Research*, 2013, 92(6): 279-281.
- [68] PHAM C K, RAMIREZ-LLODRA E, ALT C H, et al. Marine litter distribution and density in European Sea, from the shelves to deep basins[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(4): e95839.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] DELLA T C, BERGAMI E, SALVATI A, et al. Accumulation and embryotoxicity of polystyrene nanoparticles at early stage of development of sea urchin Embryos *Paracentrotus lividus* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(20): 12302-12311.
- [72] LEE K W, SHIM W J, KWON O Y, et al. Size-dependent effects of micropolystyrene particles in the marine copepod *Tigriopus japonicus* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(19): 11278-11283.
- [73] LÖNNSTEDT O M, EKLÖV P. Environmentally relevant concentrations of microplastic particles influence larval fish ecology[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1213-1216.
- [74] ROSSI G, BARNOUD J, MONTICELLI L. Polystyrene nanoparticles perturb lipid membranes[J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2014, 5(1): 241-246.
- [75] WARD J E, KACH D J. Marine aggregates facilitate ingestion of nanoparticles by suspension-feeding bivalves[J]. *Marine Environmental Research*, 2009, 68(3): 137-142.
- [76] WRIGHT S T, THOMPSON R C, GALLPWAY T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178(1): 483-492.
- [77] GRAHAM E R, THOMPSON J T. Deposit- and suspension-feeding sea cucumbers (*Echinodermata*) ingest plastic fragments[J]. *Journal of Experimental Marine Biology & Ecology*, 2009, 368(1): 22-29.
- [78] SHAW D G, DAY R H. Colour- and form-dependent loss of plastic micro-debris from the North Pacific Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, 28(1): 39-43.
- [79] LI J N, QU X Y, SU L, et al. Microplastics in mussels along the coastal waters of China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 177-184.
- [80] WEGNER A, BESSELING E, FOEKEMA E M, et al. Effects of nanopolystyrene on the feeding behavior of the blue mussel (*Mytilus edulis* L.) [J]. *Environmental Toxicology & Chemistry*, 2012, 31(11): 2490-2497.

- [81] 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 of the United States of America, 2015: doi/10.1073/pnas.1519019113.
- [82] 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.
- [83] SPEAR L B, AINLEY D G, RIBIC C A. Incidence of plastic in seabirds from the tropical Pacific, 1984-1991: Relation with distribution of species, sex, age, season, year and body weight[J]. Marine Environmental Research, 1995, 40(2): 123-146.
- [84] KÜ HNS, FRANEKER J A V. Plastic ingestion by the northern fulmar (*Fulmarus glacialis*) in Iceland[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(6): 1252-1254.
- [85] VAN FRANEKER J A, BLAIZE C, DANIELSEN J, et al. Monitoring plastic ingestion by the northern fulmar *Fulmarus glacialis* in the North Sea[J]. Environmental Pollution, 2011, 159: 2609-2615.
- [86] ACAMPORA H, SCHUYLER Q A, TOWNSEND K A, et al. Comparing plastic ingestion in juvenile and adult stranded short-tailed shearwaters (*Puffinus tenuirostris*) in eastern Australia[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 78(1-2): 63-68.
- [87] DENUNCIO P, BASTIDA R, DASSIS M, et al. Plastic ingestion in Franciscana dolphins, *Pontoporia blainvillei* (Gervais and dOrbigny, 1844), from Argentina[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(8): 1836-1841.
- [88] ROCHMAN C M, HOH E, HENTSCHEL B T, et al. Long-term field measurement of sorption of organic contaminants to five types of plastic pellets: Implications for plastic marine debris[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(3): 1646-1654.
- [89] BJORN DAL K A, BOLTEN A B, LAGUEUX C J. Ingestion of marine debris by juvenile sea turtles in coastal Florida habitats[J]. Marine Pollution Bulletin, 1994, 28(3): 154-158.
- [90] TEUTEN E L, ROWLAND S J, GALLOWAY T S, et al. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(22): 7759-7764.
- [91] ROCHMAN C M, HOH E, KUROBE T, et al. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress[J]. Science Reports, 2013, 3: 3263.
- [92] RIOS L M, JONES P R. Characterisation of microplastics and toxic chemicals extracted from microplastic samples from the North Pacific Gyre[J]. Environmental Chemistry, 2015, 12(5): 611-617.
- [93] AVIO C G, GORBI S, REGOLI F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues: first observations in commercial species from Adriatic Sea[J]. Marine Environmental Research, 2015, 111: 18-26.
- [94] OLIVEIRA M, RIBEIRO A, HYLLAND K, et al. Single and combined effects of microplastics and pyrene on juveniles (0+ group) of the common goby *Pomatoschistus microps* (Teleostei, Gobiidae)[J]. Ecological Indicators, 2013, 34(11): 641-647.
- [95] AVIO C G, GORBI S, MILAN M, BENEDETTI M, et al. Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels[J]. Environmental Pollution, 2015, 198: 211-222.
- [96] 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.
- [97] BOERGER C M, LATTIN G L, MOORE S L, et al. Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(12): 2275-2278.
- [98] GUO X Y, WANG X L, ZHOU X Z, et al. Sorption of four hydrophobic organic compounds by three chemically distinct polymers: role of chemical and physical composition[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(13): 7252-7259.
- [99] WANG F, SHIH K M, LI X Y. The partition behavior of perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanesulfonamide (FOSA) on microplastics[J]. Chemosphere, 2015, 119C: 841-847.
- [100] VELZEBOER I, KWADIJK C, KOELMANS A A. Strong sorption of PCBs to nanoplastics, microplastics, carbon nanotubes, and fullerenes[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 48(9): 4869-4876.
- [101] BAKIR A, ROWLAND S J, THOMPSON R C. Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions[J]. Estuarine Coastal Shelf and Science, 2014, 140(3): 14-21.
- [102] 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(4): 16-23.
- [103] ZARFL C, MATTHIES M. Are marine plastic particles transport vectors for organic pollutants to the Arctic[J]? Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(10): 1810-1814.
- [104] ENGLER R E. The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(22): 12302-12315.
- [105] RIOS L M, MOORE C, JONES P R. Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment[J]. Marine

- Pollution Bulletin, 2007, 54(8): 1230-1237.
- [106] HOLMES L A, TURNER A, THOMPSON R C. Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment[J]. Environmental Pollution, 2012, 160(1): 42-48.
- [107] MIZUKAWA K, TAKADA H, ITO M, et al. Monitoring of a wide range of organic micropollutants on the Portuguese coast using plastic resin pellets[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 70(1-2): 296-302.
- [108] GALLOWAY T S. Micro-and nano-plastics and human health[M]//BERGMANN M, GUTOW L, KLAGES M. Marine Anthropogenic Litter. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 343-366.
- [109] SMITH J. Plastic debris in the ocean//UNEP. UNEP Year Book 2014: Emerging Issues in Our Global Environment[M]. Nairobi, Kenya: UNEP, 2014: 48-53.
- [110] RAYNAUD J. Valuing plastic: the business case for measuring, managing and disclosing plastic use in the consumer goods industry [R]. Nairobi, Kenya: UNEP, 2014.
- [111] State Oceanic Administration, People's Republic of China. Bulletin of the quality of the marine environment (2011-2015)[EB/OL]. [2016-09-20]. <http://www.coi.gov.cn/gongbao/huanjing/>. 国家海洋局. 海洋环境质量公报 (2011-2015)[EB/OL]. [2016-09-20]. <http://www.coi.gov.cn/gongbao/huanjing/>.
- [112] GIGAULT J, PEDRONO B, MAXIT B, et al. Marine plastic litter: the unanalyzed nano-fraction[J]. Environmental Science Nano, 2016, 3(2): 346-350.
- [113] ZHOU Q, ZHANG H B, LI Y, et al. Progress on microplastics pollution and its ecological effects in the coastal environment[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(33): 3210-3220. 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.
- [114] VIANELLO A, BOLDRIN A, GUERRIERO P, et al. Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: first observations on occurrence, spatial patterns and identification[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2013, 130(3): 54-61.
- [115] LÖDER M G J, GERDTS G. Methodology used for the detection and identification of microplastics—A critical appraisal[M]//BERGMANN M, GUTOW L, KLAGES M. Marine Anthropogenic Litter. Berlin: Springer International Publishing, 2015: 201-228.
- [116] TAGG A S, SAPP M, HARRISON J P, et al. Identification and quantification of microplastics in wastewater using focal plane array-based reflectance micro-FTIR imaging[J]. Analytical Chemistry, 2015, 87: 6032-6040.
- [117] NUELLE M T, DEKIFF J H, REMY D, et al. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments[J]. Environmental Pollution, 2014, 184(1): 161-169.
- [118] MURRAY F, COWIE P R. Plastic contamination in the decapod crustacean *Nephrops norvegicus* (Linnaeus 1758)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(6): 1207-1217.
- [119] LUSHER A L, BURKE A, OCONNOR I, et al. Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: validated and opportunistic sampling[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 88(1-2): 325-333.

The Research Progress in Source, Distribution, Ecological and Environmental Effects of Marine Microplastics

SUN Cheng-jun^{1, 2}, JIANG Feng-hua¹, LI Jing-xi¹, ZHENG Li^{1, 3}

(1. *Marine Ecology Center, The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266237, China;*

2. *Laboratory of Marine Drugs and Bioproducts, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;*

3. *Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)*

Abstract: As a new type of pollutant, microplastics (plastics with a size smaller than 5 mm) has received an increasing concern. This paper summarizes the research progress in microplastics from the aspects of the source, distribution, and ecological and environmental effects. Studies show that the microplastics in the ocean basically come from the fragmented or degraded plastic litter under the action of sunlight, wind, wave and ocean currents. Terrestrial input, plastic trash from the ship and abandoned aquaculture floating devices are the main sources of marine plastic litter. Marine microplastics are globally distributed and have been found in the coastal area, oceans, deep sea and polar regions. The deep sea is the sink for microplastics. Microplastics can affect both the photosynthesis of marine algae and the hatching and reproduction of certain marine organisms. They can lead to the malnutrition and even to the death of some marine organisms. The pollutants carried by the microplastics or attached on its surface can be brought into global distribution under the action of ocean currents, causing a complex toxicity to the marine organisms. In order to decrease marine plastic litter, control marine microplastics pollution, support pollution prevention and protect marine environmental safety and human health, the future research will focus on the following areas: the quick separation and fast on-line identification of microplastics, the effects of ocean currents on global transportation of microplastics, the effects and mechanism of complex toxicity of microplastics on marine environment, the establishment of management and technology system, and related policies and regulations.

Key words: microplastics; plastic pollution; microplastic source; ecological effect; marine pollution; marine litter

Received: September 20, 2016