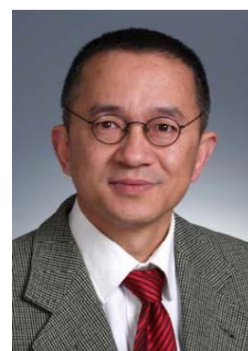


· 序 言 ·

姜岷 南京工业大学教授、博士生导师。长期从事废弃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)、国家重点研发计划合成生物学专项、国家重点基础研究发展计划和国家高技术研究发展计划课题等国家和省部级项目 20 余项。近 5 年,在生物化工领域权威期刊 *Trends in Biotechnology*、*Green Chemistry*、*ACS Synthetic Biology* 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,《生物工程学报》《化工进展》等期刊编委。



祁庆生 山东大学微生物技术国家重点实验室教授。2001 年获得德国明斯特大学博士学位,2001–2003 年在德国 Chemnitz/Leipzig 从事研究工作,2004 年被山东大学引进并全职回国。长期从事合成生物学理论与方法、代谢工程改造、微生物环境治理等方面的研究。发表论文 200 余篇,被引用 5 000 余次,申请和获得专利 40 余项。近 5 年主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金国际合作重大项目、国家自然科学基金重点项目等。担任《生物工程学报》编委。



塑料的生物降解与转化专刊序言

周杰¹, 苏田源², 姜岷^{1*}, 祁庆生^{2*}

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 山东大学 微生物技术国家重点实验室, 山东 青岛 266273

周杰, 苏田源, 姜岷, 祁庆生. 塑料的生物降解与转化专刊序言[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1861-1866.

ZHOU Jie, SU Tianyuan, JIANG Min, QI Qingsheng. Preface to the special issue: biotechnology of plastic waste degradation and valorization[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1861-1866.

摘 要: 合成塑料已广泛应用于国民经济各领域,是国民经济的支柱产业。然而,不规范生产、使用塑料制品以及处置塑料废弃物等问题,造成塑料在环境中长期累积,导致了严重的环境污染和碳资源浪费。生物降解是实现废塑料污染治理与资源化的新途径,已成为国内外废弃塑料处置研究的热点。近年来,在塑料降解微生物/酶资源的分离、筛选、鉴定以及对其进行工程化改造等

资助项目: 国家自然科学基金(31961133017, 31961133014)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (31961133017, 31961133014).

*Corresponding authors. E-mail: JIANG Min, jiangmin@njtech.edu.cn; QI Qingsheng, qiqingsheng@sdu.edu.cn

Received: 2023-04-18

方面取得了重要突破,为环境中微塑料的治理、废塑料的闭环循环再生提供了新的思路 and 方案。另一方面,利用微生物(纯菌或菌群)将塑料降解产生的单体进一步转化为生物可降解塑料及其他具有高附加值的化合物,对于解决废塑料的生态环境污染、推动塑料循环经济发展以及减少塑料在生命周期中的碳排放等方面具有重要意义。《生物工程学报》特组织出版“塑料的生物降解与转化”专刊,邀请了国内外塑料生物降解与转化领域的相关专家学者介绍了塑料生物降解资源的发掘、塑料解聚酶的设计与改造、塑料降解物的生物高值转化等领域最新进展和研究成果,收录了包括评论、综述、研究论文等类型的相关文章 16 篇,为塑料生物降解与转化的进一步研究提供借鉴和指导。

关键词: 废塑料; 生物降解; 生物转化; 微生物; 酶

Preface to the special issue: biotechnology of plastic waste degradation and valorization

ZHOU Jie¹, SU Tianyuan², JIANG Min^{1*}, QI Qingsheng^{2*}

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

² State Key Laboratory of Microbial Technology, Shandong University, Qingdao 266273, Shandong, China

Abstract: Synthetic plastics have been widely used in various fields of the national economy and are the pillar industry. However, irregular production, plastic product use, and plastic waste piling have caused long-term accumulation in the environment, contributing considerably to the global solid waste stream and environmental plastic pollution, which has become a global problem to be solved. Biodegradation has recently emerged as a viable disposal method for a circular plastic economy and has become a thriving research area. In recent years, important breakthroughs have been made in the screening, isolation, and identification of plastic-degrading microorganisms/enzyme resources and their further engineering, which provide new ideas and solutions for treating microplastics in the environment and the closed-loop bio-recycling of waste plastics. On the other hand, the use of microorganisms (pure cultures or consortia) to further transform different plastic degradants into biodegradable plastics and other compounds with high added value is of great significance, promoting the development of a plastic recycling economy and reducing the carbon emission of plastics in their life cycle. We edited a Special Issue on the topic of “Biotechnology of Plastic Waste Degradation and Valorization”, focusing on the researches progress in three aspects: Mining microbial and enzyme resources for plastic biodegradation, Design and engineering of plastic depolymerase, and biological high-value transformation of plastic degradants. In total, 16 papers have been collected in this issue including reviews, comments, and research articles, which provide reference and guidance for further development of plastic waste degradation and valorization biotechnology.

Keywords: waste plastics; biodegradation; biotransformation; microorganisms; enzymes

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)、聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT)、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,造成塑料在环境中长期累积,导致了严重的环境污染和资源浪费。最新研究数据表明,从1950至2021年全球共产生87亿t的塑料废弃物,其中只有约11%被回收利用。在2019年所产生的3.53亿t塑料垃圾中,超过2/3被填埋或焚烧,22%(约7900万t)被丢弃到环境中^[1]。随着全球塑料循环体系的变革升级,实现塑料的回收循环利用不仅可以减少塑料在生命周期中的碳排放,还可以解决废塑料潜在的生态环境危害。生物降解是实现废塑料污染治理与资源化的新途径,已成为国内外废弃塑料处置研究的热点,应用潜力巨大。

近年来,在塑料降解微生物/酶资源的分离、筛选、鉴定以及对其进行工程化改造等方面取得了重要突破。鉴于此,《生物工程学报》邀请祁庆生教授和姜岷教授为特邀主编,组织出版了“塑料的生物降解与转化”专刊,邀请了来自国内外多家单位的专家学者,从不同方向和视角集中展示了相关领域的最新研究进展。专刊围绕这一主题,汇集了16篇文章^[2-17],其中包括发展规划研究1篇、评论1篇、综述7篇、研究论文7篇。中国科学院成都文献情

报中心的陈方和丁陈君团队通过比较美国、欧洲、德国、日本与我国塑料降解与回收的相关战略,对该领域的文献与专利展开计量分析,从循环生物经济角度探讨了我国塑料降解回收发展面临的机会与挑战,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^[2]。同时,学者们围绕着PET、PUR、聚乳酸(poly(lactic acid, PLA)、PE等塑料的生物降解资源发掘、塑料解聚酶的设计与改造、塑料降解物的生物高值转化3个方面进行了梳理和总结^[3-17],旨在及时全面地反映该领域的发展动态和最新研究成果,促进塑料生物降解与转化研究的进一步发展。

1 塑料生物降解资源的发掘

塑料的生物降解具有条件温和、应用潜力巨大的特点,塑料降解微生物和酶资源的挖掘以及新技术的开发方兴未艾。塑料生物降解技术的核心是高效解聚微生物/酶,然而当前的分析检测方法无法满足塑料生物降解资源的高效筛选,因此开发准确、快速的塑料降解过程分析方法,对于生物降解资源筛选和降解效能评价具有重要意义。南京工业大学陈小强团队对塑料生物降解检测方法进行了总结和梳理,全面介绍了目前塑料生物降解的检测与表征的原理方法,以及这些检测分析方法在塑料降解微生物/酶筛选方面的应用进展,并重点讨论了荧光分析策略在快速表征塑料生物降解过程中的应用,为进一步规范塑料生物降解过程的表征与分析研究,以及开发更高效的塑料生物降解资源筛选方法提供借鉴^[3]。随着我国塑料污染治理政策的不断深入,生物可降解塑料产业得到快速发展,PLA塑料作为生物基可降解塑料中的典型代表,发展潜力巨大。然而公众对生物基塑料的认识仍存在诸多误解,培养公

众正确的绿色环保意识十分重要,不能因为使用可降解塑料制品而形成随意丢弃的习惯。南京工业大学姜岷团队对 PLA 塑料的性质,以及 PLA 塑料微生物与酶法降解的研究进行了回顾与总结,探讨了 PLA 的生物降解机制,并提出了微生物原位处理和酶法闭环回收两种 PLA 塑料废弃物生物处置方法,为正确认识和提前布局研究生物基可降解塑料的环境效应与废弃物的回收利用提供借鉴^[4]。

以 C-C 键为骨架的聚烯烃塑料是全球通用合成树脂中产量最丰富的品种,占据了全球塑料制品的 77%,主要包括 PE、PS、PP 和 PVC。山东大学祁庆生团队和南京农业大学曹慧团队全面梳理了聚烯烃塑料生物降解资源及生物降解机制的研究进展,提出了目前聚烯烃类塑料生物降解过程存在的问题及聚烯烃塑料生物降解的进一步研究方向^[5-6]。PUR 塑料是由不同类型的多元醇和异氰酸酯聚合而成,根据多元醇类型可大致将 PUR 分为聚酯型和聚醚型两类,占全球塑料制品的 4%,2020 年仅中国就生产了 1 470 万 t,消费 1 175 万 t。南京农业大学崔中利团队和闫新团队分别从垃圾填埋场的土壤样品中分离鉴定了 PUR 塑料降解菌拟无枝杆菌属(*Amycolatopsis* sp.) G-11 和高地芽孢杆菌(*Bacillus altitudinis*) YX8-1,通过对菌株降解 PUR 的性能表征并鉴定了关键降解产物,丰富了 PUR 废弃物的生物降解菌株资源^[7-8]。

2 塑料解聚酶的设计与改造

近年来,利用生物技术对塑料废弃物进行回收利用已成为一个蓬勃发展的研究领域,许多研究人员针对 PET、PBAT 等聚酯塑料解聚酶开展了基因挖掘、功能表征、结构解析,以及酶设计与改造等研究工作,获得了一系列具有潜在应用价值的高效塑料解聚酶,为塑料的

生物降解机制研究提供了参考范例。来自山东大学的李盛英和刘琨团队对不同微生物来源的 PET 水解酶及其 PET 降解能力,IsPETase 降解 PET 的催化机理进行了综述,并总结了近年来通过酶工程改造而获得的高效 PET 降解酶,为未来的 PET 降解机制研究、PET 高效降解酶的进一步挖掘和改造提供参考^[9]。来自德国亚琛工业大学生物技术研究所的 Ulrich Schwaneberg 教授和季宇团队对发表在 *Chem Catalysis* 期刊上的一项工作进行了评述^[10],在文中通过中英文对照的方式介绍了采用塑料结合模块促进 PET 塑料酶法解聚的机制与应用潜力,为进一步实现 PET 或其他种类的聚酯塑料在高底物负载量条件下的高效酶法解聚提供了指导。

角质酶(cutinase, EC 3.1.1.74)在 PET、PBAT 等聚酯塑料的酶法解聚中发挥着重要的作用,来自江南大学吴敬团队研究了 5 种不同来源的角质酶对 PBAT 的解聚性能,并考察了不同己二酸-丁二醇酯(butylene adipate, BA)含量对 PBAT 解聚效率影响,并对酶解聚条件进行了优化,获得了最佳的 PBAT 酶解体系^[11]。对苯二甲酸双(羟乙基)酯(bishydroxyethyl terephthalate, BHET)是 PET 生物酶解的中间产物,其过量累积将抑制 PET 水解酶的催化活性。河南科技大学侯颖和中国科学院天津工业生物技术研究所刘卫东从嗜热氢化杆菌中挖掘到一个新型的双烯内酯酶(HtBHETase)基因,对其进行了异源重组表达、纯化以及酶学性质研究,对该酶水解 BHET 的能力进行了评价^[12]。齐鲁工业大学孙登岳和曾志雄团队从浅黄糖丝菌中克隆到一个 BHET 水解酶基因 *sle*,经在大肠杆菌中重组表达纯化,对其酶学性质及降解特性进行了研究^[13]。中国科学院天津工业生物技术研究所韩旭和高健团队对来自海洋微生物宏基因组的中温塑料降解酶 Ple629 进行了理性设计,突变体

D226C/S281C 的融解温度(T_m 值)比野生型提高 6.9 °C, 催化活性提高了 1.5 倍^[14], 上述工作为塑料的酶法解聚提供了新的酶资源。

3 塑料降解物的生物高值转化

面对日益加剧的塑料污染问题, 在合成塑料降解资源的挖掘及关键解聚酶的设计与改造基础上, 融入生物合成的思路, 通过微生物将塑料降解物生物转化为生物可降解塑料及其他具有高附加值的化合物, 如生物基塑料单体等, 是实现废塑料循环利用的一个重要途径。清华大学陈国强和刘絮团队综述了目前塑料降解并生产聚羟基脂肪酸酯 (polyhydroxyalkanoates, PHA) 的最新研究进展, 并对 PHA 的性质与合成改性进行了总结与展望^[15]。二元羧酸是生物可降解塑料的重要单体之一, 可降解性强, 应用广泛。江南大学邓禹团队总结了几种比较有代表性二元羧酸的生物合成途径以及其代谢改造手段, 为中长链等复杂二元羧酸的生物法合成提供借鉴^[16]。5-氨基戊酸(5-aminovalanoic acid, 5AVA)可作为新型塑料尼龙 5 和尼龙 56 的前体, 是合成聚酰亚胺的重要平台化合物。重庆大学王丹团队在大肠杆菌中构建了 5AVA 的人工合成路线, 结合补料分批生物转化策略, 在不添加乙醇和 H_2O_2 的条件下, 5AVA 的产量可达 57.52 g/L, 摩尔得率为 0.62 mol/mol, 为生物基塑料单体的发酵合成提供了新的策略^[17]。

4 结语

国家发展和改革委员会与生态环境部联合印发《“十四五”塑料污染治理行动方案》, 明确“加快推广应用废塑料再生利用先进适用技术装备, 鼓励塑料废弃物同级化、高附加值利用”。塑料生物解聚与高值化技术条件温和、副产物少、绿色环保, 是废弃塑料同级、升级利

用的最理想手段, 国内外纷纷加大了对废塑料生物降解与资源化利用的研究力度, 积极探索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”塑料生物循环经济路线。感谢《生物工程学报》编辑部的提议, 我们邀请到众多高校和科研院所相关研究领域的专家, 采用评论、综述、研究论文等多种形式, 将近些年在“塑料的生物降解与转化”方向的部分研究成果与研究进展汇集成册, 出版了这期专刊, 希望能为塑料的生物降解与转化研究提供一定的参考和借鉴。由于水平有限, 专刊中的失误和不足在所难免, 敬请各位读者和专家不吝指正。

REFERENCES

- [1] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060 (OECD Publications, 2022). https://www.oecd-ilibrary.org/environment/global-plastics-outlook_aaledf33-en.
- [2] 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 R, CHEN F, DING CJ. 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 (in Chinese).
- [3] 王元波, 郑诗玥, 王凡, 彭俊倩, 周杰, 王芳, 姜岷, 陈小强. 塑料生物降解检测方法的研究进展[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1889-1911.
WANG YB, ZHENG SY, WANG F, PENG JQ, ZHOU J, WANG F, JIANG M, CHEN XQ. Advances in methods for detecting plastics biodegradation[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1889-1911 (in Chinese).
- [4] 谢彬, 白茸茸, 孙华山, 周小力, 董维亮, 周杰, 姜岷. 聚乳酸塑料合成、生物降解及其废弃物处置的研究进展[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1912-1929.
XIE B, BAI RR, SUN HS, ZHOU XL, DONG WL, ZHOU J, JIANG M. Synthesis, biodegradation and waste disposal of polylactic acid plastics: a review[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1912-1929 (in Chinese).
- [5] 袁英博, 周汶楷, 梁泉峰, 典龙阳, 苏田源, 祁庆生. 生物降解聚烯烃类塑料研究进展[J]. 生物工程学报,

- 2023, 39(5): 1930-1948.
YUAN YB, ZHOU WK, LIANG QF, DIAN LY, SU TY, QI QS. Advances in biodegradation of polyolefin plastics[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1930-1948 (in Chinese).
- [6] 张李婷, 张博, 许维东, 崔中利, 曹慧. 聚乙烯塑料生物降解研究进展[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1949-1962.
ZHANG LT, ZHANG B, XU WD, CUI ZL, CAO H. Polyethylene biodegradation: current status and perspectives[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1949-1962 (in Chinese).
- [7] 江志通, 陈雪, 雷金晖, 薛慧珍, 张博, 徐晓凡, 耿惠京, 李周坤, 闫新, 董维亮, 曹慧, 崔中利. 聚氨酯塑料降解菌 G-11 的筛选鉴定及其塑料降解特性[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1963-1975.
JIANG ZT, CHEN X, LEI JH, XUE HZ, ZHANG B, XU XF, GENG HJ, LI ZK, YAN X, DONG WL, CAO H, CUI ZL. Screening and identification of a polyurethane-degrading bacterium G-11 and its plastic degradation characteristics[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1963-1975 (in Chinese).
- [8] 曾彩婷, 纪俊宾, 丁方慧, 李周坤, 曹慧, 崔中利, 闫新. 一株聚酯型聚氨酯降解菌高地芽孢杆菌 YX8-1 的分离及鉴定[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1976-1986.
ZENG CT, JI JB, DING FH, LI ZK, CAO H, CUI ZL, YAN X. Isolation and identification of a polyester-polyurethane degrading bacterium *Bacillus altitudinis* YX8-1[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1976-1986 (in Chinese).
- [9] 赵之怡, 张国强, 刘琨, 李盛英. 聚对苯二甲酸乙二醇酯水解酶研究进展[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1998-2014.
ZHAO ZY, ZHANG GQ, LIU K, LI SY. Advances in poly(ethylene terephthalate) hydrolases[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1998-2014 (in Chinese).
- [10] 卢艺, 韩瑞枝, SCHWANEBERG Ulrich, 季宇. 评论: 塑料结合模块促进聚对苯二甲酸乙二醇酯的酶法降解[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1883-1888.
LU Y, HAN RZ, ULRICH S, JI Y. Commentary: polymer binding modules accelerate enzymatic degradation of poly(ethylene terephthalate)[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1883-1888 (in Chinese).
- [11] 王慧, 吴敬, 陈晟, 夏伟. 角质酶在生物可降解聚酯聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯降解中的应用[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 1987-1997.
WANG H, WU J, CHEN S, XIA W. Application of cutinase in the degradation of biodegradable polyester poly(butylene adipate-co-terephthalate)[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 1987-1997 (in Chinese).
- [12] 陈阳阳, 高健, 赵夷培, 王浩, 韩旭, 张洁, 顾群, 侯颖, 刘卫东. 来源于嗜热氢化杆菌的新型对苯二甲酸双(羟乙)酯水解酶的表达纯化与酶学性质[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 2015-2026.
CHEN YY, GAO J, ZHAO YP, WANG H, HAN X, ZHANG J, GU Q, HOU Y, LIU WD. Expression, purification and characterization of a novel bis(hydroxyethyl) terephthalate hydrolase from *Hydrogenobacter thermophilus*[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 2015-2026 (in Chinese).
- [13] 张洁, 单瑞达, 李霞, 曾志雄, 孙登岳. 来源于糖丝菌双(2-羟乙基)对苯二甲酸酯水解酶的酶学性质表征及降解特性分析[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 2027-2039.
ZHANG J, SHAN RD, LI X, ZENG ZX, SUN DY. Enzymatic properties and degradation characterization of a bis(2-hydroxyethyl) terephthalate hydrolase from *Saccharothrix* sp.[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 2027-2039 (in Chinese).
- [14] 赵夷培, 王浩, 武攀, 李志帅, 刘夫锋, 顾群, 刘卫东, 高健, 韩旭. 来源于海洋宏基因组塑料降解酶 Ple629 的耐热性提升改造[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 2040-2052.
ZHAO YP, WANG H, WU P, LI ZS, LIU FF, GU Q, LIU WD, GAO J, HAN X. Engineering the plastic degradation enzyme Ple629 from marine consortium to improve its thermal stability[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 2040-2052 (in Chinese).
- [15] 张宗豪, 何宏韬, 张旭, 郑爽, 郑陶然, 刘絮, 陈国强. 塑料的降解与可降解塑料——聚羟基脂肪酸酯的合成[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 2053-2069.
ZHANG ZH, HE HT, ZHANG X, ZHENG S, ZHENG TR, LIU X, CHEN GQ. The degradation of plastics and the production of polyhydroxyalkanoates (PHA)[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 2053-2069 (in Chinese).
- [16] 支睿, 卢艳波, 王敏, 李国辉, 邓禹. 生物可降解塑料单体二元羧酸的生物合成研究进展[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 2081-2094.
ZHI R, LU YB, WANG M, LI GH, DENG Y. Recent progress in the biosynthesis of dicarboxylic acids, a monomer of biodegradable plastics[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 2081-2094 (in Chinese).
- [17] 康雅琦, 罗若诗, 林凡祺, 程杰, 周桢, 王丹. 生物基塑料单体 5-氨基戊酸的生物合成新途径[J]. 生物工程学报, 2023, 39(5): 2070-2080.
KANG YQ, LUO RS, LIN FZ, CHENG J, ZHOU Z, WANG D. A new biosynthesis route for production of 5-aminovalanoic acid, a biobased plastic monomer[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2023, 39(5): 2070-2080 (in Chinese).

(本文责编 陈宏宇)