

我国废弃塑料污染防治战略研究

王琪¹, 瞿金平², 石碧³, 陈宁¹, 聂敏¹, 杨双桥¹

(1. 四川大学高分子研究所, 成都 610065; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641;
3. 四川大学轻工科学与工程学院, 成都 610065)

摘要: 废弃塑料污染防治是国家战略的重要组成部分。本文全面深入分析我国废弃塑料的来源、回收利用及回收利用技术的现状。在塑料全生命周期评价基础上, 提出了我国塑料污染防治全链条解决方案: 在技术层面, 必须从塑料合成、加工、应用和处理等各环节全方位全链条防治废弃塑料污染, 包括塑料制品源头减量, 塑料原料及替代产品的开发, 塑料制品循环利用的设计, 高性能长服役期塑料制品的加工, 废弃塑料清洁高效规模化回收利用, 终极塑料垃圾的安全处理等; 在政府层面, 建议加强政府政策引导, 落实行政监管; 在企业层面, 建立有效回收机制, 明确生产者、经营者、消费者的回收责任, 为废弃塑料污染防治提供政策及技术建议; 在公众层面, 提高公民环保意识, 全民参与治理。采用上述提出的我国塑料污染防治全链条解决方案, 可以促进我国塑料工业和国民经济绿色可持续发展。

关键词: 废弃塑料; 环境污染; 防治措施; 回收利用; 全链条治理

中图分类号: X32 **文献标识码:** A

Prevention and Control of Waste Plastics Pollution in China

Wang Qi¹, Qu Jinping², Shi Bi³, Chen Ning¹, Nie Min¹, Yang Shuangqiao¹

(1. Polymer Research Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. College of Biomass Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Prevention and control of waste plastics is an important component of the national strategy in China. In this study, the sources as well as the current situation and measures for recycling of waste plastics in China were comprehensively analyzed. We proposed an all-rounded tactic for the prevention and control of plastic pollution in China based on the life-cycle assessment of plastics. Technically, waste plastic pollution should be prevented and controlled throughout the entire process covering plastic synthesis, processing, utilization, and recycling; specifically, it includes reduction of waste plastics from the origin by developing new degradable raw materials and their environmentally friendly alternatives, design and processing of high-performance plastic products with extended service life, development of new technologies offering efficient and large-scale capacity for recycling waste plastics, as well as safe disposal of the ultimate plastic wastes. At the government level, policy guidance must be strengthened, and administrative supervision be implemented. At the enterprise level, an effective recycling system should be instituted to clarify recycling responsibilities of producers, sellers, and consumers, providing policy and technical suggestions for the prevention and control of waste plastics. At the public level, citizens' environmental awareness must be aroused to promote a nationwide participation in waste management. These suggestions are favorable to a more green and sustainable development of China's plastic industry and even national economy.

Keywords: waste plastic; environmental pollution; prevention and control; recycle; full-chain management

收稿日期: 2020-04-29; 修回日期: 2020-07-25

通讯作者: 王琪, 四川大学教授, 中国工程院院士, 主要研究方向为塑料加工工程; E-mail: qiwang@scu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“废弃塑料污染防治战略研究”(2019-XY-26)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

材料是人类社会发展的基础和先导,高分子材料,如塑料、橡胶和合成纤维等具有密度小、易加工、高性能、多功能等优异性能,广泛应用于国民经济各领域[1]。塑料工业是国民经济的支柱产业,2019年我国塑料加工制品高达 8.184×10^7 t,产量和消费量均居世界第一[2]。但不规范生产、使用塑料制品和堆放塑料废弃物等问题,造成废弃塑料在环境中的长期累积,导致严重的环境污染和能源资源浪费,必须进行治理。据统计,截至2015年全球已累积生产了约 8.3×10^9 t塑料制品,废弃量约 6.3×10^9 t,仅有9%被回收利用[3]。2019年我国产生废弃塑料 6.3×10^7 t,仅回收利用 1.89×10^7 t[4]。废弃塑料污染防治事关人民群众健康,事关我国生态文明建设和高质量发展,是实施党中央建设绿水青山、美丽中国战略的重要组成部分。

本文在分析废弃塑料污染现状及回收利用技术的基础上,从塑料全生命周期评价、废弃塑料全方位全链条污染防治等方面提出了我国废弃塑料污染防治的措施建议,为促进我国塑料工业和国民经济绿色可持续发展、建设绿水青山、美丽中国提供政策及技术参考。

二、废弃塑料污染与防治现状分析

(一) 废弃塑料的污染现状

1. 废弃塑料的来源

废弃塑料根据其来源不同,可分为工业源、农业源、医用源和生活源四大类。工业源废弃塑料主要指塑料成型加工过程中产生的废弃料及废弃工业塑料制品,大多来源明确,相对集中,原料品质较好,回收利用价值高;农业源废弃塑料主要包括废弃农用地膜、棚膜、农用管道、农药包装等,其中农膜废弃量最大,使用废弃后处理困难,残留在田间,不易降解,污染农田,危害生态环境;医用源废弃塑料主要源于医疗卫生及防疫过程中使用的一次性塑料制品,如防护服、医用外科口罩、防护目镜等,是具有直接或者间接感染性、毒性以及其他危害性的危险废物;生活源废弃塑料为日常生活活动产生的废弃塑料制品,品种多、分散广、难收集,

如塑料瓶、塑料包装袋、纸塑复合材料及其他失去使用价值的塑料制品等。

2. 废弃塑料的危害

目前,我国固体废物年产生总量超 1×10^{10} t,其中废弃塑料约为 6.3×10^7 t,占固体废物的0.6%左右[5],但由于塑料化学结构稳定,难以自然降解,其不当使用和处置以及多年的累积效应造成了严重的环境污染和极大的资源浪费,引起全社会高度关注。特别是塑料快餐盒、塑料包装袋和农业塑料薄膜等一次性塑料制品,其使用量大、面广,使用周期短,废弃后大部分与生活垃圾或土壤混合,回收难度大,因而严重污染土壤、高山、海洋等,导致城市“垃圾围城”,珠峰“海拔最高的垃圾场”等环境污染事件。部分难回收废弃塑料在焚烧处理过程中释放大量有毒气体,产生大量粉尘和烟雾,严重污染大气环境,引起雾霾。同时,我国石油资源匮乏,2018年对外依赖度超过70%,进口石油约1/3用于合成塑料制品[6]。废弃塑料如不能循环回收利用,是对石油、煤和天然气等不可再生资源的巨大浪费。废弃塑料是放错地方的资源,极具回收利用价值。通过废弃塑料有效处理处置,尤其是回收利用,有望解决塑料污染难题。

(二) 全球废弃塑料污染防治现状

20世纪90年代以来,全球日益重视废弃塑料的污染治理。联合国环境规划署不断发起多项大规模全球运动,以减少、再利用和再循环废弃塑料制品,如2017年启动全球“清洁海洋运动”,呼吁政府、行业和消费者减少塑料的生产和过度使用;2019年将废塑料纳入《巴塞尔公约》的管控范围。美国、欧洲、日本等发达国家和地区制定了一系列公约、政策和法规,建立了塑料污染防治法律体系,如美国的《资源保护与回收利用法》、欧盟的《欧盟限塑令》、日本的《资源有效利用促进法》等[7]。发达国家人工成本高昂,环保措施严苛,长期将废塑料大量出口到其他国家,如据美国废料回收工业协会(ISRI)统计,2017年美国出口废塑料达 2×10^6 t,其中出口到中国的约占其出口量的70%,中国禁止洋垃圾进口后,如何处理巨量废弃塑料是其需解决的问题。

(三) 我国废弃塑料污染防治现状

1. 我国废弃塑料治理现状

我国废弃塑料处置方式主要包括回收利用、焚烧、填埋等方式，建国以来废弃塑料流向如图1所示。2019年我国塑料废弃量约为 6.3×10^7 t，其中，一次性塑料产品如塑料袋、农膜、饮料瓶，年废弃量超过 2×10^7 t，是造成“白色污染”的主要来源。另外，家电、汽车、建筑等塑料制品，也随着相关产品进入淘汰期，成为废弃塑料的重要来源。我国废弃塑料流向主要包括回收利用、焚烧、填埋处理和环境中积累等四个方面：30% 废弃塑料被回收利用，14% 被焚烧发电回收热能，36% 被填埋或任意丢弃，大量积累在自然环境中，造成严重的环境污染。

2. 我国废弃塑料防治的主要原则及法律体系

我国十分重视废弃塑料的污染防治，1995年颁布了《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》，国家各部委、地方陆续出台了一系列规范性

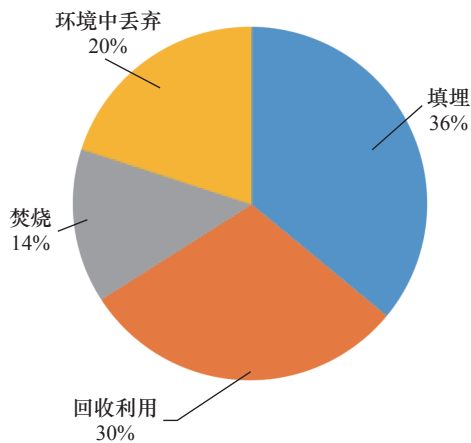


图1 1949—2019年我国废弃塑料流向统计 [8]

文件，制定了相关的国家和行业标准，逐步完善了废弃塑料防治法律体系，提出固体废物“减量化、无害化、资源化”、全过程管理、分类管理等原则。最近，为应对日益严重的废弃塑料污染，国家推出了新的塑料污染治理法规。2019年9月9日，习近平总书记主持召开中央全面深化改革委员会第十次会议，审议通过《关于进一步加强塑料污染治理的意见》。2020年1月16日，国家发展和改革委员会、生态环境部联合发布《关于进一步加强塑料污染治理的意见》，明确提出规范塑料废弃物回收利用，推动塑料废弃物资源化利用的规范化、集中化和产业化，强化创新引领、科技支撑，有力有序有效治理塑料污染。此外，我国还出台了“无废城市”“美丽乡村”建设等一系列政策，为我国废弃塑料污染防治和废塑料回收利用行业健康发展指明了方向。

3. 我国废弃塑料污染防治科技支撑情况

国家各部委高度重视废弃塑料污染防治与综合利用的科技立项。科学技术部多次立项废旧塑料制品污染防治与综合利用系列科研项目，在“十三五”期间开展“固废资源化”重点研发计划，在全生物降解塑料及其新型制品、废旧塑料制品智能化回收与再利用、二次资源高值化综合利用等领域进行技术创新布局，初步形成了较为健全的塑料垃圾回收利用技术链条，带动了废弃塑料循环利用产业的快速发展，如图2所示。

4. 我国废塑料回收利用行业及企业现状

废旧塑料回收行业是战略性新兴产业，发展潜力很大。近年来，我国大力推进废旧塑料回收利用体系建设，以中国塑料加工协会、中国合成树脂协会、中国物资再生协会等三大行业协会为依托，形

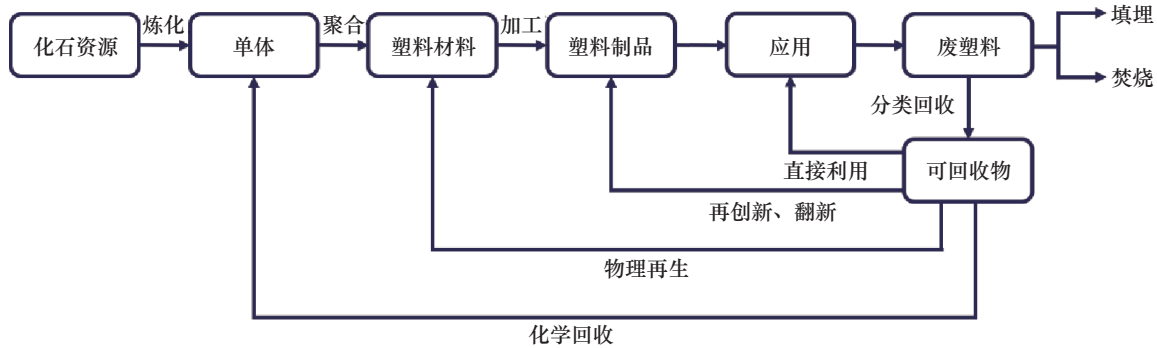


图2 我国塑料垃圾污染防治与回收利用全流程技术体系

成了一批较大规模的再生塑料回收交易市场和加工集散地，建成了 25 个再生资源—循环经济产业园，包含 21 个废弃塑料回收利用园区 [9]。据统计，2019 年国内废塑料回收利用量为 1.89×10^7 t，回收率接近 30%，回收总值达 1000 亿元以上，国内登记注册从事废塑料加工的企业共有 3000 多家，年再生塑料加工能力超过 1×10^4 t 的企业达到 300 家，年再生塑料加工能力超过 5×10^4 t 的企业达到 50 家 [10]。

(四) 废弃塑料回收利用技术

废弃塑料的回收利用主要包括物质回收和能量回收两大类，各种主要回收方法详见图 3。国际回收标准指南按回收优先顺序，将废弃塑料回收利用分为四级，第一、二级为材料再生，即物理回收，第三级为化学回收，制取化学品或油品，第四级为废弃塑料焚烧，回收能量 [11]。

1. 物理回收

物理回收不改变塑料化学组成，主要通过收集—粗略分类挑选—简单清洗破碎—熔融加工等制备再生塑料制品，广泛用于单一材质的热塑性废弃塑料回收利用，如回收利用废弃聚酯瓶制备再生涤纶纤维、废弃聚苯乙烯泡沫制备装饰制品等。但塑料制品 60% 以上是应用于航空航天、电子电器、交通运输等领域的结构件和功能件，其所需的高性能多功能通过共混复合、交联等实现，废弃后难以回收利用。传统熔融加工方法，因共混复合型器件难分类难分离，组分相容性差、熔点差异大、熔体黏度不匹配，再生制品相畴尺寸大，性能差，无应用价值；交联型不熔不溶，难再加工，大多只有填埋或焚烧，造成严重的环境污染和能源资源浪费，已成为解决塑料污染治理

的瓶颈和难点。

2. 化学回收

化学回收采用裂解技术将废弃塑料降级回收为可再次使用的燃料（汽油、柴油等）或化工原料（乙烯、丙烯等）。由于化学回收装备复杂、能耗高，从经济角度一直被认为难以推广应用 [12]。近年来化学回收技术发展迅速，许多企业已做到了商业化，并拟在未来扩大规模。但是高温热裂解温度高，反应时间长，产率低，产物复杂，易产生有害废气造成二次污染，经济性较差；催化裂解和溶剂分解是化学回收的发展方向，但尚需提高催化剂效率和发绿色溶剂 [13]。

3. 能量回收

能量回收，即燃烧回收热能，主要适用于传统物理法和化学法无法回收利用的污染严重的废旧塑料，通过垃圾焚烧产生高温气体用于发电。但焚烧会产生氯化氢、二噁英、多环芳烃等有毒气体，造成大气二次污染。应加大开展先进的绿色高温焚烧设备的研制，实现安全清洁焚烧。

三、全方位全链条防治废弃塑料污染

(一) 塑料全生命周期评价

对塑料生命周期管理基于其制品综合环境评价，即：从最初的原油开采、合成、加工、应用，到最终的废弃物处理，进行全过程跟踪，评价其在整个生命周期中的所有投入及产出对环境造成的潜在影响，如图 4 所示。同时，根据应用和处理方式，反过来指导合成和加工，改进工艺、改善管理，实现塑料的循环利用，最大限度降低塑料污染。采用高效的办法对塑料进行生命周期管理，发展资源安

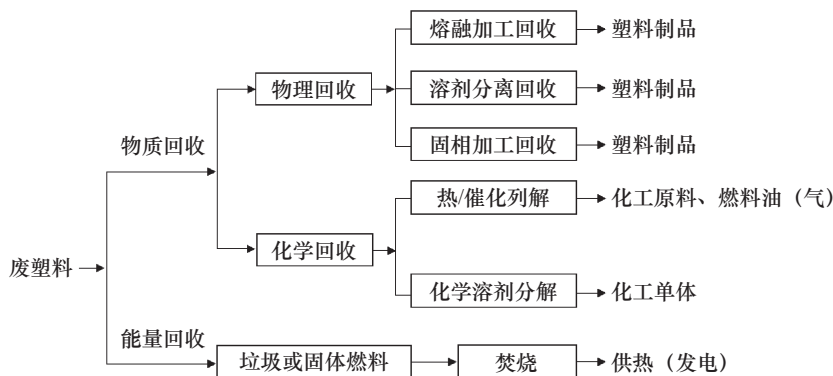


图 3 废弃塑料回收利用技术

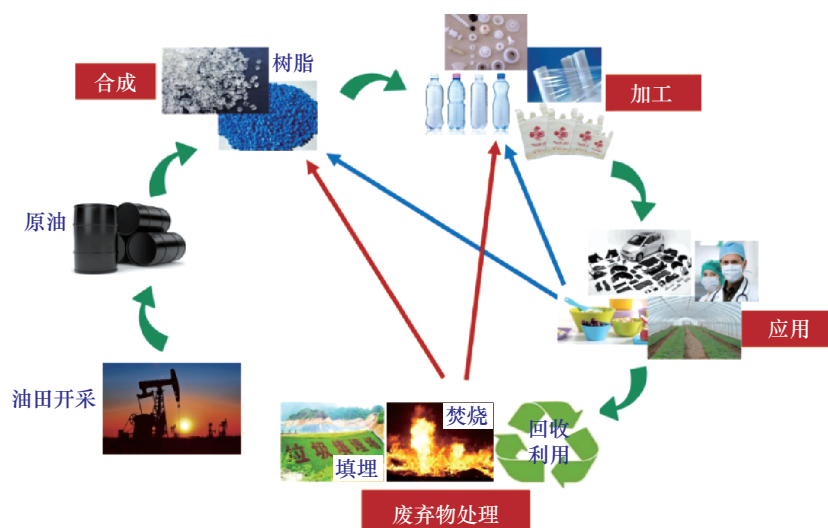


图4 塑料生命周期示意图

全利用集成技术，可以提高塑料的使用效率，减少其对环境的影响。

（二）从合成 - 加工 - 应用 - 废弃物处理等环节全方位全链条防治废弃塑料污染

通过对塑料制品合成、加工、应用和废弃物处理等阶段全生命周期评价和分析，提出废弃塑料污染防治必须坚持节约资源和保护环境的基本国策，通过开展塑料制品源头减量、原料及产品替代、废塑料高值利用及安全处理等措施来全方位全链条防治废弃塑料污染。

1. 从合成环节防治废弃塑料污染

大多数塑料来源于不可再生石化资源，合成工艺成熟、规模大、成本低，应用相当广泛，产量持续增加。但石油为不可再生资源，我国石油进口依存度高达 70.9%，且这些塑料大分子主链以 C—C 键连接，自然界中难降解；而环氧树脂、酚醛树脂等热固性塑料材料为三维网状结构，不溶不熔，难回收利用。对废弃塑料污染防治需从源头出发，建立源头减量合成技术体系，合成高性能、长寿命、易回收的石油基高分子材料，加强可循环、易回收产品开发；发展高性价比生物降解塑料，如聚乳酸、二氧化碳共聚物等，实现可控降解、提升材料综合性能；发展低成本、高产量的新型聚合技术，重点发展我国已规模化工业生产的可生物降解塑料材料如聚乙烯醇等，替代需填埋处置的一次性制品；发

展清洁规模化利用生物质资源如纤维素、甲壳素等的先进技术，从源头实现塑料污染防治。

2. 从加工环节防治废弃塑料污染

塑料制品性能不仅与其分子结构有关，还依赖于加工过程中形成的多层次多尺度结构。通过共混复合、填充增强、交联、发泡等加工方法，可实现塑料制品高性能、多功能、轻量化、长寿命及生态化。但是废弃后的共混复合型塑料难分类、难分离，交联型塑料不熔不溶、难再加工，不能采用传统回收方法进行回收再利用。因此，亟需发展先进的塑料加工新技术，减少共混复合，实现同质异相增强，提高塑料制品性能，延长服役周期，减少废弃量；实现零部件同质制造，发展环保型助剂，便于塑料制品废弃后回收再利用；设计和制造可多次循环使用的塑料制品，减少塑料废弃，并发展先进的塑料回收再利用装备及技术，如塑料拉伸流变塑化输运加工技术 [14]，固相剪切碾磨加工技术 [15] 等，高值高效回收共混复合型、交联型塑料。

3. 从应用环节防治废弃塑料污染

提倡塑料合理适度使用、消费，鼓励循环使用，从源头减量。加强管理，实现“谁生产谁处理，谁购买谁交回，谁销售谁收集”。完善废弃塑料回收利用政策体系，提升公众对废弃塑料制品回收利用的认同，开辟合法、合适的应用途径，如农田水利、道路材料、室外设施等，为其再利用提供法律保障。

塑料制品应用不同,其性能要求不同,应根据不同塑料制品使用特性,从应用环节开展废弃塑料污染防治,如对共混复合、交联型工业用结构件和功能件,应大力提倡循环再利用,充分延长塑料制品的使用周期;发展环境友好型高分子回收利用技术;对寿命短、废弃后难收集、对环境影响大的塑料包装制品,应避免过度包装,设计制造可多次使用的制品,实现塑料包装制品的循环利用;对服役后难机械化回收的农用薄膜,应建立先进的加工技术,能全回收再加工利用;研发全生物降解塑料,推动生物降解塑料在一次性塑料制品中的使用,解决塑料在环境中难降解的问题;医疗防护用品应采用无毒的聚烯烃塑料,同时对医疗废弃物及危废塑料进行高温焚烧处理。

4. 从废弃物处理环节防治废弃塑料污染

基于全方位全链条防治废弃塑料污染的理念,在处理或回收前,对废弃塑料制品进行合理、科学分类,发展针对不同类型塑料垃圾的回收、处理方式,不仅能够有效解决废弃塑料处置不当带来的环境污染问题,也能实现废弃塑料的物质、能量再利用。构建废弃塑料回收利用完整产业链,提高废弃塑料制品的回收率,可以有效促进塑料资源的综合利用。根据废弃塑料多产地、多源头、差异化的特点,创新本地化回收利用模式和推广应用模式,对可回收利用的废弃塑料,优先发展环境友好的物理回收利用技术,完善单材废塑料回收加工技术,突破混杂废塑料回收加工难题;填埋处理餐厨混杂湿垃圾等,仅用生物降解塑料包装,实现安全填埋。焚烧处理危废塑料及废弃医疗塑料,需发展环保焚烧装备和工艺,实现绿色排放,回收能量。

四、对策建议

(一) 强化政府引领, 加强部门联动

借鉴抗击新冠肺炎疫情成功经验,实行联防联控机制,群防群治。在党中央、国务院统一领导下,突破部门、地区、行业界限,形成政府统领、企业施治、市场驱动、公众参与的废弃塑料污染防治新机制。统筹固、水、气三位一体污染治理,借鉴大气、水污染治理成功经验,构建责任明确、协调有序、监管严格、保护有力的废塑料污染防治机制。

(二) 完善法律法规, 加快标准建设

将塑料污染防治明确纳入国家相关法律法规。明确塑料制品生产、销售、消费、回收各环节主体在废弃塑料回收利用中承担的责任与义务,完善生产者责任延伸制度,引入保证金返还等政策和法规。制定再生塑料及制品国家标准,为再生塑料开辟合法合适的应用途径,鼓励和强制使用再生塑料和制品,制定或修订降解塑料产品的国家标准和认证体系,杜绝伪降解、假降解塑料制品。

(三) 完善废弃塑料回收利用体系

建立和完善分层次全覆盖的废弃塑料污染防治网络,实行“谁生产谁处理,谁购买谁交回,谁销售谁收集”,生活塑料垃圾分类落实到村镇、小区和个人。建立从国家级回收基地、回收加工企业,至小微企业废弃塑料回收利用战略新兴产业体系,解决环境污染,减轻能源资源压力,提供就业岗位,把废弃塑料污染治理与“无废城市”“美丽乡村”建设相结合。

(四) 加大财政支持, 完善优惠政策

加大财政投入和税收优惠政策,支持废塑料回收利用产业发展。建议塑料合成、加工、销售、应用的利益方缴纳废弃塑料回收处置费,专款专用于废弃塑料回收利用的科研、企业和处理部门。

(五) 加强科技支撑, 引领塑料污染防治

开展不同类型塑料制品全生命周期环境风险评价的研究。研发高性能、长寿命、易回收的塑料合成新技术,攻克可生物降解塑料的低成本合成技术。发展先进的塑料制品高性能、轻量化加工新方法,实现同质异相增强、同器同材,研发可多次使用的塑料制品;建立基于高分子态高值高效回收利用混杂废弃塑料的新装备和技术。发展环保节能焚烧炉、烟气净化技术及灰渣固定化技术;研究难回收再生的废塑料化学回收新技术及环境影响评价研究等。

(六) 加强宣传引导, 全民参与治理

加强塑料污染防治的科学性和权威性宣传,既要加强治理,也要避免妖魔化塑料。提高公民环保意识,提倡合理消费、适度消费,自觉主动参与废弃塑料污染防治,自觉实施废弃塑料规范分类回收。

五、结语

废弃塑料污染防治事关人民群众健康，事关我国生态文明建设和高质量发展，是实施党中央建设绿水青山、美丽中国战略的重要组成部分。废弃塑料污染防治，实现塑料制品源头减量、原料及产品替代、废弃塑料高值利用及终极塑料垃圾安全处理，必须从塑料合成、加工、应用和处理各环节进行全方位全链条治理。同时，也要加强政策引导，强化行政监管，强化塑料回收利用领域科技创新，加大科研经费投入，增强公民环保意识，鼓励全民参与废弃塑料污染防治，通过群防群治措施提高废弃塑料制品的回收利用，以促进废弃塑料的污染控制和资源保护的协同发展。

参考文献

- [1] 王葆仁. 高分子时代 [M]. 北京: 科学普及出版社, 1963.
Wang B R. Polymer age [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1963.
- [2] 中国塑料加工工业协会. 中国塑料加工业2019年回顾与2020年展望 [R]. 北京: 中国塑料加工工业协会, 2020.
China Plastics Processing Industry Association. 2019 review and 2020 prospect on Chinese plastics processing industry [R]. Beijing: China Plastics Processing Industry Association, 2020.
- [3] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made [J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700782.
- [4] 中国物资再生协会再生塑料分会. 中国再生塑料行业发展报告(2019—2020) [R]. 北京: 中国物资再生协会再生塑料分会, 2020.
China Plastic Recycling Association of China National Resources Recycling Association. Development report on China's renewable plastics industry (2019—2020) [R]. Beijing: China Plastic Recycling Association of China National Resources Recycling Association, 2020.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》实施情况的报告 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2017.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Report on the implementation of the law on the prevention and control of environmental pollution by solid wastes [R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2017.
- [6] 中国石油经济技术研究院. 2018年国内外油气行业发展报告 [R]. 北京: 中国石油经济技术研究院, 2019.
China Petroleum Economics and Technology Research Institute. Development report on domestic and foreign oil and gas industry at 2018 [R]. Beijing: China Petroleum Economics and Technology Research Institute, 2019.
- [7] Letcher T M. Plastic waste and recycling: Environmental impact, societal issues, prevention [M]. Milton: Elsevier, 2020.
- [8] 栾晓玉, 刘巍, 崔兆杰, 等. 基于物质流分析的中国塑料资源代谢研究 [J]. *资源科学*, 2020, 42(2): 372–382.
Luan X Y, Liu W, Cui Z J, et al. Plastic resources metabolism in China based on material flow analysis [J]. *Resources Science*, 2020, 42(2): 372–382.
- [9] 国家发展和改革委员会. 2015年循环经济推进计划 [R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2015.
National Development and Reform Commission. 2015 circular economy promotion plan [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2015.
- [10] 商务部流通业发展司. 中国再生资源回收行业发展报告(2018) [R]. 北京: 商务部流通业发展司, 2018.
Department of Circulation Industry Development, Ministry of Commerce. Development report on recycling industry of renewable resources in China (2018) [R]. Beijing: Department of Circulation Industry Development, Ministry of Commerce, 2018.
- [11] Wani K A, Ariana L, Zuber S M. Handbook of research on environmental and human health impacts of plastic pollution [M]. Pennsylvania: IGI Global, 2020.
- [12] Khan M Z H, Sultana M, Al-Mamun M R, et al. Pyrolytic waste plastic oil and its diesel blend: Fuel characterization [J]. *Journal of Environmental and Public Health*, 2016: 1–6.
- [13] Mohanraj C, Senthilkumar T, Chandrasekar M. A review on conversion techniques of liquid fuel from waste plastic materials [J]. *International Journal of Energy Research*, 2017, 41(11): 1534–52.
- [14] 瞿金平, 陈佳佳, 刘环裕, 等. 体积拉伸形变加工成型方法最新研究进展 [J]. *高分子通报*, 2013 (9): 9–17.
Qu J P, Chen J J, Liu H Y, et al. The latest research on volume elongational deformation plasticizing processing method [J]. *Polymer Bulletin*, 2013 (9): 9–17.
- [15] 王琪, 卢灿辉, 夏和生. 高分子力化学研究进展 [J]. *高分子通报*, 2013 (9): 35–49.
Wang Q, Lu C H, Xia H S. Research progress in polymer mechanochemistry [J]. *Polymer Bulletin*, 2013 (9): 35–49.