

· 发展规划研究 ·

**陈方** 中国科学院成都文献情报中心战略情报部主任、研究员、硕士生导师。

主要从事科技战略与创新政策研究、生物科技及相关领域战略情报研究，承担和参与了中国科学院及相关部委、科研院所、企事业单位委托的多项战略情报研究与分析任务，策划和组织完成多份科技领域态势研究和信息分析报告，发表学术论文 40 余篇，参与编写著作 10 余部。



# 循环生物经济背景下我国塑料降解回收发展的机遇、挑战及建议

许睿，陈方<sup>\*</sup>，丁陈君

中国科学院成都文献情报中心，四川 成都 610299

许睿，陈方，丁陈君. 循环生物经济背景下我国塑料降解回收发展的机遇、挑战及建议[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1867-1882.

XU Rui, CHEN Fang, DING Chenjun. Opportunities, challenges and suggestions for the development of plastic degradation and recycling under the context of circular bioeconomy[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1867-1882.

**摘 要：**当前，白色污染造成的消极影响已经扩散到人类社会经济、生态和健康等各个方面，循环生物经济发展进程面临严峻挑战。作为全球最大的塑料生产消费国家，我国在塑料污染的治理问题上肩负着重要责任。在此背景下，本文分析了美国、欧洲、日本与我国塑料降解与回收的相关战略，并对该领域的文献与专利展开计量，从研发趋势、主要研发国家和研发机构等角度了解其技术研发现状，探讨我国塑料降解回收发展面临的机会与挑战，最终提出了政策体系、技术路径、产业发展与公众认知四位一体的未来发展建议。

**关键词：**循环经济；生物经济；塑料降解；生物降解

<sup>\*</sup>Corresponding author. E-mail: chenfang@clas.ac.cn

Received: 2022-12-24; Accepted: 2023-03-30; Published online: 2023-04-04

# Opportunities, challenges and suggestions for the development of plastic degradation and recycling under the context of circular bioeconomy

XU Rui, CHEN Fang<sup>\*</sup>, DING Chenjun

Chengdu Library and Information Center, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, Sichuan, China

**Abstract:** At present, the negative impact caused by white pollution has spread to all aspects of human society economy, ecosystem, and health, which causes severe challenges for developing the circular bioeconomy. As the largest plastic production and consumption country in the world, China has shouldered an important responsibility in plastic pollution control. In this context, this paper analyzed the relevant strategies of plastic degradation and recycling in the United States, Europe, Japan and China, measured the literature and patents in this field, analyzed the status quo of technology from the perspective of research and development trends, major countries, major institutions, and discussed the opportunities and challenges faced by the development of plastic degradation and recycling in China. Finally, we put forward future development suggestions which include the integration of policy system, technology path, industry development and public cognition.

**Keywords:** circular economy; bioeconomy; plastic degradation; biodegradation

1999 年, 美国首次提出“生物基经济”(Bio-Based Economy)的概念, 重点在于创新的生物基产品, 如生物聚合物及生物塑料<sup>[1]</sup>。进入 21 世纪以来, 随着生物科学的不断发展, 生物技术在医药、能源、环保和农林等多个领域的应用不断拓展, 生物经济(bioeconomy)内涵更加丰富。现阶段, 循环经济(circular economy)被纳入可持续经济的研究范畴, 并与生物经济产生了显著的协同效应<sup>[2]</sup>。二者交融的循环生物经济即运用循环经济“减量化、再使用、再循环”原则指导或干预生物基产品的生产, 推动“开采-消费-使用-丢弃”的传统线性经济模式转变为依靠生态型资源的循环经济发展模式。

应对塑料污染、减少塑料废弃物和二氧化碳排放是循环生物经济发展的重要目标之一<sup>[3]</sup>。基于此背景, 本文以塑料降解与回收为落脚点, 研

究分析该领域相关国际战略与技术研发进展, 提出未来我国塑料降解与回收发展的机会、挑战与建议, 以期为我国生物环保产业发展及经济模式转型提供具有现实意义的路径参考。

## 1 循环生物经济背景下全球塑料降解与回收相关战略

2020 年, 全球塑料总量已超 80 亿 t<sup>[4]</sup>。塑料废弃物的危害涉及环境、健康、经济与能源等多个方面, 使全球可持续发展面临严峻挑战, 例如: 传统的塑料焚烧或填埋方法占用土地面积, 并对土壤、水资源、大气等造成污染<sup>[5]</sup>; 微塑料通过海产品、农产品等途径进入人体, 威胁人类健康<sup>[6]</sup>; 一次性塑料包装占每年塑料包装总价值的 95%, 却无法进入经济循环<sup>[7]</sup>; 目前塑料生产所需的石油资源已占全球石油总量的 8%, 其生产和使用过程

中的碳排放量占全球总量的3.8%<sup>[8-9]</sup>。

面对日益加剧的“白色污染”问题,已有120多个国家规范塑料袋的使用,60多个国家限用或禁用一次性塑料产品<sup>[10]</sup>。全球各国纷纷围绕塑料管理与处置出台相关政策法规,将塑料污染治理作为循环生物经济发展战略中的重点内容,部署相关政策以引导并扶持塑料生物降解与回收技术的研究和发展。

### 1.1 美国:以提高生物经济战略地位为目标,推进塑料降解与回收技术研发

美国高度重视生物经济的发展,2017年生物基产品在美国经济中的贡献值达到4700亿美元,较上年增长2.4%<sup>[11]</sup>;2019年美国《生物经济倡议:实施框架》重点部署生物基产品的技术研发,提出最大限度促进生物燃料、生物能源等生物质资源的持续利用<sup>[12]</sup>;2020年5月美国参议院通过《2020年生物经济研发法案》,明确将建立国家工程生物学研究与发展计划,鼓励生物创新商业化<sup>[13]</sup>;2022年美国能源部为响应“国家生物技术与生物制造计划”宣布拨款1.78亿美元用于推进生物能源技术,可再生生物能源与生物材料是其中4个重点研究方向之一<sup>[14]</sup>。

作为发展循环生物经济的重要环节,美国各州近年来为限用或禁用一次性塑料袋制定了相关法案和条例,政府部门也围绕塑料降解与回收利用制定并开展了各项行动计划。美国农业部(U.S. Department of Agriculture, USDA)为生物塑料的研究、开发和生产提供相关支持,并通过设立“生物基优先项目”(BioPreferred Program)来增加公众对包括生物塑料在内的生物基产品的购买和使用<sup>[15]</sup>;美国国家标准与技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)“循环经济项目”中对聚合物在自然/生产环境中的降解和解聚开展了深入研究<sup>[16]</sup>;2018年,美国能源部(United States Department of

Energy, DOE)启动“塑料创新挑战”,以提升美国在塑料回收与新型塑料制造领域的技术能力<sup>[17]</sup>;2021年11月,美国国家环境保护局(U.S. Environmental Protection Agency, EPA)发布首个《国家回收战略》,旨在2030年将废塑料回收率提升至50%<sup>[18]</sup>。

### 1.2 欧盟:大力发展循环生物经济,致力于通过生物技术解决塑料污染

欧盟一直致力于推进线性经济转变为循环经济,并最终实现绿色经济的发展目标。2012年起,欧盟先后发布了《基于知识的欧洲生物经济:成就与挑战》战略<sup>[19]</sup>、《2030年的欧洲生物经济:应对巨大社会挑战实现可持续增长》白皮书<sup>[20]</sup>和《为可持续增长创新:欧洲生物经济》战略<sup>[21]</sup>;2019年,欧洲生物产业学会发布《生物技术产业化宣言》,号召成员国重视生物技术创新,提升市场对生物基产品的接纳程度<sup>[22]</sup>;2020年,欧洲生物基产业联盟(Bio-based Industries Joint Undertaking, BBIJU)在《战略创新与研究议程》草案中提出在2050年建立循环生物经济社会的目标,并制定了相应的行动路线<sup>[23]</sup>;2022年,欧洲循环生物基产业联盟(Circular Bio-based Europe Joint Undertaking, CBEJU)发最新版《战略创新与研究议程》,提出了包含开发新的突破性生物基产品在内的3个战略目标,将循环性、可持续性与零污染目标纳入生物基系统的发展战略当中<sup>[24]</sup>。

具体到塑料污染治理,欧盟已完成立法,并构建了“1+5+2”的塑料污染治理政策体系。即1项战略(《循环经济中的欧洲塑料战略》)、5项法规(《关于包装和包装废弃物的指令》《废弃物框架指令》《欧盟一次性塑料指令》《欧盟塑料袋指令》和《欧盟关于塑料废弃物运输的指令》)以及2项提案(《欧盟塑料税》《欧盟碳边境税》)。

在基于生物技术的塑料污染治理方面,

BBIJU 自 2014 年起通过资助循环生物相关项目,推动生物基产品代替化石能源产品,减少塑料废弃物。例如,其资助的 ENZYCLE 项目致力于将酶促工艺应用于工业规模,处理和回收塑料废物;RECOVER 项目利用微生物、酶、昆虫等为农用塑料制品的降解提供生物技术方案;EMBRACED 项目聚焦于塑料降解产物的升级改造,通过生物炼制技术将废物尿片再生为肥料和薄膜的制造材料。

作为欧盟的成员国之一,德国在循环生物经济建设与塑料治理方面的经验相对成熟,构筑了较为完善的战略规划体系。

德国的循环生物经济发展已进入成熟阶段。早在 2009 年,德国发布《国家生物质能行动计划》,支持生物质产品的开发应用<sup>[25]</sup>;2010 年,德国教育与研究部(Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF)发布了《国家研究战略:生物经济 2030》,提出在自然物质循环基础上建立可持续生物经济的愿景<sup>[26]</sup>;2020 年,德国正式通过新版《国家生物经济战略》,通过了到 2024 年投入 36 亿欧元的生物经济行动计划,以帮助可持续资源取代日常产品中的石化原料<sup>[27]</sup>;同年,德国推出《资源效率计划 III》,制定循环发展的行动路线图,提出要在 2025 年实现 100%塑料回收与循环利用<sup>[28]</sup>;2022 年,BMBF 宣布投入 7 200 万欧元用以支持“莱茵河流域示范区生物经济”研究网络的建设,其中“生物技术和塑料技术(BioTech)”创新集群下的 PlastiQuant 项目旨在开发用于分解微塑料的特殊肽<sup>[29]</sup>。

在推进循环生物经济的过程中,德国通过在全国范围内建立生物精炼厂,来推进工业生物技术解决化石燃料依赖、塑料污染等生态问题。2012 年,德国发布《生物精炼路线图》,指出应加强工业生物技术创新,推动传统化学工业向循环生物原料为主的新型产业<sup>[30]</sup>。目前,德国

共有 59 家生物精炼厂投入运营,在生物塑料制造方面最具代表性的项目是由欧洲最大的造纸商芬兰芬欧汇川集团在洛伊纳运营的生物精炼厂,自 2022 年起,该生物精炼厂以山毛榉工业木材为原料,生产用于纺织品、塑料等产品的单乙二醇化学品。此外,巴登-符腾堡州生物经济生物精炼厂开发了一种将中国银草芒草分离成碳水化合物和木质素部分的方法,分离产物用于包装、纺织品及塑料制品的生产。

### 1.3 日本:将可持续的生物材料作为循环生物经济社会的建设要点之一

日本高度重视循环经济,并将循环经济中的可持续理念引入到生物经济社会的建设当中。2001 年 1 月,日本政府出台《循环社会形成推进基本法》,下设《废弃物处理法》和《资源有效利用促进法》两个分支,旨在以“减量化、再利用、资源化(3R)”为原则探索循环经济的发展道路<sup>[31]</sup>;后于 2018 年启动第 4 期循环型社会建设计划,指导建设低碳、循环的可持续发展社会<sup>[32]</sup>。近年来,日本大力发展生物经济,以期建设可持续发展的生物经济社会。2019 年日本发布《生物战略 2019》,提出以生物技术制造可持续、可循环的材料是建设生物经济社会的重点之一<sup>[33]</sup>;2020 年发布的《循环经济愿景 2020》提出了包括“以可持续方法实现材料和资源生物化”在内的各项社会图景<sup>[34]</sup>;同年,日本还提出“2050 年碳中和绿色增长战略”,将发展资源循环与碳循环相关产业作为实现碳中和目标的关键支撑之一<sup>[35]</sup>。

塑料废物处理也是日本实现可持续生物经济社会的重要议题之一。2018 年日本提出国内首个生物经济战略,明确指出要将生物材料作为重要突破口,包括研发制造更高性能的生物塑料;2019 年,日本发布《塑料资源循环战略》,同年举办的 G20 大阪峰会上日本也将塑料治理

列为重要议题；2021年6月，日本参议院通过《塑料资源循环促进法》，要求塑料制品经营者通过使用替代材料等途径减少一次性使用塑料的生产和使用<sup>[36]</sup>；2022年2月，日本《全球变暖对策推进法》中表示将为去碳化项目提供总计1 000亿日元的经费支持，废旧塑料的循环再利用是其中的候选项目之一<sup>[37]</sup>。

#### 1.4 中国：稳步推进循环生物经济建设，支持生物降解塑料的研发与应用

我国也是较早关注生物经济的国家之一，自2005年起先后发布并实施了《促进生物产业加快发展的若干政策》《生物产业发展规划》《“十三五”生物产业规划》《“十三五”生物技术创新专项规划》等政策规划，为我国生物经济的建设和发展保驾护航。随着世界各国纷纷将生物技术促进净零排放列入战略发展目标，我国也提出了建设绿色低碳循环经济的社会图景。2022年5月，我国首部生物经济5年规划《“十四五”生物经济规划》正式印发，提出要加快发展生物技术与生物能源、生物环保和生物材料等支柱产业，稳步推进绿色低碳的生物经济社会建设<sup>[38]</sup>。

在塑料污染治理方面，我国在禁限塑料、循环利用以及生产者责任延伸等方面建立了相对完善的政策法规体系。如2020年印发的《关于进一步加强塑料污染治理的意见》中明确提出了我国禁限塑料的时间表，有望促进可降解塑料产品的加速替代<sup>[39]</sup>；2021年2月，国务院发布《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》，指出应加强塑料废物的回收与利用，促进循环经济的建设与发展<sup>[40]</sup>；5月，资源节约和环境保护司发布《污染治理和节能减碳中央预算内投资转向管理办法》，提出国家将为生物降解塑料的研发、制造与应用提供经费支持<sup>[41]</sup>；

7月，发改委印发《“十四五”循环经济发展规划》，将塑料污染的全链条治理列入经济建设重点行动当中<sup>[42]</sup>；9月，发改委与环境部联合出台《“十四五”塑料污染治理行动方案》，明确指出应健全我国生物降解塑料标准体系<sup>[43]</sup>；2022年4月，工信部、发改委等多部门联合印发《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》，再次指出要有序发展和科学推广生物可降解塑料，加快我国绿色低碳发展进程<sup>[44]</sup>。

## 2 塑料降解回收技术研发进展

本文从论文和专利的角度围绕“塑料降解与回收”展开计量分析，通过文献回溯与专家咨询的方式分别制定检索策略，以掌握该主题的研究态势与技术研发现状。其中，文献分析以Web of Science核心合集作为数据来源，选择科学引文索引拓展版(SCI-E)进行检索；专利分析选择incoPat科技创新情报平台作为数据来源，使用关键词与分类号进行组合检索。

### 2.1 研究论文分析

#### 2.1.1 发文趋势

截至2022年12月19日，塑料降解与回收相关研究论文共有61 761篇。从该领域研究论文的发表趋势(图1)可以看出，1971年以前塑料降解与回收相关论文数量较少，每年发文均在20篇以下。其后，随着塑料工业飞速发展，聚烯烃等多种高性能的工程塑料被广泛应用，但随之而来的石油危机催生学界围绕塑料降解与回收展开研究，1972年后该领域论文发表数量逐步增多，并在1990年达到84篇。1990年至今，全球能源危机与环境污染问题日益严重，化学、生物降解技术的不断突破也促使塑料降解回收领域进入高速发展期，论文发表数量快速增长，2020–2022年每年发文数量均高于5 000篇。

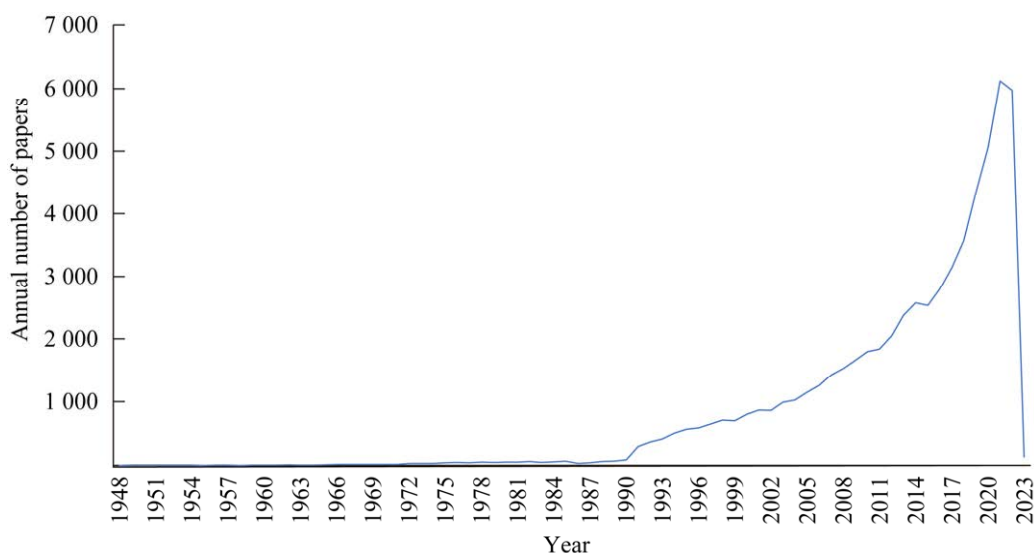


图1 塑料降解与回收领域发文趋势

Figure 1 Trends in terms of the number of publications in the field of plastic degradation and recycling.

### 2.1.2 主要发文国家

对各国在塑料降解与回收领域的论文数量进行统计(图2), 发文量超2 000的国家主要有中国、美国、德国、日本、印度和英国等。其中, 中国发文量为13 072篇, 排名第一, 占该领域论文总量的21.17%; 美国发文量为8 632篇, 排名第二, 占比13.98%。图中国家的发文量共

计47 233篇, 约占该领域论文总量的76.48%。

### 2.1.3 主要研究机构

对塑料降解与回收领域发文量前10的研究机构/组织进行统计(表1), 其中3所来自我国, 分别是中国科学院、四川大学以及中国科学院大学, 特别是中国科学院在该领域的论文数量位居全球第一。此外, 法国有2所机构/组织跻身该

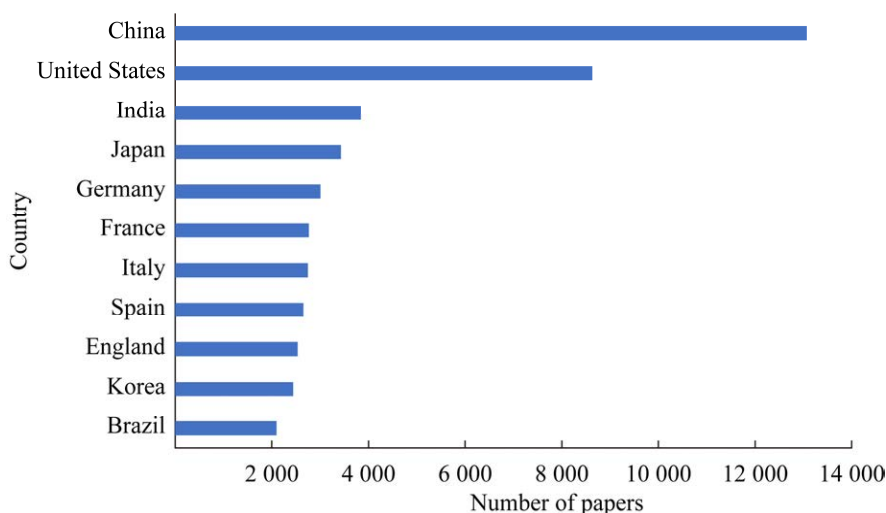


图2 塑料降解与回收领域主要发文国家

Figure 2 Major countries in the field of plastic degradation and recycling.

表 1 塑料降解与回收领域发文量排名前 10 位的研究机构

Table 1 Top 10 research institutions in the field of plastic degradation and recycling

Rank	Institution	Number of papers	Total times cited	Citations per paper
1	Chinese Academy of Sciences	1 878	58 291	31.04
2	Centre National de la Recherche Scientifique	1 418	42 256	29.80
3	Indian Institute of Technology System Iit System	856	20 798	24.30
4	UDICE French Research Universities	847	24 883	29.38
5	Egyptian Knowledge Bank	795	14 893	18.73
6	Sichuan University	782	19 027	24.33
7	Russian Academy of Sciences	629	7 518	11.95
8	Italy National Research Council	546	14 994	27.46
9	United States Department of Energy	541	22 774	42.10
10	University of Chinese Academy of Sciences	535	13 381	25.01

领域研究机构前 10 名,分别为法国国家科学研究中心、UDICE 法国研究型大学联盟。从被引频次看,美国能源部的相关论文总数虽然只排在第 9 位,但其发文篇均被引 42.10 次,位列第一;中国科学院相关论文篇均被引 31.04 次,排名第二。

2.1.4 近 5 年主要研究方向

对 2018–2022 年间塑料降解与回收领域论文的主要研究方向进行统计,近 5 年该领域论文主要集中在高分子科学、工程、材料科学、化学、

环境科学生态学、科学技术其他主题、物理、能源燃料、生物技术应用微生物学、生物化学与分子生物学等方向(图 3)。其中,高分子科学方向的论文数量最多,有 18 932 篇,占总数的 30.65%。

2.2 专利分析

2.2.1 专利申请趋势

截至 2022 年 12 月 19 日,全球塑料降解与回收技术领域已公开专利共有 64 276 件,专利家族 47 485 项。分析该技术领域的专利申请趋

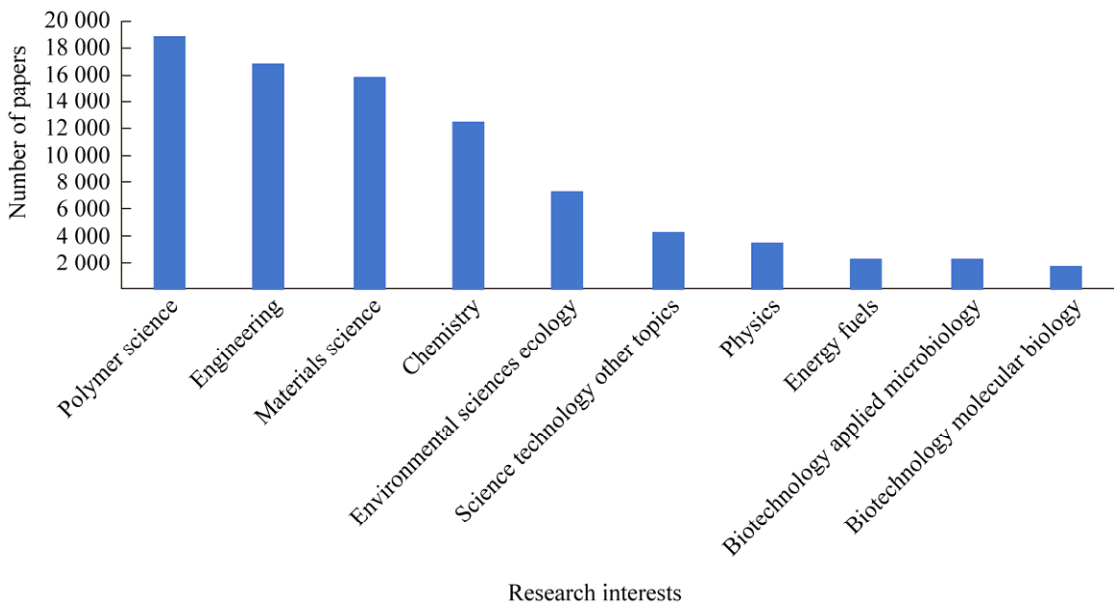


图 3 塑料降解与回收领域的主要研究方向

Figure 3 Main research directions in the field of plastic degradation and recycling.



势(图 4), 首件专利于 1910 年申请, 提出了一种含橡胶塑料组合物的回收方法。1910–1954 年间塑料降解与回收技术的相关专利数量较少, 年申请量均在 30 件以下(未在图表中展示); 1955–1982 年, 随着聚酯、有机硅树脂、氟树脂、环氧树脂和聚氨酯等陆续投入工业生产, 废弃塑料的治理问题进入公众视野, 塑料降解与回收技术领域的专利申请量有所提高, 处于萌芽阶段, 尤其是 1973–1975 年, 随着第一次石油危机爆发, 该领域专利申请量达到首个峰值; 1983 年后, 专利技术进入发展阶段, 专利申请量和专利申请人数量均急剧上升, 市场快速扩大企业数量随之增加, Biopol、Novamont 等生物塑料公司相继成立, 塑料生物降解技术取得多项突破性进展; 2010 年左右, 随着各国限塑、禁塑政策的颁布实施, 以及全球日益严峻的能源问题, 塑料降解与回收技术进入快速发展期, 新企业/机构不断进入市场进行研发布局, 专利数量随之呈现爆发式增长。

总体而言, 目前全球塑料降解与回收技术处于快速发展期, 专利申请呈增长趋势, 2020 年专利申请量突破 4 500 件, 近 10 年来技术创新

活跃程度较高(由于专利公开的迟滞性, 2021 年后的专利数量统计不全)。

### 2.2.2 主要技术来源地与目标地

对塑料降解与回收领域的技术来源地进行专利申请量统计(图 5), 排前 10 的依次是中国、日本、美国、德国、韩国、意大利、法国、英国、瑞士和加拿大。其中, 来源于中国的专利申请最多, 为 25 902 件, 占全球总申请量的 40.30%。排名第 2 和第 3 的是日本和美国, 日本申请量为 9 788 件, 美国申请量为 9 692 件, 分别占全球申请总量的 15.23%和 15.08%, 可见这 3 个国家是该领域主要的技术创新地, 其专利数量之和超过全球总量的 70%。从技术目标地的角度分析(图 6), 排名前 10 的国家/地区依次为中国、日本、美国、韩国、世界知识产权组织(World Intellectual Property Organization, WIPO)、德国、欧洲专利局(European Patent Office, EPO)、加拿大、英国、澳大利亚。向这些国家、地区以及区域性组织提交的专利申请量占到全球范围内提交的专利申请总量的 84.56%。其中, 向中国提交的专利数量最多, 说明我国是该领域首要的技术目标市场。

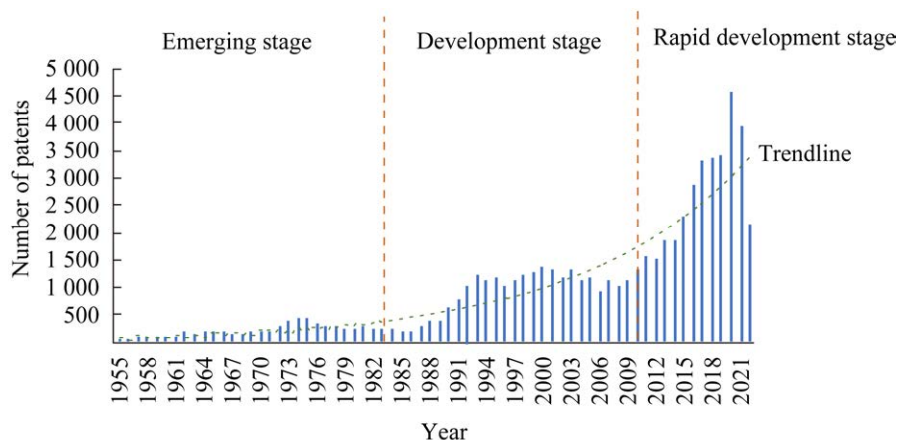


图 4 塑料降解与回收技术领域全球专利申请趋势

Figure 4 Global trends in terms of the filed patents in the field of plastic degradation and recycling.



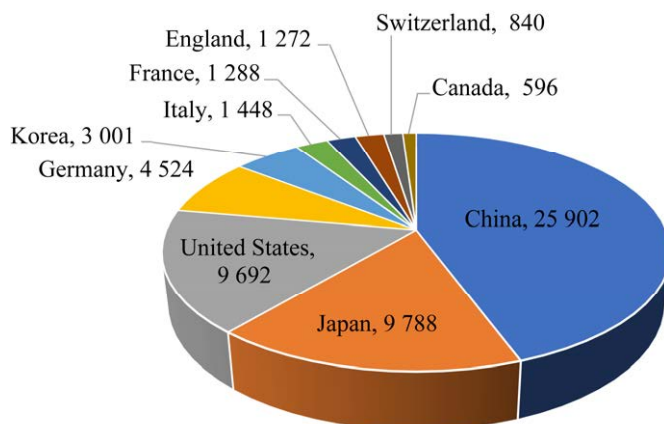


图5 塑料降解与回收主要技术来源地

Figure 5 Major countries/regions which developed the plastic degradation and recycling technologies.

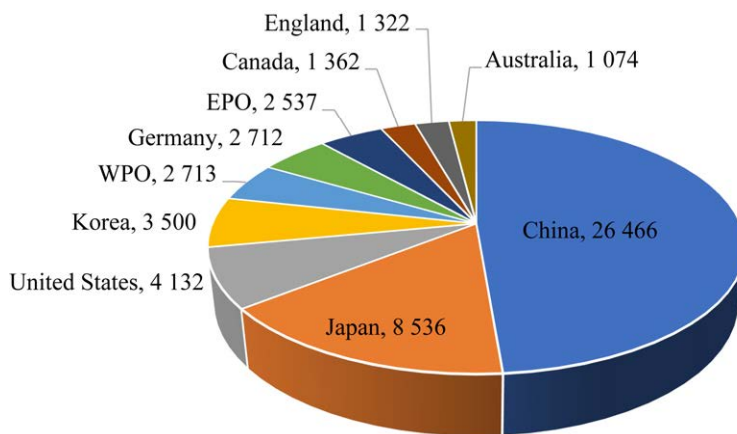


图6 塑料降解与回收主要技术目标地

Figure 6 Major countries/regions where plastic degradation and recycling technologies are targeting.

### 2.2.3 主要技术构成

如表2所示,统计塑料降解与回收相关专利的IPC分类号,主要集中于C部与B部。其中,C08(有机高分子化合物;其制备或化学加工;以其为基料的组合物)大类下的专利数量最多,占比72.44%,主要技术分支有C08L(高分子化合物的组合物)、C08J(该小类下专利均分布于C08J11/00废料的回收或加工)、C08K(使用无机物或非高分子有机物作为配料)、C08G(用碳-碳不饱和键以外的反应得到的高分子化合物)、C08F(仅用碳-碳不饱和键反应得到的高分子化

合物)。B部专利的主要技术分支有B29B(成型材料的准备或预处理;制作颗粒或预型件;塑料或包含塑料的废料的其他成分的回收)、B29C(塑料的成型连接;塑性状态材料的成型,不包含在其他类目中的;已成型产品的后处理,例如修整)、B09B(固体废物的处理)、B32B(层状产品,即由扁平的或非扁平的薄层,例如泡沫状的、蜂窝状的薄层构成的产品)。此外,C12N(微生物或酶;其组合物;繁殖、保藏或维持微生物;变异或遗传工程;培养基)也是该领域专利的主要技术分支之一,属于生物科学技术方向。

表 2 塑料降解与回收技术专利 IPC 分布

Table 2 IPC distribution of plastic degradation and recycling patents

IPC code (subclass)	Number of patents	Technical fields
C08L	29 663	Compositions of macromolecular compounds
C08J	18 488	Working-up; General processes of compounding (C08J11/00 recovery or working-up of waste materials)
B29B	17 321	Preparation or pretreatment of the material to be shaped; Making granules or preforms; Recovery of plastics or other constituents of waste material containing plastics
C08K	16 619	Use of inorganic or non-macromolecular organic substances as compounding ingredients
C08G	10 424	Macromolecular compounds obtained otherwise than by reactions only involving carbon-to-carbon unsaturated bonds
C08F	7 633	Macromolecular compounds obtained by reactions only involving carbon-to-carbon unsaturated bonds
B29C	6 878	Shaping or joining of plastics; shaping of material in a plastic state, not otherwise provided for; After-treatment of the shaped products, e.g. repairing
B09B	4 954	Disposal of solid waste
B32B	2 810	Layered products, i.e. products built-up of strata of flat or non-flat, e.g. cellular or honeycomb, form
C12N	2 344	Biochemistry; Beer; Spirits; Wine; Vinegar; Microbiology; Enzymology; Mutation or genetic engineering

#### 2.2.4 主要申请人

统计塑料降解与回收领域专利数量前 15 名的申请人,其中有 1 家研究机构、2 所高校、12 家企业。从申请人国别来看,我国申请人数最多,有 4 家,其次是美国和德国,均有 3 家(图 7)。

分析发现,排名前 15 的专利申请人均将生物降解塑料技术作为其在该领域的主要布局方向。排名第一的德国巴斯夫(BASF)公司,其核心产品 ecovio®生物塑料是一种完全可堆肥的聚合物,由该公司可生物降解的聚合物 ecoflex®和聚乳酸(polylactic acid, PLA)制成,后者主要来自于含糖的可再生原料。美国杜邦(Du Pont)公司的科学家于 1932 年首次合成 PLA,近年来用从玉米糖分中提取的 Bio-PDO 中间体制成聚三甲甲基呋喃二羧酸酯塑料,用于生产可完全再生的包装材料。中国科学院长春应用化学研究所生态环境高分子材料重点实验室以生物降解高分子

材料合成及加工作为重点技术研发方向,旨在提升聚乳酸、二氧化碳基塑料的性价比,拓展其在工业包装和生物降解地膜领域的应用,已建立起世界第 2 条、国内第 1 条千吨级聚乳酸生产线。

#### 2.3 研发热点分析

通过分析塑料降解与回收领域的相关论文与专利,可以看出近年来以催化热解、解聚和单体共聚等技术为代表的化学法是塑料回收利用的主要研发方向。但由于化学法在实际工业生产中仍具有环境不友好、设施投资高等弊端,加之全球循环生物经济发展进程的不断推进,生物技术与微生物学为塑料回收升级提供了更优路径,能够很好弥补物理法、化学法的不足,逐步成为该领域的重要研发热点。

##### 2.3.1 生物降解技术及其优势

当前,全球生产和使用的塑料制品绝大多数是以石油和天然气为原材料的热塑性合成塑料,如聚乙烯(polytene, PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯

(polyethylene terephthalate, PET)、聚苯乙烯(polystyrene, PS)、聚丙烯(polypropylene, PP)和聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)等,通常采用机械法、能量回收法以及化学法对此类塑料废物进行回收再利用。生物降解法通过使用微生物或酶

将塑料废物解聚为单体小分子并进行再次利用,主要适用于 PLA、聚丁二酸丁二醇酯(polybutylene succinate, PBS)等生物基/化石基生物降解塑料。不同回收方法主要适用的塑料类型及其优缺点如表 3 所示。

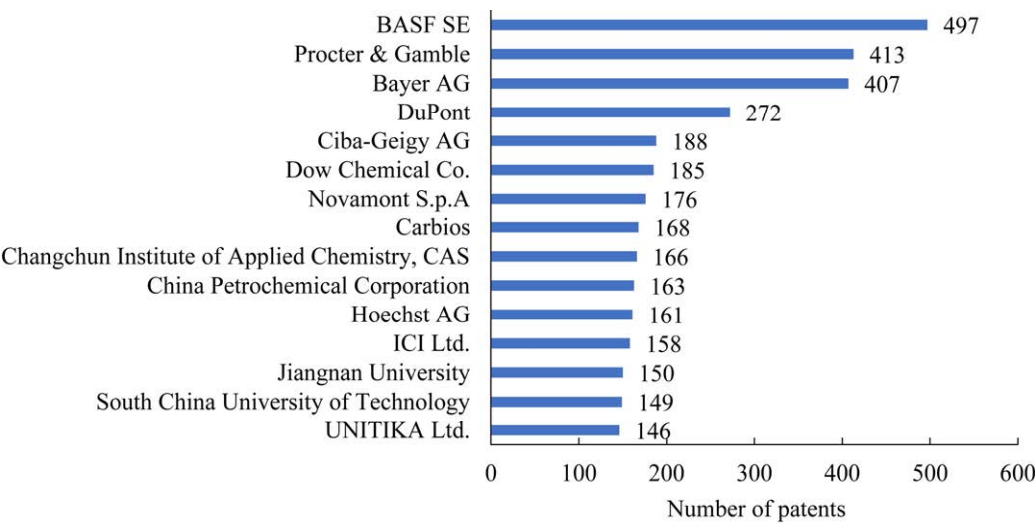


图 7 塑料降解与回收技术重要专利申请人  
Figure 7 Important patent applicants in the field of plastic degradation and recycling.

表 3 各类塑料回收方法的优点与不足  
Table 3 Advantages and disadvantages of various plastic recycling methods

Recycling methods	Applicable types of plastic	Advantages	Disadvantages
Physical recycling (landfill, physical modification)	Most common plastic waste (PE, PET, PS, PP, PVC)	Simple operation and low cost; Modified for use in building materials can improve material properties	It is a downgrade recycling; There are limitations on the types of plastics and material losses; Poor economy
Energy recycling (combustion method)	All types of plastic waste	Energy conversion is achieved while recycling waste plastics, and combustion heat energy is converted into electricity	Low energy recovery; Toxic and harmful by-products are produced, and the cost of waste gas treatment is high
Chemical recycling (thermal decomposition, chemical modification, solvent depolymerization)	Most common plastic waste (PE, PET, PS, PP, PVC)	Theoretically, unlimited recycling of plastic performance without degradation can be realized; Higher product value	Processing equipment and technology are more complicated; The high cost of chemical preparations; Lack of commercial competitiveness
Biodegradation (microbial degradation, enzymatic degradation)	Bio-based plastics and petroleum-based plastics, biodegradation of pet has also been achieved	Mild conditions; It can achieve high-value conversion of waste; The degradation process is environmentally friendly and has no by-products	The technology is not yet mature, and there is still a bottleneck in the biodegradation of petroleum-based plastics

相比于目前广泛使用的物理法、能量回收法以及化学法,生物降解法具有显著优势:首先,生物降解法通过微生物/酶对塑料进行分解代谢的过程中不存在大量能量消耗,而且降解废物为水、二氧化碳以及生物质,不会产生潜在有害物质,符合绿色发展要求;其次,通过现有的分子操作手段和工具能够对微生物进行遗传改造,提升其生物降解效率和代谢路径,满足工业生产的现实需求;此外,微生物/酶能够将塑料废弃物转化为单体原料,用于合成原始聚合物或生产增值化学品,真正实现塑料废物的高值化循环。

### 2.3.2 生物降解技术研发进展

塑料生物降解相关研究主要围绕特定种类塑料的降解微生物/酶/菌的发掘与改造、降解机制解析、降解产物高值化再造等内容。国内外研究者围绕石油基塑料的生物降解展开了大量探索,已经发现多种能够降解 PET、PE、PVC、PP、PS 等塑料的微生物与酶;也有相关研究解析了 PET、PE、PS、聚氨酯(polyurethane, PUR)等塑料的微生物降解机制,但此类研究相对较少,且有些塑料的降解机理仍不明确,有待进一步探索。

有关生物法降解石油基塑料的研究中, PET 的酶降解已经取得了一系列突破性进展。PET 降解酶的挖掘与表征方面,日本研究人员发现的水解酶 IsPETase,能够将 PET 降解为小片段,并将其进一步分解转化为二醇和对苯二甲酸,是 PET 生物降解的重要里程碑<sup>[45]</sup>;图卢兹大学的研究团队报道了一种能够在 10 h 内水解 90% 塑料瓶 PET 的新酶,且水解后产生的单体与石化材料中的单体具有相同特性<sup>[46]</sup>;Beckham 团队结合机器学习和合成生物学方法发现了新的酶变体,该变体具有无需预处理即可降解最坚硬的 PET 的潜能<sup>[47]</sup>。降解微生物/酶结构与机制解析方面,郭瑞庭团队研究发现细菌选择利用突变角

质酶分解 PET,揭示了自然界在短时间内演化出更多塑料降解酶机制的可能性<sup>[48]</sup>。降解微生物/酶的设计与改造方面,吴边团队提出了一种新型蛋白质稳定性计算设计策略(greedy accumulated strategy for protein engineering, GRAPE),基于计算机蛋白质设计对 IsPETase 降解酶进行稳定性改造,获得了适应性显著增强的重设计酶(DuraPETase)<sup>[49]</sup>。PET 工业化生物回收方面,Alper HS 团队改造的 FAST-PETase 酶能够在 1 周内完全降解 51 种日常使用的 PET,并能从回收的单体中重新合成 PET,证明了工业规模上酶塑料回收的可能性<sup>[50]</sup>;法国 Carbios 公司创新开发的生物酶回收技术已在饮料包装领域取得成功,能够将 PET 瓶片转化为新纤维材料,现又布局纺织品领域,希望通过回收纺织废料中存在的聚酯 PET 实现从纤维到纤维的聚酯化学循环。

## 3 我国塑料降解回收未来发展机遇与挑战

### 3.1 机遇

国际层面,循环生物经济发展背景下各国/地区、组织都已围绕塑料治理出台了多层级的政策法规体系,以应对当前日益严重的塑料污染问题。为减少和解决塑料污染在人类健康、生态、经济和社会发展等各个领域产生的影响和危害,各国都应秉承人类命运共同体理念,积极构建可持续、可再生、可循环的塑料生产-治理体系。

国内层面,政策环境角度,作为全球最大的发展中国家,同时也是塑料生产和消费大国,为进一步推进绿色发展战略,实现“双碳”目标,我国各级政府聚焦塑料污染治理提出了一系列相关政策规划。在实施“禁塑令”与“限塑令”,征收环保税等措施的同时,大力支持塑料降解与回收

技术创新,赋能生物降解塑料的开发利用。从论文与专利的角度,我国在塑料降解与回收领域的基础研究数量与技术创新活跃度都处于领先水平,中国科学院、四川大学、中国石油化工股份有限公司等机构在该领域已经积聚了一定的研发基础。从技术发展趋势角度,目前塑料回收技术虽仍以化学法与机械法为主,但生物技术应用微生物学、生物化学与分子生物学在该领域的应用逐渐成为学界、产业点关注的焦点,运用微生物与酶降解塑料,以及研发生物可降解材料替代传统石油基塑料能够为我国解决塑料污染问题提供新视角与新路径。

### 3.2 挑战

技术层面,当前塑料降解与回收大多采用物理回收法,经济性较低,多为降级再回收,产生的废水废气对环境损害较大。化学回收法虽能实现同级回收,但成本较高、设备及工艺复杂,溶解及催化制剂价格较高,难以实现大规模产业化。新兴的生物降解技术能够在温和条件下解聚废塑料,并能实现降解产物的高值转化,无副产物,绿色清洁,是解决塑料污染问题的理想路径,但由于相关技术研发刚刚起步,在降解条件(大多需要工业堆肥)、解聚酶与微生物种类、生物解聚机制、降解产物高值化再造,以及技术产业化转化等方面还存在不小挑战。

经济层面,我国是全球塑料生产、消费、出口第一大国,国家统计局数据显示,2021年我国塑料制品产量累计值为8 004万t,累计增长5.9%<sup>[51]</sup>,塑料产业在我国经济发展中占据着重要地位。趋严的环保政策、能源问题导致的原材料价格上涨、国际绿色贸易壁垒带来的出口难度增大等因素都影响着我国塑料产业的升级转型。

产业层面,我国在塑料降解与回收领域的基础研究数量与专利数量虽领先于其他国家地区,但从专利研发机构看,全球专利申请量排名前

15的机构中我国企业仅占1家,而德国、美国等国家的企业在该领域有着明显的技术主导优势。可见当前我国企业在塑料降解与循环利用领域的创新研发能力仍不足,技术产业化还需加快步伐,生物降解与再生塑料市场有待进一步培育和扩展。

市场层面,部分生物基可降解塑料已经投入市场,如淀粉原料制成的PLA塑料、由微生物及碳源发酵合成的聚3-羟基烷酸酯(polyhydroxyalkanoates, PHA)塑料,以及可通过农作物生产发酵制成的聚酯类塑料。但由于生物降解塑料加工难度大、成本相对较高,在经济性、产品性能上都与石油基塑料存在一定差距,公众使用习惯与购买意愿在一定程度上会限制该类产品的大规模推广。

## 4 发展建议

在当前全球推进循环可持续发展的现实背景下,我国塑料降解与回收产业链相关主体需以转变传统的线性经济模式作为根本目标和导向,共同推进该领域技术研发与生产制造的高质量发展。

首先,优化完善相关政策法规体系。继续推进禁塑、限塑政策的实施,为塑料产品的生产、使用、降解、处理、回收、再利用,以及替代全流程中的各环节制定相关政策与标准;增加专项资金及重点项目,创新资助形式,推动该领域的基础研究和技术创新;制定相关税收政策,对秉持绿色可循环生产的企业给予税收优惠,鼓励扶持企业发展,同时可学习欧盟等国家/地区对回收成本较高的一次性塑料制品征收“回收税”,以减少公众对此类产品的消费和使用。

其次,探索生物法与非生物法相结合的塑料降解与回收路径。改进当前广泛使用的物理回收法和化学回收法,优化回收工艺,开发反应条件

温和、对环境友好和副产品少的催化制剂。生物降解方面,在聚焦于挖掘更多种类的生物解聚微生物/酶、探寻石油基塑料生物解聚机制的同时,积极发展生物降解塑料与塑料替代产品,多线并行防治塑料污染问题。

再次,推进我国塑料加工行业转型升级。产业链内各创新单元应不断加强自主研发能力,开发具有市场竞争力的塑料处理技术和塑料制品;以应用带产业,加强产业上中下游间的协同合作,拓展产业链应用市场;充分发挥行业协会/联盟的桥梁作用,促进行业内外的交流与贸易,为企业发展给予引导和支持。

最后,进一步倡导可持续、绿色发展的社会理念。生物循环经济是未来社会发展的必然趋势,因此,我国应继续普及和倡导“绿色、经济、可循环”的社会理念,宣传塑料降解与回收利用的生态价值与社会经济价值;引导公众转变对塑料制品的观念与偏好,从源头减少传统塑料制品的消费使用,同时为生物可降解塑料的大规模推广积累用户基础。

## REFERENCES

- [1] How sustainability is addressed in official bioeconomy strategies at international, national and regional levels: an overview[R/OL]. [2022-07-19]. <https://www.fao.org/3/i5998e/i5998e.pdf>.
- [2] Expert group report-review of the EU bioeconomy strategy and its action plan[R/OL]. [2022-07-19]. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/149467>.
- [3] Five reasons why a sustainable and circular global bioeconomy just make sense[EB/OL]. [2022-07-19]. <https://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1330390/>.
- [4] ELHACHAM E, BEN-URI L, GROZOVSKI J, BAR-ON YM, MILO R. Global human-made mass exceeds all living biomass[J]. *Nature*, 2020, 588(7838): 442-444.
- [5] ANTELAVA A, DAMILOS S, HAFEEZ S, MANOS G, AL-SALEM SM, SHARMA BK, KOHLI K, CONSTANTINO A. Plastic solid waste (PSW) in the context of life cycle assessment (LCA) and sustainable management[J]. *Environmental Management*, 2019, 64(2): 230-244.
- [6] LI LZ, LUO YM, LI RJ, ZHOU Q, PEIJENBURG WJGM, YIN N, YANG J, TU C, ZHANG YC. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants *via* a crack-entry mode[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(11): 929-937.
- [7] The new plastics economy: rethinking the future of plastics[R/OL]. [2022-07-19]. [https://www.weforum.org/reports/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics/?DAG=3&gclid=EAIAIQobChMIkdfUhbqC\\_gIV0BJMCh2J\\_AqUEAAYAiAAEgIKuvD\\_BwE](https://www.weforum.org/reports/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics/?DAG=3&gclid=EAIAIQobChMIkdfUhbqC_gIV0BJMCh2J_AqUEAAYAiAAEgIKuvD_BwE).
- [8] ZHENG JJ, SUH S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(5): 374-378.
- [9] Trends in global CO<sub>2</sub> and total greenhouse gas emissions: 2020 report[R/OL]. [2022-07-19]. <http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/file/greenhouse%20gas%20emissions%202020%20report.pdf>.
- [10] 周杰, 苏海佳, 吴琼, 邢建民, 董维亮, 姜岷. 中欧组织间合作研究项目 MIX-UP 助力实现“碳中和”[J]. *生物工程学报*, 2021, 37(10): 3414-3424.
- [11] ZHOU J, SU HJ, WU Q, XING JM, DONG WL, JIANG M. MIXed plastics biodegradation and UPcycling using microbial communities: the NSFC-EU 2019 project MIX-UP to help achieve “carbon neutrality”[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2021, 37(10): 3414-3424 (in Chinese).
- [12] An economic impact analysis of the US biobased products industry[R/OL]. [2022-10-15]. [https://www.rd.usda.gov/sites/default/files/usda\\_rd\\_economic\\_impact\\_analysis\\_us\\_biobased\\_products\\_industry.pdf](https://www.rd.usda.gov/sites/default/files/usda_rd_economic_impact_analysis_us_biobased_products_industry.pdf).
- [13] The bioeconomy initiative: implementation framework[R/OL]. [2022-10-15]. [https://biomassboard.gov/sites/default/files/pdfs/Bioeconomy\\_Initiative\\_Implementation\\_Framework\\_FINAL.pdf](https://biomassboard.gov/sites/default/files/pdfs/Bioeconomy_Initiative_Implementation_Framework_FINAL.pdf).
- [14] Bioeconomy research and development act of 2020[R/OL]. [2022-10-15]. <https://www.congress.gov/bill/116th-congress/senate-bill/3734>.
- [15] DOE announces \$178 million to advance bioenergy technology[EB/OL]. [2022-10-15]. <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-178-million-advance-bioenergy-technology>.
- [16] What is the biopreferred program?[EB/OL]. [2022-8-19]. <https://www.biopreferred.gov/BioPreferred/faces/pages/AboutBioPreferred.xhtml>.
- [17] Weathering plastic waste with the NIST SPHERE



- [EB/OL]. [2022-11-27]. <https://www.nist.gov/el/materials-and-structural-systems-division-73100/infrastructure-materials-group-73107/weathering>.
- [17] About the plastics innovation challenge[EB/OL]. [2022-11-27]. <https://www.energy.gov/plastics-innovation-challenge/plastics-innovation-challenge>.
- [18] National recycling strategy[EB/OL]. [2022-11-27]. <https://www.epa.gov/recyclingstrategy/national-recycling-strategy>.
- [19] The knowledge based bio-economy (KBBE) in Europe: achievements and challenges[R/OL]. [2022-11-27]. [https://www.researchgate.net/publication/315752017\\_The\\_Knowledge\\_Based\\_Bio-Economy\\_KBBE\\_in\\_Europe\\_Achievements\\_and\\_Challenges](https://www.researchgate.net/publication/315752017_The_Knowledge_Based_Bio-Economy_KBBE_in_Europe_Achievements_and_Challenges).
- [20] The European bioeconomy In 2030[R/OL]. [2022-11-27]. <https://www.bioeconomy-library.eu/the-european-bioeconomy-in-2030/>.
- [21] Innovating for sustainable growth: a bioeconomy for Europe[R/OL]. [2022-11-27]. <https://www.ecsite.eu/activities-and-services/resources/innovating-sustainable-growth-bioeconomy-europe>.
- [22] Resetting the ambition for biotechnology in the EU[R/OL]. [2022-8-19]. <https://www.europabio.org/cross-sector/publications/resetting-ambition-biotechnology-eu>.
- [23] The strategic innovation and research agenda (SIRA 2030) for a circular bio-based Europe[R/OL]. [2022-11-27]. [https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/legal\\_basis/jtis/bbi/bbi-sira\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/legal_basis/jtis/bbi/bbi-sira_en.pdf).
- [24] Strategic research and innovation agenda (SRIA) [R/OL]. [2022-11-27]. [https://www.eosc.eu/sites/default/files/EOSC-SRIA-V1.0\\_15Feb2021.pdf](https://www.eosc.eu/sites/default/files/EOSC-SRIA-V1.0_15Feb2021.pdf).
- [25] Energiekonzept der bundesregierung[R/OL]. [2022-8-19]. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=5).
- [26] National research strategy bioeconomy 2030 [R/OL]. [2022-8-19]. [https://www.pflanzenforschung.de/application/files/4415/7355/9025/German\\_bioeconomy\\_Strategy\\_2030.pdf](https://www.pflanzenforschung.de/application/files/4415/7355/9025/German_bioeconomy_Strategy_2030.pdf).
- [27] The German national bioeconomy strategy[R/OL]. [2022-11-27]. [https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/german-national-bioeconomy-strategy\\_en](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/german-national-bioeconomy-strategy_en).
- [28] German resource efficiency programme III[R/OL]. [2022-11-27]. <https://www.oneplanetnetwork.org/knowledge-centre/policies/german-resource-efficiency-programme-iii>.
- [29] Start des forschungsverbunds “modellregion bioökonomie im rheinischen Revier”—förderung von bis zu 72 millionen Euro[EB/OL]. [2022-11-27]. <https://www.wirtschaft.nrw/start-des-forschungsverbunds-modellregion-bioökonomie-im-rheinischen-revier-förderung-von-bis-zu#:~:text=Mit%20einer%20F%C3%B6rderung%20durch%20das,im%20Rheinischen%20Revier%20vorantreiben%20soll>.
- [30] Biorefineries roadmap[R/OL]. [2022-11-27]. [https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/FS/30759\\_Biorefineries\\_Roadmap\\_en.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/FS/30759_Biorefineries_Roadmap_en.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- [31] 循環型社会形成推進基本法[EB/OL]. [2022-11-27]. <https://www.env.go.jp/recycle/circul/recycle.html>.
- [32] 循環型社会形成推進基本計画[EB/OL]. [2022-11-27]. <https://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku.html>.
- [33] バイオ戦略 2019 [R/OL]. [2022-11-27]. [https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/bio2019\\_honbun.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/bio2019_honbun.pdf).
- [34] 「循環経済ビジョン 2020」を取りまとめました[EB/OL]. [2022-11-27]. <https://www.meti.go.jp/press/2020/05/20200522004/20200522004.html>.
- [35] 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略を策定しました[EB/OL]. [2022-11-27]. <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html>.
- [36] プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律 [EB/OL]. [2022-11-27]. <https://www.env.go.jp/recycle/plastic/circulation.html>.
- [37] 地球温暖化対策推進法[EB/OL]. [2022-11-27]. <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/domestic.html>.
- [38] “十四五”生物经济发展规划[EB/OL]. [2022-8-19]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202205/t20220510\\_1324436\\_ext.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202205/t20220510_1324436_ext.html).
- [39] 关于进一步加强塑料污染治理的意见[EB/OL]. [2022-8-19]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-01/20/content\\_5470895.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-01/20/content_5470895.htm).
- [40] 关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见[EB/OL]. [2022-8-19]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content\\_5588274.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-02/22/content_5588274.htm).
- [41] 污染治理和节能减碳中央预算内投资专项管理办法[EB/OL]. [2022-8-19]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/19/5608645/files/9154776e31324850986fc094ce93a2df.pdf>.
- [42] “十四五”循环经济发展规划[R/OL]. [2022-8-19]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202107/t20210707\\_1285527.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202107/t20210707_1285527.html).
- [43] “十四五”塑料污染治理行动方案[EB/OL]. [2022-8-19]. [https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/zys/sjdt/202109/t20210928\\_1298061.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/zys/sjdt/202109/t20210928_1298061.html?code=&state=123).

- [44] 关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见 [EB/OL]. [2022-11-27]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/08/content\\_5683972.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/08/content_5683972.htm).
- [45] YOSHIDA S, HIRAGA K, TAKEHANA T, TANIGUCHI I, YAMAJI H, MAEDA Y, TOYOHARA K, MIYAMOTO K, KIMURA Y, ODA K. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate)[J]. *Science*, 2016, 351(6278): 1196-1199.
- [46] TOURNIER V, TOPHAM CM, GILLES A, DAVID B, FOLGOAS C, MOYA-LECLAIR E, KAMIONKA E, DESROUSSEAU ML, TEXIER H, GAVALDA S, COT M, GUÉMARD E, DALIBEY M, NOMME J, CIOCI G, BARBE S, CHATEAU M, ANDRÉ I, DUQUESNE S, MARTY A. An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles[J]. *Nature*, 2020, 580(7802): 216-219.
- [47] ERICKSON E, GADO JE, AVILÁN L, BRATTI F, BRIZENDINE RK, COX PA, GILL R, GRAHAM R, KIM DJ, KÖNIG G, MICHENER WE, POUDEL S, RAMIREZ KJ, SHAKESPEARE TJ, ZAHN M, BOYD ES, PAYNE CM, DUBOIS JL, PICKFORD AR, BECKHAM GT, et al. Sourcing thermotolerant poly(ethylene terephthalate) hydrolase scaffolds from natural diversity[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 7850.
- [48] CHEN CC, HAN X, LI X, JIANG PC, NIU D, MA LX, LIU WD, LI SY, QU YY, HU HB, MIN J, YANG Y, ZHANG LL, ZENG W, HUANG JW, DAI LH, GUO RT. General features to enhance enzymatic activity of poly(ethylene terephthalate) hydrolysis[J]. *Nature Catalysis*, 2021, 4(5): 425-430.
- [49] CUI YL, CHEN YC, LIU XY, DONG SJ, WU B. Computational redesign of a PETase for plastic biodegradation under ambient condition by the GRAPE strategy[J]. *ACS Catalysis*, 2021, 11(3): 1340-1350.
- [50] LU HY, DIAZ DJ, CZARNECKI NJ, ZHU CZ, KIM W, SHROFF R, ACOSTA DJ, ALEXANDER BR, COLE HO, ZHANG Y, LYND NA, ELLINGTON AD, ALPER HS. Machine learning-aided engineering of hydrolases for PET depolymerization[J]. *Nature*, 2022, 604(7907): 662-667.
- [51] 国家统计局工业主要产品产量月度数据[EB/OL]. [2022-12-23]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=A01>.

(本文责编 郝丽芳)