

前 言

塑料是 20 世纪最具革命性的合成材料之一，深刻嵌入现代文明的方方面面。从轻便耐用的包装材料，到医疗行业的一次性医护工具，再到汽车与航空的轻量化部件，塑料以其可塑性、耐久性和低成本奠定了现代工业与社会生活的基石。然而，在推动经济与社会发展的同时，废塑料的快速累积也带来了前所未有的环境挑战。塑料的化学稳定性使其在自然环境中难以降解，且广泛使用的增塑剂、阻燃剂等添加剂进一步增加了环境与健康风险。如何妥善处理和高值化利用废塑料，已成为全球关注的重大科学与社会问题。

废塑料不仅是环境负担，而且也是庞大的“碳资源库”。合理的回收利用有助于缓解不可再生资源的消耗，推动产业向绿色低碳转型。化学回收技术从分子层面入手，通过裂解、解聚、气化等方式断裂塑料聚合物中的化学键，将其转化为燃料油、单体、化工原料等小分子化合物，甚至实现闭环聚合。与物理回收相比，化学回收能够处理混合复杂、污染严重的塑料废弃物，产物附加值高，并具备无害化处置含卤、含重金属塑料的潜力。因此，化学回收是突破塑料循环利用瓶颈、推动产业绿色转型的重要技术路径。

系统梳理和总结废塑料化学回收的研究进展，既具有基础科学意义，也承载着现实应用价值。从基础层面看，深入解析塑料分子结构与催化体系的构效关系，有助于开发高效、高选择性转化技术；从应用层面看，总结国内外最新研究成果与产业化案例，可以为技术路线选择和政策制定提供有力参考。基于这一考虑，我们编写了本书。

全书共分为 11 章：第 1 章基于塑料全生命周期的环境行为，介绍塑料的发展与来源、污染现状及国内外管理政策，并展望人工智能在资源化利用中的应用；第 2 章阐述塑料的分类与鉴别方法，系统梳理“收运－分选－破碎－清洗－干燥”的前端技术链条；第 3 章回顾废塑料的传统再生与处置手段；第 4~9 章分别介绍聚烯烃、聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚碳酸酯与热固性塑料的化学回收方法及工程案例；第 10 章探讨传统塑料向可降解塑料及高端新兴材料的化学转化路径；第 11 章则系统介绍废塑料化学回收的环境与经济评价框架。本书以跨学科视角，力求兼顾科学原理、技术方法与工程应用，既可作为环境工程、材料科学、循环经济等相关专业本科生与研究生的参考教材，也适合从事废塑料回收、处理处置及新材料开发的科研人员、工程技术人员和政府决策者参考使用。



废塑料化学回收：从分子解聚到循环经济

本书由梅清清主持编写，吴伟祥、张伟杰、刘东旭和余云开参与编著。张少宇、吴泽翔、高雄、白月、张玉菲、陈彦臻、林家怡、朱思名、张铭浩、汪卓等在资料整理、内容编写和图表绘制过程中作出了重要贡献。特别感谢科学出版社对本书出版的大力支持，以及刘冉编辑在策划与编校中的细致工作。本书由浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划项目（2024C03112）、国家自然科学基金项目（22376183，22576180）资助出版。

限于时间与编写水平，书中难免存在不足，恳请各位读者批评指正。愿白色污染逐渐消逝，愿城市矿产焕发新生，助力绿色未来可持续发展。

编著者

2025 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 废塑料污染与治理概述.....	1
1.1 塑料工业概况	1
1.1.1 塑料的发展	1
1.1.2 产业结构与趋势.....	2
1.1.3 废塑料的产生	3
1.2 废塑料污染现状及环境危害	5
1.2.1 废塑料污染现状.....	5
1.2.2 微塑料污染	6
1.2.3 添加剂污染	8
1.3 国内外废塑料管理政策与法规.....	12
1.3.1 国际组织与公约.....	13
1.3.2 我国法律与标准.....	15
1.3.3 国外法律与标准.....	18
1.4 人工智能在废塑料回收中的应用	25
1.4.1 智能识别与自动分选.....	25
1.4.2 辅助降解与转化.....	27
1.4.3 市场预测与资源调度.....	29
1.5 本章小结.....	31
参考文献.....	32
第 2 章 废塑料分类与前端处理.....	33
2.1 塑料分类与鉴别.....	33
2.1.1 塑料分类.....	34
2.1.2 塑料鉴别	39
2.2 废塑料收集与运输	48
2.2.1 废塑料收集	48
2.2.2 废塑料运输	49
2.2.3 我国收运体系与实践.....	50
2.3 废塑料分选.....	51

2.3.1	人工分选	52
2.3.2	机械分选	53
2.3.3	溶剂分选	56
2.3.4	其他分选技术	62
2.3.5	分选技术要求	63
2.4	废塑料预处理	64
2.4.1	废塑料破碎	64
2.4.2	废塑料清洗与干燥	67
2.4.3	预处理对化学回收的影响	68
2.4.4	前端处理中微塑料控制	68
2.5	本章小结	69
	参考文献	70
第3章	废塑料资源化与末端处置技术	72
3.1	废塑料物理再生技术	72
3.1.1	直接再生	72
3.1.2	改性再生	74
3.2	废塑料化学再生技术	78
3.2.1	热驱动裂解	79
3.2.2	溶剂辅助回收	81
3.2.3	绿色催化转化	84
3.2.4	能场耦合强化	85
3.3	废塑料末端处置技术	88
3.3.1	填埋技术	88
3.3.2	焚烧与能量回收	93
3.4	本章小结	95
	参考文献	96
第4章	聚烯烃（PO）废塑料化学回收	98
4.1	PO 概述	98
4.1.1	PO 类型及应用	98
4.1.2	PO 生产消费现状	101
4.2	废 PO 化学回收技术	102
4.2.1	复分解法	103
4.2.2	催化氢解	110
4.2.3	加氢裂化	115

4.2.4	氧化解聚.....	120
4.2.5	新兴转化技术.....	124
4.3	废 PO 化学回收工程案例.....	133
4.3.1	废弃农膜连续热解循环再生工程.....	134
4.3.2	含油污泥耦合废塑料共热解工程.....	135
4.3.3	城市混杂软塑连续催化裂解工程.....	136
4.4	本章小结.....	137
	参考文献.....	137
第 5 章	聚氯乙烯 (PVC) 废塑料化学回收.....	142
5.1	PVC 概述.....	143
5.1.1	PVC 分子结构与性能特征.....	143
5.1.2	PVC 生产现状与应用领域.....	144
5.2	废 PVC 环境风险与回收挑战.....	146
5.2.1	氯主导的环境风险.....	146
5.2.2	废 PVC 机械回收困境.....	148
5.3	废 PVC 化学回收技术.....	149
5.3.1	热解.....	150
5.3.2	共热解.....	156
5.3.3	湿法脱氯.....	162
5.3.4	新兴脱氯技术.....	167
5.4	废 PVC 再生工艺.....	169
5.4.1	物理改性再生.....	169
5.4.2	化学深度脱氯.....	170
5.5	本章小结.....	172
	参考文献.....	172
第 6 章	聚苯乙烯 (PS) 废塑料化学回收.....	175
6.1	PS 概述.....	175
6.1.1	PS 结构与应用特征.....	175
6.1.2	PS 产业现状.....	178
6.2	废 PS 化学回收技术.....	182
6.2.1	热解.....	183
6.2.2	催化裂解.....	188
6.2.3	气化.....	197
6.2.4	氧化降解.....	198

6.2.5 新兴转化技术	200
6.3 废 PS 化学回收工程案例	203
6.3.1 催化裂解工艺	203
6.3.2 气化工艺	204
6.3.3 超临界工艺	205
6.4 本章小结	206
参考文献	208
第 7 章 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 废塑料化学回收	211
7.1 PET 概述	211
7.1.1 PET 性质与应用	211
7.1.2 PET 生产与回收现状	214
7.2 废 PET 化学回收技术	218
7.2.1 热化学解聚	219
7.2.2 溶剂介导解聚	227
7.2.3 结构单元转化	248
7.2.4 共聚酯重构	262
7.3 废 PET 化学回收工程案例	265
7.3.1 两步酯交换制备 DMT 工艺	265
7.3.2 乙二醇醇解制备 BHET 工艺	266
7.3.3 化学水解制备 TPA 工艺	268
7.4 本章小结	269
参考文献	269
第 8 章 聚碳酸酯 (PC) 废塑料化学回收	277
8.1 PC 概述	277
8.1.1 PC 分子结构	277
8.1.2 废 PC 塑料污染	278
8.2 废 PC 化学回收技术	278
8.2.1 热解	278
8.2.2 氢解	283
8.2.3 溶剂解	289
8.3 废 PC 再生工艺与产业实践	302
8.3.1 废 PC 回收政策	302
8.3.2 物理溶解回收技术	303
8.3.3 化学解聚单体回收技术	303

8.3.4 再造粒与材料循环利用路径.....	304
8.4 本章小结.....	305
参考文献.....	306
第 9 章 废热固性塑料化学回收.....	310
9.1 热固性塑料概述.....	310
9.1.1 热固性塑料分类及应用.....	310
9.1.2 热固性塑料合成方法.....	316
9.2 废热固性塑料化学回收技术.....	320
9.2.1 总体技术路径.....	321
9.2.2 聚氨酯回收.....	326
9.2.3 酚醛树脂回收.....	331
9.2.4 环氧树脂回收.....	333
9.2.5 不饱和聚酯回收.....	338
9.2.6 新型热固性塑料回收.....	341
9.3 废热固性塑料回收工程实践.....	342
9.3.1 聚氨酯醇解再生与多元醇回收.....	343
9.3.2 风电叶片热裂解与组分回收.....	344
9.4 本章小结.....	345
参考文献.....	345
第 10 章 废塑料重构新材料.....	350
10.1 废塑料构建可降解塑料.....	350
10.1.1 可降解塑料概述.....	350
10.1.2 可降解塑料合成与化学回收.....	355
10.1.3 废塑料向可降解塑料转化路径.....	364
10.1.4 工业化案例.....	367
10.2 废塑料构建新型功能材料.....	369
10.2.1 废塑料向新型功能材料转化路径.....	369
10.2.2 工业化案例.....	376
10.3 重构新材料的现实挑战.....	378
10.3.1 可降解塑料市场化问题.....	378
10.3.2 新型功能材料推广问题.....	381
10.4 本章小结.....	382
参考文献.....	384



第 11 章 废塑料化学回收环境与经济效益评价 387

11.1 环境效益与风险 388

11.1.1 环境效益 388

11.1.2 环境风险 391

11.2 生命周期评价（LCA） 395

11.2.1 LCA 概述 395

11.2.2 LCA 流程 397

11.2.3 LCA 在废塑料化学回收中的应用 400

11.3 技术经济评价（TEA） 405

11.3.1 TEA 概述 406

11.3.2 TEA 方法 408

11.3.3 TEA 在废塑料回收中的应用 411

11.4 本章小结 414

参考文献 415

第 1 章 废塑料污染与治理概述

塑料作为 20 世纪最具革命性的合成材料，其分子结构多样性（从聚乙烯的线型链到聚丙烯的支化构型）与化学稳定性在推动现代工业发展的同时，也构成了环境治理的深层挑战。以 C—C 键骨架相连的高分子聚合特性，使塑料在自然环境中难以降解，而增塑剂、阻燃剂等化学添加剂的广泛使用进一步加剧了污染复杂性。全球塑料年产量已突破 3.8 亿吨，其中一次性包装占比 40%，而回收率长期低于 10%，导致大量废弃物通过填埋、焚烧或其他途径进入生态系统，形成从宏观塑料到微塑料的全尺度污染链。

本章基于塑料全生命周期环境行为，构建“发展历程—污染机制—治理体系”的三维框架。开篇追溯塑料工业从 19 世纪赛璐珞发明到当代年产 3.8 亿吨的演进历程，揭示其化学稳定性带来的利弊；在污染机制层面，重点剖析微塑料、化学添加剂两大核心风险源的生成机制、扩散路径及环境风险。本章针对塑料污染这一跨介质、跨国界的全球性难题，整合国际先进治理经验和 AI 技术辅助方案，旨在为发展高效-低碳耦合的塑料循环经济提供科学认知与实践参考。

1.1 塑料工业概况

1.1.1 塑料的发展

塑料作为现代工业文明的重要标志，其发展历程与人类对材料科学的探索密不可分。根据 ISO 472:2013 国际标准，塑料被定义为以天然或合成树脂为主体成分的高分子化合物，这种材料在常温下展现出独特的韧性和弹性特征。天然树脂作为塑料的原始形态，其分子结构中含有丰富的碳—碳双键和芳香环，这种有机组合赋予了材料可塑性、硬度和黏性等基本特性，当暴露在空气中时还会发生氧化硬化现象。合成树脂的出现则标志着人类对材料性能的主动掌控，通过化学单体聚合技术，科学家们成功研制出聚乙烯、聚丙烯等一系列具有特定性能的高分子聚合物，这些材料的耐化学腐蚀性、耐热性和机械强度都可以通过调整单体和聚合工艺来精确调控。

塑料工业的起源可以追溯到 19 世纪中叶对天然树脂的化学改性。当时象牙制品的巨大需求催生了材料创新的迫切性，从 1845 年瑞士化学家塞伯坦发现硝化纤维，到 1868 年美国印刷工人海亚特发明赛璐珞，这些突破性进展不仅解决了象牙替代问题，更开创了人造塑料的新纪元。20 世纪初，随着酚醛树脂的发明，塑料开始展现出其在工业领域的巨大潜力，这种首个完全合成的塑料材料因其优异的绝缘性和耐热性，迅速在电气工业中得到广泛应用。20 世纪 30 年代是塑料发展的黄金时期，聚乙烯、尼龙等革命性材料的相继问世，不仅拓展了塑料的应用范围，更推动了整个高分子化学学科的飞跃发展。二战后的石油化工兴起为塑料工业注入了新的活力，原料路线的转变使得塑料生产规模迅速扩大，而聚酰亚胺、聚砜等特种塑料的研发则满足了航空航天等高端领域的需求。值得注意的是，聚乳酸（PLA）的诞生标志着塑料发展进入环保新阶段，这种源自玉米的生物基材料为解决白色污染问题提供了新思路。

随着塑料技术的不断成熟，这种多功能材料已深入现代生活的各个角落。从日常家居用品到高科技医疗设备，塑料以其优异的可塑性、耐用性和经济性，成为推动社会进步的重要物质基础。塑料的普及不仅改变了人们的生活方式，更深刻影响着全球制造业的格局和发展方向。

1.1.2 产业结构与趋势

塑料作为 20 世纪最重要的材料创新之一，其全球发展呈现出三个显著特征：持续增长的总量规模，日益集中的区域分布，以及加速演进的产业结构。从长期趋势来看，全球塑料产量在过去二十年保持着年均 3%~4% 的增长率，2024 年相关行业报告显示，全球塑料总产量达 3.82 亿吨，市场规模突破 1.2 万亿美元，预计到 2030 年将突破 5 亿吨。这种增长主要受到发展中国家工业化进程和全球消费升级的双重驱动，同时也面临着日益严峻的环保压力。从产品结构看，四大通用塑料（聚乙烯 PE、聚丙烯 PP、聚氯乙烯 PVC 和聚苯乙烯 PS）始终占据主导地位，这种格局在过去十年保持稳定。但值得注意的是，工程塑料和特种塑料的份额正在稳步提升，反映出产业向高附加值方向发展的趋势。

区域分布方面，亚太地区已经成为全球塑料产业的重心，其产量占比从 2000 年的 25% 提升至 2024 年的 45% 以上，而同期欧美日等传统塑料强国的份额则从 60% 降至 35% 左右。这种区域转移与全球制造业布局变化和政策导向高度吻合，一方面亚太地区快速推进的城市化进程和制造业的持续扩张促使其市场规模日益扩大，另一方面欧盟国家居高不下的能源成本以及日益严格的环保法规（如《一次性塑料指令》对特定塑料制品的投放限制）导致欧洲市场持续

萎缩。

消费结构上，整体塑料消费呈现两极分化特征。一次性包装占据 40% 的市场份额，其应用主要集中在食品饮料和电商物流领域，具体表现为聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）水瓶、PP 快餐盒和 PE 缓冲膜等产品。中国外卖行业的发展为此提供了典型例证，每年消耗数百亿个餐盒，其中可降解材料占比在 2024 年已提升至 30%，这一变化清晰地反映出政策引导下材料替代进程的加速。与此同时，耐用领域呈现出不同的发展态势：建筑管材以 PVC 为主，占据 15% 的份额，而汽车轻量化部件则以聚丙烯、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯三元共聚物（ABS）为主，占比 8%，且年需求增长率保持在 10% 的高位，直接推动全球车用塑料市场规模达到 950 亿美元。特别值得关注的是工程塑料的发展，聚碳酸酯（PC）和聚氨酯（PU）在汽车与电子产业的带动下保持 6%~8% 的年增长率，广泛应用于车灯罩、手机外壳等高附加值产品。除此之外，新兴应用领域如氢能存储罐使用的超高分子量聚乙烯和柔性电子所需的导电高分子材料也展现出强劲的发展势头，为产业升级注入新动能。

在全球环保意识觉醒的大背景下，塑料产业正在经历一场深刻的绿色转型。首先是材料创新方面，可降解塑料市场以 20% 的年增长率快速扩张，中国一次性快餐盒市场规模在 2024 年达到 659 亿元人民币，其中 PLA 等淀粉基材料已占据 30% 的份额。其次，再生塑料领域迎来突破性发展，行业巨头纷纷采取实质性行动：可口可乐®推出 100% 再生 PET 瓶，ALPLA®开发减碳 30% 的循环瓶，联合利华®则承诺在 2025 年前将原生塑料使用量削减 50%。技术创新方面同样取得显著进展，智能制造技术的应用大幅提升生产效率，如中国快餐盒企业通过 AI 优化模具设计成功降低了 20% 的原料损耗。在回收技术领域，瑞典开发的等离子体气化炉能在 1200℃ 以上的高温下彻底分解二噁英，武汉大学研发的生物质海绵则可吸附 99.8% 的水体微塑料，这些创新技术已在试点项目中验证了实际效果。政策层面也出现积极变化，我国通过政企合作在沿海城市建立了海洋塑料垃圾回收-再生-认证的闭环体系，这一具有示范意义的模式已被纳入《沿海城市海洋垃圾清理行动方案》进行推广，为全球塑料污染治理提供了中国方案。

1.1.3 废塑料的产生

废塑料的产生贯穿于塑料生命周期的各个阶段，从最初的树脂合成到最终的消费使用，形成了一个复杂而多元的废弃物来源体系。根据产生环节的不同，废塑料可分为消费前废塑料和消费后废塑料两大类。消费前废塑料主要来自工业生

产环节，包括树脂合成和成型加工过程中产生的废料，这类废料虽然数量相对较少，但由于其成分单一、污染程度低，具有较高的回收价值，通常由生产企业自行回收处理。相比之下，消费后废塑料则来源于各类塑料制品的使用终端，其回收处理面临着来源分散、成分复杂等挑战，因此成为塑料回收领域的重点研究对象。

1. 消费前废塑料的产生

（1）树脂生产环节。废料的产生主要源于三个关键工序：聚合反应中附着在反应釜内壁的辅料以及粗品，配混过程产生的配混料，挤出机产出的废料。这些废料的产生量与生产工艺的复杂程度、设备性能以及操作水平密切相关，其中聚乙烯生产过程中产生的废料最少，而聚氯乙烯则因其工艺特性成为废料产生量最大的树脂品种。

（2）塑料加工环节。塑料制品加工成型过程同样会产生大量废料，这些废料的表现形式因加工工艺而异。注射成型会产生流道冷料和浇口冷固料，挤出成型会留下修边料和截断料，吹塑工艺则会产生截坯口废料和中空容器飞边。压延加工过程中混炼机和压延机会掉落废料，而滚塑成型则会在模具分型线处产生溢料。这些加工废料虽然形态各异，但都具有成分明确、污染程度低的特点，是优质的再生原料来源。

（3）二次加工环节。当塑料制品进入二次加工阶段，废料的处理难度显著增加。经过印刷、电镀等表面处理的废品，其回收需要额外的脱漆、去镀工序，大大提高了处理成本。相比之下，热成型和机械加工产生的废边角料则更容易回收利用。在配混和再生加工环节产生的废料虽然总量不大，但由于其本身就是回收料，具有较高的循环利用价值。

2. 消费后废塑料的产生

消费后塑料废料的来源最为广泛，几乎涵盖了所有使用塑料制品的行业领域。化学工业的包装容器、食品工业的包装袋、纺织业的纤维废料、家电产品的缓冲材料、建筑行业的管材型材，以及农业用地膜、渔业用渔网等，都在使用后转化为具有回收价值的废塑料。其中，城市生活垃圾中的废塑料因其数量庞大、分类困难而成为环境治理的重点难点。这类废塑料约占生活垃圾总量的 2%~4%，以一次性包装材料为主，主要成分为聚乙烯、聚丙烯等聚烯烃类材料，包括各类瓶罐容器、日用制品、包装材料等，其回收处理面临着分类困难、污染严重等现实挑战。

1.2 废塑料污染现状及环境危害

1.2.1 废塑料污染现状

全球塑料污染已演变为工业文明时代最严峻的生态挑战之一，其影响深度和广度正在重塑地球系统的物质循环。纵观塑料产业的发展历程，自 20 世纪 50 年代大规模商业化以来，全球累计生产的塑料制品已超过 100 亿吨，其中约四分之三最终成为废弃物，形成跨越国界的环境负债。这种“生产-废弃”的线性经济模式造成了惊人的资源浪费和环境代价——全球每年约有 1100 万吨废塑料通过河流、倾倒等途径进入海洋系统，对海洋生态环境造成污染。更令人担忧的是，塑料污染与其他环境问题产生耦合效应，其全生命周期贡献了全球 3.4%~5.3% 的温室气体排放，与气候变化形成恶性循环。

从地域分布来看，塑料污染呈现出明显的“南北差异”。发达国家凭借成熟的回收体系，在塑料废弃物管理方面相对规范，但其高人均消费模式仍是污染的重要源头。以美国为例，人均年塑料消费量达 130 千克，是发展中国家的 5~8 倍。而亚洲发展中国家则面临双重压力：一方面承接了全球塑料制造业转移，另一方面受限于处理能力，成为污染集中的“热点地区”。印度尼西亚、菲律宾、越南等国家贡献了全球 60% 的海洋塑料排放，这些地区往往缺乏完善的垃圾收集系统，加之雨季强降水影响，大量陆源塑料通过河流进入海洋。值得注意的是，塑料污染的影响具有全球流动性特征，即便在无人居住的北极地区，每立方米海冰中也发现了超过 12 000 个微塑料颗粒。

技术经济层面的结构性矛盾是治理困境的核心。当前全球塑料回收率长期徘徊在 10% 左右，远低于纸类（58%）和钢铁（90%）等传统材料的回收水平。这主要受制于三个关键瓶颈：第一是材料复杂性，部分功能性塑料制品通常由 3~5 种聚合物复合而成，增加了分拣难度；第二是经济可行性，低值塑料的回收成本往往高于原材料价格；第三是技术局限性，现有机械回收工艺难以处理受污染或降解的塑料废弃物。这种局面导致全球每年有价值 800 亿~1200 亿美元的塑料材料在单次使用后即被丢弃，形成巨大的资源流失。

从微观层面分析，废塑料所含的化学添加剂及其破裂形成的微塑料颗粒构成两大核心污染源（图 1.1），二者通过复杂的迁移转化机制对生态系统以及人体健康造成严重影响，下文将详细阐述两者的产生、迁移途径及环境风险。

废塑料化学回收：从分子解聚到循环经济

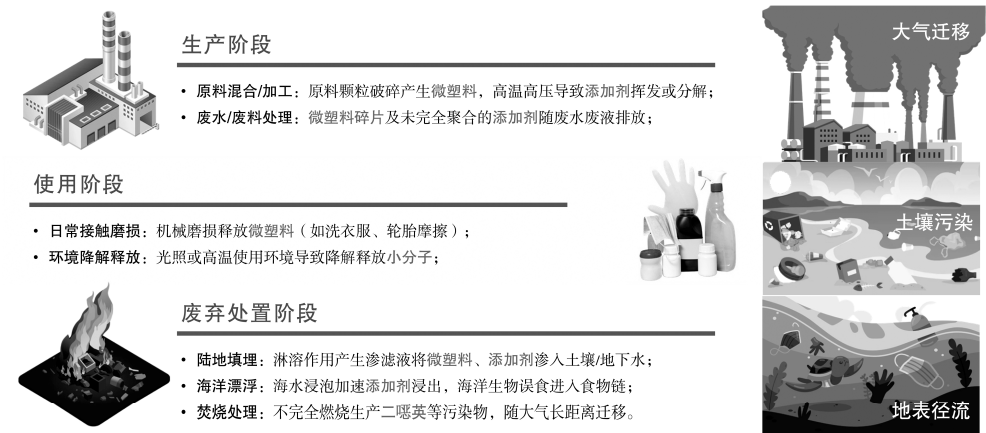


图 1.1 微塑料及添加剂的释放迁移与环境风险示意图

可扫描封底二维码查看本书彩图

1.2.2 微塑料污染

在宏观塑料污染问题尚未得到有效控制的背景下，微塑料污染已经悄然演变为更具隐蔽性和持久性的环境威胁。2004 年英国科学家 Thompson 等在 *Science* 首次提出的微塑料概念，特指粒径小于 5 毫米的塑料颗粒、纤维或薄膜，其危害性不仅在于自身难降解的特性，更在于其对其他有毒物质的吸附与传递作用^[1]。这种无处不在的污染物已渗透到人类生活的方方面面，研究显示，日常饮用的瓶装水中平均含有约 24 万个塑料颗粒，且在高温或机械外力作用下，塑料容器会释放更多微塑料进入水体^[2]。这种新型污染形式不仅延续了宏观塑料污染的跨介质特性，更因其尺寸效应产生了独特的生物毒性机制，使得污染影响从生态系统层面深入到细胞分子水平，在全球范围内形成了从深海沟壑到高山积雪无所不在的污染网络^[2]。

1. 微塑料的来源与赋存

微塑料按来源可分为初生微塑料和次生微塑料：①初生微塑料：化妆品、洗涤剂 etc 日化产品中添加的塑料微珠以及轮胎摩擦或塑料生产过程中掉落的塑料颗粒；②次生微塑料：塑料在使用、处理处置过程中形成的碎片颗粒，如在衣物清洗过程中纤维衣物会释放微纤维，使用微波加热塑料容器可能会释放塑料片段；在垃圾填埋过程中大型塑料会逐渐被降解为微塑料，留存于垃圾渗滤液^[3-5]。

相关数据显示，全球水体中微塑料平均浓度达 4.8×10^3 个/ m^3 ，北极大气中纤维状 PET 占比 57%。2025 年全球微塑料年释放量达 320 万吨，其中陆地系统贡献 62%，海洋输入占 38%。

2. 微塑料在环境中的迁移与污染特性

微塑料污染已成为全球环境治理面临的重大挑战，其通过多介质、跨区域的复杂迁移路径以及复合污染效应，将污染风险扩散至地球的每个角落。在水环境中，微塑料主要依靠洋流、潮汐和风力作用进行扩散，其中 80% 的海洋微塑料通过河流从陆地输入，呈现出近岸高浓度、远洋低浓度的空间分布特征。大气传输使微塑料具备了惊人的迁移能力，纳米级颗粒甚至可进入平流层参与全球大气循环，这解释了为何在北极大气中也能检测到大量微塑料的存在。与此同时，污水灌溉和污泥施肥等农业活动则成为水-土壤系统中微塑料循环的重要驱动力，使这些污染物得以在不同环境介质间持续迁移转化。

微塑料的环境行为与其特殊的物理化学性质密切相关。这些微小颗粒虽然粒径小，却拥有巨大的比表面积和丰富的孔隙结构，表面通常带有负电荷，使其能够通过静电作用吸附重金属离子和蛋白质分子。由 PP、PE 等疏水性材料构成的微塑料可通过范德瓦耳斯力吸附多环芳烃、农药等脂溶性有机物，而含有含氧官能团的微塑料则能与污染物形成氢键或金属配位键。更值得警惕的是，长期环境暴露会导致微塑料表面氧化产生更多活性位点，进一步强化其作为污染物载体的功能。这种“载体效应”使得微塑料不仅含有增塑剂、阻燃剂等化学添加剂，还能富集环境中的各类有毒物质，形成复合污染体系，对生态系统产生协同毒性。

微塑料污染对各类环境介质都造成了深远影响。在土壤系统中，微塑料会改变土壤物理结构，降低孔隙度和透气性，甚至影响植被生长。例如 PVC 降解产生的氯乙烯单体半衰期长达 20 年，浓度超过 0.5 mg/kg 时可直接导致植物根系坏死。水体环境中，微塑料不仅直接威胁水生生物生存，还会破坏珊瑚礁等重要栖息地，研究表明近千种海产品检测到微塑料污染，包括 800 多种鱼类，亚洲地区污染水平最高。在大气环境中，微塑料除了在大气环流实现污染源的跨区域迁移，还会作为云凝结核改变云层反照率，间接干扰区域水循环；此外，在极地地区，深色微塑料降低冰雪反照率，成为加速冰盖消融的隐形推手。联合国环境规划署评估指出，微塑料对海洋表层的遮蔽效应会抑制浮游植物的固碳能力，使塑料全生命周期贡献的温室气体排放攀升至每年 13 亿~20 亿吨 CO₂ 当量，占全球总量的 3.4%~4.5%。微塑料不仅破坏了环境介质的自然平衡，还加剧了全球性生态危机的复杂性。

3. 微塑料对人体健康的危害

由于微塑料粒径小，易于穿透生物膜屏障，因而容易依附、作用于人体器官组织。相关微塑料颗粒潜在健康风险评估结果表明，随着各类迁移途径到达人体内部器官或组织的微塑料由于其自身的化学毒性以及吸附的其他化学物质会诱发

炎症、遗传毒性、氧化应激、细胞凋亡和坏死，损坏细胞内的遗传信息，导致突变，诱发许多慢性疾病（如糖尿病、癌症等）。

目前研究发现，人体许多器官组织及排泄物中发现了微塑料的存在，如血液^[6,7]、肺部、肝脏、粪便^[8]和胎盘^[9]等。杜克大学研究团队发现，纳米塑料颗粒会进入大脑，诱发大脑神经元中的 α -突触核蛋白紧密聚集并自发增殖，加大帕金森等神经疾病的发生率^[10]。

塑料污染伴有长久且深远的影响，废塑料污染已演变为跨越介质、国界与代际的全球性危机，亟待各国紧密合作共同研讨，治理塑料污染。

1.2.3 添加剂污染

1. 塑料化学添加剂概述

塑料制品的性能优化高度依赖化学添加剂，这些物质通过物理混合或简单化学键合融入聚合物基体，赋予塑料柔韧性、阻燃性、耐候性等特性。根据功能差异，添加剂主要分为增塑剂、阻燃剂、着色剂及其他塑料化学添加剂（如热稳定剂、抗氧化剂等，详见表 1.1）^[11-14]。

（1）增塑剂。增塑剂是优化塑料加工流动性和提升制品柔软度与拉伸性的关键物质，其应用极大拓展了聚氯乙烯（增塑剂消耗占比超 80%）等合成树脂的用途范围。常见的增塑剂有邻苯二甲酸酯类（如邻苯二甲酸二辛酯 DOP、邻苯二甲酸二异壬酯 DINP 等）、脂肪族二元酸酯类、环氧类、聚酯类、含氯类等。增塑剂主要功能作用在于增加塑料分子链的移动性以提高柔软度，降低熔体黏度以改善加工性能和降低能耗，以及通过降低玻璃化转变温度（glass transition temperature, T_g ）来增强材料的耐寒性。

（2）阻燃剂。阻燃剂是一类通过气相抑制、凝聚相成炭及冷却稀释等多重作用机制，能够有效延缓燃烧链式反应、降低材料可燃性并显著提高其抗点燃特性的功能性化合物。在电线电缆、建材及交通工具内饰等需要防火安全的塑料制品中起到关键保护作用。基于化学结构，可将阻燃剂分为卤系、磷系、氮系、无机金属氢氧化物等多个类别。阻燃剂能在燃烧时形成保护层隔绝氧气以阻止火焰蔓延，减少烟雾和有毒气体的释放以提高逃生安全性，并帮助材料达到特定的耐火标准。

（3）着色剂。着色剂赋予塑料多样色彩以提升外观和市场价值，种类包括无机颜料（钛白粉、氧化铁红等）、有机颜料（酞菁蓝、偶氮红等）和染料（分散染料、活性染料等）。其功能不仅在于提供丰富色彩满足审美需求，部分着色剂还能提升塑料的耐光、耐热、耐化学腐蚀等耐候性能，并通过高遮盖力掩盖基体瑕疵，

改善外观质量。

(4) 其他塑料化学添加剂。塑料制品性能的完善还需依赖多种其他功能性添加剂协同作用。例如，热稳定剂（如铅盐类、钙锌复合稳定剂）防止加工和使用过程中的热降解；抗氧剂抑制由光、热、氧引发的氧化反应以延长寿命；光稳定剂吸收或反射有害紫外线，防止光老化；抗静电剂降低制品带电性，避免吸附灰尘或电击；润滑剂则改善加工性能并减少模具磨损和制品缺陷。

然而，这些化学添加剂在生产、使用及塑料废弃处置的全生命周期中均存在向环境释放的风险。例如增塑剂可能迁移至作物或其他食品中，人类长期摄入存在影响生殖健康或致癌隐患；部分阻燃剂（如多溴联苯醚）具有持久性、生物累积性及毒性（如内分泌干扰、神经毒性），且卤系阻燃剂焚烧可能产生剧毒二噁英；着色剂和其他添加剂可能通过废水排放或垃圾填埋进入水体、土壤环境，其潜在生物毒性和难降解特性对生态系统构成威胁。因此，塑料化学添加剂在提升材料性能的同时，其潜在的环境风险不容忽视。

表 1.1 塑料化学添加剂分类及潜在环境风险

添加剂种类	典型化学成分	应用及含量范围	暴露/释放途径	潜在环境污染风险
增塑剂	邻苯二甲酸酯类（DEHP、DBP）、柠檬酸酯	PVC 医疗器械/食品包装膜：硬质 PVC < 10%，软质 PVC 30%~70%；PET 饮料瓶：DOA ≤ 35%，DBP ≤ 10%	高温迁移至食品；塑料老化析入土壤/水体；焚烧释放二噁英	内分泌干扰（性早熟、精子质量下降）
阻燃剂	多溴联苯醚（PBDEs）、氯化石蜡	PP/ABS 电子外壳：含氯 70%石蜡 5%~15%；聚氨酯建材：通用母粒 3%~15%	电子垃圾渗滤液释放；微塑料吸附后经洋流扩散	北极海鸟肝脏富集浓度达自然饲料 12 万倍；干扰甲状腺功能
热稳定剂	硬脂酸铅、钙锌复合剂	PVC 管材/电缆护套：0.3%~5%（硬脂酸钙 ≤ 5%）	填埋场重金属溶出；PVC 制品机械磨损产生含铅粉尘	铅/镉经食物链累积；儿童血铅超标引发认知障碍
着色剂	镉黄（CdS）、酞菁蓝	通用塑料玩具/包装：≤ 10%；食品包装：TiO ₂ ≤ 10%，有机颜料 ≤ 0.25%	塑料降解后颜料颗粒进入水体；焚烧飞灰沉降	镉污染农田致水稻减产；六价铬具强致癌性
发泡剂	偶氮二甲酰胺（ADC）、碳酸氢钠	聚氨酯保温材料/PS 餐盒：硬质 PVC 1~10 份，聚碳酸酯 20~50 份；弹性体泡沫：ADC 0.1~30 份	泡沫破碎释放气体；化学分解残留物入土	释放化学物质破坏臭氧层；偶氮化合物分解产物具致癌性
光稳定剂	二苯甲酮类（UV-9）、苯并三唑类	PE/PVC 农膜/户外建材：0.3%~0.5%；软 PVC：UV-9 用量 0.1~0.5 份	户外塑料老化淋溶释放；洗涤进入污水	光解产物醌类自由基毒性更高；抑制藻类光合作用
双酚 A 类化合物	双酚 A（BPA）、双酚 S（BPS）	环氧树脂罐头涂层/PC 奶瓶：非直接添加（单体）；迁移限量 ≤ 0.05 mg/kg（食品接触材料）	食品罐头内衬迁移；热敏纸回收释放	胎盘穿透致胎儿发育异常；模拟雌激素诱发乳腺癌

2. 化学添加剂环境危害及防控措施

在塑料生产过程中，化学添加剂与塑料聚合物间主要以非共价键结合，包括范德瓦耳斯力和氢键作用，只有少部分添加剂会和聚合物发生化学结合。因此它们很容易浸出并迁移到环境介质中。添加剂从塑料中的释放是一个动态过程，涉及扩散、解吸、生物摄食等多重路径。在环境迁移中，温度、光照和机械作用力是主要驱动因素。例如，填埋场中的农膜经紫外线照射后，邻苯二甲酸酯以分子形式渗入土壤，被作物根系吸收后富集于农产品；而海洋塑料在波浪冲刷下释放溴化阻燃剂，吸附于微塑料后被浮游生物摄食，最终通过食物链传递至鱼类和鸟类^[13, 14]。

化学添加剂产生的环境危害体现在三方面：

（1）生态链污染。添加剂在生物体内累积引发级联反应。例如，瑞典研究发现塑料制品每年释放约 5.4 万吨添加剂，其中邻苯二甲酸酯类干扰水生生物内分泌，导致鱼类卵黄蛋白合成异常和贝类钙化障碍；溴化阻燃剂在北极海鸟肝脏中的浓度达天然饲料的 12 万倍，引发繁殖衰退。

（2）健康威胁。人类通过食物链摄入添加剂的风险突出。邻苯二甲酸酯作为典型环境激素，可穿透胎盘屏障，安徽马鞍山研究发现 42% 儿童尿液中检出超标代谢物，男童生殖系统发育异常率显著上升；双酚 A 则通过食品包装迁移，诱发胰岛素抵抗和早熟。

（3）协同毒性。塑料老化产生的纳米颗粒（ $<100\text{ nm}$ ）与添加剂形成复合污染。纳米塑料携带铅、镉等重金属穿透生物屏障，诱发斑马鱼胚胎畸变；可溶性聚合物片段（如聚乙烯醇）螯合水体钙离子，导致贝类幼体外壳钙化失败。越南的造纸回收小作坊，排放含塑废水使河流化学需氧量（COD）超标 8.9 倍，其中重金属与二噁英复合污染导致当地居民皮肤病和呼吸道疾病高发。

针对塑料化学添加剂引发的环境污染问题，有效的防控措施需要从源头减量、过程控制、末端治理以及公众教育和政策引导等多个方面综合考虑。

（1）源头减量。源头替代技术的核心在于通过分子设计、生物基原料转化及复配工艺革新实现环保性能突破。一方面可以共价键结合降低小分子增塑剂的迁移，如北京化工大学开发的 PVC-g-PCL 接枝共聚物采用 RAFT 聚合技术，将聚己内酯（polycaprolactone, PCL）链段与 PVC 分子通过共价键结合，彻底消除小分子增塑剂的迁移风险，工业化测试显示，当 PCL 质量分数达 30% 时，材料玻璃化转变温度从 87°C 降至 45°C ，拉伸韧性提升 200%，且 200 天迁移实验未检出。另一方面，相较于传统邻苯二甲酸酯增塑剂，该技术使医用导管产品的细胞毒性降低