

futurearth
coasts



中国未来海洋联合会

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

中国海岸带研究



中国海岸工程学会
海岸科学与工程分会

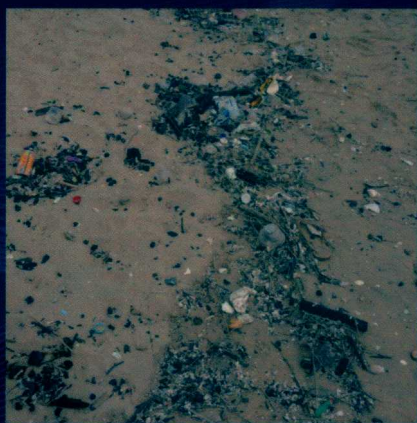
Association of Coastal
Science and Engineering, ACSE



海洋和海岸环境 微塑料污染与治理

Pollution and Management of Microplastics in
Marine and Coastal Environments

骆永明 等 编著



科学出版社



龙门书局

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

“中国海岸带研究”丛书

海洋和海岸环境 微塑料污染与治理

骆永明 等 编著

科学出版社

龙门书局

北京

内 容 简 介

本书是在国内介绍海洋和海岸微塑料污染与治理的首部著作。系统介绍了国内外海洋和海岸中微塑料的采集、分离和分析方法,微塑料类型、丰度、分布和来源,微塑料的传输、沉降及分解,微塑料表面附着的污染物和生物,微塑料的生物积累、毒性及风险,以及海洋和海岸环境微塑料监管与防控策略;可为海洋和陆地环境微塑料研究与管理提供借鉴与指导。

本书可作为国家及地方海洋和海岸带微塑料污染、塑料垃圾与生态环境保护等管理部门的重要参考资料,也可供海洋、海岸、环境、生物、生态、管理等科学领域的科研与教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋和海岸环境微塑料污染与治理/骆永明等编著. —北京:科学出版社, 2019.6

(中国海岸带研究丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-061279-3

I. ①海… II. ①骆… III. ①黄河-三角洲-海洋环境-塑料垃圾-垃圾处理 IV. ①X705

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第098027号

责任编辑:朱瑾 陈倩 / 责任校对:郑金红

责任印制:吴兆东 / 封面设计:北京图阅盛世文化传媒有限公司

科学出版社出版

龍門書局

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2019年6月第一版 开本: B5(720×1000)

2019年6月第一次印刷 印张: 15

字数: 294 000

定价: 180.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“中国海岸带研究”丛书 编委会

主 编：骆永明

副主编：刘东艳 黄邦钦 王厚杰 黄小平 孙永福

刘 慧 王菊英 崔保山 刘素美

编 委（按姓氏笔画排序）：

王秀君 王金坑 王厚杰 王菊英 尤再进

仝 川 印 萍 吕 剑 刘 慧 刘东艳

刘芳华 刘素美 孙永福 李 远 李 博

李杨帆 吴纪华 吴嘉平 张 华 陈凯麒

周 锋 於 方 侯西勇 施华宏 骆永明

秦 松 涂 晨 黄 鹄 黄小平 黄邦钦

龚 骏 崔保山 章海波 韩广轩 韩秋影

雷 坤 潘响亮

从 书 序

海岸带是地球表层动态而复杂的陆-海过渡带，具有独特的陆、海属性，承受着强烈的陆海相互作用。广义上，海岸带是以海岸线为基准向海、陆两个方向辐射延伸的广阔地带，包括沿海平原、滨海湿地、河口三角洲、潮间带、水下岸坡、浅海大陆架等。海岸带也是人口密集、交通频繁、文化繁荣和经济发达地区，因而又是人文-自然复合的社会-生态系统。全球有40余万千米海岸线，一半以上的人口生活在沿海60千米的区间内，人口在250万以上的城市有2/3位于海岸带的潮汐河口附近。在中国，大陆及海岛海岸线总长约为3.2万千米，跨越热带、亚热带、温带三大气候带；大陆11个沿海省、自治区和直辖市的面积约占全国陆地国土面积的13%，集中了全国50%以上的大城市、40%的中小城市、42%的人口和60%以上的国内生产总值，新兴海洋经济还在快速增长。21世纪以来，我国在沿海地区部署了近20个战略性国家发展规划，现在的海岸带既是国家经济发展的支柱区域，又是区域社会发展的“黄金地带”。在国家“一带一路”倡议和生态文明建设战略部署下，海岸带作为第一海洋经济区，成为拉动我国经济社会发展的新引擎。

然而，随着人类高强度的活动和气候变化，我国乃至世界海岸带面临着自然岸线缩短、泥沙输入减少、营养盐增加、污染加剧、海平面上升、强风暴潮增多、围填海频发和渔业资源萎缩等严重问题，越来越多的海岸带生态系统产品和服务呈现不可持续的趋势，甚至出现生态、环境灾害。海岸带已是自然生态环境与经济社会可持续发展的关键带。

海岸带既是深受相连陆地作用的海洋部分，也是深受相连海洋作用的陆地部分。海岸动力学、海域空间规划和海岸管理等已超越传统地理学的范畴，海岸工程、海岸土地利用规划与管理、海岸水文生态、海岸社会学和海岸文化等也已超越传统海洋学的范畴。当今人类社会急需深入认识海岸带结构、组成、性质及功能，陆海相互作用过程、机制、效应及其与人类活动和气候变化的关系，创新工程技术和政策，发展海岸科学，支持可持续发展。目前，如何通过科学创新和技术发明，更好地认识、预测和应对气候、环境和人文的变化对海岸带的冲击，管控海岸带风险，增强其可持续性，提高其恢复力，已成为我国

乃至全球未来地球海岸科学与可持续发展的重大研究课题。近年来，国际上设立的“未来地球海岸（Future Earth Coasts, FEC）”国际计划，以及我国成立的“中国未来海洋联合会”“中国海洋工程咨询协会海岸科学与工程分会”“中国太平洋学会海岸管理科学分会”等，充分反映了这种迫切需求。

“中国海岸带研究”丛书正是在认识海岸带自然规律和支持可持续发展的需求下应运而生。该丛书邀请了包括中国科学院、教育部、国土资源部（国家海洋局）、环境保护部、农业部、交通运输部等系统及企业界在内的数十位知名海岸带研究专家、学者、管理者 and 企业家，以他们多年的科学技术部（科技部）、国家自然科学基金委员会、国家海洋局及国际合作项目等研究进展、工程技术实践和旅游文化教育为基础，组织撰写丛书分册。分册涵盖海岸带的自然科学、社会科学和社会-生态交叉学科，涉及海岸带地理、土壤、地质、生态、环境、资源、生物、灾害、信息、工程、经济、文化、管理等多个学科领域，旨在持续向国内外系统性展示我国科学家、工程师和管理者在海岸带与可持续发展研究方面的新成果，包括新数据、新图集、新理论、新方法、新技术、新平台、新规定和新策略。出版“中国海岸带研究”丛书在我国尚属首次。无疑，这不仅可以增进科技交流与合作，促进我国及全球海岸科学、技术和管理的 research 与发展，而且必将为我国乃至世界海岸带保护、利用和改良提供科技支撑和重要参考。

中国科学院院士、厦门大学教授



2017年2月于厦门

前 言

微塑料已成为环境中的一类新型污染物。海洋及海岸环境中的微塑料污染已成为全球性生态环境问题。微塑料在海洋及海岸生态系统中的来源、环境行为、生态与健康风险正受到人们的高度关注。2014年，首届联合国环境大会提出要特别关注海洋微塑料污染。2016年召开的第二届联合国环境大会上，微塑料污染被列入环境与生态科学研究领域的第二大科学问题，成为与全球气候变化、臭氧耗竭和海洋酸化等并列的重大全球环境问题。海洋微塑料污染不仅是威胁海洋生物生态系统进而危及食物链安全及人类健康的问题，还涉及跨界跨境污染、产业结构调整和国际治理等问题。目前，国际上对海洋和海岸环境微塑料与塑料垃圾问题的关注已从科学研究层面向实质性污染管控及全球环境治理延伸，海洋和海岸环境微塑料污染问题已从单一的环境问题演变为与生态安全、产业经济和可持续发展纵横交织的复杂问题。

微塑料是指环境中粒径小于5 mm的塑料类污染物，包括碎片、纤维、颗粒、发泡、薄膜等类型。海洋中这样的微小塑料早在20世纪70年代初就在《科学》杂志被报道过。目前被全球广泛接受使用的微塑料概念则于21世纪初才被描述。海洋和海岸环境微塑料污染得到全球重视并加以大量研究则是近10年的事。我国的微塑料研究稍晚于欧美日韩等国家，自2015年国内有关海洋和海岸环境微塑料的研究蓬勃兴起，现在已经涉及河流、陆地、大气环境。可以说，海洋和海岸环境微塑料污染与管控研究方兴未艾。

为了更快、更好地促进人们对我国海洋和海岸环境微塑料污染规律的认识与系统治理方案的创建，我们在系统收集和综合分析国内外报道的文献资料的基础上，结合研究组2014年以来自身的海洋和海岸环境调查、分析、试验、研究成果，集研究方法、来源分布、风化附着、迁移归趋、积累毒性、监管治理于一体，撰写形成了本书。全书共分8章。第1章绪论，介绍了塑料产品生产、使用与塑料垃圾污染产生，国内外海洋和海岸环境微塑料污染与研究进展；第2章海洋和海岸中微塑料的采集、分离与分析方法，包括海水、沉积物、土壤、大气、生物中微塑料样品的采集与分离方法，海洋微塑料生物膜样品的采集、测定与鉴定方法，环境微塑料样品的实验室分析方法（包含微塑料的计量与粒径测量方法，聚合物类型的分析方法，微塑料表面的形貌、污染物、附着生物、基因

的分析方法,密度分析方法);第3章海洋微塑料的来源和分布特征,包括海洋微塑料的来源,海水中微塑料的水平与垂直分布特征;第4章海岸环境微塑料的来源和分布特征,包括潮滩中微塑料的来源,旅游海滩、养殖海滩、河口湿地、红树林湿地、天然海湾等潮滩中微塑料的分布特征;第5章海洋微塑料的传输、沉降及分解,包括海洋微塑料的传输与数值模拟,海洋微塑料的沉降、沉积与再悬浮,海洋微塑料的物理与化学风化、光降解和生物降解;第6章海洋和海岸中微塑料表面附着的污染物及生物,包含微塑料表面附着的化学添加剂、持久性有机污染物、重金属等污染物,微塑料表面附着的生物膜、微生物群落、病原微生物、外来有害物种等;第7章海洋和海岸中微塑料的生物积累、毒性及环境风险,涉及海洋环境中微塑料的生物摄食、传递与积累,微塑料及其携带污染物的生物学效应,微塑料对海洋生物的伤害,海洋和海岸环境微塑料污染的环境损害与生态健康风险;第8章海洋和海岸塑料垃圾与微塑料污染的监管及治理,介绍国内外有关监管办法和治理经验,分析我国的差距,提出监管、防控策略和开展国际合作的建议。

本书正值2019年6月8日第11个“世界海洋日”、第12个“全国海洋宣传日”和“第二届全国环境(海洋)微塑料污染与管控学术研讨会”召开之际出版,具有格外重要的意义。本书是国内系统介绍海洋和海岸环境微塑料污染与治理的首部著作,吸收了国家重点研发计划项目课题“海洋微塑料的源解析、输运和归趋机制”(2016YFC1402202)、中国科学院前沿科学重点研究项目“黄渤海重点河口与海湾的微塑料污染及生态风险”(QYZDJ-SSW-DQC015)和国家自然科学基金项目“污泥和猪粪长期施用土壤中微塑料积累与限际传递机制”(41877142)的部分研究成果。本书的出版还得到了中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所)的经费支持。本书的主要执笔人为:骆永明、周倩、章海波、涂晨、张华、马海青、代振飞、陈涛、胡学锋、李连祯、李艳芳、李远、周阳。全书由骆永明统稿、定稿,其间得到了涂晨博士、李远博士、博士生周倩和杨杰、硕士生田媛和张晨捷,以及研究助理刘颖的大力协助。对在文献资料收集、采样与研究过程中给予指导和帮助,以及在本书撰写过程中提供有关资料的诸位老师、同事及学生,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请各位同仁批评指正。



2019年5月于烟台

目 录

第 1 章	绪论	001
	1.1 塑料产品生产、使用与塑料垃圾污染	002
	1.2 国际海洋和海岸环境微塑料污染与研究 进展	003
	1.3 中国海洋和海岸环境微塑料污染与研究 进展	007
	本章小结	009
	参考文献	009
第 2 章	海洋和海岸中微塑料的采集、分离与分析方法	013
	2.1 海水中微塑料样品的采集与分离方法	015
	2.1.1 表层海水中微塑料样品的采集方法	016
	2.1.2 不同深度海水中微塑料样品的采集 方法	019
	2.1.3 海水样品中微塑料样品的分离与收集 方法	021
	2.2 海洋沉积物和潮滩土壤中微塑料样品的采集 与分离方法	024
	2.2.1 潮滩土壤中微塑料样品的采集方法	024
	2.2.2 海洋沉积物中微塑料样品的采集 方法	027
	2.2.3 海洋沉积物和潮滩土壤中微塑料样品 的分离与收集方法	028

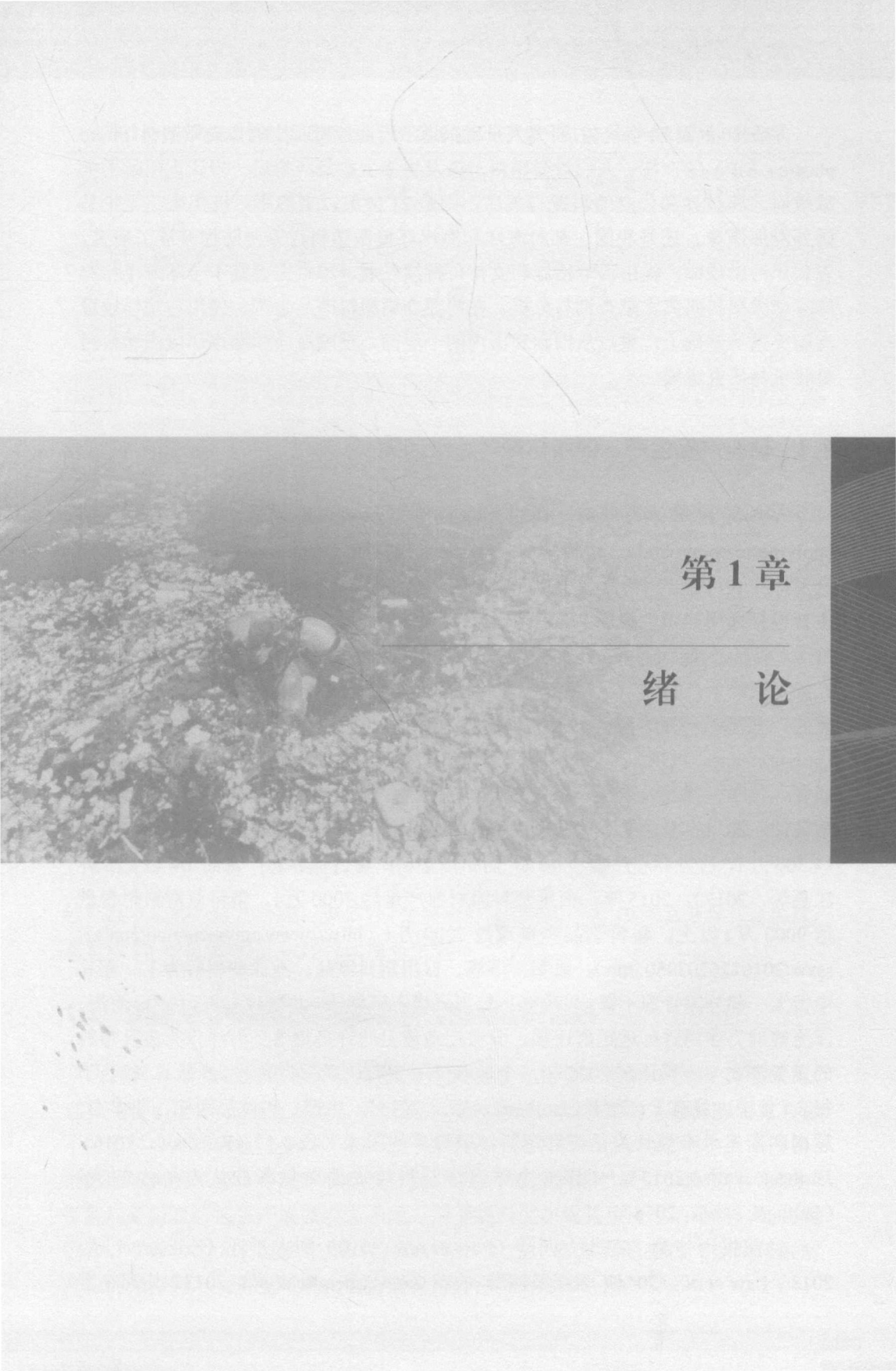
2.3	海岸大气中微塑料样品的采集与分离方法	035
2.3.1	海岸大气中微塑料样品的采集方法	036
2.3.2	海岸大气中微塑料样品的分离与收集方法	037
2.4	海洋生物中微塑料样品的采集、分离与收集方法	038
2.4.1	海洋生物中微塑料样品的采集方法	038
2.4.2	海洋生物中微塑料样品的分离与收集方法	039
2.5	海洋微塑料生物膜样品的采集、测定与鉴定方法	041
2.5.1	海洋微塑料生物膜样品的采集方法	041
2.5.2	海洋微塑料生物膜样品的测定与鉴定方法	042
2.6	环境微塑料样品的实验室分析方法	043
2.6.1	微塑料计量与粒径测量方法	044
2.6.2	微塑料聚合物类型的分析方法	045
2.6.3	微塑料表面形貌的观测与分析	046
2.6.4	微塑料表面附着污染物的分析方法	047
2.6.5	微塑料表面附着生物的分析方法	050
2.6.6	微塑料表面基团的分析方法	051
2.6.7	微塑料密度的分析方法	053
	本章小结	054
	参考文献	054

第3章	海洋微塑料的来源和分布特征	063
3.1	海洋微塑料的来源	064
3.1.1	海洋环境中的“原生”微塑料污染	064
3.1.2	海洋环境中的“次生”微塑料污染	066
3.2	海水中微塑料的分布特征	069
3.2.1	近岸海域微塑料的水平与垂直分布特征	069
3.2.2	大洋及“垃圾带”中微塑料的分布	

	特征	076
	3.2.3 海洋环境中微塑料研究的模型应用	079
	3.3 海底沉积物中微塑料的分布特征	080
	本章小结	082
	参考文献	082
第 4 章	海岸环境微塑料的来源和分布特征	089
	4.1 潮滩中微塑料的来源	090
	4.1.1 潮滩中的“原生”微塑料污染	091
	4.1.2 海岸环境中的“次生”微塑料污染	091
	4.2 潮滩中微塑料的分布特征	093
	4.2.1 旅游海滩中微塑料的分布特征	094
	4.2.2 养殖海滩中微塑料的分布特征	098
	4.2.3 河口湿地中微塑料的分布特征	099
	4.2.4 红树林湿地中微塑料的分布特征	100
	4.2.5 天然海湾潮滩中微塑料的分布特征	102
	4.2.6 其他类型潮滩中微塑料的分布特征	103
	本章小结	106
	参考文献	106
第 5 章	海洋微塑料的传输、沉降及分解	111
	5.1 海洋微塑料的传输与数值模拟	112
	5.1.1 微塑料物理传输机制	113
	5.1.2 海洋微塑料的传输模拟和预测	118
	5.1.3 总结与展望	121
	5.2 海洋微塑料的沉降与沉积	122
	5.2.1 海水表面微塑料的沉降与再悬浮	122
	5.2.2 海洋微塑料的潮滩沉积特征	124
	5.3 海洋微塑料的风化与降解	125
	5.3.1 海洋微塑料的物理与化学风化	126
	5.3.2 海洋微塑料的光降解	126
	5.3.3 海洋塑料及微塑料的生物降解	128
	本章小结	130

	参考文献	131
第 6 章	海洋和海岸中微塑料表面附着的污染物及生物	137
6.1	微塑料表面附着的污染物	138
6.1.1	化学添加剂	138
6.1.2	持久性有机污染物	139
6.1.3	重金属	144
6.1.4	其他化学污染物	146
6.2	微塑料表面附着的生物	147
6.2.1	微塑料表面的生物膜形成机制	147
6.2.2	微塑料表面的微生物群落结构	152
6.2.3	微塑料表面有害微生物的传播	154
	本章小结	155
	参考文献	155
第 7 章	海洋和海岸中微塑料的生物积累、毒性及环境 风险	163
7.1	海洋环境中微塑料的生物摄食与积累	164
7.1.1	微塑料的生物摄食	164
7.1.2	微塑料的暴露及其在生物体内的 分布	165
7.1.3	微塑料在海洋食物链中的传递	180
7.2	微塑料及其携带污染物的生物学效应	183
7.2.1	微塑料对海洋生物的伤害	183
7.2.2	微塑料携带污染物的生物学效应	188
7.2.3	微塑料及其携带污染物的联合生物学 效应	195
7.3	海洋和海岸环境微塑料污染的环境损害与 风险	196
7.3.1	海洋和海岸环境微塑料污染的环境 损害	197
7.3.2	海洋和海岸环境微塑料污染的生态与 健康风险	197
	本章小结	199

	参考文献	200
第 8 章	海洋和海岸塑料垃圾与微塑料污染的监管及治理	
		211
	8.1 国际监管与治理	213
	8.2 国内监管与治理	214
	参考文献	216
	结语	219
附录	缩写词	223



第1章

绪 论

早在20世纪70年代初,研究人员就报道了近海环境及生物体内微塑料(micro plastic, MP)的存在。人们对微塑料污染及生物生态效应的进一步认识引起了全球政府、科技界和公众的兴趣与关注,则是21世纪以来的事。近年来,无论是国外沿海国家,还是我国,都对海洋和海岸环境微塑料污染与防控开展了研究,以认识污染规律、提出治理措施和支持可持续发展。本章主要基于全球海洋和海岸环境微塑料研究文献查询与分析,在简要介绍塑料产品生产、使用与塑料垃圾污染关系的基础上,重点从国际和国内两个层面,反映海洋和海岸环境微塑料污染状况与研究进展。

1.1 塑料产品生产、使用与塑料垃圾污染

塑料是以单体为原料,通过加聚或缩聚反应聚合而成的高分子聚合物(polymeric compound),俗称塑料(plastic)或树脂(resin),可以自由改变成分及形体样式,由合成树脂及填料、增塑剂、稳定剂、润滑剂、色料等添加剂组成,主要包括通用热塑性树脂[聚乙烯(polyethylene, PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)、聚苯乙烯(polystyrene, PS)及苯乙烯共聚物]、工程塑料(尼龙、聚碳酸酯、热塑性聚酯)、特种工程塑料(聚苯硫醚、聚醚砜、聚芳醚酮、液晶聚合物)、通用热固性树脂[酚醛树脂、聚氨酯(polyurethane, PUR)、环氧树脂、不饱和聚酯树脂]等。由于塑料及其制品具有质轻、化学性质稳定、成本低等优点,在工业、农业及日常生活中被广泛应用。据估计,2014年世界塑料总产量为31 100万t,其中,亚洲塑料产量最大,约为14 300万t,占世界总产量的46%,而中国塑料产量占世界总产量的1/4以上(许江菱等,2017)。2015年,中国塑料原材料产量约7000万t,塑料原材料消费量达9000万t以上,塑料制品产量超过7000万t(<http://www.cppia.com.cn/cppia1/ssxw/2016126203950.htm>),以塑料薄膜、日用塑料制品、泡沫塑料等为主。而其中很大一部分因管理不善,以废弃塑料形式进入环境中,并通过人工、风力、河流、洋流等外力作用进行远距离迁移,分布在地球上的许多角落;海洋作为废弃塑料的重要汇之一,预计至2025年,全球海洋中塑料垃圾量将高达2.5亿t,相当于每3t鱼中,就有1t塑料(Jambeck *et al.*, 2015)。中国、印度尼西亚、菲律宾、越南和斯里兰卡被认为是废弃塑料垃圾最多的国家(表1.1)(Kershaw, 2016; Jambeck *et al.*, 2015),中国对全球海洋塑料垃圾的贡献率被认为高达27.7%(Jambeck *et al.*, 2015)。

目前报道估测,在北大西洋(Law *et al.*, 2010)和太平洋(Eriksen *et al.*, 2013; Law *et al.*, 2014)表面及深海(van Cauwenberghe *et al.*, 2013)均存在着

表 1.1 不同国家塑料垃圾数量、比例及其排名一览表 (引自 Jambeck *et al.*, 2015)

排名	国家	管理不善的垃圾比例 /%	管理不善的塑料垃圾数量 / ($\times 10^6$ t/年)	占全球管理不善的塑料垃圾总量的百分比 /%	海洋塑料垃圾数量 / ($\times 10^6$ t/年)
1	中国	76	8.82	27.7	1.32 ~ 3.53
2	印度尼西亚	83	3.22	10.1	0.48 ~ 1.29
3	菲律宾	83	1.88	5.9	0.28 ~ 0.75
4	越南	88	1.83	5.8	0.28 ~ 0.73
5	斯里兰卡	84	1.59	5	0.24 ~ 0.64
6	泰国	75	1.03	3.2	0.15 ~ 0.41
7	埃及	69	0.97	3	0.15 ~ 0.39
8	马来西亚	57	0.94	2.9	0.14 ~ 0.37
9	尼日利亚	83	0.85	2.7	0.13 ~ 0.34
10	孟加拉国	89	0.79	2.5	0.12 ~ 0.31
11	南非	56	0.63	2	0.09 ~ 0.25
12	印度	87	0.6	1.9	0.09 ~ 0.24
13	阿尔及利亚	60	0.52	1.6	0.08 ~ 0.21
14	土耳其	18	0.49	1.5	0.07 ~ 0.19
15	巴基斯坦	88	0.48	1.5	0.07 ~ 0.19
16	巴西	11	0.47	1.5	0.07 ~ 0.19
17	缅甸	89	0.46	1.4	0.07 ~ 0.18
18	摩洛哥	68	0.31	1	0.05 ~ 0.12
19	朝鲜	90	0.3	1	0.05 ~ 0.12
20	美国	2	0.28	0.9	0.04 ~ 0.11

较高程度的塑料碎片污染。据估计,全球海洋上的漂浮塑料碎片至少有五万亿件,重量超 26 万 t。塑料垃圾污染已遍布全球。

1.2 国际海洋和海岸环境微塑料污染与研究进展

进入环境中的废弃塑料,经过太阳辐射(光降解、脆化)或波浪等作用,直径往往小于 1 cm 甚至更低,并且在长期的物理、化学作用下会分解成更为微小的塑料碎片或颗粒(pellet)。目前,通常将粒径小于 5 mm 的塑料称为微塑料。根据微塑料的来源可将海洋微塑料分为“原生”微塑料和“次生”微塑料,“原生”微塑料是指直接被生产成微观大小的、用于塑料生产或其他应用的塑料,如树脂颗粒、喷砂、个人护理品中添加的微珠等;“次生”微塑料是指由大型塑料裂解产生的微塑料,主要受环境、生物或人为等作用而形成(图 1.1)。

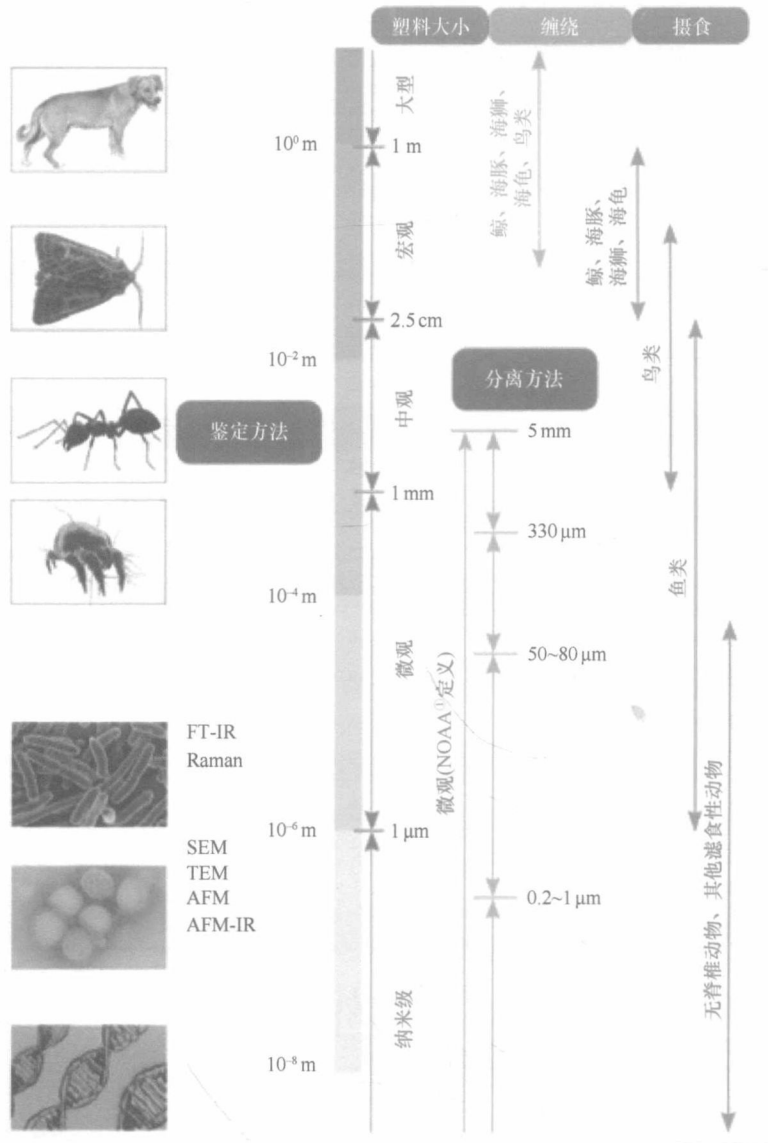


图 1.1 海洋环境中塑料尺寸范围及与生物大小的比较 (该大小区分可以形成严格的表述依据)
(引自 Anderson *et al.*, 2015)

FT-IR: 傅里叶红外光谱; Raman: 拉曼光谱; SEM: 扫描电子显微镜; TEM: 透射电子显微镜; AFM: 原子力显微镜; AFM-IR: 原子力显微镜-红外光谱

微塑料由于化学性质稳定, 其作为一类新型环境污染物越来越受到重视。自 2011 年起, 联合国环境规划署 (United Nations Environment Programme, UNEP)

① NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, 美国国家海洋和大气管理局