

· 中欧合作项目介绍 ·

姜岷 南京工业大学教授、博士生导师，长期从事低品味碳资源生物降解与转化方向的研究工作，主持国家自然科学基金国际（地区）合作与交流项目（中欧）、国家重点研发计划、973和863课题等国家和省部级项目20余项。近5年，在生物质化工领域权威期刊*Trends Biotechnol*、*ACS Synth Biol*等发表学术论文130余篇，以第一发明人申请中国发明专利73项，授权40余项；主编教材及学术专著4部，参编英文专著1部。担任中国生物发酵产业协会理事，微生物育种委员会副理事长，中德生物科技双边合作协调员，德国卡尔斯鲁厄大学客座教授，《化工进展》《生物工程学报》等期刊编委。



董维亮 南京工业大学教授、硕士生导师，主要研究方向为废弃物高值化生物炼制全细胞催化剂发掘与催化机制，主持国家重点研发计划课题、国家基金委面上和青年项目等。近5年在环境微生物领域*Appl Environ Microb*、*Chemosphere*等期刊发表学术论文60余篇，入选江苏省六大人才高峰，科技部第六次国家技术预测生物制造领域专家，2020-2035国家中长期发展规划生物医药专题生物制造子专题编写专家，中国微生物学会环境微生物专业委员会、江苏省微生物学会会员。



中欧组织间合作研究项目 MIX-UP 助力实现“碳中和”

周杰¹，苏海佳²，吴琼³，邢建民⁴，董维亮¹，姜岷¹

1 南京工业大学 生物与制药工程学院 材料化学工程国家重点实验室，江苏 南京 211816

2 北京化工大学 生命科学与技术学院，北京 100029

3 清华大学 生命科学学院 化工系，北京 100084

4 中国科学院过程工程研究所 中国科学院绿色过程与工程重点实验室，北京 100190

周杰，苏海佳，吴琼，等. 中欧组织间合作研究项目 MIX-UP 助力实现“碳中和”. 生物工程学报, 2021, 37(10): 3414-3424.

Zhou J, Su HJ, Wu Q, et al. MIXed plastics biodegradation and UPcycling using microbial communities: the NSFC-EU 2019 project MIX-UP to help achieve “carbon neutrality”. Chin J Biotech, 2021, 37(10): 3414-3424.

摘要: 随着全球塑料循环体系的变革升级，提高塑料的回收利用不仅可以减少塑料在生命周期中的碳排

Received: May 29, 2021; **Accepted:** July 9, 2021

Supported by: National Natural Science Foundation of China (Nos. 31961133017, 31961133018, 31961133019).

Corresponding authors: Min Jiang. Tel: +86-21-58139933; E-mail: bioengine@njtech.edu.cn

Weiliang Dong. E-mail: dwl@njtech.edu.cn

国家自然科学基金 (Nos. 31961133017, 31961133018, 31961133019) 资助。

网络出版时间: 2021-07-26

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1998.Q.20210726.0857.001.html>

放, 还可以解决废塑料潜在的生态环境危害。文中介绍了 2019 年国家自然科学基金组织间国际 (地区) 合作研究项目“废塑料资源高效生物降解转化的关键科学问题与技术 (MIXed plastics biodegradation and UPcycling using microbial communities, MIX-UP)”。该项目聚焦“塑料污染”这一全球化的问题, 围绕中欧双方确定的“塑料生物降解菌群”研究领域, 联合中欧双方 14 家优势科研单位, 开展实质性的重大前沿合作研究。针对废塑料生物降解中存在的解聚与重塑两个难题, 项目以难降解石油基塑料 (PP、PE、PUR、PET 和 PS) 以及生物可降解塑料 (PLA 和 PHA) 的混合废塑料作为研究对象, 从塑料微生物降解途径解析及关键元件的挖掘与改造、塑料高效降解混菌/多酶体系的构建与功能调控、塑料降解物的高值化炼制途径设计与利用策略 3 个方面展开研究。本项目将突破废塑料生物降解转化中高效降解元件挖掘、塑料降解物高值化利用的关键科学问题与技术, 探索一条废塑料资源化、高值化、循环化、低碳化的新塑料循环路线, 建立以“降塑再造”为核心理念的废塑料生物炼制体系, 丰富我国固废资源化生物技术利用平台。项目的实施不仅有助于提升我国塑料 (生物) 循环经济的理论基础和关键技术水平, 还可以推动我国与国际科研院所的多边交流与合作, 促进我国在生物技术领域的创新发展, 助力我国碳中和目标的实现。

关键词: 废塑料, 生物循环经济, 碳中和, 中欧合作, 降塑再造, 混菌/多酶

MIXed plastics biodegradation and UPcycling using microbial communities: the NSFC-EU 2019 project MIX-UP to help achieve “carbon neutrality”

Jie Zhou¹, Haijia Su², Qiong Wu³, Jianmin Xing⁴, Weiliang Dong¹, and Min Jiang¹

¹ State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China

² College of Life Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

³ Department Chemical Engineering, Tsinghua University, School of Life Science, Beijing 100084, China

⁴ CAS Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: With the transformation and revolution of the global plastics recycling system, recycling and upcycling of mixed plastics waste not only reduces the carbon emissions of plastics during its life cycle, but also addresses its potential ecological and environmental hazards. This article summarizes an international cooperation project, “MIXed plastics biodegradation and UPcycling using microbial communities” (MIX-UP) which was funded by the National Natural Science Foundation of China and the European Union (NSFC-EU) in 2019. The consortium of MIX-UP consists of 14 partners from European Union and China. Focusing on the global issue of “plastics pollution”, this Sino-European MIX-UP project took the mixed waste of petroleum-based plastics (PP, PE, PUR, PET and PS) and bio-based plastics (PLA and PHA) as starting materials for biotechnological conversion into value-added, sustainable biomaterials. MIX-UP has three subprojects: 1) identification of plastics biodegradation pathway and design & engineering of key degrading elements, 2) construction and functional regulation of microbial consortia/enzyme cocktails with high-efficiency for degradation of plastics mixtures, 3) strategy of design and utilization of plastics degradation products for production of high value materials. Through NSFC-EU complementary and cross-disciplinary cooperation, MIX-UP proposes the engineering of a new-to-nature biological route for upcycling, a low carbon and sustainable bio-treatment that is different from the traditional physico-chemical treatment, which will empower the recycling industry to a new dimension. The implementation of the project will not only help to promote innovation and development in the field of biotechnology in China, but also contribute to the achievement of China’s carbon neutral goal.

Keywords: waste plastics mixtures, biological circular economy, carbon neutral, international cooperation, MIX-UP, microbial consortia/enzyme cocktails

合成塑料是由单体原料通过加聚或缩聚而成的高分子材料,其种类繁多、结构多样,目前主流的合成塑料包括聚苯乙烯 (Polystyrene, PS)、聚乙烯 (Polyethylene, PE)、聚丙烯 (Polypropylene, PP)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene terephthalate, PET)、聚氨酯 (Polyurethane, PUR)、聚氯乙烯 (Polyvinyl chloride, PVC) 等石油基塑料。塑料工业是国民经济的支柱产业,广泛应用于国民经济各领域,为人类社会的进步和人民生活水平的提高奠定了坚实的物质基础。然而,不规范生产、使用塑料制品和堆放塑料废弃物等问题,造成塑料在环境中的长期累积,导致了严重的环境污染和资源浪费。以色列魏茨曼科学研究所所在 *Nature* 杂志上报道称,2020 年人类生产的塑料总量超过 80 亿 t,是地球上所有动物的质量总和 (40 亿 t) 的 2 倍^[1],大量废弃塑料不合理处置导致的“白色污染”已经成为一个全球性问题。随着全球塑料循环体系的变革升级,加强废弃塑料的回收利用不仅可以解决废塑料的生态环境污染,还可以减少塑料在生命周期中的碳排放,具有多重生态效应^[2]。“十三五”以来,党中央高度重视生态文明建设,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全链条、全方位防治废弃塑料污染,已成为我国建设绿水青山、美丽中国的一个重要工作^[3]。

目前,塑料废弃物处理方法主要以物理和化学回收方法为主,具有经济性差、副产品多和产生二次污染的局限性。近些年,生物处理技术由于具有高效降解、低经济成本、绿色环保等特点被逐步应用到废弃塑料的处理当中;建立以工业生物技术为基础的“生物解聚→生物降解→生物高值转化”塑料生物循环经济,有望成为塑料废弃物回收处置的重要手段,解决传统塑料线性经济模式带来的“白色污染问题”^[4-5],被认为是未来最具可持续发展潜力的处理方式^[6]。因此,塑料废弃物生物降解与回收再利用成为了国内外的研究

热点^[7-10]。

本文将对中欧组织间合作研究项目“废塑料资源高效生物降解转化的关键科学问题与技术”进行介绍。首先,从全球塑料污染问题与环境保护政策、塑料循环利用减轻碳排放、全球塑料经济体系发展与转型、塑料生物降解和转化技术面临的机遇与挑战 4 个方面对该项目的立项背景与意义进行阐述;然后从废塑料资源化的角度,探讨生物技术对于解决塑料环境污染问题、助力碳中和以及实现循环经济的作用;最后对该项目的理念与目标进行了详细的介绍,以期引导和帮助全社会对塑料污染问题的关注和科学的理解,并为建立可持续的塑料生物循环经济提供科学的意见和建议。

1 全球塑料污染问题与环境保护政策

塑料的完全人工合成已有 120 余年的历史,过去的 60 多年中,塑料作为一种重要基础材料被规模化生产和应用,在工业、农业、包装及日常生活各个方面发挥了重要作用。全球塑料产量从 1950 年的 200 万 t 飙升至 2018 年的 3.59 亿 t^[11],产业市场价值达 5 526 亿美元^[12];2018 年,中国和欧盟的塑料产量分别占全球塑料产量的 30% 和 17%,位居世界第一和第三。从 1950 年到 2015 年,人类累计制造了约 83 亿 t 塑料^[11],加上 2016–2019 年的全球塑料产量,2019 年底全球塑料累计产量已超过 100 亿 t。由于当今世界塑料经济仍以“开采-消费-使用-丢弃”模式的线性经济为主,塑料制品的日益广泛应用给人民生活带来极大便利的同时,塑料污染也对自然环境和人类健康产生了严重的负面影响。截止到 2015 年,已有约 63 亿 t 塑料彻底成为废弃物,其中只有 9% 被回收,另有 12% 被焚烧处理,剩余 79% 则深埋在垃圾填埋场或丢弃在自然环境中^[11]。据估算,按照目前塑料的生产规模及发展趋势,2050 年全球将产生大约 120 亿 t 塑料垃圾,在造成资源浪

费的同时,也带来了严重的环境污染。

目前,塑料污染已经成为全球性问题,从珊瑚礁到深海海沟、从偏远岛屿到两极,影响着地球上所有的生态系统,其中海洋的塑料污染问题已经非常严峻。2010年,约800万t塑料垃圾从陆地输入到海洋,海洋中的塑料总量可能已经达到1.5亿t^[13]。如果不采取行动,到2040年每年流入海洋的塑料将达到每年2900万t,相当于全球每米海岸线都有50kg塑料。2014年,首届联合国环境大会上,将海洋塑料垃圾污染列为全球亟待解决的十大环境问题之一,并对“微塑料”进行了特别关注。“微塑料”是由泄露到环境中的“宏塑料”废弃物在环境中分解和碎片化形成的塑料颗粒(粒径:0.1–5.0mm)。据估算,全球海洋表层水中约有5.25万亿个塑料颗粒,而陆地的微塑料污染规模可能是海洋的4–23倍,农业土壤可能较海洋“储存”了更多的微塑料^[14–16]。微塑料可以在大气及洋流的作用下在全球进行流动传播,甚至会通过海鲜、海盐以及农作物等途径富集到人体,对人类健康造成潜在威胁^[17–18]。目前,塑料、微塑料的大量存在不仅改变了生物栖息地、伤害了野生动植物,还严重干扰了生态系统的平衡和功能,对自然环境造成了严重的影响^[19–20]。

塑料污染不仅是一个环境悲剧,其在经济意义上的教训也是十分惨痛的。在线性塑料经济系统中,每年塑料包装总价值的95%(800亿至1200亿美元)在短暂的一次性使用周期后,就会在经济循环中流失^[12]。鉴于此,世界各国纷纷出台了一系列塑料合理使用及处置的政策。联合国环境规划署将2018年世界环境日的主题定为“塑战速决”(Beat plastic pollution),呼吁世界各国齐心协力对抗一次性塑料污染问题。2019年G20大阪峰会上,各国就“蓝色海洋愿景”达成共识,提出“2050年实现塑料垃圾向海洋零排放”的目标。目前,全球有120多个国家对塑料袋的使用进行规范,60多个国家出台了限制或者禁止

一次性不可降解塑料制品政策,限塑、禁塑正成为全球保护环境的共识和举措。2020年,欧盟《循环经济行动计划2.0版》中针对再生塑料、微塑料、生物基塑料和一次性塑料制品等制定了相应的政策法规,进一步丰富了治理举措。我国是塑料生产和消费大国,也在积极履行限塑、禁塑的大国责任。2020年1月,我国出台了《关于进一步加强塑料污染治理的意见》(发改环资〔2020〕80号)(简称新《意见》),2020年9月正式实施了《固体废物污染防治法》(简称新《固废法》)等一系列法规,推动细化各领域塑料制品禁限生产、销售和使用的政策界限和执行标准,进一步提高我国塑料废弃物资源化和能源化的比例,最大限度减少塑料污染^[21]。

2 塑料循环利用有助于石油减排与碳排放

为应对全球气候变化与加快实现《巴黎协定》长期目标,中国国家主席习近平在2020年9月联合国大会上庄严承诺,“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取到2060年前实现碳中和”^[22]。这一战略目标的实现需要工业、农业、能源、环境、交通等各行各业共同努力。

塑料的全生命周期包括从原油开采到塑料制品在企业制成,以及从塑料制品离开家庭到后续处理两个部分,在生产和使用塑料的过程中存在各种形式的碳排放。据统计,塑料工业全生命周期消耗了全球8%的石油资源,塑料生产和使用过程中的碳排放占全球的3.8%^[23–24],按照目前塑料行业的发展速度,2050年全球塑料生产将消耗全球20%的石油供应总量,其中约1/4的塑料产品是一次性的^[24];不考虑塑料在开放环境中降解产生的碳足迹,届时塑料生产和使用的碳排放可能占全球总量的15%^[12]。由此可见,塑料回收再利用将大大降低用于生产新塑料制品的石油总量,

对石油碳减排具有重要意义。

全球最大的环保集团法国威立雅 (Veolia) 在《检验材料的碳足迹》技术报告中指出, 塑料包装比纸、玻璃、不锈钢和铝等材料包装碳排放更低。同时, 回收再生塑料相比初生塑料生产可减少 30%–80% 的碳排放。据此推算, 如果将所有废弃塑料回收再利用, 平均每年可减排 0.3–1.5 亿 t 二氧化碳, 相当于在全球关闭 8–40 个燃煤电厂^[25]。2020 年, 我国石油消费总量控制和政策研究项目发布最新报告《中国塑料的环境足迹评估》, 首次系统量化我国塑料产品的环境足迹。报告指出, 通过对塑料全产业链的管理, “十四五”我国可累积减少传统化石基塑料消费 1 180 万 t, 避免塑料焚烧 620 万 t, 节省原油 2 500 万 t, 减排二氧化碳 1.1 亿 t^[26]。因此, 塑料的回收利用可在碳减排、碳中和的过程中发挥重要作用。

3 全球塑料经济体系发展与转型

塑料污染速度日益加快, 生态环境加速恶化。源头减量只是塑料污染治理中的一个环节, 塑料污染整体综合治理需涵盖塑料制品生产、流通、使用、回收、处置全过程和各环节, 应体现出全生命周期管理的系统性和整体性, 遵循“减量化、再利用、资源化”的循环经济理念^[27-28]。当前, 很多不同的策略被相应提出, 从完全消除塑料到将其转变为燃料, 从开发可生物降解的替代品到将塑料循环再生为可利用产品, 从废弃物专项行动转向涵盖整个塑料产业链的综合治理, 建立一个智能、可持续和循环再生的塑料循环体系已经成为全球共识。欧盟继 2015 年《循环经济行动计划》之后, 于 2020 年 3 月公布的新版循环经济计划 (CEAP-the new circular economy action plan), 继续推动着全球塑料经济模式由“线性塑料经济”逐步向低碳、绿色的“循环塑料经济”转型升级^[29]。

2020 年 7 月 23 日, 由牛津大学、利兹大学、埃伦·麦克阿瑟基金会、Common Seas、皮尤慈善

信托基金会和 SYSTEMIQ 共同发布了《打破塑料浪潮: 对遏制海洋塑料污染途径的综合评估》白皮书, 这是迄今为止针对海洋塑料发布的最为全面和最有力的研究报告之一。同时, 在 *Science* 杂志上发表的“Evaluating scenarios toward zero plastic pollution”一文阐述了该报告的基础理论与技术^[30]。《打破塑料浪潮》报告提出一个全新的经济模型, 对全球塑料体系中关键塑料的流动和存量进行量化, 评估了 2016 年至 2040 年期间 6 种方案下的海洋塑料污染数量, 并预测了不同方案对经济、环境和社会的影响。报告中基于现有可行的技术和解决方案, 对塑料循环体系提出了 8 项措施, 通过这些措施预计到 2040 年将使流入海洋的塑料污染减少约 80%。报告最后指出, 人类如果在整个塑料经济体系中积极采取措施, 在不影响社会或经济效益的前提下, 是有可能在未来大幅减少塑料污染的。这份报告为全世界、全人类提供了一个共同解决塑料污染问题的可行性解决方案。

全球塑料循环体系由塑料的生产、消费、回收和贸易等部分组成。其中, 废塑料的回收利用是全球塑料循环体系形成的关键环节。从全球范围来看, 我国属于废塑料回收利用的“优等生”, 废塑料回收率与欧盟 (32.5%)、日本 (28%) 等发达国家水平相当, 而美国废塑料回收比例长期在 10% 以下, 2017 年, 美国废塑料回收率仅为 8.8% (主要为 PET 和 PE 两种材料)^[2]。2019 年我国约产生 6 300 万 t 废塑料, 其中回收再利用的废塑料有 1 890 万 t, 达到 30%^[31]。由于废塑料回收利用需要大量的人力、物力和财力, 导致焚烧和填埋仍是当前废塑料主要的处置手段。栾晓玉等对我国 1949–2019 年废弃塑料流向进行了统计分析, 结果表明除 30% 废弃塑料被回收利用以外, 14% 被焚烧发电回收热能, 36% 被填埋或任意丢弃, 20% 则被直接丢弃到自然环境中^[32]。因此, 当前我们应从“应对产业链末端的塑料垃圾污染”向

“应对线性塑料经济”转变，从焚烧、填埋的线性处理方式转向回收再利用的循环模式，以最大程度地减少生产浪费、资源浪费和二氧化碳排放^[3]。

4 塑料生物降解和转化技术面临的机遇与挑战

当前，塑料垃圾回收主要以物理和化学回收工艺为主。物理回收是将所有在机械性能和热性能上具有差异的废塑料进行分类，然后进行洗涤以去除有机残留物并切碎，随后进行熔融和重塑的过程。物理回收可以实现净利润，是目前唯一大规模应用于处理固体塑料废物的技术。虽然诸如挪威陶朗集团 (TOMRA) 已经开发了前沿的“同级再生”的回收技术，实现了塑料饮料瓶多达 50 次的循环再生，物理回收仍然存在塑料种类和材料损耗的限制，一般以降级回收再生为主，多用于次级产品制造，如将回收的 PET 瓶等产品降级再生为长纤、短纤。目前，物理回收的主要问题就是回收经济性差，同时存在废气、废水量多、环保成本高、水资源消耗量大等缺点。

化学回收可以将废塑料经热裂解、催化裂解及溶剂解聚等过程，转化为单体和低聚物或者选择性还原为低分子燃油的技术，可实现无限次回收同时品质不降级或升级的再生塑料，是一种非常具有前景的技术^[33-34]。2019 年，国际纯粹与应用化学联合会 (IUPAC) 将“塑料降解”列入“十项将改变世界的化学创新”之中。德国 BASF、美国 Agilyx、英国 PlasticEnergy、加拿大 Loop Industries、日本 JEPLAN 以及我国的浙江科茂能源科技有限公司、浙江佳人新材料有限公司等化工企业陆续投资和启动了废塑料化学回收技术。然而，化学回收的加工设备复杂且化学能源成本高昂，使得化学回收在商业上仍缺乏竞争力。因此，如何有效地回收塑料是塑料循环经济可持续发展面临的重大挑战。

面对全球塑料生产的持续增长，考虑到传统

物理和化学回收技术的缺点，生物解聚和转化技术逐渐成为解决塑料污染的一个重要途径^[4-5,35]。生物解聚和转化技术是在温和条件下使用微生物/酶选择性将废塑料解聚成不同的聚合物单体，以及对混合塑料降解物进行高值化的生物炼制过程。塑料是人工合成的高分子材料，在设计之初就具备结构致密、疏水性强、分子结晶度高、键能稳定等特点，因此，传统认为无论是微生物还是酶都难以将塑料聚合物高效降解。然而，随着近些年在塑料生物降解领域，特别是 PET 塑料的酶法降解领域取得的突破性进展，让人们对于塑料生物降解有了全新的认识^[36-37]。从 2005 年 Muller 等鉴定并定义了首个 PET 塑料水解酶 TtH 开始^[38]，角质酶 HiC^[39]、Tfcut2^[40]、LCC^[41]和 PETase^[9]等 PET 塑料高效水解酶陆续被鉴定、表征和分析。2020 年，法国 Tournier 等通过对角质酶 LCC 进行理性设计与改造，显著提高了酶的热稳定性 (T_m 提高了 9.3 °C)，结合过程工程优化，在 10 h 内将 14.6% 结晶度 PET 的分解效率提高到了 90%^[8]；同时还实现了对水解产物 TPA 的回收与 PET 的闭环再生 (Close loop recycling)。该研究证明了废塑料生物循环经济的技术可行性，为其他类型塑料的生物解聚与利用研究奠定了基础。目前，法国 Carbios 是世界第一家在工业规模上对塑料进行生物回收的公司，不仅可以快速将 PET 塑料垃圾转化成单体原料，还能用于制造新的食品级塑料瓶，为塑料废弃物的良性管理铺平了道路。

当前，PET 塑料高效生物解聚已经取得了较好的研究进展，为其进一步实现工业水平的循环利用 (Recycling) 提供了可能^[7]。然而，对于其他大多数石油基塑料 (如 PE、PS、PP、PVC 和 PUR 等)，其生物解聚回收的技术工艺尚未取得重大突破^[37]。目前报道的绝大部分微生物倾向于利用塑料表面光化学氧化产生的活性基团，属于塑料表面修饰酶作用 (Surface-modifying enzymes)，高效解聚塑料聚合物骨架的微生物/酶却鲜有报道^[42]。

同时,除 PET 之外,目前仍缺乏标准化的生物降解能力表征手段,部分已发表研究结果还缺少严谨、科学的数据支撑,为废塑料的环境治理与回收资源化提供了误导性的宣传和解读^[36]。

废塑料的生物降解与回收仍面临着极大的挑战,尤其是聚烯烃塑料 (PE、PP、PS 和 PVC) 通常被认为是不可生物降解的。该类聚合物具有惰性 C-C 主链结构,没有易被氧化和水解的官能团,只能通过高能氧化还原反应降解^[43]。根据已有文献报道,目前只有烷烃羟化酶 AlkB、氢醌过氧化物酶和漆酶介体系统等少数几种酶可降低 PE 和 PS 的分子量;同时,也有一些研究报道昆虫幼虫和其肠道微生物组可以将 PE 和 PS 矿化为 CO₂,然而聚烯烃塑料 C-C 键生物裂解机理至今仍是悬而未决的科学问题^[43]。未来,难降解塑料的生物降解需要多学科的交叉研究,不断解析塑料生物降解机理以及填补科学与技术的空白,以期取得重大的科学突破。

在利用工程酶来催化降解废塑料的同时,如何高效利用其降解产物——塑料单体,是塑料循环经济的一个重要方面。特别是针对某些不能直接通过闭环再生合成新塑料的部分单体,如果微生物可以将它们作为碳源进行利用,进而合成诸如聚羟基脂肪酸酯 (Polyhydroxyalkanoates, PHA) 树脂等有高附加值的化合物 (Up-cycling), 将为塑料废物的“升级循环”提供更大的可能性^[36]。2019 年 3 月,亚琛工业大学 Lars Blank 教授团队主持完成的欧盟地平线 H2020 塑料生物降解及利用项目 P4SB (From plastic waste to plastic value using *Pseudomonas putida* synthetic biology), 是国际上首个塑料生物降解与转化领域的重大项目,2020 年的欧盟创新雷达将 P4SB 评为欧盟十大生物技术项目之一。该项目旨在以恶臭假单胞菌为底盘细胞,将 PET 塑料降解并将水解得到的塑料单体转化为完全可生物降解的塑料 (PHA 及其衍生物等)。2020 年, Lars Blank 教授团队设计构建

了由 3 种恶臭假单胞菌组成的多细胞体系,实现了对聚氨酯塑料单体 AA、BDO 和 EG 的利用并转化成高附加值的鼠李糖脂生物表面活性剂^[44]。2021 年,韩国大学 Kim 教授团队基于高生物兼容性的催化剂甜菜碱,设计了化学-生物耦合 PET 塑料降解与转化的一锅法工艺,通过化学-酶法耦合将 PET 塑料解聚成 TPA 和 EG 单体,并进一步在不分离的情况下利用微生物将水解液中的塑料单体进行全细胞转化,分别合成了高价值化学品原儿茶酸 (PCA) 和乙醇酸 (GLA)^[45]。

5 中欧国际合作项目 MIX-UP 的理念与目标

全球性的问题需要全球性的国际合作、全局视角和解决方案。在“白色污染”与废弃塑料资源化的全球背景下,国家自然科学基金委员会与欧盟委员会 (NSFC-EU) 联合于 2019 年设立环境生物技术合作研究项目,围绕“塑料降解微生物菌群 (Microorganism communities for plastics biodegradation)”这一研究方向,对由南京工业大学姜岷教授和亚琛工业大学 Lars M. Blank 教授作为项目负责人联合牵头申报的“废塑料资源高效生物降解转化的关键科学问题与技术 (MIXed plastics biodegradation and UPcycling using microbial communities, MIX-UP, <https://www.mix-up.eu/>)”项目进行了立项资助。项目设置了 3 个课题,分别是“塑料微生物降解途径解析及关键元件的挖掘与改造”、“混合塑料高效降解混菌/多酶体系的构建与功能调控”和“塑料降解物的高值化炼制途径设计与利用策略”,执行期为 4 年。项目合作单位由中方的南京工业大学、北京化工大学、清华大学、中国科学院过程工程研究所,以及欧方的亚琛工业大学、格赖夫斯瓦尔德大学、于利希研究中心、西班牙国家生物技术中心等 14 家国际国内知名的高校和科研院所组成,形成了多学科交叉、优势互补的国际化科研队伍。

MIX-UP 项目的主要学术思想是运用新颖的工业生物技术方法来解决塑料生命周期的循环性问题, 总体理念与研究思路如图 1 所示。项目以难降解石油基塑料 (PP、PE、PUR、PET 和 PS) 以及生物可降解塑料 (PLA 和 PHA) 的混合废塑料作为研究对象, 从塑料微生物降解途径解析及关键元件的挖掘与改造、塑料高效降解混菌/多酶体系的构建与功能调控、塑料降解物的高值化炼制途径设计与利用策略 3 个方面展开研究, 突破废塑料高效生物降解转化中的关键科学问题与技术, 实现多酶/混菌系统对混合塑料的高效解聚与高值转化, 形成从塑料降解元件挖掘到塑料降解物高值化利用的废塑料生物炼制体系。最后, MIX-UP 项目将通过综合考虑上游 (菌株/微生物组开发、蛋白质工程)、中游 (发酵过程) 和下游 (回收和纯化) 过程, 以整合的方式对整个生物过程进行优化。通过中欧双方优势互补及多学科交叉, 探索一条有别于传统物理和化学回收的废塑料资源化、高值化、循环化、低碳化回收的工艺路线, 将废弃塑料的回收再利用提高到一个新的高度。

MIX-UP 项目的总体目标是利用高度工程化的废塑料解聚多酶体系以及生物合成的多细胞混

菌体系, 将未分类的混合塑料废料经生物降解与生物转化处理升级为可持续的生物可降解塑料和高值化学品, 将混合塑料废料发展为工业生物技术的新一代碳资源。随着时间的推移和技术的发展, 利用“降塑再造”的工业生物技术, 将塑料的传统产业链转变为基于可生物降解塑料的可持续发展产业链。项目的实施将有助于推动我国与国际科研多边交流与合作, 促进我国在生物技术领域的创新发展, 以期在塑料环境污染治理这个国际化难题上取得重大突破, 为塑料资源化利用与塑料 (生物) 循环经济提供新的理论基础和关键技术, 助力我国碳中和目标的实现。

6 总结与展望

塑料本身是一种有价值的产品, 废弃塑料污染问题的根本原因在于缺少科学的、可持续的生产和处理方式。经过近几十年的研究, 已报道的可有效解聚塑料的微生物/酶资源的数量已经大大增加, 通过酶分子设计与改造也获得了诸如 LCC、PETase 等 PET 塑料高效的解聚酶或变体酶, 实现了 PET 聚酯塑料的循环生物回收与再造。然而, 废塑料种类多、成分复杂, 其生物解聚仍然面临着降解菌种/酶资源匮乏、解聚机制不明晰、

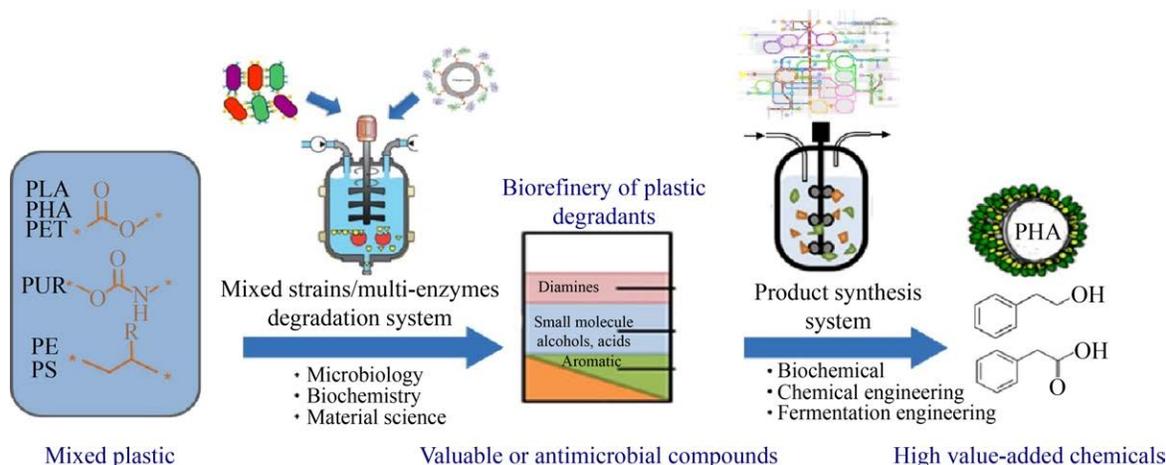


图 1 MIX-UP 项目整体理念与研究思路

Fig. 1 Schematic diagram showing the overall concept of the MIX-UP project.

降解体系效率低、降解物难以高效转化利用等一系列亟待解决的瓶颈问题,对于其他大多数石油基塑料如 PE、PS、PP、PVC 和 PUR 等,生物降解回收尚未取得重大突破。因此,除了筛选与挖掘更多塑料降解的微生物资源以及塑料降解酶的资源,对其降解特性、功能基因及关键酶的分子和生化水平的研究之外,还应加强微生物学、生物化学、合成生物学、材料科学等多学科的前沿交叉研究,从以“应对产业链末端的塑料垃圾污染”的环境微生物研究向以“应对线性塑料经济”为导向的废塑料资源化研究转型,将混合塑料垃圾升级发展为工业生物技术的新一代碳资源,构筑全新的塑料(生物)低碳循环经济模式。随着科学技术的不断进步,我们相信在不远的将来,这一目标终将在广大科研工作者的共同努力下而实现。

REFERENCES

- [1] Elhacham E, Ben-Uri L, Grozovski J, et al. Global human-made mass exceeds all living biomass. *Nature*, 2020, 588(7838): 442-444.
- [2] Garcia JM, Robertson ML. The future of plastics recycling. *Science*, 2017, 358(6365): 870-872.
- [3] 王琪, 瞿金平, 石碧, 等. 我国废弃塑料污染防治战略研究. *中国工程科学*, 2021, 23(1): 160-166.
Wang Q, Qu JP, Shi B, et al. Prevention and control of waste plastics pollution in China. *Strateg Study CAE*, 2021, 23(1): 160-166 (in Chinese).
- [4] Wei R, Zimmermann W. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we? *Microb Biotechnol*, 2017, 10(6): 1308-1322.
- [5] Wierckx N, Prieto MA, Pomposiello P, et al. Plastic waste as a novel substrate for industrial biotechnology. *Microb Biotechnol*, 2015, 8(6): 900-903.
- [6] Lens P, Hamelers B, Hoitink H, et al. Resource recovery and reuse in organic solid waste management. *Water Intell Online*, 2015, 4: 9781780402765.
- [7] Kawai F, Kawabata T, Oda M. Current state and perspectives related to the polyethylene terephthalate hydrolases available for biorecycling. *ACS Sustain Chem Eng*, 2020, 8(24): 8894-8908.
- [8] Tournier V, Topham CM, Gilles A, et al. An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 2020, 580(7802): 216-219.
- [9] Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, et al. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 2016, 351(6278): 1196-1199.
- [10] Liu JW, He J, Xue R, et al. Biodegradation and up-cycling of polyurethanes: progress, challenges, and prospects. *Biotechnol Adv*, 2021, 48: 107730.
- [11] Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv*, 2017, 3(7): e1700782.
- [12] World Economic Forum EMFaMC. The new plastics economy: rethinking the future of plastics [EB/OL]. [2016-01-19]. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics>.
- [13] Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, et al. Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 2015, 347(6223): 768-771.
- [14] Horton AA, Walton A, Spurgeon DJ, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Sci Total Environ*, 2017, 586: 127-141.
- [15] De Souza Machado AA, Kloas W, Zarfl C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Glob Chang Biol*, 2018, 24(4): 1405-1416.
- [16] Eriksen M, Lebreton LC, Carson HS, et al. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS ONE*, 2014, 9(12): e111913.
- [17] Li LZ, Luo YM, Li RJ, et al. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode. *Nat Sustain*, 2020, 3(11): 929-937.
- [18] Karami A, Golieskardi A, Keong Choo C, et al. The presence of microplastics in commercial salts from

- different countries. *Sci Rep*, 2017, 7: 46173.
- [19] Kane IA, Clare MA, Miramontes E, et al. Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation. *Science*, 2020, 368(6495): 1140-1145.
- [20] 朱莹, 曹森, 罗景阳, 等. 微塑料的环境影响行为及其在我国的分布状况. *环境科学研究*, 2019, 32(9): 1437-1447.
Zhu Y, Cao M, Luo JY, et al. Distribution and potential risks of microplastics in China: a review. *Res Environ Sci*, 2019, 32(9): 1437-1447 (in Chinese).
- [21] 李国庆. 限塑令升级下塑料污染治理的思路. *人民论坛*, 2021-02-20. <http://www.rmlt.com.cn/2021/0220/608225.shtml>
- [22] 中国减排承诺激励全球气候行动. *人民日报*, 2020-10-12. <http://world.people.com.cn/n1/2020/1012/c1002-31887542.html>.
- [23] Zheng JJ, Suh S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. *Nat Clim Chang*, 2019, 9(5): 374-378.
- [24] Olivier JG, Peters J. Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2020 report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. 2012-12-21. <https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2020-report>.
- [25] Voulvoulis, Nikolaos K, Richard K, et al. Examining material evidence-the carbon fingerprint. Veolia Plastic White paper. 2020.07. <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-natural-sciences/centre-for-environmental-policy/public/Veolia-Plastic-Whitepaper.pdf>.
- [26] 曹淑艳, 陈宝生, 郭红, 等. 中国塑料的环境足迹评估. 北京石油化工学院, 2020-12-28. <http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2020-12-28/5fe941e197b58.pdf>.
- [27] Giacobelli C. Single-use plastics: a roadmap for sustainability (rev. 2). United Nations Environment Programme, 2018-06-05. <https://www.unep.org/resources/report/single-use-plastics-roadmap-sustainability>.
- [28] Kaur G, Uisan K, Ong KL, et al. Recent trends in green and sustainable chemistry & waste valorisation: rethinking plastics in a circular economy. *Curr Opin Green Sustain Chem*, 2018, 9: 30-39.
- [29] 廖虹云, 康艳兵, 赵盟. 欧盟新版循环经济行动计划政策要点及对我国的启示. *中国发展观察*, 2020, 239(11): 55-58.
Liao HY, Kang YB, Zhao M. The policy key points of EU's new circular economy action plan and its enlightenment to China. *China Dev Obs*, 2020, 239(11): 55-58 (in Chinese).
- [30] Lau WWY, Shiran Y, Bailey RM, et al. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, 2020, 369(6510): 1455-1461.
- [31] 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). 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). Beijing: China Plastic Recycling Association of China National Resources Recycling Association, 2020 (in Chinese).
- [32] 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. *资源科学*, 2020, 42(2): 372-382.
Luan XY, Liu W, Cui ZJ, et al. Plastic resources metabolism in China based on material flow analysis. *Resour Sci*, 2020, 42(2): 372-382 (in Chinese).
- [33] Lemonick S. Chemistry may have solutions to our plastic trash problem. *Chem Eng News* 2018, 95(25): 26-29.
- [34] Kosloski-Oh SC, Wood ZA, Manjarrez Y, et al. Catalytic methods for chemical recycling or upcycling of commercial polymers. *Mater Horiz*, 2021, 8(4): 1084-1129.
- [35] 钱秀娟, 刘嘉唯, 薛瑞, 等. 合成生物学助力废弃塑料资源生物解聚与升级再造. *合成生物学*, 2021, 2(2): 161-180.
Qian XJ, Liu JW, Xue R, et al. Synthetic biology boosts biological depolymerization and upgrading of waste plastics. *Synth Biol J*, 2021, 2(2): 161-180 (in Chinese).
- [36] Wei R, Tiso T, Bertling J, et al. Possibilities and limitations of biotechnological plastic degradation and recycling. *Nat Catal*, 2020, 3(11): 867-871.
- [37] 许楹, 殷超凡, 岳纹龙, 等. 石油基塑料的微生物

- 降解. 生物工程学报, 2019, 35(11): 2092-2103.
- Xu Y, Yin CF, Yue WL, et al. Microbial degradation of petroleum-based plastics. Chin J Biotechnol, 2019, 35(11): 2092-2103 (in Chinese).
- [38] Müller RJ, Schrader H, Profe J, et al. Enzymatic degradation of poly(ethylene terephthalate): rapid hydrolyse using a hydrolase from *T. fusca*. Macromol Rapid Commun, 2005, 26(17): 1400-1405.
- [39] Ronkvist ÅM, Xie WC, Lu WH, et al. Cutinase-catalyzed hydrolysis of poly(ethylene terephthalate). Macromolecules, 2009, 42(14): 5128-5138.
- [40] Herrero Acero E, Ribitsch D, Steinkellner G, et al. Enzymatic surface hydrolysis of PET: effect of structural diversity on kinetic properties of cutinases from *Thermobifida*. Macromolecules, 2011, 44(12): 4632-4640.
- [41] Sulaiman S, Yamato S, Kanaya E, et al. Isolation of a novel cutinase homolog with polyethylene terephthalate-degrading activity from leaf-branch compost by using a metagenomic approach. Appl Environ Microbiol, 2012, 78(5): 1556-1562.
- [42] Kawai F, Kawabata T, Oda M. Current knowledge on enzymatic PET degradation and its possible application to waste stream management and other fields. Appl Microbiol Biotechnol, 2019, 103(11): 4253-4268.
- [43] Inderthal H, Tai SL, Harrison STL. Non-hydrolyzable plastics—an interdisciplinary look at plastic bio-oxidation. Trends Biotechnol, 2021, 39(1): 12-23.
- [44] Utomo RNC, Li WJ, Tiso T, et al. Defined microbial mixed culture for utilization of polyurethane monomers. ACS Sustain Chem Eng, 2020, 8(47): 17466-17474.
- [45] Kim DH, Han DO, In Shim K, et al. One-pot chemo-bioprocess of PET depolymerization and recycling enabled by a biocompatible catalyst, betaine. ACS Catal, 2021, 11(7): 3996-4008.

(本文责编 郝丽芳)