



IAEA

国际原子能机构
原子用于和平与发展



核技术用于控制塑料污染

核技术用于控制塑料污染

目 录

正文摘要	1
1. 战略背景	4
1.1. 发展挑战	4
1.2. 迄今为止国际努力的成果	6
2. 核技术的比较优势	8
2.1. 塑料循环经济背景下的核技术	8
2.2. 海洋塑料污染	10
2.3. 国际原子能机构的作用和方案	11
3. “核技术用于控制塑料污染”结果制方案	14
3.1. “核技术用于控制塑料污染”将如何支持向循环经济转型：变革理论	14
3.2. 目的和成果	16
3.3. 经济模型	18
3.4. 可持续性、风险和缓解	19
3.5. 资源需求和筹资	19
4. 伙伴关系	20
5. 执行	21
5.1. 执行方案	21
5.2. 监测和评价	22
附件：参考文献	23

正文摘要

塑料对现代生活不可或缺。塑料带来的好处和便利不一而足，但大量生产并最终丢弃的塑料正在危害生态系统，严重影响生物多样性、食品安全并最终影响人体健康。迄今生产的所有塑料制品中，大约 70% 现已成为废物，其中只有 9% 得到回收。

在世界上许多地方，塑料废物管理不善，最终进入不受监管的填埋场或露天垃圾场，然后通过河流、排水渠道进入海洋，或者被风刮走，或被潮汐冲走。塑料废物污染不仅限于海洋，土壤和地下水等陆地环境也会受到污染。塑料的设计本身是为了经久耐用，这一特征意味着塑料即使作为废物也不会分解。塑料进入海洋后可以停留数百年。随着时间推移，塑料会碎裂，成为微塑料和纳米塑料，体积非常小，更容易进入食物链。塑料最终也不会消失，而是随着时间推移在海洋中积累。按照目前的趋势，到 2025 年，海洋中塑料和鱼的重量比预计达到 1:3，而到 2050 年，海洋中塑料的重量将会超过鱼的重量。

所有塑料中仅 9% 得到回收的原因多种多样，但主要原因是回收成本太高。此外，一些塑料制品具有多层不同类型的塑料，或者塑料与其他材料融合，使得回收工作特别复杂，因此非常昂贵。尽管塑料污染问题越来越受到全球关注，但迄今为止，国际应对措施大多是零散的、临时的。解决塑料污染方面的空白与缺乏充分的认识、知识、政策、技术和资金有关。

塑料生产、使用和处置的线性模型不可持续。需要一种全球方案来建立循环经济，重点在于“4R”原则：减少、再利用、回收和再造。分析和证据表明，核应用可以补充现有技术，从而加速向**塑料循环经济**转型。然而，除少数专家之外，核科学技术对促进解决塑料废物问题的潜在贡献并不为人所知，因此很少纳入可持续、可扩展解决方案的建议中。这方面需要有所改变，不

仅要使核技术潜力更广为人知，而且更重要的是，在实践中更广泛地予以应用，让核技术在减轻全球塑料废物负担方面充分发挥潜力。为此，原子能机构以过去和目前有关这个问题的工作为基础，开发了“核技术用于控制塑料污染”，协助原子能机构成员国将核技术纳入应对塑料污染挑战的努力，使原子能机构对解决这一全球问题的贡献更显而易见、更为人所知。

原子能机构已支持并在继续支持以下两个主要活动领域的核技术研究和应用：监测和评定海洋塑料以及塑料/聚合物废物的回收和升级再造。

“核技术用于控制塑料污染”是什么？“核技术用于控制塑料污染”倡议旨在协助原子能机构成员国将核技术纳入应对塑料污染挑战的努力。“核技术用于控制塑料污染”立足于原子能机构关于利用辐射技术回收塑料和利用同位素示踪技术监测微塑料的一系列研究和技术合作项目。“核技术用于控制塑料污染”让原子能机构可以在**“塑料污染”**这一全球关切的重要问题上发挥作用。本文件汇编了原子能机构可以提供的方案及其利用核技术可以实现增值的领域，并阐明了补充现有国家和国际努力的系列活动。“核技术用于控制塑料污染”基于有关塑料价值链以及向塑料循环经济转型的最新技术、科学和经济学知识。“核技术用于控制塑料污染”旨在发起并扩大与成员国、合作伙伴、工业界和民间社会的对话，并提出了由原子能机构提供更好地管理塑料废物的解决方案的构想。具体活动的执行将通过既定原子能机构执行模式进行，如技术合作项目、协调研究项目和其他计划活动。

辐射技术，特别是 γ 射线和电子束在减少塑料和聚合物废物方面独具特点和优势，因此填补了废物处理方面的现有技术空白。辐照可以解决主流机械回收方法所面临的分类挑战，将塑料废物进行有效分类，然后送入回收流，从而提高回收塑料的质量和价值。辐射技术可用于将塑料废物转化或回收处理成其他产品，如用作建筑材料的填料和粘合剂，还可用来将废弃塑料聚合物分解成更小的成分，用作生产消费品的化学原料，有的添加原始聚合物（如非回收聚合物），有的不添加。利用辐照引发聚合反应，生产可生物降解的天然聚合物，以取代从石油提炼的塑料，从而也可以减少塑料废物。此外，辐射技术提供了更清洁的生产和回收工艺，以减少可能有害的添加剂和溶剂的使用，并可以节省能源。

海洋是陆地上大多数未回收塑料的最后归宿，对于**海洋微塑料**的丰度和影响，还缺乏足够的知识和了解。需要更准确的数据来评定微塑料和相关污染物对海洋生物、从而对海产品出口、食品安全和人体健康的影响，因为海洋生物是全球食物链的一部分，包括作为人类食物。**同位素技术**在追踪海洋环境中纳米塑料和微塑料丰度和分布方面具有无可匹敌的精确度，对常规技术构成补充。同位素示踪剂、成像技术及 γ 和 β 计数器具有评定微塑料和纳米塑料对海洋生物群的影响的独特能力。这些技术为研究塑料对生物体的毒性提供了重要标记物，以详细揭示受影响器官和系统，并可以追踪实际毒理学应激以及标记物在食物链中可能的传播，这最终会通过海产品消费影响人类。

原子能机构在奥地利和摩纳哥维持和运作**环境实验室**。这些实验室在开展应用研究与发展（研发）、提供培训和分析服务以及向成员国转让环境监测领域的成熟核技术方面有着良好记录。原子能机构不仅在自身实验室开展这些研发活动——这一点使原子能机构在联合国系统独树一帜，而且还通过其由世界各地的研究机构、学术界和基准实验室组成的广泛研究网络开展此类活动，同时也通过其协调研究计划和协作中心机制开展此类活动。

原子能机构通过其**技术合作计划**支持各国建设能力，转让辐射技术和海洋监测等方面的技术和知识。目前，有 40 多个正在进行或规划的国家地区技术合作（技合）项目涉及海洋相关辐射技术和环境监测。

经济和财务模型用于估计各项技术（包括基于核解决方案的技术）可能为加速向塑料循环经济转型做出的贡献。这种方法学方案适用于两个层面：第一，比较现金流量分析估计利用辐照技术补充现有回收工艺（化学和/或机械）的效率增益；第二，利用为分析全球塑料和塑料废物存量和流动而开发的“塑料到海洋”（P2O）[1]模型，进行基于部门的分析，以评定引进新技术带来的潜在益处。此方案估算核技术所能带来的“增值”，为将塑料回收技术试验和验证倡议实验室与技术合作计划联系起来提供了理论依据，从而缩短技术转让的时滞，提高原子能机构工作效率，并增强其有效性。

“核技术用于控制塑料污染”将进一步加强和扩大发展可靠且具有成本效益的技术，用于评定**海洋塑料**的时空丰度和特性，以便更好地了解其来源、迁移机制以及去向和影响。这包括识别环境样品中微塑料的统一标准化规程的制订、符合最佳实践和最先进科学的分析技术以及对科学家和技术人员的技术使用培训。

“核技术用于控制塑料污染”将把塑料废物回收**辐射技术**纳入国家、地区和全球倡议。当前进行的实验室规模的活动正为塑料回收中试厂铺平道路，建立与利用辐射技术回收各种塑料废物有关的数量、能源和财政平衡。根据试点获得的概念验证和经验，将扩大技术规模，建成一个大规模塑料废物回收示范厂。

全球塑料负担的整体可持续解决方案需要一种综合、全面的方法，而这只能通过与具有互补职能和专门知识的组织的**伙伴关系**来实现。至关重要的是在全球和国家两级的现有国家、地区和国际倡议（包括公私伙伴关系）范围内开展工作。这包括与联合国实体、多边开发银行、慈善机构、现有大规模伙伴关系（包括多个利益相关方平台）、私营部门和科研机构的合作。在向塑料循环经济转型的过程中，私营部门将是一个至关重要的合作伙伴，应通过扶持政策和支持性法律环境，以有力的政府行动和所有权为其提供支撑。因此，原子能机构必须与现有备受关注的**公私伙伴关系**、基金会、私营部门协会以及生产塑料制品的公司、塑料回收行业或作为塑料制品主要用户的行业合作，以测试辐射用于塑料回收的可行性和有效性并加以应用，同时扩大拟议解决方案的规模。

“核技术用于控制塑料污染”的两个主要组成部分 — 监测和评定以及塑料回收 — 在逻辑上相互交织，因为两者都有助于解决全球塑料污染问题。然而，这两部分的**落实**并非互为条件。考虑到这种相互关联但不相互依赖的关系，“核技术用于控制塑料污染”采用了**模块化方案**。这一方案的优势在于可根据资源可用性促进开展某些活动，同时让捐助者和合作伙伴有机会参与其工作方式、偏好和优先事项有关的具体活动。目前正在开展若干与塑料有关的活动。

“核技术用于控制塑料污染”目前和将来都将利用各种**既定原子能机构执行模式**来执行，如技合项目、协调研究项目和其他计划活动。

1. 战略背景

1.1. 发展挑战

塑料挑战介绍

塑料是现代生活不可或缺的一部分，事实上，它很可能是世界上使用最多的材料，因为其设计经久耐用，生产成本低廉，自有合成聚合物以来的 150 年、开始大规模生产以来的 70 年间，塑料改变了我们的世界。毫无疑问，塑料有许多优点：可以保护易碎品在运输过程中不被损坏、不受污染，或免遭湿气、微生物或光线造成的其他损害，从而还可以加强食品安全；塑料可以延长产品保存时间，从而减少废物；由于塑料重量轻，有助于在长途运输中节省燃料，从而提高运输效率。然而，正是塑料的无处不在带来了一项快速加剧的全球挑战。科学数据显示，生产和丢弃的大量塑料正在危害生态系统和自然资源，可能对生物多样性、食品安全和人体健康造成严重影响[2]。

线性经济与塑料污染的规模和影响

2017 年，对所有塑料的生产、使用和最终去向的首次全球分析估计，迄今生产的所有塑料制品中，超过 70% 现已成为废物，即总计 83 亿吨塑料中有 63 亿吨成了废物，其中只有 9% 得到回收[3]。按照目前的趋势，预计到 2025 年，海洋中塑料和鱼的重量比将达到 1:3，而到 2050 年，海洋环境中塑料的重量会超过鱼的重量[4]。在世界上许多地方，塑料废物管理不善，最终进入不受监管的填埋场或露天垃圾场，其中大部分通过河流或其他排水渠道进入海洋，或者被风刮走。然而，塑料废物对土地也有影响，污染土壤或地下水。

塑料的设计本身是为了经久耐用，而这一特征意味着一旦进入海洋，它可以在那里停留数百年。随着时间推移，塑料会碎裂，变成微塑料和纳米塑料，可以进入生物体和食物链。塑料最终也不会消失，而是会积累，包括在海洋中积累。据估计，自 1950 年以来，超过 1.5 亿吨塑料进入了海洋[5]。

众所周知，塑料污染对海洋生态系统及其动物的影响特别大[6]。塑料对人体健康可能产生的影响成为一系列广泛研究的主题。其中许多研究关于人体通过食物链对微塑料的摄入，以及塑料通过有毒添加剂积累可能产生的有害影响。到目前为止，尚无任何直接科学证据表明微塑料会直接危害人体健康。然而，塑料污染不仅是一个环境和人体健康问题，也是一项重大的社会经济发展挑战，可能影响到生物多样性、基础设施、旅游业和渔业部门的生计。

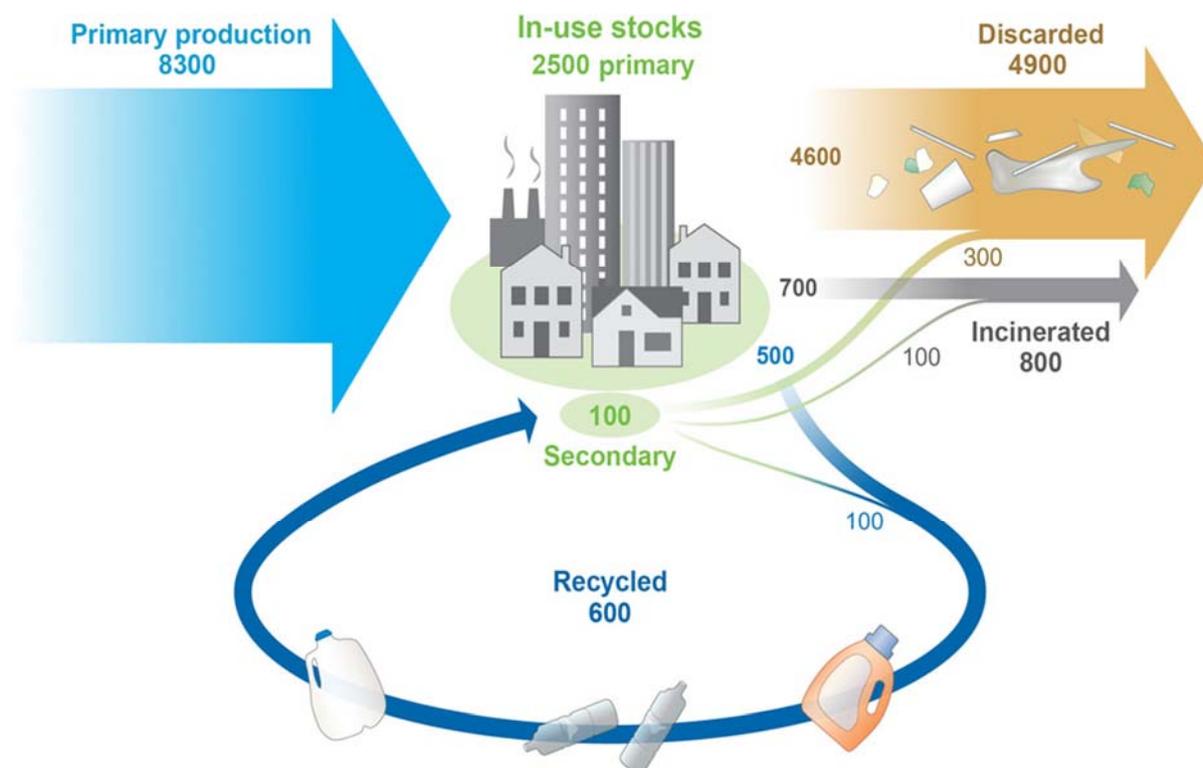


图 1. 塑料废物总体流向：塑料最终去哪儿了？（资料来源：R. GEYER、J.R. JAMBECK、K.L. LAW，参考文献[3]）

到目前为止，塑料经济在很大程度上遵循了“获取、制造、废弃”的线性模式，即塑料一旦不再有用，就将其丢弃。尽管塑料对全球经济有着巨大重要性，但很明显，塑料作为废物带来的有害影响和负面外部影响正日益让其诸多好处黯然失色。因此，一些国家已经禁止某些类型的一次性塑料。2019 冠状病毒病大流行期间，由于对个人防护设备等一次性塑料产品以及出于卫生和健康管理考虑而使用的其他一次性塑料物品的需求急剧增加，本已存在的全球塑料废物负担必将加重。

性别差异化影响

与其他各类环境污染一样，社会不同群体受塑料废物污染影响的程度也因地理、财富、年龄和性别等特征而不同。因此，在讨论塑料经济、其影响和冲击时，为了考虑在塑料污染对女性和男性的不同影响方面的差异化看法，性别分析非常重要。向塑料循环经济转型是一个复杂过程，需要塑料价值链上所有利益相关方的参与。因此，至关重要的是，不仅要满足妇女的具体需要，而且要解决社会中受塑料废物污染影响的其他弱势群体或边缘化群体的具体需要。

对塑料使用和塑料废物管理不善

塑料生产的急剧增长受人口、收入增长等多种因素驱动，其中最突出的原因是塑料包装的增长。在所有非纤维塑料中，42%用作包装材料，平均使用一年或不到一年就会被丢弃。在 1950 年至 2015 年生产的所有塑料中，只有 9%得到回收，12%被焚烧，还有 60%丢弃在填埋场或环境中，剩余的要么处于贮存中，要么在使用中[3]。（见图 1。）

这些数字显示了 65 年来的全球总体情况。显然，塑料废物管理，特别是塑料回收，在不同地区和不同时期也存在差异。例如，自本世纪初以来，许多高收入国家的塑料回收率持续稳步上升，某些国家超过了 30%，而许多较贫穷国家的塑料回收率仅为 10%[7]。中低收入国家的塑料回收率尚不清楚，但至少具备高效非正式塑料废物管理系统的国家，这一比率预计会很高[8]。

对于陆地塑料污染来源，在产品生命周期的处置、收集和回收阶段改进固体废物管理系统是解决问题的根本，特别是在中低收入国家。联合国环境规划署（环境署）数据显示，低收入国家的废物收集平均覆盖率仅为 36%，中等偏下收入国家为 64%，中等偏上收入国家为 82%，高收入国家几乎为 100%^[9]。拥有可靠和全面的废物管理系统和基础设施，加上鼓励回收的法规，是实现塑料高回收率的关键因素。

因此，塑料使用后的去向便因国家不同而千差万别，取决于所采用的废物管理系统。因此，如果不通过回收、焚烧或有序填埋等方式进行适当处置，大量塑料废物迟早会进入环境。若不采取任何行动，到 2040 年，进入海洋的塑料废物数量可能会增至近三倍。即使现有政府和行业减少塑料污染的承诺完全得到落实，每年泄漏入海的塑料也只会减少近 7%^[10]。

迄今生产的所有塑料中仅 9% 得到回收的原因多种多样，但最重要的原因之一涉及从塑料线性经济向塑料循环经济转型的成本。在循环经济下，丢弃的塑料不会被视为垃圾，而是一种宝贵的资源和原材料。这种转变需要较高的前期投资成本，还需要一个更加有利的扶持性环境^[11]。例如，塑料废物回收比传统的废物管理和处理要复杂得多，因为它需要单独收集和分类，这使得总体成本高于玻璃或纸张等其他材料回收系统。解释塑料回收率低的其他抑制因素与某些类型塑料的材料特性有关，例如，这些塑料可能特别薄，如塑料袋或塑料膜，或有多层不同类型的聚合物，因此回收起来特别困难和/或昂贵。塑料包装的回收率低便意味着经济损失巨大：据估计，每年损失的材料价值高达 800—1200 亿美元^[12]。

1.2. 迄今为止国际努力的成果

很显然，塑料生产、使用和处置的线性模式不可持续。相反，正如各种组织的倡议所表明的那样，需要一种不同方案。“核技术用于控制塑料污染”正是本着这一精神，致力于建立塑料循环经济，重点关注“4R”原则：减少、再利用、回收和再造。“4R”概念的要素包括对塑料再利用和回收的经济激励，遏制管理不善的塑料废物泄漏进入环境，以及通过采用替代性可再生原料让塑料生产脱离化石原料。这需要众多参与者做出雄心勃勃的努力，充分利用所有现有技术。

塑料污染已成为全球关切的环境问题，不仅引起了科学界的注意，而且受到各国政府的关注^[13]。事实上，世界各国已经开始采取行动，通过采取国家政策和计划来减少塑料废物、增加塑料回收。与这些努力相匹配的是多项针对塑料废物的地区和全球倡议。与其他全球环境问题一样，解决塑料废物污染问题需要国际、地区、国家和地方各级广泛参与者的合作。但归根结底，政府是解决这一问题的主要驱动力，因为政府有责任在国内和与其他国家共同监管政治、社会和经济事务。

政策和监管环境是遏制塑料废物污染的努力成败的决定性因素，遏制办法包括鼓励减少原始塑料的使用，增加回收定额，以及扩大对回收塑料的需求。即使现有政府和行业承诺完全得到兑现，到 2040 年，较之于“一切照旧”，每年泄漏入海的塑料很可能也只会减少 7%（±1%）^[10]。需要的是向塑料循环经济的系统转变，通过用替代材料来减少对塑料的需求，并提高回收率，从而大幅减少管理不善或丢弃的塑料数量。要做到这一点，就需要制订适当的激励措施，需要进一步创新，还需要资本投资。

政策和监管框架的成就和空白

根据《塑料政策清单》¹，从 2000 年到 2019 年中，已通过约 322 项政策文书，明确旨在解决塑料污染；其中，29 项为国际文书，43 项为地区文书，151 项为国家文书和 99 项为地方文书

¹ 见杜克大学，《塑料政策清单》（2020 年），<https://nicholasinstitute.duke.edu/plastics-policy-inventory>。

[14]。这些政策文书有的属于监管性，有的属于经济性或资料性，提到了处理塑料污染的不同模式，例如制订减少塑料计划、制订新的或改进现有的生产工艺、限制塑料的使用、禁止产品、回收定额、补贴、现金回收机制、税收等。

国际文书和倡议

在国际一级通过的文书基本上不具有法律约束力。随着时间推移，这些文书越来越复杂，在范围上越来越具体，专门针对塑料污染。这些文书相当注重自愿监测，并呼吁各国制订和执行国家行动计划。国际上提出的建议大多包括有关塑料废物管理和清理的积极监管行动；教育和宣传活动；改善塑料废物管理的经济激励措施；以及对一次性塑料的经济抑制措施。

国际一级针对塑料废物污染的行动不仅限于通过某些文书，还有诸多倡议，例如终结塑料垃圾联盟、艾伦·麦克阿瑟基金会与环境署合作的新塑料经济全球承诺、世界经济论坛主办的全球塑料行动伙伴关系、七国集团的《海洋塑料宪章》或 20 国集团的“20 国集团海洋塑料垃圾行动执行框架”。联合国宣布了“海洋科学促进可持续发展十年”（2021—2030 年），以支持扭转海洋健康状况下降周期的努力，并将世界各地的海洋利益相关方聚集到一个共同框架下[15]。

这些倡议的绝大多数都在多个国家实施，牵头的主要是联合国机构、公约秘书处、地区和协调中心等政府间组织，如环境署、世界银行或经合组织，其次是非政府组织和工商业。近一半倡议由多个利益相关方发起，通常与商业和非营利组织共同致力于向塑料循环经济转型。²

地区文书和倡议

地区范围内通过的政策和文书也越来越多。与国际层面相似，随着时间推移，有关塑料污染的地区政策也越来越具有针对性，重点关注特定类型的塑料污染[14]。

2018 年，欧洲联盟（欧盟）通过了《循环经济中的塑料战略》，旨在转变塑料产品的设计、使用、生产和回收方式[16]。根据该战略，到 2030 年，欧盟市场上的所有塑料包装要么可重复使用，要么可回收；欧盟境内产生的一半以上塑料废物必须得到回收；分类和回收能力必须提升为 2015 年水平的四倍。在亚洲，东南亚国家联盟（东盟）于 2019 年通过了《关于应对东盟地区海洋垃圾的曼谷宣言》，其中，各成员国宣布有意加大努力，以陆海综合方案预防和减少海洋塑料污染，加强法律法规，推广实现塑料循环经济的创新解决方案，增强地区和国际合作与信息共享[17]。另一项倡议是联合国亚洲及太平洋经济社会委员会（亚太经社会）的“闭环”项目，旨在检测和监测进入河流的塑料废物的来源和路径[18]。在非洲，“非洲海洋废物网络”项目是一个致力于创建塑料污染知识、提升认识和教育的倡议[19]。在拉丁美洲和加勒比地区，由美洲开发银行牵头的多部门包容性回收地区倡议侧重于正式和非正式回收部门[20]。

国家和地方文书和倡议

迄今为止，大多数文书均由国家和地方各级通过，主要是在高收入国家和中等偏上收入国家[14]。积极监管行动包括制定计划、改进现有工艺和产品或鼓励负责任地处理塑料。禁止性监管行动包括限制或禁止塑料，或禁止不负责任地处理塑料。作为其他经济模式采用的有补贴、减税、现金回收机制，以及诸如费用、税收、征税或关税等抑制措施。最后，各个国家通过教育和宣传、塑料标识、研究、数据收集和报告等方式开展宣传活动。

² 艾伦·麦克阿瑟基金会与环境署合作，于 2018 年启动了新塑料经济全球承诺，有 500 多家组织设定了到 2025 年从源头上解决塑料废物和污染问题的目标。见 <https://www.newplasticseconomy.org/assets/doc/npec-vision.pdf>

2. 核技术的比较优势

2.1. 塑料循环经济背景下的核技术

全球都认识到，塑料污染需要一种长期可持续的且经济上可行的解决方案，摆脱“获取-制造-废弃”的线性模式。³ 考虑到技术和经济可行性，这一挑战的解决取决于迅速向基于 4R 原则（减少、再利用、回收、再造）的塑料循环经济转型。

尽管塑料污染问题在国际上受到大量关注，但迄今为止，全球应对措施大多是临时的。解决塑料污染方面的空白是一个主要障碍，包括缺乏充分的认识、知识、技术、资金和政策[21]。定制核技术的应用为监测海洋微塑料污染及其对生态系统的影响以及改进塑料废物回收提供了独特的科学解决方案。

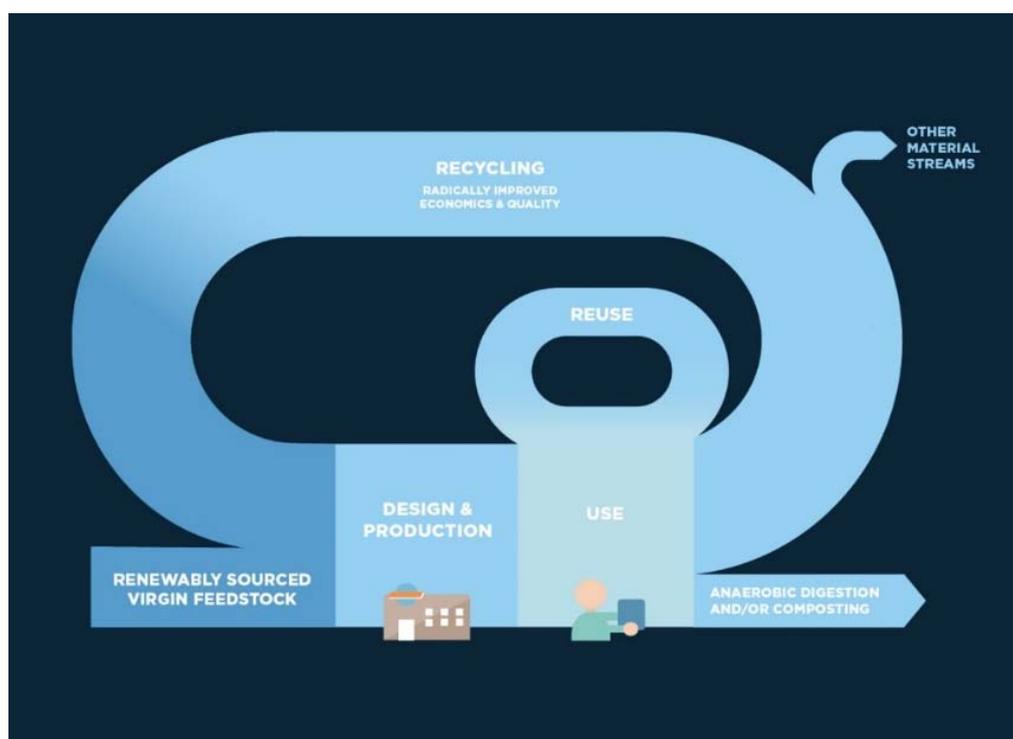


图 2. 塑料循环经济。(资料来源：艾伦·麦克阿瑟基金会⁴)

现行常规回收技术

对报废塑料的唯一可持续管理方案是通过综合回收，这是一种将塑料废物转化为新的塑料制品的过程。目前采用的主要有两种回收技术：机械回收和化学回收。不适合当前主流回收技术的塑料废物可以作为燃料进行焚烧，这一过程被称为能源回收，也可以再造或升级改造成有价值的新产品。

³ 联合国环境大会第四届会议的相关决议包括关于海洋塑料垃圾和微塑料的第 4/6 号决议 (UNEP/EA.4/RES.6)、关于治理一次性塑料制品污染的第 4/9 号决议 (UNEP/EA.4/RES.9)、关于保护海洋环境免受陆上活动污染的第 4/11 号决议 (UNEP/EA.4/RES.11) 及关于实现可持续消费和生产的创新途径的第 4/1 号决议 (UNEP/EA.4/RES.1)，可查阅：<https://web.unep.org/environmentassembly/proceedings-report-ministerial-declaration-resolutions-and-decisions>。

⁴ 见：艾伦·麦克阿瑟基金会，塑料循环经济（2016 年），www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/images/Deep-Dives/m4_circular_economy_for_plastics_big_image_2000px.jpg。

机械回收是迄今为止回收塑料废物最常用的方法[22]。这种方法回收废弃塑料，生产原材料，循环用于塑料生产，从而取代原始塑料。这一过程通常包括收集、分类、清洗和研磨材料，以生成塑料颗粒，这些塑料颗粒随后被融化并重新加工，用于生产新的塑料产品[23]。只有热塑性塑料才能以这种方式回收（即可以重新熔化和再加工成产品的材料）。这类塑料约占全球塑料产量的12%[24]。

塑料的机械回收虽然是一种相对廉价的工业过程，但有一些局限性。这种方法要求对不同聚合物进行分类，这对于多层塑料来说是一项特殊挑战。此外，回收材料的质量在每一轮循环中都会下降，因此，机械加工不能用于超过一到两轮的回收。

化学回收与机械回收不同，可以处理混合塑料废物流。化学回收需采用多种技术（例如气化、热解、流体催化裂化和加氢裂化），将塑料分解到分子水平，并将塑料废料转化为二级原材料。

化学回收较之于机械回收有一个优势，即可以用来处理更广泛的塑料流，包括那些混合塑料、受污染塑料或劣质塑料。然而，化学回收会在很大程度上造成有毒添加剂和污染物的释放，各司法管辖区的国家法规已对其中一些予以了禁止。由于存在这些问题，加上相关成本因素，化学回收的商业运作比较罕见。

塑料循环价值链中的核技术

辐射技术，特别是 γ 射线和电子束独具优势，可以填补塑料回收中存在的技术空白，补充并在某些情况下取代常规技术，弥补它们的缺点。最新研究表明，辐射支持的回收具有诸多优势，包括改进过程控制，提高回收塑料的质量，具备定制产品属性的能力，并且能显著节约成本和能源。该技术的优势在于能够控制塑料聚合物中化学键的形成或断裂方式，从而可以改变聚合物的特性，生成新的化学成分，或分解化学成分。

辐射技术可以分解塑料聚合物，将分子链分裂成较小片段，用作生产新消费品的原料，有的需加入原始聚合物，有的则无需添加。这一点的实现既可以采取共热处理，也可以不采取，取决于回收塑料所用聚合物的抗辐射性能。辐射还可用于废弃聚合物改性，比如，改性后获得新型材料，用于制造新产品。辐照可以更有效地分离塑料废物，让其得以进入机械回收流，从而提高回收塑料的质量和价值。

辐射技术甚至可用于照射大量的聚合物废物。这对该技术的商业用途和应用都有意义。此外，当其他方法不再可行时，辐射技术可以用来将废弃塑料回收成新产品。这有可能减少进入塑料价值链的原始化石燃料塑料的数量，从而产生进一步的环境效益。

辐照改进化学回收工艺

辐照与热解（利用热改变材料的化学成分）相结合，生成新的塑料化学原料，避免使用溶剂和催化添加剂，为化学回收提供更清洁的生产工艺，还有可能提高过程的能源效率，并提高终端产品的质量和产量。

电子束也可以用来增加和改进回收，办法是利用静电分离加强对混合塑料的分类。借助辐射处理，还可以定制聚合物废物属性，生成新的复合材料，并实现废物材料的创新再利用。这有助于使塑料重复可用，进一步减少塑料废物。

2.2. 海洋塑料污染

海洋是许多陆地塑料污染的最后归宿[25]。每年有数百万吨塑料废物进入海洋环境，预计未来几年这些数量还会增加[26]。由于塑料颗粒体积较小，许多海洋物种，包括那些与全球渔业有关的物种，都可能主动或被动地摄入塑料颗粒。海洋塑料垃圾的整体规模尚未得到系统或充分计算[27]。

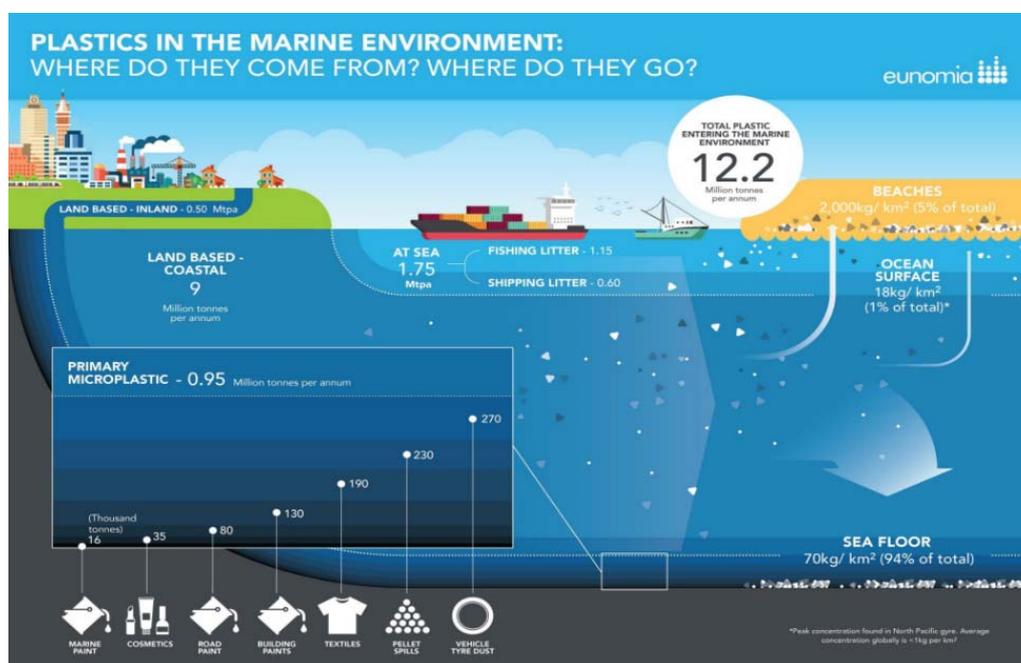


图 3. 海洋环境中的塑料：来自何方？去往何处？（资料来源：ECOWATCH⁵）

塑料污染对海洋生物以及更广泛的沿海和公海海洋生态系统的影响仍不确定，需要仔细监测和评定[28、29]。事实上，最新评定指出，初步发现微塑料甚至在人类胃肠道中积累，这可能产生有害影响[30、31]。

鉴于海洋塑料废物存在许多不确定性，有必要进一步了解海洋塑料污染的规模及其对沿海和海洋生态系统和生物体的影响[3]。过去十年间，全球科学界投入了相当大的努力，以增进了解选定塑料颗粒的丰度及其对水生生物的影响[27]，同时观察到，海洋中的塑料被水流和潮汐有效地分散在整个水域中，经过持续的物理和化学降解，而形成越来越小的塑料颗粒。这种降解过程也会释放出共同污染物，要么是塑料颗粒固有成分，要么是从活性颗粒表面清理出来的[29]。要全面了解这些共同污染物对海洋生物体的影响，加强食品安全和粮食安全，包括许多国家沿海人口赖以生存的海产品出口，还需要更多数据。

核技术的优势

专门同位素技术具有无可匹敌的精确度和实用性，可以作为其他技术的补充，评定海洋塑料颗粒的时空丰度、特性及影响。因此，这些技术有助于对海洋垃圾进行全面监测和评定，在政策层面制订缓解战略，以及评价此类措施的有效性。

⁵ 见：ECOWATCH，新报道发现：80%的海洋塑料来自陆地（2016年），www.ecowatch.com/80-of-ocean-plastic-comes-from-land-based-sources-new-report-finds-1891173457.html。

同位素示踪剂和核成像技术在评定塑料对海洋环境造成的影响和应力方面具有若干优势：(一) 分析敏感性，可以进行更精确可靠的预测；(二) 与以有机或无机污染物进行评定相比，样品交叉污染问题通常要小得多，有利于实验室间的广泛交流；(三) 可用于非破坏性分析，从而可以进行生物活体实验；(四) 可以整体显示污染物对整个生物体的影响以及在生物体内的移动。这为研究塑料可能对生物体的毒性提供了重要标记物，可详尽显示受影响器官和系统，从而可以追踪实际毒理学应激以及标记物在食物链中可能的传播，这最终会通过海产品消费影响人类。

此外，核技术还有助于发现塑料在降解、释放和清除共同污染物（如多氯联苯、卤系阻燃剂以及汞和铅等微量元素）时的额外环境影响。随着海洋中塑料数量的增加，以及海洋受气候变化影响而日益变暖，估计此类过程的路径和影响会越来越重要。

2.3. 国际原子能机构的作用和方案

根据其《规约》，⁶ 原子能机构的任务是加速和扩大用于和平目的的核科学技术的贡献。因此，原子能机构是发展和转让核技术和应用的中心。核技术经过原子能机构研究活动的严格研究和验证。相关核技术一旦足够成熟，就可以通过原子能机构的技术合作计划转让给所有国家，特别是发展中成员国。

原子能机构在支持核技术应用的研究与发展方面有着悠久而成功的历史。原子能机构通过其核科学和应用部维持和运作位于奥地利和摩纳哥的环境实验室。⁷ 这些实验室支持并开展各种活动，以满足成员国在一系列主题领域的发展需要，同时在开展应用研究与发展、提供培训和分析服务以及向成员国转让成熟核技术方面有着相沿成习的良好记录。

原子能机构不仅在自身实验室开展这些研究与发展活动，而且还通过其由研究机构、学术界和基准实验室组成的广泛研究网络开展此类活动，同时也通过其协调研究计划和协作中心⁸ 机制开展此类活动。

一些协作中心与“核技术用于控制塑料污染”直接相关。一些合作机构在聚合物、废弃聚合物和生物复合材料的辐射处理方面具有特定专门知识，而其他机构的研究重点则是海洋和海洋学研究，包括海洋环境污染。对于已指定原子能机构协作中心的地区和国家，“核技术用于控制塑料污染”的潜在益处会得到加强。

⁶ 《规约》第三条 A 款规定，原子能机构有权“鼓励和援助全世界和平利用原子能的研究、发展和实际应用；遇有请求时，充任居间人，使机构一成员国为另一成员国提供服务，或供给材料、设备和设施；并从事有助于和平利用原子能的研究、发展、实际应用的任何工作和服务。”

⁷ 核科学和仪器仪表实验室开发、改造和向成员国转让核仪器仪表和加速器应用，用于从环境监测到材料科学的广泛业务。原子能机构设在摩纳哥的三个海洋环境实验室致力于了解和保护健康的海洋环境以及环境资源的可持续发展。

⁸ 有关协作中心的更多背景资料，见：

https://www.iaea.org/sites/default/files/16/07/iaea_collaborating_centres_scheme_external_guide_v1.1_april_2016.pdf。



原子能机构环境实验室每天都在进行实验。

除其协作中心机制及其实验室工作之外，原子能机构还鼓励和协助世界各地成员国对核技术和应用的研究、发展和实际利用，汇集来自发展中成员国和发达成员国的研究机构，在所谓协调研究项目中就共同感兴趣的研究项目展开合作。原子能机构作为协调机构，通过这些协调研究项目向成员国的研究机构授予研究合同、技术合同、博士合同及研究协议。

原子能机构在支持塑料价值链中特定核技术的研究、发展和应用方面有着良好记录。原子能机构应用核科学技术来补充现有的常规技术，并提出新的解决方案来帮助其成员国。

根据“核技术用于控制塑料污染”，原子能机构环境实验室将进一步加强和扩大发展可靠且具有成本效益的技术，用于评定海洋塑料的时空丰度和特性，以便更好地了解其来源、迁移机制以及去向和影响。这包括识别环境样品中微塑料的统一标准化规程的制订、对科学家和技术人员的培训以及符合最佳实践和最先进科学的分析技术开发。同时，微塑料的比较监测有助于量化和识别示范厂的环境影响。

海洋监测

原子能机构利用核技术支持成员国在“联合国海洋科学促进可持续发展十年”框架内努力实现本国的联合国可持续发展目标和具体目标。这项工作涵盖气候变化和人为因素对海洋的影响，如陆地或海洋污染、海洋变暖、海洋酸化和海洋脱氧。自 2016 年以来，原子能机构环境实验室一直在研究塑料对海洋生物体的影响。各国政府将这些研究成果用作政策决策的科学资料。

原子能机构使用放射性示踪技术来研究沿海环境中污染物或生物毒素的去向，以及气候变化等全球压力因素对海洋生物的影响。目前，这些工具在检测塑料对水生生物的影响方面十分重要。

通过原子能机构的技术合作计划，许多国家都在强化其监测和减轻不同污染物的知识，例如评定放射性核素和非放射性污染物及其对环境和生态系统的影响。原子能机构是世界上不同基质（如鱼、植物、土壤、水或其他物质）中放射性核素基准材料的最大供应方，其中一些已被用作国际测量标准。原子能机构向世界各地的实验室提供这些基准材料，协助其确保应用适当核分析技术和非核分析技术取得准确、可信和可靠的结果。



这是原子能机构环境实验室中食用了微塑料颗粒的丰年虾特写镜头。
(照片来源：F. Oberhaensli/原子能机构)

技合计划在海洋污染取样、藻华控制、污染物（包括重金属、有机化合物、放射性和毒素）分析、海产品安全、使用放射性示踪剂的实验室试验方面建设了能力，为开展微塑料监测和评定活动奠定了坚实基础。可以扩大这些领域的现有能力，以便能够借助更多的先进技术（例如微型傅立叶变换红外光谱仪、自动大气监测网、气相色谱-质谱测定法等）以及专门培训来对塑料污染进行表征和评价。

聚合物辐射

二十世纪 80 年代和 90 年代，通过协调研究项目展开了对聚合物辐射的基础研究，特别侧重于用于生物医学和生化应用的聚合物、工业和医疗用聚合物或本地天然聚合物的辐射处理。⁹ 二十一世纪初，继续进行聚合物辐射技术的研究与发展，¹⁰ 还包括利用辐射诱导移植术发展新型吸附剂和薄膜。¹¹ 另一个协调研究项目侧重于利用天然聚合物开发辐射加工产品，以生产用于农业、保健、工业和环境的增值和适销产品。¹² 其他辐射技术协调研究项目涉及纳米复合材料的生成；利用辐射形成新型抗划涂层；增强表面光洁度的涂料的辐射引发聚合反应；¹³ 以及利用辐射技术开发新型天然聚合物和合成聚合物包装材料，并评定辐射对食品包装材料的影响。¹⁴ 众多协调研究项目涉及辐射技术的其他工业应用，¹⁵ 其中许多已促成了成功的技术转让，催生了可持续工业，这就是原子能机构及其伙伴这方面工作记录良好的明证。

⁹ 其中包括：CRP385 号协调研究项目“用于生物医学和生化应用的辐射改性聚合物”（1980—1983 年）；CRP927 号协调研究项目“工业和医疗用聚合物的辐射改性”（1984—1989 年）；CRP1018 号协调研究项目“辐照下聚合物的稳定性和稳定化”（1993—1997 年）；及 CRP931 号协调研究项目“本地天然聚合物的辐照处理”（1997—2000 年）。

¹⁰ CRP565 号协调研究项目“控制聚合物辐射处理中的降解效应”（2003—2006 年）。

¹¹ CRP1434 号协调研究项目“[利用辐射诱导移植术发展供选择性分离的新型吸附剂和薄膜](#)”（2007—2011 年）。

¹² CRP1467 号协调研究项目“[开发用于农业、保健、工业和环境的经辐射处理的天然聚合物产品](#)”（2007—2013 年）。

¹³ CRP1783 号协调研究项目“[保健和工业利用辐射固化增强复合材料特性和用途](#)”（2011—2015 年）。

¹⁴ CRP1947 号协调研究项目“[辐射技术用于开发先进食品包装材料](#)”（2013—2017 年）。

¹⁵ CRP1539 号协调研究项目“[特别侧重于含有机污染物废水的废水辐射处理复用](#)”（2010—2016 年）；CRP2220 号协调研究项目“[利用大功率电子束加速器进行生物危害辐射灭活](#)”（2018—2022 年）；CRP2216 号协调研究项目“[辐射技术用于处理新兴有机污染物](#)”（2019—2023 年）。

一个新的协调研究项目（2020 年核准）“利用电离辐射回收结构材料和非结构材料聚合物废物”被定位为“核技术用于控制塑料污染”回收部分的研究与发展支柱。2020 年底举行了一场咨询会议，有该领域的专家以及世界各地的同行参加，明确概述了正在测试的多项技术，并就未来的最佳方法提出了建议。还有许多技术处于不同的研究和测试阶段。

咨询会议向原子能机构提出的建议强调了“核技术用于控制塑料污染”回收部分的重要性。辐射技术将聚合物废物转化为原料和用于高性能结构和非结构应用的新材料的潜力得到了确认，因此各成员国要求原子能机构大力采用、推广和进行技术转让。具体而言，建议原子能机构分析并推广利用连续的模块化辐射处理技术来补充现有的机械和化学工艺，以此作为可扩展制造方法的一个范例，支持塑料生产和回收领域具有成本效益且生态友好的可持续解决方案。为此，原子能机构正努力协助在政府、工业和科学各层面建立国际合作，强化辐射技术安全可靠地应用于回收聚合物废物的影响力，扩大其影响范围，并提升全球对此类应用有效性的认识。

原子能机构研究与发展活动的成果以既有知识和成熟技术的形式转让给成员国。原子能机构技术合作计划已建立了国家能力，并加强了成员国将辐射技术用于聚合物回收的技术能力。用于材料加工和制造先进材料的诸如电子束和 γ 辐照器等技术的转让已让许多成员国受益。

3. “核技术用于控制塑料污染”结果制方案

3.1. “核技术用于控制塑料污染”将如何支持向循环经济转型：变革理论

从线性到循环

“2030 年议程”承诺消除多层面贫困，实现人人可持续的公平发展。利用核技术支持从塑料线性经济向塑料循环经济的转变，是对“2030 年议程”的内在贡献。“目标 12”是国际社会对可持续消费和生产模式的承诺，“可持续发展目标 12.5”特别呼吁各国到 2030 年“通过预防、减排、回收和再利用，大幅减少废物的产生”。

解决塑料污染的根源需要系统性的解决方案，减少对有限化石燃料材料的需求，并缩减与当前塑料价值链相关的负面外部效应。简言之，国际社会必须减少从原始原料进入经济的塑料数量以及无更多增值而退出经济的塑料数量。换言之，世界需要从废物管理方案转向资源管理方案。这可以通过从线性的“获取-制造-废弃”模式转变为循环经济来实现。在此模式下，可以在如下所示价值链的多个阶段采取行动。

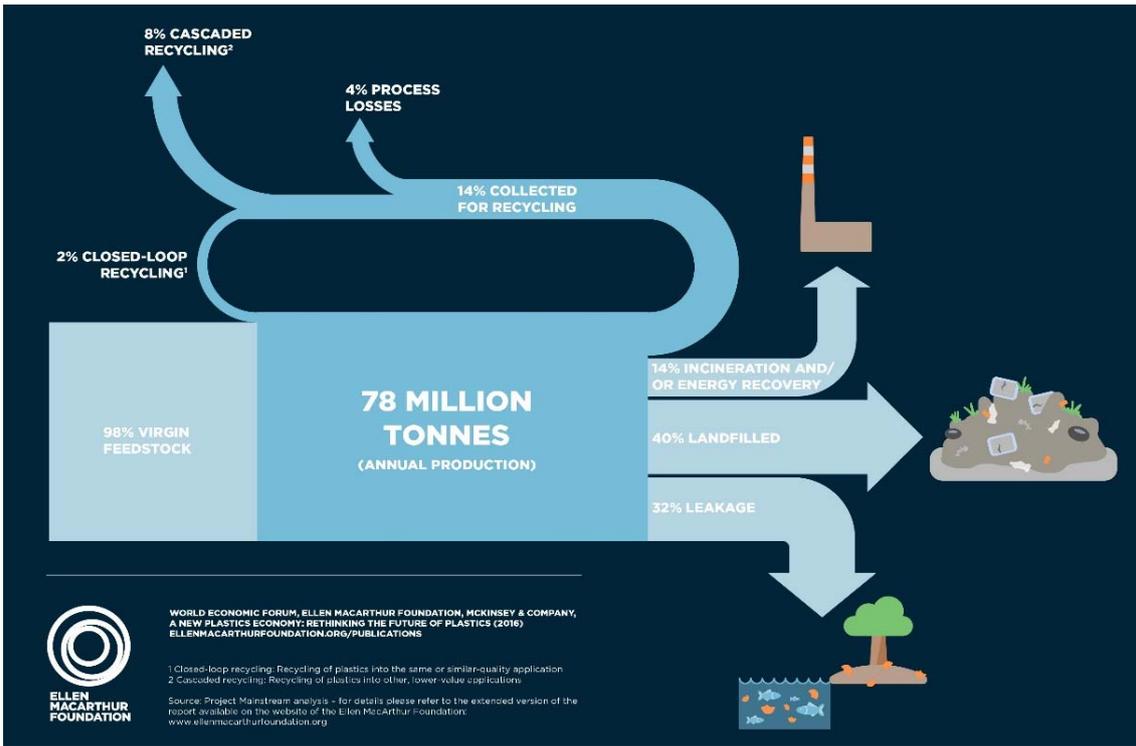
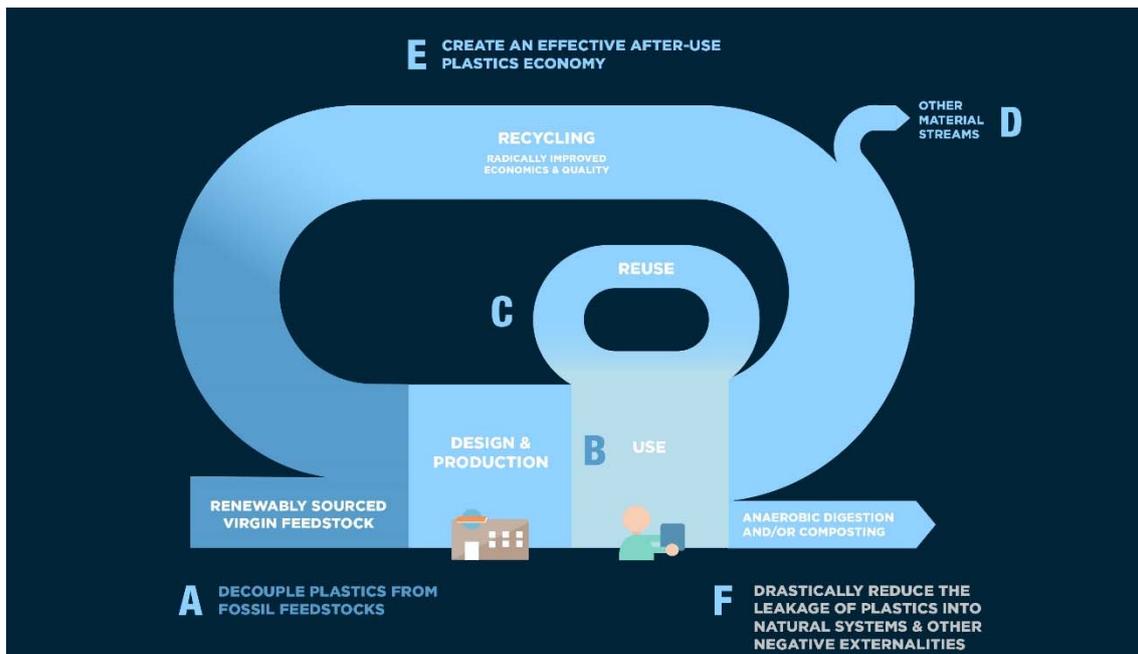


图 4. 全球塑料包装的流动 (2013 年)。(资料来源: 艾伦·麦克阿瑟基金会)

“塑料到海洋” (P2O) [1]模型属“同类首个模型”，系为分析在全球社会存在和流通的塑料和塑料废物的存量和流动而开发。P2O 模型可以对塑料废物管理系统的所有组成部分进行预测和全球分析。“核技术用于控制塑料污染”正在利用这一模型来评定核技术对塑料废物经济的经济影响。目前，模型输入参数系基于预测和估计。一旦中试厂投入运行并提供关键性能数据，P2O 预测的可靠性应会提高。



- A. 减少塑料生产
- B. 减少塑料使用
- C. 增加塑料制品的再利用（避免一次性塑料和塑料废物的指数级增加）
- D. 增加将塑料废物回收处理成其他产品的数量
- E. 提高回收废物的质量，将其用作塑料生产的原料或用其取代基于石油的原料
- F. 清理海洋中和陆地上的现有塑料废物

图 5. 新塑料经济的目标。（资料来源：世界经济论坛、艾伦·麦克阿瑟基金会、麦肯锡商业与环境中心，参考文献[4]）

3.2. 目的和成果

“核技术用于控制塑料污染”的总体目的是**协助原子能机构成员国将核技术纳入其应对塑料污染挑战的努力**。

两项主要成果：

1. 强化全球对海洋塑料污染严重性和影响的了解。
2. 通过应用辐射技术来补充传统实践，改进回收和生产方法。

强化全球对海洋塑料污染严重性和影响的了解

这一部分旨在使成员国能够通过评定有关其领海及附近塑料污染的基线情况和预测的假想情况，改进海洋塑料管理。“核技术用于控制塑料污染”将建设世界各地实验室部署同位素技术和其他技术的能力，以便监测和评定海洋塑料污染的影响，并得以交流该领域的数据、知识和最佳实践。来自所有地理区域的若干成员国已在原子能机构的帮助下建立了强大的海洋环境监测能力，能够进一步受益于“核技术用于控制塑料污染”。

产出 1.1：提升全球对同位素技术用于海洋塑料监测和影响评定的认识。

这一产出旨在提升全球对同位素技术准确性和精确性优势的认识，以填补全球在海洋微塑料和纳米塑料监测和影响评定方面的知识空白。

产出 1.2: 确定公共和私营伙伴，以支持提高海洋实验室的监测能力。

这一产出旨在利用必要的多利益相关方伙伴关系，促进更广泛地利用同位素技术，对海洋环境中的微塑料和纳米塑料进行准确监测和影响评定。

产出 1.3: 建立拥有充足设备和训练有素工作人员的业务实验室，并采用适当规程。

这一产出的重点是设备转让、技术咨询服务和培训，并支持各国制订规程，以适当采集、测绘和追踪海洋中的微塑料以及评定它们对海洋生态系统的影响。

产出 1.4: “核技术用于控制塑料污染”监测网络。

这一产出将建立一个能够监测和评定海洋塑料影响的全球实验室网络，以便能够交流数据、知识和最佳实践。这些实验室将作为地区资源中心，用于持续提供服务和学习。

产出 1.5: 有关纳米塑料和微塑料的来源、分布、迁移、影响和去向的知识。

这一产出将推动有关纳米塑料和微塑料的研究和知识发展。

通过应用辐射技术，改进回收和生产方法

辐射处理是科学实验室验证过的技术，具有补充机械和化学回收的潜力。然而，它既不为全球塑料界所熟知，亦未被列为替代解决方案。这一部分旨在向利益相关方证明辐射技术在改进现有回收方法方面的有效性和效率，并通过让私营参与者参加验证过程以及建立伙伴关系以支持及早采用，加速各项技术从实验室向商业用途转化的进程。

辐射技术是现有化学和机械回收过程的补充技术，因此，有兴趣在这一部分开展活动的国家需要确保满足一系列塑料价值链先决条件，并制订扶持性监管框架。

产出 2.1: 提升全球对辐照技术在塑料处理和回收方面的比较优势的认识。

这一产出旨在通过提升全球塑料界的认识，强化辐照技术作为塑料污染问题解决方案的一部分的影响力。

产出 2.2: 确定公共和私营伙伴，以支持辐照技术从实验室向工厂的转让。

这一产出旨在利用必要的多利益相关方伙伴关系，促进更广泛地利用辐照技术补充现有塑料生产和回收工艺。

产出 2.3: 第一阶段：在回收厂安装试用辐照机。

这一产出的重点是确保机构能力足以制订将辐照技术用于塑料废物管理的试点计划，支持设备转让、培训和关于制订中试厂发展行动计划同步所需规程的专家意见，并设想了借助面向候选者/国家的成本效益分析和可行性模型开发对所转让技术的评定和验证过程。

产出 2.4: 第二阶段：示范厂与公共/私营伙伴一起运营，使这项技术达到商业规模。

这一产出的重点是支持示范厂的安装过程，以及对已安装和运行的工厂辐照机提供专家意见和监督。

3.3. 经济模型

海洋垃圾每年造成的费用为 130 亿美元，主要因其对渔业、旅游业和生物多样性的不利影响[32]。塑料污染的社会和环境总成本估计为每年 1390 亿美元[33]，其中一半源自与塑料生产和运输相关的温室气体排放造成的气候影响，还有三分之一源自相关空气和水土污染对健康、作物和环境的影响，以及废物处理费用。减轻这一社会负担的任何努力都将是一种积极尝试，原子能机构愿为之做出贡献。

核技术对整个塑料价值链的增值

本节介绍方法学方案，用于估计核基技术可能为加速向塑料循环经济转型做出的贡献。此方案将有助于更好地估算核技术能够给塑料价值链带来的“增值”。阐明这些实验技术的预期增值有助于将实验室与商业回收厂、其他私营部门实体和技术合作计划支持的技术验证倡议联系起来，从而缩短技术转让的时滞，并增强原子能机构工作的有效性。

这种方法学方案利用先进的经济和财务模型系统，适用于两个层面。

首先，对不同的工厂规模进行初步成本效益分析，以评定这些工厂与现有设施相比可能具有的潜在优势。分析基于一种假设，即辐照技术能够通过整体投入成本较低的节能工艺改进现有回收工艺并生产质量更高的塑料颗粒。¹⁶ 这种方法学方案将在实施过程中适用，以确保对技术进行合理验证，同时在获得关键的市场和行业相关数据后对其进行更新，并在必要时根据具体情况确定每项具体建议。

其次，列举了“核技术用于控制塑料污染”所协调行动的预期益处，将当前情况与引进这些新技术的潜在影响进行了比较。这里借助了上述 P2O 模型的敏感性分析，确定和修改了 P2O 模型的具体参数，以反映在微观模型中假设的技术改进。为了在获得详细资料后，纳入加强海洋微塑料监测能力和相关科学决策的预期益处，还将开展更多工作。

通过 P2O 模型测试了辐射技术可能减少塑料泄漏入海的情况。模拟活动显示，如果与分类过程或者机械或化学回收过程结合部署，辐射技术将减少海洋垃圾。如下图 6 所示，辐射结合正式分类，可减少垃圾 1.83 千克/吨；辐射结合机械回收，可减少垃圾 2.3 千克/吨。如果辐射技术与向单体和向碳氢化合物的化学转化结合部署，将实现海洋垃圾的最大程度减少（4.41 千克/吨）。分析得出的结论是，利用辐射补充化学转化实现的**海洋垃圾估计减少量超过**辐射技术与分类过程或机械回收结合部署所实现减少量的**两倍**。

¹⁶ 假设基于原子能机构 2020 年 10 月 27 日至 30 日举行的虚拟专家咨询会议的结论，其中确认，辐射分解可以将热解温度降低 150 度，节能效率高达 700 千焦/千克，再次证实了 A.V.Ponomarev 的研究结论（2020 年）。“辐射分解是聚合物废物回收的有力工具”。《高能化学》，第 54 期，第 194—204 页。

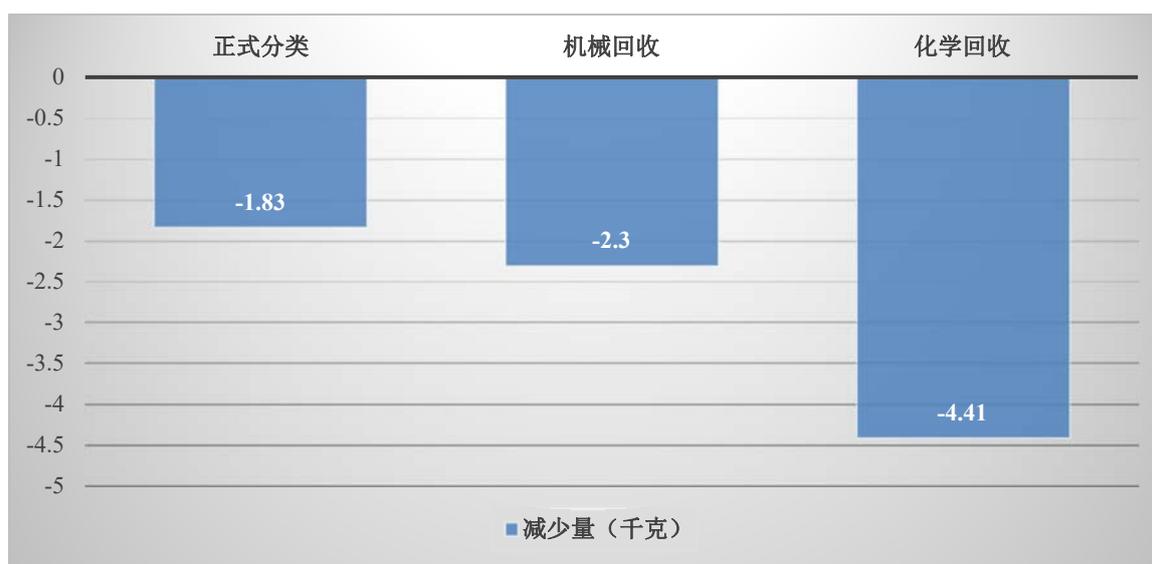


图 6. 辐射技术与常规技术结合部署可能减少海洋泄漏量（每吨）。基于 P2O 模型工具的自行阐述。

这些是基于改良回收技术相关假设的初步结果，属于保守结果，因为回收塑料仅占整个塑料废物管理的 9%，但是，考虑到回收量的预期增加（高达 60%），目前正在开发一个动态模型，以研究“核技术用于控制塑料污染”作为向循环经济整体转型的一部分而引进的新技术可能产生的影响[34]。

3.4. 可持续性、风险和缓解

实现向塑料循环经济的全面转型有赖于再利用塑料和回收塑料高于新化石塑料的效率和成本效益。辐射技术所提供的竞争优势是成功实现转型的一个关键要素。

监测管理结果的综合工具将跟踪“核技术用于控制塑料污染”下活动相关的实施进展和支出，上述 P2O 模型将用于评定和预测取得的结果。该模型还可以查明具体干预措施预期流程中的主要瓶颈，从而有可能着力于重点干预措施，解决向塑料循环经济转型的可持续性方面的不足之处。这些论点将为把塑料视为一种有价值的原材料而非废物铺平道路。

围绕实现“核技术用于控制塑料污染”目标的不同可能假想方案仍然存在着多种不确定性，这些不确定性取决于超出“核技术用于控制塑料污染”控制范围的一系列因素和参与者。在发展变革理论的同时，确定了一系列关键的前提条件，并对“核技术用于控制塑料污染”实现其预期结果所需采取的相关行动作出了假设。如果其中任何一项不能实现，都可能对“核技术用于控制塑料污染”构成风险。

3.5. 资源需求和筹资

加强海洋实验室的能力将耗资约 110 万欧元（包括需求评定、能力建设和设备），辐照中试厂的费用约为 210 万欧元（包括能力建设、可行性研究和设备/建造）。这些都是指示性数字。具体的“核技术用于控制塑料污染”项目和预算将与具体请求成员国协商编制，并将相应确定具体项目的财务需求。

4. 伙伴关系

全球塑料问题在性质上属于跨国问题，影响到全世界所有国家，而发展中经济体承受的负担最重。塑料价值链上的问题挥之不去，各种参与者都在着手解决。原子能机构的任务仅涵盖塑料价值链的一部分，即可以应用核科学技术补充现有方法的部分。全球塑料负担的整体可持续解决方案需要一种综合、全面的方法，而这只能通过与具有互补性的参与者的伙伴关系来实现。至关重要的是在全球和国家两级的现有国家、地区和国际倡议范围内开展工作。这包括与联合国实体、多边开发银行、慈善机构、现有大规模伙伴关系（包括多个利益相关方平台）、私营部门以及既有公私伙伴关系倡议和科研机构的合作。

原子能机构有意为应对全球塑料挑战的现有伙伴关系提供增值，并将通过以下方式实现这一点：

- 向合作伙伴提供对塑料表征及其丰度、分布和影响的准确评定，以便为环境决策和管理决定提供资料。
- 通过辐射技术提供新型塑料回收方案，以补充常规方法，填补迄今尚无任何塑料废物倡议涉及的现存空白。

为此，原子能机构将加强与相关合作伙伴的接触，提升对核技术补充现有技术的独特优势的认识，并寻求建立伙伴关系，以加速向塑料循环经济转型。

原子能机构有意加强与联合国系统内正就应对全球塑料挑战的互补性方面开展工作的姊妹组织合作，其中包括教科文组织海委会、粮农组织、开发计划署、环境署和工发组织。这些组织也参与了原子能机构作为官方合作伙伴的“联合国海洋科学促进可持续发展十年”。原子能机构已经与许多直接或间接研究全球塑料废物及其对陆地、海洋和大气的各种影响的组织建立了伙伴关系。

在向塑料循环经济转型的过程中，私营部门将是一个至关重要的合作伙伴，应通过扶持政策和支持性法律环境，以有力的政府行动和所有权为其提供支撑。因此，原子能机构将与现有备受关注的公私伙伴关系（如全球塑料行动伙伴关系）、基金会、私营部门协会以及生产塑料制品的私营部门公司合作，以测试辐射用于塑料回收的可行性和有效性并加以应用。利用与工商界、既有公私伙伴关系、基金会、塑料协会和其他相关利益相关方的伙伴关系，将提升对实际应用技术创新和革新型解决方案的领域核科学技术处理塑料废物的益处的认识，并协调对其他潜在合作伙伴网络的宣传。

原子能机构认识到必须向更可持续的塑料管理实践过渡，而这需要大规模投资，因此将与国际金融机构和发展融资机构密切合作，将它们作为国家和私营部门建立塑料循环经济闭环工作的主要投资方。

为了交流信息和利用各方贡献，将寻求与其他技术和科学机构合作，例如：

- 专攻北极雪/冰芯塑料污染的研究机构，如德国阿尔弗雷德·魏格纳研究所的亥姆霍兹极地和海洋研究中心；瑞士雪和雪崩研究所；挪威研究理事会；丹麦海洋研究中心；英国南极调查局；挪威极地研究所；北极网（ArcticNet）等。
- 具有复杂系统建模能力的利益相关方，如世界气象组织（气象组织）、美国地质调查局和国际理论物理中心。

5. 执行

5.1. 执行方案

本“核技术用于控制塑料污染”文件所述活动将利用各种既定原子能机构执行机制来开展，如技合项目、协调研究项目和其他计划活动。“核技术用于控制塑料污染”的两个主要组成部分——海洋监测和回收/再利用——在逻辑上相互交织，因为两者都有助于解决全球塑料污染问题。然而，这两部分的运作是独立的，因为一个部分的活动开展并不以另一个部分的执行为条件。“核技术用于控制塑料污染”通过采用**模块化执行方案**，考虑了这两个部分相互关联但不相互依赖的关系。这一方案的优势在于两个方面：

首先，模块化方案最适合考虑各国不同的需求、偏好和能力，以解决其具体的塑料问题。有的国家可能需要更准确地监测和评定海洋塑料污染；另一些国家则可能需要利用辐射技术升级塑料回收设施；还有一些国家可能希望选择二者兼顾。模块化方案确保坚决以成员国需求和优先事项为基础，以最大程度的灵活性落实执行工作。

其次，模块化方案在调动和确保必要财政（和非财政）资源方面具有灵活性，从而可以尽早启动执行工作。一旦有“种子”资源可用，虽然其余资源仍在确定过程中，也可以着手开展“核技术用于控制塑料污染”的具体活动。这种方案还有另外一个优势：让捐助者和合作伙伴能够根据其偏好和优先事项参与具体活动。

目前，有 40 多个正在进行或规划的技合项目、协调研究项目和其他计划活动涉及辐射技术和环境监测。其中，超过 25 个项目与塑料直接相关。这些项目可以在必要时扩大范围，纳入“核技术用于控制塑料污染”活动。

希望参与“核技术用于控制塑料污染”活动的国家，无论是参与回收部分还是监测部分（抑或二者兼顾），都必须考虑以下标准：

- 国家/地区塑料废物问题的范围。
- 除各自国家机构、相关地区网络和合作平台之间强有力的战略联系之外，以各自政策、计划和指标为证据的解决塑料废物污染的坚定政治承诺。
- 通过正式或非正式的塑料废物管理进行塑料废物收集和分离。
- 持续参与塑料废物倡议。这将确保解决整个塑料价值链问题，并确保原子能机构的贡献和影响大于单项干预措施。
- 承诺深入了解微塑料污染对海洋的影响。
- 在辐照技术和（或）海洋环境分析方面的现有能力。
- 在核技术和应用领域与原子能机构合作的经验，例如通过原子能机构协作中心。
- 为了利用辐射技术或者因为愿意落实此类技术，建立了必要的监管环境。
- 具备相关私营（塑料）部门，不仅已经参与，而且经验丰富，同时还对通过公私伙伴关系进行协作持开放态度。

活 动	时间安排				
	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年
回收					
认识					
中试厂					
宣传活动					
可行性					
建造					
运营					
示范厂					
可行性					
建造					
运营					
伙伴关系					
伙伴关系					
监测					
认识					
公私伙伴关系					
宣传活动					
伙伴关系					
实验室能力					
采购设备					
培训					
网络					
监测网络					
知识					
知识					

图 7. “核技术用于控制塑料污染”执行时间表。

5.2. 监测和评价

每一种执行模式（技合项目、协调研究项目和其他计划活动）都将使用各自标准的监测、评价和报告程序与机制。原子能机构监测和评价系统的核心是结果制方案，采用逻辑框架、指标、验证手段和假设。“核技术用于控制塑料污染”包括每一部分的结果指标。已开发了详细的监测和管理工具。这些指标将在执行过程中予以监测，进展情况将记入一年两次的报告。鉴于“核技术用于控制塑料污染”是在一个由其他利益相关方发挥主要作用的不断变化的环境中运作，变革理论中采用的一些假设是成功实现结果的关键因素。在执行过程中，作为风险管理框架的一部分，将对这些假设进行密切监测，一旦假设不成立或对实现“核技术用于控制塑料污染”任何部分构成风险，即采取纠正行动。

附件：参考文献

- [1] BAILEY, R.M. richardmbailey/P2O: P2O v1.0.0. Zenodo (2020 年)
<https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3929470>
- [2] R. BARRA、S.A. LEONARD, “塑料和循环经济”, 全球环境基金科学和技术咨询小组, 华盛顿哥伦比亚特区 (2018 年)。
- [3] R. GEYER、J.R. JAMBECK、K.L. LAW, “所制造的所有塑料的生产、使用和最终去向”, 《科学进展》第 3 卷第 7 期 (2017 年)。
- [4] 世界经济论坛、艾伦·麦克阿瑟基金会、麦肯锡商业与环境中心, “新塑料经济 — 重新思考塑料的未来”, 世界经济论坛, 科洛尼 (2016 年)。
- [5] 海洋保护协会、麦肯锡商业和环境中心, 《力挽狂澜: 无塑料海洋的陆基战略》(2015 年)
<https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2017/04/full-report-stemming-the.pdf>
- [6] 生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台, 《生物多样性和生态系统服务全球评估报告: 决策者摘要》, 生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台, 波恩 (2019 年)。
- [7] 欧洲塑料协会, “塑料: 事实” (2019 年),
www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf
- [8] 经济合作与发展组织, “改善塑料管理: 趋势、政策响应和国际合作的作用” 以及 “贸易背景报告”, 经合组织环境政策文件第 12 号, 经合组织, 巴黎 (2018 年)。
- [9] 联合国环境规划署, 《全球废物管理展望》, 环境署, 内罗毕 (2015 年)。
- [10] W.W. LAU 等人, “评估实现零塑料污染的方案”, 《科学杂志》第 369 卷第 6510 期 (2020 年) 第 1455—1461 页。
- [11] D.BOURGUIGNON, “循环经济中的塑料: 机遇与挑战”, PE 603.940, 欧洲议会, 布鲁塞尔 (2017 年)。
- [12] 艾伦·麦克阿瑟基金会, 《新塑料经济: 重新思考未来和催化行动》, 艾伦·麦克阿瑟基金会, 考斯 (2017 年)。
- [13] T.D. NIELSEN、J. HASSELBALCH、K. HOLMBERG、J. STRIPPLE, “政治与塑料危机: 塑料寿期评论”, 《威利跨学科评论: 能源与环境》第 9 卷第 1 期 (2020 年) e360。
- [14] R. KARASIK, 《政府应对全球塑料污染问题 20 年: 塑料政策清单》, NI X 20-05 号出版物, 杜克大学, 北卡罗莱纳州达勒姆 (2020 年)。
- [15] 联合国教育、科学及文化组织、政府间海洋学委员会, “构建我们所需要的科学、打造我们所希望的海洋: 联合国海洋科学促进可持续发展十年 (2021—2030 年)”, IOC/BRO/2018/7 Rev, 教科文组织, 巴黎 (2019 年)。
- [16] 欧盟委员会, “塑料循环经济”, 欧盟委员会, 布鲁塞尔 (2019 年)。
- [17] 东南亚国家联盟, “关于应对东盟地区海洋垃圾的曼谷宣言” (2019 年),
<https://asean.org/storage/2019/06/2.-Bangkok-Declaration-on-Combating-Marine-Debris-in-ASEAN-Region-FINAL.pdf>

- [18] 联合国亚洲及太平洋经济社会委员会, “闭环”(2020年), www.unescap.org/projects/closing-the-loop
- [19] 可持续海洋信托基金, “非洲海洋废物网络”(2020年), <https://sst.org.za/projects/african-marine-waste-network/>
- [20] “面向循环经济的包容性回收”, Latitud (2020年), <https://latitudr.org/>
- [21] 联合国环境规划署, “应对海洋塑料: 一种系统方案 — 行动建议”, 环境署, 内罗毕(2019年)。
- [22] S. AL-SALEM、P. LETTIERI、J. BAEYENS, “塑料固体废物的回收和回收路线评论”, 《废物管理》第29卷第10期(2009年)第2625—2643页。
- [23] K. RAGAERT、L. DELVAA、K. VAN GEEMB, “固体塑料废物的机械和化学回收”, 《废物管理》第69卷(2017年)第24—58页。
- [24] I. VOLLMER 等人, “机械回收之外: 赋予塑料垃圾新生命”, 《应用化学》第59卷第36期(2015年)第15402—15423页。
- [25] M. COLE、P. LINDEQUE、C. HALSBAND、T.S. GALLOWAY, “海洋环境中的微塑料污染物评论”, 《海洋污染通报》第62卷第12期(2011年)第2588—2597页。
- [26] I.A. KANE 等人, “深海环流控制的海底微塑性热点”, 《科学杂志》第368卷第6495期(2020年)第1140—1145页。
- [27] M.S. BANK、S.V. HANSSON, “塑料循环: 人类纪的一个新整体范式”, 《环境科学与技术》第53卷第13期(2019年)第7177—7179页。
- [28] C.M. ROCHMAN、E. HOH、T. KUROBE、S.J. TEH, “摄入的塑料将有害化学物质转移到鱼体内并诱发肝脏应激”, 《科学报告》第3卷(2013年)第3263页。
- [29] C.M. ROCHMAN 等人, “重新思考作为多种污染物组合的微塑料”, 《环境毒理学与化学》第38卷第4期(2019年)第703—711页。
- [30] B. LIEBMANN 等人, “人类粪便中微量塑料浓度的评定: 一项前瞻性研究的最后结果”, 奥地利环境署, 维也纳(2018年)。
- [31] 国际模制纤维协会, “研究发现微塑料伤害免疫细胞”(2019年), www.imfa.org/study-finds-microplastics-harm-immune-cells/
- [32] J. RAYNAUD, 《评估塑料: 计量、管理和披露消费品行业塑料使用情况的商业案例》, 联合国环境规划署, 内罗毕(2014年)。
- [33] 《经济学家》, “塑料污染的已知未知因素”(2018年), www.economist.com/international/2018/03/03/the-known-unknowns-of-plastic-pollution
- [34] 皮尤慈善信托基金会、SYSTEMIQ 公司, 《打破塑料浪潮: 对遏制海洋塑料污染途径的综合评估》, 皮尤慈善信托基金会, 伦敦(2020年)。



IAEA

国际原子能机构编制

www.iaea.org

nutecplastics@iaea.org

2021年5月