

微生物降解聚酯和聚碳酸酯类地膜的研究进展

王玉^{1,2}, 王琰^{2*}, 聂红云^{1,3*}, 姚建民⁴, 李瑞珍⁴, 万一²

1 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安

2 陕西省微生物研究所, 陕西 西安

3 陕西省秦岭生态安全重点实验室, 陕西 西安

4 山西农业大学 农业经济管理学院, 山西 太原

王玉, 王琰, 聂红云, 姚建民, 李瑞珍, 万一. 微生物降解聚酯和聚碳酸酯类地膜的研究进展[J]. 微生物学报, 2025, 65(6): 2365-2381.

WANG Yu, WANG Yan, NIE Hongyun, YAO Jianmin, LI Ruizhen, WAN Yi. Advances in microbial degradation of polyester and polycarbonate-based mulch films[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2025, 65(6): 2365-2381.

摘要: 生物可降解地膜(biodegradable mulch films, BDMs)以其广阔的应用前景和生态友好特性正逐步取代传统地膜, 被视为解决“白色污染”问题最具潜力的途径。近年来, 我国在生物可降解地膜的生产技术领域取得了显著成就, 为其规模化生产和广泛应用奠定了坚实基础。尽管前景广阔, 生物可降解地膜在降解过程中的复杂性、可控性以及其对生态环境的潜在影响仍是必须高度关注的重点。基于此, 本文综合分析了5种极具应用前景的聚酯类和聚碳酸酯类生物可降解地膜, 深入探讨了这些地膜的主要降解微生物及其降解机制, 并对其土壤生态影响的研究现状进行了总结。本文为挖掘高效降解微生物资源、明确降解过程中的关键限速步骤、加强长周期生态效应研究提供了理论参考, 为生物可降解地膜的大规模安全应用提供了新的解决思路和解决方案。

关键词: 生物降解; 聚酯; 聚碳酸酯; 酶; 土壤生态

资助项目: 国家重点研发计划(2018YFD1001000); 陕西省秦岭生态安全重点实验室开放基金(QLES202501); 中国科学院西安分院“西部之光”人才培养计划(2022S-1); 山西省重点研发计划(202102140601011)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD1001000), the Key Laboratory Project of Shaanxi Provincial of Qinling Ecological Security (QLES202501), the “Light of the West” Talent Cultivation Program of Xi’an Branch of the Chinese Academy of Sciences (2022S-1), and the Key Research and Development Program of Shanxi Province (202102140601011).

*Corresponding authors. E-mail: NIE Hongyun, nie0212@126.com; WANG Yan, 900smile@163.com

Received: 2025-01-15; Accepted: 2025-03-16; Published online: 2025-05-07

Advances in microbial degradation of polyester and polycarbonate-based mulch films

WANG Yu^{1,2}, WANG Yan^{2*}, NIE Hongyun^{1,3*}, YAO Jianmin⁴, LI Ruizhen⁴, WAN Yi²

1 School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi, China

2 Shaanxi Institute of Microbiology, Xi'an, Shaanxi, China

3 Shaanxi Key Laboratory of Qinling Ecological Security, Xi'an, Shaanxi, China

4 College of Agricultural Economics and Management, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi, China

Abstract: Biodegradable mulch films (BDMs), distinguished by their extensive application potential and ecological friendliness, are progressively supplanting traditional mulch film and considered as a highly promising approach to address “white pollution”. China has witnessed notable advancements in the production technology of BDMs in recent years, establishing a strong foundation for their large-scale manufacturing and widespread application. Despite the great prospects of BDMs, the complexity and controllability of their degradation process, alongside their potential impacts on the eco-environment, remain highly concerned. This paper comprehensively analyzes five promising polyester and polycarbonate-based BDMs and delves into the primary degrading microorganisms and their degradation mechanisms. Furthermore, this paper summarizes the current research regarding the impacts of BDMs on the soil environment. This review aims to lay a theoretical foundation for discovering efficient microbial degraders, pinpointing key rate-limiting steps in degradation, and enhancing long-term ecological effect studies, thus providing new perspectives and solutions for the large-scale and safe utilization of BDMs.

Keywords: biodegradation; polyester; polycarbonate; enzyme; soil ecology

地膜(mulch films)作为一种在农业生产中广泛应用的地面覆盖材料,自20世纪70年代末引入我国以来,凭借其增温、保墒、保肥、抑制杂草生长及改善土壤理化性质等多重功能,极大地推动了农业生产的发展^[1-2]。进入21世纪以来,地膜覆盖技术在我国历经不断探索与实践,已逐步迈向成熟阶段^[3]。然而,随着地膜覆盖技术的广泛应用,其在提升农业生产力的同时,也引发了日益严峻的残膜污染问题。传统地膜以聚乙烯(polyethylene, PE)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)等合成材料为基材,这些材料因高分子链结构的化学惰性,在自然环境中表现出极高的稳定性和难降解特性^[4]。在连

续耕作模式下,土壤中地膜残留量持续累积,不仅严重破坏了土壤结构,降低了土壤透气性和孔隙度,还对作物的生长发育构成了极大威胁,包括降低出苗率、阻碍根系扩展及营养吸收等^[5-6]。尽管理论上可以通过回收地膜来解决这一问题,但在实际操作中,由于地膜材质的特性、回收成本及渠道等多重因素的影响,回收工作难以有效实施。作为农业大国,我国的地膜产量和使用量均居世界前列^[7],由此引发的残膜污染问题愈发严峻,亟待解决。

生物可降解地膜(biodegradable mulch films, BDMs)凭借其环境友好性、可自然降解性,被视为解决地膜污染问题最有效的途径之一^[8]。近

年来,我国在生物可降解地膜生产技术方面取得了显著进展,地膜性能得到大幅提升,使用成本逐步降低。例如,我国自主研发的0.006 mm聚碳酸亚丙酯(polypropylene carbonate, PPC)基生物降解地膜成功攻克了纵向撕裂强度小和耐候期短的共性技术难题,实现了万吨级PPC原料的生产,地膜中70%的PPC含量和0.006 mm的薄度极大降低了地膜成本与每亩用量^[9],为其规模化生产及应用奠定了坚实基础。然而,生物可降解地膜在降解过程中的复杂性仍需高度关注,其逐级分解过程中可能形成诸如酸类、醚类及酯类,甚至微塑料等中间产物;同时,生物可降解地膜存在降解的不可预期性,可能出现作物需求期内即发生降解,以及作物收获后仍大面积残留的情况,从而影响下茬作物的耕种^[10]。这些逐级分解过程中可能形成的中间产物对土壤生态的影响,以及降解速率与作物生长周期的匹配性问题,均是当前研究的重点和难点。

基于此,本文综述了农业领域中广泛应用或具有广阔应用前景的5种聚酯类和聚碳酸酯类生物可降解地膜,探讨了这些地膜在农业环境中的主要降解微生物、降解酶、降解机制以及对土壤生态的影响。从环境中筛选出具有更强生物降解能力的微生物资源,深入挖掘潜在的生物降解机制,可为生物可降解地膜在农业生产中的安全应用与推广提供坚实的理论支撑,为解决地膜污染问题、实现可生物降解地膜的可控性提供新的思路和解决方案。

1 生物可降解地膜的种类

生物可降解地膜是指一类在自然环境条件(包括但不限于土壤的湿度、温度、微生物群落等复杂生态条件)以及特定人工模拟环境条件(例如堆肥过程中适宜的高温、高湿和丰富微生物种群的环境,或是厌氧消化所营造的无氧且富含特定厌氧微生物的环境)下,发生自然水解反应致使覆盖膜聚合物化学键断裂分解,通过真

菌或细菌分泌的特异性酶引起降解,直至最终完全降解为二氧化碳(CO₂)和水(H₂O)^[11-12]。目前,农业生产中广泛应用的生物可降解地膜以聚酯类和聚碳酸酯类为主^[13],包括聚己内酯(polycaprolactone, PCL)、聚乳酸(poly(lactic acid), PLA)、聚羟基脂肪酸酯(polyhydroxyalkanoates, PHA)、聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯[poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT]和聚碳酸亚丙酯(polypropylene carbonate, PPC)。表1总结了这些生物可降解地膜的基本特征及性能。

2 作用于BDMs的微生物及酶

目前广泛应用的生物可降解地膜均具有潜在的可水解键,易被微生物分泌的脂肪酶、酯酶、角质酶等解聚酶水解,并转变为低聚物、二聚体或单体,再进一步经同化与矿化作用转化为CO₂和H₂O^[12,23]。在已发现的参与降解BDMs的微生物类群中,真菌在种类数量上占优势。哈茨木霉、里氏木霉、链格孢霉、雅致放射毛霉、尖孢镰孢菌、黄曲霉、米曲霉、念珠菌等均是常见的具有降解能力的真菌菌株;在细菌方面,芽孢杆菌、大肠埃希氏菌、黄杆菌、假单胞菌、诺卡氏菌、克雷伯氏菌、红球菌、小单孢菌、放线菌等是主要的降解类群^[24-25]。本文将依据BDMs种类对其降解微生物以及所分泌的解聚酶进行介绍。

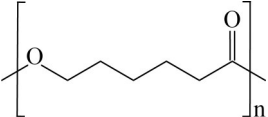
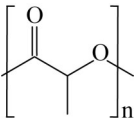
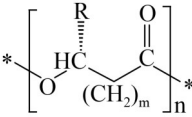
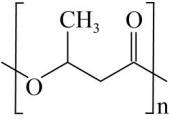
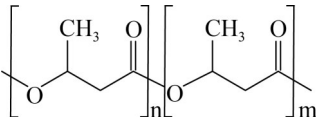
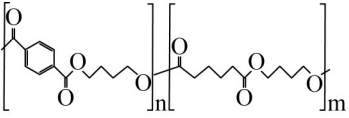
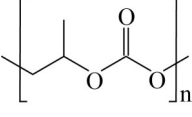
2.1 作用于PCL地膜的降解微生物及酶

PCL是通过ε-己内酯单体的开环聚合反应合成的,其分子链中的酯键能在多种微生物的作用下发生水解,从而实现生物降解^[23]。通过系统性分析发现,当前研究在PCL生物降解的微生物作用机制与酶促反应动力学领域取得了3项关键进展^[26-28]。

(1) 在环境响应特异性机制研究方面,Al Hosni等^[26]通过构建温度阶梯模型,揭示了微生物群落的温度适应性分化规律:在50℃堆肥体

表1 生物可降解地膜基本特征及性能

Table 1 Basic characteristics and properties of biodegradable mulch film

材料 Material	单体 Monomer	结构式 Structural formulas	常见聚合方式 Common polymerization methods	物理性能 Physical performance	参考文献 References
Polycaprolactone (PCL)	己内酯 ε-caprolactone		Open-loop polymerization method	Exhibits depressed thermal transitions with a melting point ($T_m=60^\circ\text{C}$) and glass transition temperature ($T_g=-60^\circ\text{C}$), demonstrating exceptional processability	[14]
Poly(lactic acid (PLA)	乳酸(或丙交酯) Lactic acid		Polymerization, open-loop polymerization method, enzymatic polymerization	Distinctive thermal stability manifested through elevated T_m (170°C) and T_g (60°C) exceeding conventional aliphatic polyester systems	[15]
Polyhydroxyalkanoates (PHA)	多种羟基脂肪酸 Hydroxyalkanoic acid		-	Presents a T_m of 145°C with adjustable physicochemical properties through monomer compositional engineering and stoichiometric optimization	[16]
Poly(β-hydroxybutyrate) (PHB)	3-羟基丁酸 3-hydroxybutyric acid			Displays substantially elevated T_m (180°C) concomitant with superior mechanical rigidity and pronounced brittle fracture behavior	[17-18]
Poly(3-hydroxybutyrate-3-hydroxyvalerate) (PHBV)	3-羟基丁酸 3-hydroxybutyric acid 3-羟基戊酸 3-hydroxyvaleric acid			Enables precise property tailoring via controlled 3-hydroxyvalerate content modulation in copolymer architecture	[19]
Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)	己二酸 Adipic acid 对苯二甲酸 Terephthalic acid 1,4-丁二醇 1,4-butanediol		Melt polycondensation	Thermal profile comprises: $T_m=110-130^\circ\text{C}$, $T_g=-30^\circ\text{C}$, crystallization temperature (T_c) 110°C , and crystallinity degree (X_c) 30%	[20-21]
Poly propylene carbonate (PPC)	二氧化碳 Carbon dioxide 环氧丙烷 Propylene oxide		Coordination copolymerization	Features markedly elevated phase-transition temperatures with $T_m=160-170^\circ\text{C}$ and $T_g=30-41^\circ\text{C}$	[22]

系中, 成功分离出以绿脓杆菌为主的嗜热菌群(占比 82.6%), 其最适生长温度 $[T_m=(48\pm 1)^\circ\text{C}]$ 与堆肥高温期显著相关; 而在 25°C 的中温条件下, 镰孢菌属成为优势菌群(相对丰度 76.3%), 并首次证实新赤壳属(*Neocosmospora* sp.) 菌株对 PCL 地膜的降解效率可达 $0.32\text{ mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$, 相较对照组提升 4.7 倍。值得注意的是, 高温菌群与中温菌群在降解功能上呈现出互补特征。这种由温度驱动的菌群演替规律, 为设计具备梯度特性的堆肥系统提供了坚实的生物学理论依据。

(2) 对极端环境中微生物资源的深入开发, 为 PCL 的降解研究开拓了全新的视角。Soulethone 等^[27]从海水中分离出一株嗜盐假单胞菌(*Halopseudomonas* sp.) MFKK-1, 在海水盐度条件下能够维持 $(198.2\pm 31.7)\ \mu\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{d})$ 的降解速率。这一重要发现, 不仅证实了海洋微生物在 PCL 降解过程中的关键作用, 还暗示了海洋与陆地微生物在降解机制方面可能存在趋同进化的特征。此外, 这些菌株所具备的高盐适应性是否归因于其酯酶的特殊修饰, 值得进一步探究。

(3) 研究表明大多聚酯类材料的降解是由微生物胞外酯酶介导的^[28]。目前, 已经从细菌或真菌中分离纯化出多种 PCL 解聚酶^[29], 其中最为关键的突破在于对这些酶解机制在分子层面的精准解析。Ma 等^[30]对酶解机制展开了深入研究, 发现 PCL 薄膜在南极假丝酵母脂肪酶作用下, 其降解过程可清晰划分为快速、缓慢 2 个阶段, 且 PCL 薄膜的分子量并不会对脂肪酶性能产生影响, 却会显著影响降解后薄膜的孔结构。Feng 等^[31]通过宏基因组筛选和多尺度模拟手段, 揭示了 PCL 酶解的双步解聚机制, 发现降解酶 MGS0156 能够通过疏水界面锚定在 PCL 表面, 并通过构象转换驱动“表层剥离-纵深渗透”的降解路径。这一发现不仅构建了 PCL 酶解动力学的定量模型, 还明确了 C-O 键断裂作为速率决定步骤的重要性, 为酶工程的改造提供了清晰且明确的靶点, 有望通过定向进化提升

降解酶的催化效率。于丹等^[32]发现假单胞菌(*Pseudomonas* sp.) DS0901 分泌的 PCL 解聚酶在 37°C 、130 r/min 的摇床振荡培养条件下, 72 h 内可将 PCL 完全降解, 并发现其立体降解模式与 MGS0156 作用机制存在耦合现象, 这暗示着不同的解聚酶或许遵循着相同的降解规律。这一重要发现为建立具有普适性的聚酯降解理论模型奠定了坚实的基础。

然而, 当前的研究大多集中在单一菌株或酶的降解性能上, 而自然环境中微生物群落的代谢网络协同机制尚不明确。Tseng 等^[33]从堆肥体系中分离出能够同时降解 PCL、聚 3-羟基丁酸酯[poly(β -hydroxybutyrate), PHB]等聚酯材料的降解菌(分属于小双孢菌属、高温放线菌属、马杜拉放线菌属、链霉菌属及木聚糖单胞菌属等), 为微生物群落水平的降解机制提供了研究模型。虽然 PCL 的生物降解研究在环境响应特异性机制、酶促反应动力学以及微生物群落协同机制等方面取得了重要进展, 但是菌株是否通过代谢分工实现降解强化, 微生物群体代谢是否参与降解酶的调控表达等许多问题仍有待深入探讨和研究。对这些问题的解答将有助于推动合成微生物群落的构建工作, 实现降解效能的可控性。

2.2 作用于 PLA 地膜的降解微生物及酶

在降解 PLA 地膜的研究中, 已发现了一系列关键的微生物及其分解酶。降解微生物主要包括 5 个细菌属: 糖丝菌属、假诺卡氏菌属、链霉菌属、芽孢杆菌属和假单胞菌属, 其中放线菌占据主导地位。此外, 还包括真菌(如根霉、梗霉)和酵母菌(如隐球酵母)。对 PLA 地膜有突出降解能力的微生物主要集中于放线菌门的拟无枝酸菌属。Ikura 等^[34]分离的拟无枝酸菌(*Amycolatopsis* sp.) 3118 菌株, 在 12 d 内对 PLA 的降解率可达到 90% 以上; Pranamuda 等^[35]通过 PLA 乳化矿盐平板从土壤筛选出一株

Amycolatopsis sp. HT-32, 该菌株经过 14 d 的摇瓶培养可使 60% 的 PLA 薄膜发生降解, 并且该降解过程被推测为酶促过程; Nakamura 等^[36]从 300 份土壤样品中分离筛选到的 *Amycolatopsis* sp. K104-1 菌株, 能以 PLA 为唯一碳源生长, 并首次纯化出新型 PLA 降解酶——纤溶丝氨酸酶 PLD, 证实了 PLA 的酶解过程。Li 等^[37]从东方拟无枝酸菌亚种 (*Amycolatopsis orientalis* subsp. *orientalis*) 中同时纯化出 3 种细胞外丝氨酸蛋白酶 PLAase I、PLAase II、PLAase III, 且 3 种酶均具有良好的降解效果, 进一步表明 PLA 的降解酶可能作为一种蛋白酶。

Williams 等^[38]对分离自丝状真菌 (*Engyodontium album*, 旧称 *Tritirachium album*) 的蛋白酶 K 进行了 PLA 生物降解性测试。Oda 等^[39]对 56 种市售蛋白酶进行了 PLA 降解活性检测, 发现嗜酸蛋白酶几乎对 PLA 无影响, 中性蛋白酶仅有很低的降解活性, 而部分嗜碱蛋白酶具有显著的聚乳酸降解活性; 这些嗜碱蛋白酶大多来自芽孢杆菌属, 即使在中性和碱性条件下也表现出催化活性, 这可能与酶的空间结构和催化机制有关。Matsuda 等^[40]纯化了一种蛋白酶, 可使 PLA 薄膜在 48 h 内粉末化, 降解率高达 90%。此外, 来自戴尔根霉 (*Rhizopus delemere*) 和解淀粉类芽孢杆菌 (*Paenibacillus amylolyticus*) TB-13 的脂肪酶, 来自史氏芽孢杆菌 (*Bacillus smithii*) 的酯酶以及来自食酸代尔夫特菌 (*Delftia acidovorans*) TB-35 菌株的聚酯聚氨酯降解酶均被报道对 PLA 有降解能力^[41-43]。Akutsu-Shigeno 等^[44]对来自 *P. amylolyticus* TB-13 的 PLA 降解基因进行克隆, 并在大肠埃希氏菌 (*Escherichia coli*) 中进行异源表达和纯化, 纯化获得的重组 PLA 解聚酶 PlaA 表现出对多种可降解聚酯(如聚丁二酸丁二醇酯、聚丁二酸乙二醇酯和聚己内酯等)的降解活性, 其在 90 min 内可完全降解分子量为 5 000 g/mol 的 PLA, 并且降解效率远高于蛋白酶 K。重组脂肪酶展现出的高降解性, 不仅为聚酯类废弃物的绿色处理提

供了新的酶学途径, 也证实广泛存在于自然环境中的产脂肪酶微生物是 PLA 的潜在降解类群。

此外, Watanabe 等^[45]从稻壳中分离出隐球菌 (*Cryptococcus* sp.) GB-1, 它可产生可生物降解塑料降解酶, 采用紫外线诱导获得突变体 GB-1-DMC1, 其在葡萄糖/木糖双碳源体系中 PLA 降解酶活性较原始菌株提升 3.1 倍, 这一现象提示碳源代谢调控可能通过表观遗传修饰影响酶蛋白表达水平。值得注意的是, 蛋白酶底物特异性研究表明^[46], 蛋白酶对 L-乳酸有较高的降解活性, 而对 D-乳酸表现出较高的惰性, 并且对聚乳酸的结晶度具有很高的敏感性。这种差异可能与酶的活性中心与 PLA 构象的匹配模式有关。这一发现为进一步优化酶的立体选择催化位点提供了新思路。尽管在 PLA 降解方面已经取得了较多进展, 但仍有许多问题亟待解决。例如, 如何通过定向进化策略优化酶的立体选择催化位点, 如何借助代谢网络重构技术提升工程菌株的酶蛋白表达量及分泌效率等。这些问题的解答将有助于更深入地理解 PLA 的微生物降解机制, 并为开发更高效的聚酯类降解酶提供关键指导。

2.3 作用于 PHA 地膜的降解微生物及酶

PHA 是一类由微生物发酵合成的具有不同结构的脂肪族共聚酯, PHB、3-羟基丁酸酯和 3-羟基戊酸酯的共聚物 [poly(3-hydroxybutyrate-3-hydroxyvalerate), PHBV] 等均属于 PHA 家族成员。因其良好的生物相容性和降解性, PHA 可被多种微生物及其分泌酶高效降解^[31,47]。Pérez-Arauz 等^[48]通过富集传代实验成功筛选出一批混合菌群, 这些菌群在 80 d 内对 PHA 膜片的降解率达到 75%。在这些混合菌中, 假单胞菌 (*Pseudomonas* sp.)、大肠埃希氏菌 (*E. coli*)、盐单胞菌 (*Halomonas* spp.)、沙克尔顿号马加利特氏菌 (*Margalitia shackletonii*) 和杀虫贪铜菌 (*Cupriavidus necator*) 等发挥了关键作用。Chhetri

等^[49]从土壤中分离到一株能降解 PHB 的马赛菌 (*Massilia* sp.) JJY02, 该菌在 28 °C 条件下仅需 20 d 就能对 PHB 实现 90% 的高效降解, 其降解效率远高于 Pérez-Arauz 等^[48]筛选到的混合降解菌群。

Abe 等^[50]进一步证实了微生物可通过分泌胞外解聚酶来降解 PHA, 并且这些微生物可利用分解的化合物作为营养物质进行生长。目前, 已从海勒氏假单胞菌^[51]、施氏假单胞菌^[52]、粪产碱菌^[53]、鞣鞣酮丛毛单胞菌^[54]和嗜酸乳杆菌^[55]等细菌中分离纯化出多种 PHB 解聚酶。这些解聚酶的共性研究表明, 在行使其活性功能时, 至少需要识别聚合物链中的 3 个单体单元作为酯键水解的底物位点; 其水解过程始于链表面的非结晶性聚酯部分, 并逐渐深入到结晶态的聚合物链中。值得注意的是, 聚酯链的序列结构对水解速率有显著影响。

PHA 材料的生物降解性能与其结构特征密切相关, 同时, 微生物合成 PHA 的过程以及 PHA 在环境中的降解过程都与环境微生物群落组成呈现显著关联性^[56]。上述所涉及的解聚酶对聚酯链序列结构的识别机制, 揭示了聚酯降解过程中单体单元排布对酶促水解的动力学影响, 这为未来开发可控降解速率的 BDMs 提供了理论依据。

2.4 作用于 PBAT 地膜的降解微生物及酶

PBAT 是一种由己二酸、1,4-丁二醇和对苯二甲酸缩聚合成的脂肪族-芳香族共聚酯。研究表明, PBAT 地膜能被多种微生物类群降解, 如芽孢杆菌属、假单胞菌属、布鲁氏菌属、肠杆菌属和微杆菌属等^[57]。特别地, 一些能在地膜上定殖并富集的微生物, 如节杆菌属、鞘氨醇单胞菌属、恶臭假单胞菌等, 通常具备降解 PBAT 地膜的潜力^[58]。然而, 不同微生物对 PBAT 的降解能力存在显著差异。刘佳茜等^[59]从环境中筛选出 2 株假单胞菌, *Pseudomonas* sp.

RD1-3 和 *Pseudomonas* sp. N1-2, 它们在 28 °C 条件下 56 d 内对 PBAT 的降解率仅有 6.88% 和 6.49%。Sun 等^[60]分离出一株能以 PBAT 为唯一碳源生长的霍氏肠杆菌 (*Enterobacter hormaechei*) WX-2, 该菌在 60 d 内对 PBAT 的降解率为 20% - 25%。Jia 等^[61]报道褐色喜热裂孢菌 (*Thermobifida fusca*) FXJ-1 在 9 d 内对 PBAT 以及 PBAT-PLA 复合膜的降解率可分别达到 80% 和 50%, 在证实 *T. fusca* 对 PBAT 具有较高降解能力的同时, 却与通常认为共混物生物降解率随 PBAT 含量的增加而降低的理论相悖^[62]。理论上, PLA 与 PBAT 进行复合时应当产生协同降解效应^[63], 因为 PLA 分子链中的易水解酯键与 PBAT 结构中的微生物酶解酯基可形成互补作用位点, 且 PLA 的引入能破坏 PBAT 的半结晶结构有序性, 改善复合体系的表面湿润性, 从而促进水分子渗透和微生物定殖, 进而加速降解。然而, 实验数据显示, 复合体系的降解速率反而低于纯 PBAT 体系, 这可能与 PLA 改性导致的微区结晶重构或微生物群落的环境适应性差异有关。

PBAT 在土壤中的降解还受多种环境因素制约, 包括土壤条件、类型和气候条件等。Zhang 等^[64]研究发现, PLA/PBAT 在湿度 60% 和 pH 7.0 的条件下降解率最高, 这可能与土壤细菌群落的积极响应有关; 高通量测序显示, 适宜的降解条件显著提升了如假单胞菌和鞘氨醇单胞菌等降解相关物种的丰度。Han 等^[65]则通过土壤微宇宙系统探究 PBAT 地膜降解的关键因素, 发现壤土中 PBAT 地膜的矿化率(16.0%)远高于潮土(9.0%)、黑土(0.3%)和红壤(0.9%); 宏基因组分析揭示, 壤土中微生物群落对 PBAT 响应更敏感, 且富含 PBAT 水解酶基因。此外, 慢生根瘤菌属 (*Bradyrhizobium*)、贪噬菌属 (*Variovorax*) 和沙壤土杆菌属 (*Ramlibacter*) 等被鉴定为新型潜在降解菌, 其富集程度与 PBAT 降解能力呈正相关^[25,65]。这些发现强调了 PBAT 降解与土壤环境及细菌群落的紧密联系, 凸显了这些因素在决

定降解效率中的重要性。

目前已从细菌、真菌等多种微生物中获得 PBAT 降解酶。Dresler 等^[66]从 *T. fusca* 中分离到对脂肪族-芳香族共聚酯具有超强降解能力的水解酶 TfH, 并发现编码该酶的基因(*bta1* 和 *bta2*) 位于一个操纵子上, 氨基酸同源率为 92%。Gouda 等^[67]进一步发现 TfH 酶在培养基中的分泌量与添加至培养基中的聚酯数量相关, 属于诱导酶。Wallace 等^[68]通过蛋白质组学筛选方法从食油假单胞菌(*Pseudomonas oleovorans*)中发掘了新的解聚酶 PpEst, 发现其可水解 PBAT 生成对苯二甲酸和 4-羟基丁氧羰基苯甲酸。Yang 等^[69]证实角质酶是极具潜在能力的 PBAT 降解酶, 能够在 48 h 内完全分解 PBAT。同时, 通过应用双突变策略使底物结合口袋更具灵活性而设计的工程化角质酶, 表现出更高的降解速率。这些发现增进了酶介导 PBAT 降解的分子理解, 有助于未来的酶工程发展, 以推动 PBAT 生物降解技术。

2.5 作用于 PPC 地膜的降解微生物及酶

PPC 是由 CO₂ 和环氧丙烷在催化剂作用下, 通过共聚反应制备而成的高分子聚合物。PPC 因其强疏水性阻碍了微生物的附着与富集, 进而限制其自身的降解速率。陶剑等^[70]采用土悬法降解 PPC, 在第 30 天仍未观察到明显的降解现象。Du 等^[71]进行土埋 PPC 地膜降解试验也证实了这一点, 在第 30 天和第 120 天分别测得降解率约为 1.69% 和 3.00%; 通过摇瓶实验对 PPC 地膜降解, 发现在 pH 6.0 的条件下经 120 d 的降解, PPC 地膜的降解率达 6.32%。在此期间, 膜表面的亲水性显著增强, 提示液体环境可能改变了膜表面的亲疏水性, 从而提升了 PPC 地膜的降解效果。

Liang 等^[72]研究了 PPC 覆膜对土壤理化性质和微生物群落的影响, 发现与无膜条件相比, 覆膜并未对土壤微生物群落及多样性产生显著影响, 但促进了嗜酸杆菌的富集。张加凡^[73]通过 Illumina Nova 技术对覆膜各阶段的微生物群

落结构进行分析, 发现根瘤菌属、假单胞菌属和黄杆菌属等菌群在 PPC 地膜降解过程中逐渐富集。同时, 该团队筛选获得了一株能以 PPC 为唯一碳源生长的枯草芽孢杆菌 J16, 在降解 30 d 后, PPC 地膜的质量损失率达到了 6.00%–9.95%^[74]。目前, PPC 地膜降解菌株及其关键酶的研究仍处于起步阶段, 相关报道极为稀缺。未来亟待进一步挖掘降解微生物资源, 解析其代谢途径与降解酶的作用机制。

综上所述, 不同类型的生物降解地膜均有其特定的有效降解微生物类群。值得关注的是, 在 PPC、PBAT、聚丁二酸-己二酸丁二酯(adipic acid-1,4-butanediol-succinic acid copolymer, PBSA) 地膜覆盖的土壤中均富集到了含有根瘤菌属的潜在降解菌群^[25,65,75]。众所周知, 根瘤菌能与豆科植物共生形成根瘤, 固定并利用空气中的氮气供植物所需; 现今的研究揭示, 根瘤菌等固氮菌属在降解地膜方面也发挥着潜在作用, 这预示着在漫长的进化历程中, 根瘤菌可能演化出了复杂多样的酶系统或代谢路径^[25,65]。这些机制不仅让它们能够适应与豆科植物的共生固氮关系, 还赋予了它们处理新型人工聚合物的能力。表 2 对作用于 BDMs 的部分降解微生物类群及基本特性进行了总结。

3 微生物降解 BDMs 的主要机制

BDMs 的降解是一个复杂而有序的生物化学过程, 主要涉及微生物及其分泌酶的作用。无论真菌或细菌, 降解 BDMs 的本质是微生物分泌的解聚合酶使其化学键断裂^[84-85], 具体途径取决于所涉及的微生物种类和聚合物类型^[24]。尽管现阶段关于 BDMs 的具体降解机制尚未完全阐明, 但依据现有研究成果, 其降解过程主要分为以下 4 个步骤^[86] (图 1): 生物吸附附着、解聚、同化和矿化。

(1) 吸附附着阶段, 微生物通过自身结构,

表2 作用于BDMs的降解微生物类群及基本特性

Table 2 Degradation microbiome and basic characteristics of BDMs

材料 Material	生物可降解地膜类型 Types of biodegradable mulch film	菌株 Strain	菌株来源 Source	降解周期 Degradation period (d)	降解率 Degradation rate	参考文献 References
PCL	PCL mulch film	<i>Pseudomonas</i> sp. DS0901	Activated sludge	3	100%	[32]
PLA	PLA mulch film	<i>Pseudomonas geniculata</i> WS3	Soil and wastewater sludge	20	Around 45%	[42]
	PLA mulch film	<i>Stenotrophomonas pavanii</i> CH1	/	20	10%	[42]
	PLA mulch film	<i>Bacillus pumilus</i> B12	Soil	2	/	[76]
	PLA powder/tray	<i>Actinomadura keratinilytica</i> T16-1	/	3	99%/32%	[77]
	PLA mulch film	<i>Nocardiopsis prasina</i>	Ocean	60	(1.27±0.19)%	[78]
	PLA mulch film	<i>Priestia flexa</i> PMPHB7	Soil	21	73%	[79]
	PLA mulch film	<i>Bacillus safensis</i> PLA1006	Soil	30	8%	[80]
	PLA mulch film	<i>Tritirachium album</i>	/	4	78%	[81]
PHA	PHA mulch film	/	Soil	80	75%	[48]
PHB	PHB mulch film	<i>Acinetobacter junii</i> BP25	Wastewater	77	83%	[82]
PHBV	PHBV	<i>Alcaligenes</i> spp. <i>Pseudomonas</i> spp.	Soil	365	13%	[83]
PBAT	PBAT mulch film	<i>Enterobacter hormaechei</i> WX-2	Soil	60	(20.8±2.2)%	[60]
	PBAT mulch film (PF, AF, PPSF)	<i>Thermobifida fusca</i> FXJ-1	Compost samples	9	(82.87±1.01)% (87.83±2.00)% (52.53±0.54)%	[61]
PPC	PPC mulch film	<i>Bacillus subtilis</i> J16	Soil	30	9.95%	[73]

图表中单独的“/”意为所引用文献中未提及。

The separate “/” in the chart means that it is not mentioned in the cited literature.

如鞭毛、菌毛及细胞壁表面电荷等，与待降解底物发生接触并附着^[87]。这一过程的效率受多种环境因素的影响，包括温度、pH、底物浓度以及微生物的趋化性等^[84]。这些因素共同作用，引导着微生物向 BDMs 底物移动并有效附着。其中，细菌 α 多样性主要响应材料类型与温度变化，而真菌群落结构对温度梯度呈特异性响应。β 多样性分析显示所有实验变量均具有显著影响，其中，Ju 等^[88]通过宏基因组学证实塑料组分和时间演替对地膜表面细菌群落的 β 多样

性具有交互作用。这些核心微生物组解析鉴定出具有潜在降解功能的优势菌属和真菌分类单元。(2) 进入解聚作用阶段，微生物分泌具有高度特异性的解聚酶，如水解酶、氧化还原酶等^[89]。基于 16S rRNA 基因功能，预测到水解酶、角质酶、纤维素酶和脂肪酶等关键功能基因显著富集。这些酶通过分子识别机制精准识别并结合底物化学键，通过水解、氧化等化学反应，将复杂的聚合物分解为低聚物或单体小分子。这一过程是 BDMs 降解的关键步骤，为

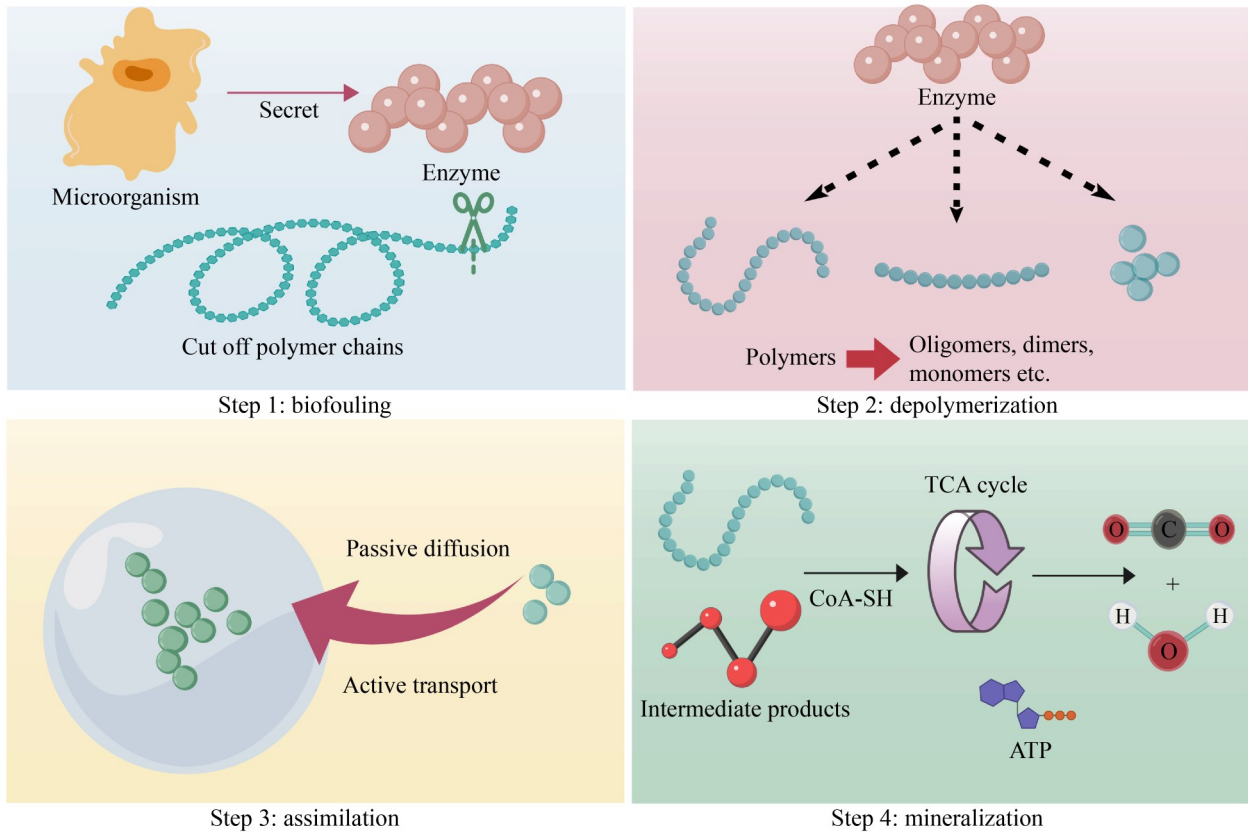


图1 微生物降解BDMs的主要步骤

Figure 1 Major steps in microbial degradation of BDMs.

后续的吸收同化奠定了基础。(3) 在吸收同化阶段，解聚产生的小分子通过跨膜运输系统(主动运输/被动扩散)进入微生物胞内代谢网络^[90]。在细胞内，这些小分子参与各类代谢途径，既可以作为碳源、氮源参与氨基酸/核苷酸等生物大分子合成，也可以经氧化磷酸化途径生成 ATP，为微生物的生长、繁殖以及维持生命活动提供了必要的支持。(4) 矿化作用阶段，在微生物利用 BDMs 底物的过程中，部分有机物会被彻底氧化^[91]。这一过程通过三羧酸循环等途径，使有机物最终转化为 CO_2 和 H_2O ，参与到生态系统的循环之中。

值得注意的是，BDMs 的降解过程还受到多种环境因素的影响。其中，温度是一个关键因素^[92]。研究表明，微生物在土壤中对塑料的有效生物降解一般发生在中温温度范围内，即

10–50 °C，这有利于微生物保持最佳活性并促进降解过程的进行。此外，塑料成分和时间演变也显著影响了地膜表面微生物群落的多样性，进而影响了 BDMs 的降解效率和模式。

4 BDMs 对土壤生态的影响

BDMs 覆盖土壤过程中，其物理属性与普通 PE 地膜颇为相似，二者均能通过调节土壤微气候间接影响土壤生态系统和微生物群落功能^[93]。地膜覆盖作为一种物理屏障，显著减少了土壤的水分蒸发，抑制了气体交换，提高了土壤温度，并降低了光透过率。这些变化共同改变了土壤的理化性质^[94]。同时，土壤湿度、温度及蒸汽扩散率等参数的调整还可能进一步调节土壤微生物的活性，影响微生物的群落结构^[95] (图 2)。

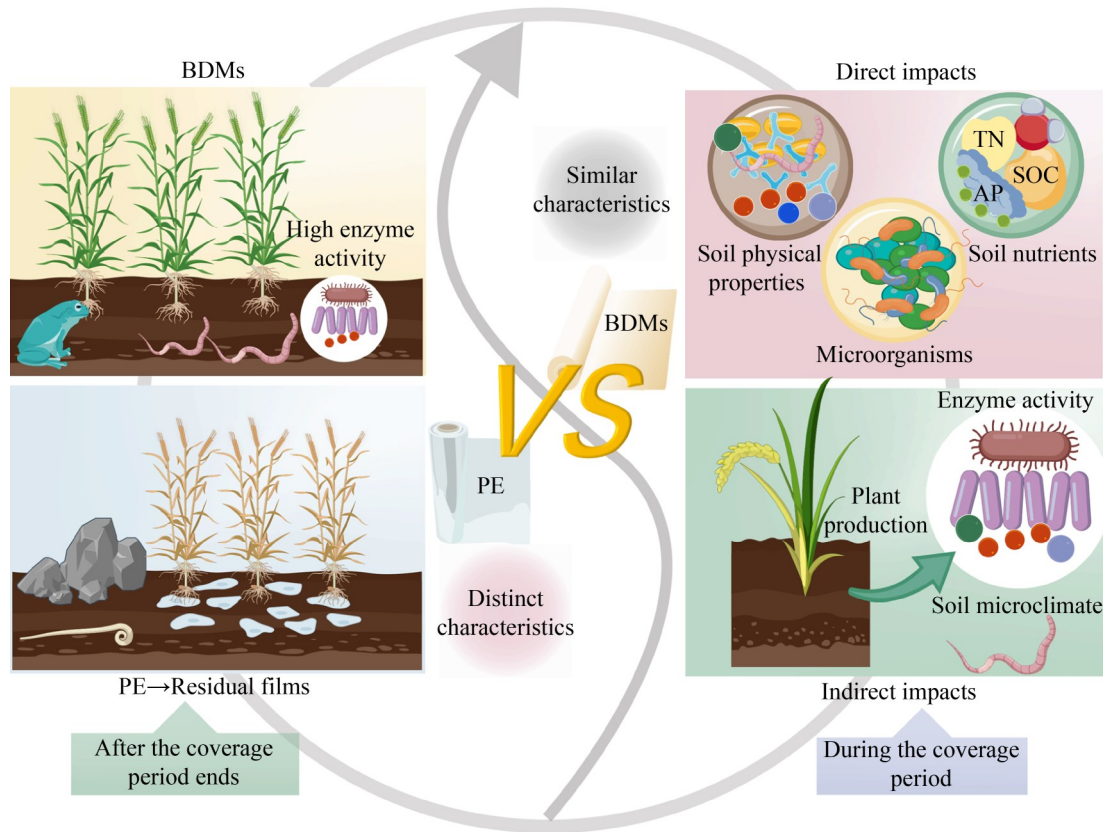


图2 地膜对土壤生态影响示意图

Figure 2 Effects of mulch film on soil ecology.

尽管 BDMs 与普通 PE 地膜在作为物理屏障方面具有相似性，但它们在土壤中的最终归宿却是截然不同的。生长季结束后，普通 PE 地膜会从土壤表面去除或以残膜形式存在，而 BDMs 则是在土壤中自然降解。因此，BDMs 对土壤生态的影响应该与普通 PE 地膜存在差异。王卫星等^[96]采用覆盖对照试验，在大豆种植中验证了 PBAT 地膜的实际效果，发现其除草效果更佳，且能显著提升大豆的产量。赵军等^[97]对比了 PBAT 地膜、PE 地膜覆盖和无覆盖膜 3 种情况下棉花的产量，结果显示，相较于 PE 地膜组，PBAT 地膜组的棉花产量提高了 13%，土壤含水量增加 4.2%，且土壤盐分动态表现和水分利用效率更优，证实了 BDMs 通过调控水盐运移，在维持土壤健康的同时实现产量增益。在确认

BDMs 农艺优势的同时，其是否会出现残膜污染问题也应引起关注。Wang 等^[98]研究表明，PPC、PBAT 和聚二氧化碳 (poly-carbon dioxide, PCO₂) 这 3 种不同类型的 BDMs 在作物生长期几乎完全降解，残留量显著低于普通 PE 地膜。这与齐英等^[99]的研究结果一致，即 BDMs 在花生收获期的残留量相较于普通地膜降低 57%–67%。

BDMs 是逐级分解的，在此过程中可能会形成各种降解产物。Palsikowski 等^[100]以洋葱 (*Allium cepa*) 为试验对象，研究了 PBAT 和 PLA 地膜在土壤中不同自然降解阶段水提取物的生态毒理效应，结果表明各阶段水提取物对 *A. cepa* 无细胞毒性、基因毒性或诱变效应。Muroi 等^[101]研究了 PBAT 地膜自然降解过程对土壤微生物群落的影响，证实 PBAT 在土壤中的降解促

进了真菌和根际促生菌的生长,并且对芸薹属植物无生态毒理影响,表明 PBAT 适宜于农业应用。Satti 等^[102]利用 PLA 降解菌株和土著微生物对土壤进行生物增强和生物刺激,结果表明与自然降解相比,生物刺激和生物强化可显著提高 PLA 的矿化速率,但不影响土壤固有微生物种群。然而,也有研究表明 BDMs 对土壤生态的影响应予以重视。Balestri 等^[103]评估了 PBAT/淀粉和高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)混合物渗滤液的植物毒性效应,结果表明渗滤液对种子萌发无影响,但有相当数量的幼苗表现出发育异常或幼苗生长减少。虽然目前尚无直接证据证明 BDMs 在自然环境中会形成微塑料,但已有研究关注人工制备 BDMs 微塑料对土壤生态的潜在影响。Schöpfer 等^[104]研究了 PLA/PBAT 和低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE)植被的微塑料对秀丽隐杆线虫的潜在毒性,发现微塑料污染土壤对线虫的繁殖(土壤食物网的主要角色)有影响,并可能对土壤功能产生负面影响。Sun 等^[105]研究了传统塑料 PE、聚苯乙烯(polystyrene, PS)与可生物降解塑料 PLA、聚丁二酸丁二醇酯(polybutylene succinate, PBS)微塑料对土壤微生物群落组成及功能的潜在影响,结果表明可生物降解塑料显著改变了土壤微生物群落结构,进而影响土壤功能。

尽管目前已从 BDMs 对土壤理化性质、微生物群落、作物产量、生态毒性等方面开展了相关研究,但大多局限于短期范畴,难以全面揭示 BDMs 的长期潜在影响。后续研究应在此基础上进行多维度、长时间的动态监测与深度分析,精准解析其在土壤生态系统中的作用机制,以突破短期研究的局限并填补该领域在长期研究方面的空白,为 BDMs 的环境生态风险评估和安全应用推广提供更为科学和全面的依据。

5 总结与展望

生物可降解地膜作为传统地膜最具潜力的

替代品,正展现出巨大的市场潜力和环保价值。为促进具有我国自主知识产权的生物可降解地膜得以广泛应用,深入探究具有共性结构的聚酯和聚碳酸酯类生物可降解地膜的降解机制及生态环境效应至关重要。本文聚焦于 5 种极具应用潜力的生物可降解地膜,系统概述了它们的基本特性,并深入分析了其降解微生物类群及关键降解酶在降解过程中的作用机制。然而,当前研究更关注于生物可降解地膜对农作物产量的提升,对其降解机制及生态环境效应的探讨尚显不足。鉴于生物可降解地膜推广规模的不断扩大,未来研究需着重于以下关键内容。

(1) 高效地膜降解微生物的挖掘与关键酶的解析。通过先进技术手段,精准解析酶与底物的相互作用模式,优化现有降解酶的设计,实现定向改造,从而明确生物可降解地膜降解的限速步骤,提升降解的可控性。

(2) 明确生物可降解地膜逐级降解过程的中间产物及其生态影响。深入分析逐级降解中间产物的积累特征,阐明逐级分解途径,评估其对生态环境的短期与长期潜在影响。

(3) 关注生物可降解地膜微塑料形成及其环境效应。明确生物可降解地膜微塑料形成的可能性,评估人工制备的各类生物可降解地膜微塑料的潜在生态影响。

这些研究将为生物可降解地膜的大规模安全应用、降解的可调控性的实现奠定基础。通过科学评估与合理调控,确保生物可降解地膜在促进农业生产的同时,不会对生态环境造成不可逆的损害,最终实现农业可持续发展和生态环境保护的双赢目标。

致谢

感谢在线平面设计网站(gdp.renlab.cn)提供绘图元素。

作者贡献声明

王玉: 论文资料检索、论文撰写; 王琰:

论文构思和设计、论文修订; 聂红云: 论文资料收集、审阅和修订; 姚建民: 论文构思、审阅和修订; 李瑞珍: 论文审阅; 万一: 论文审阅和修订。

作者利益冲突公开声明

作者声明不存在任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

参考文献

- [1] 李伟, 李明军, 赵恒章, 孙冬霞, 李树兵, 韩小伟. 地膜覆盖种植技术及残膜污染防控[J]. 农业工程, 2024, 14(6): 65-71.
LI W, LI MJ, ZHAO HZ, SUN DX, LI SB, HAN XW. Plastic film covering planting technology and residual film pollution prevention and control[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(6): 65-71 (in Chinese).
- [2] 赵佳佳. 新中国成立以来种子事业的发展历程与经验启示[J]. 当代中国史研究, 2021, 28(6): 47-65, 158.
ZHAO JJ. The developmental course, experience and enlightenment of the seed industry since the founding of new China[J]. Contemporary China History Studies, 2021, 28(6): 47-65, 158 (in Chinese).
- [3] 李真, 秦丽娟, 何文清, 刘勤, 刘恩科, 严昌荣. 应用可降解地膜, 推动农业清洁生产[J]. 蔬菜, 2017(8): 1-7.
LI Z, QIN LJ, HE WQ, LIU Q, LIU EK, YAN CR. Application of degradable plastic film to promote agricultural cleaner production[J]. Vegetables, 2017(8): 1-7 (in Chinese).
- [4] 严昌荣, 何文清, 薛颖昊, 刘恩科, 刘勤. 生物降解地膜应用与地膜残留污染防控[J]. 生物工程学报, 2016, 32(6): 748-760.
YAN CR, HE WQ, XUE YH, LIU EK, LIU Q. Application of biodegradable plastic film to reduce plastic film residual pollution in Chinese agriculture[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2016, 32(6): 748-760 (in Chinese).
- [5] 张美, 刘金铜, 付同刚, 高会. 农田残留地膜累积生态效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2023, 18(3): 223-237.
ZHANG M, LIU JT, FU TG, GAO H. Review on cumulative ecological effects of mulching film residues in farmland[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(3): 223-237 (in Chinese).
- [6] 朱文悦, 吴景贵, 王蒙. 残留地膜对土壤物理性质及玉米根系生长的影响[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(12): 33-38.
ZHU WY, WU JG, WANG M. Effects of residual mulch on soil physical properties and root growth of maize[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(12): 33-38 (in Chinese).
- [7] 严昌荣, 侯靖岳, 徐运赞, 洪志杰, 马志刚, 崔吉晓. 发达国家地膜应用及回收处理[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(6): 1288-1293.
YAN CR, HOU JY, XU YY, HONG ZJ, MA ZG, CUI JX. Plastic mulch film application and management: experience from developed countries[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(6): 1288-1293 (in Chinese).
- [8] YU YX, VELANDIA M, HAYES DG, DEVETTER LW, MILES CA, FLURY M. Chapter Three: Biodegradable Plastics as Alternatives for Polyethylene Mulch Films, *Advances in Agronomy*[M]. United States: Elsevier Science & Technology, 2024: 121-192.
- [9] 毕昕媛, 姚建民. 聚碳酸亚丙酯生物降解渗水地膜的研制及性能分析[J]. 中国塑料, 2021, 35(10): 21-25.
BI XY, YAO JM. Preparation and performance analysis of PPC-based biodegradable water-permeable mulch film[J]. China Plastics, 2021, 35(10): 21-25 (in Chinese).
- [10] 黄瑶珠, 高旭华, 谢东, 陈明周, 张文桦. 生物降解地膜田间应用降解效果及对后茬早稻产量的影响[J]. 现代农业科技, 2018(23): 1-3.
HUANG YZ, GAO XH, XIE D, CHEN MZ, ZHANG WH. Degradation effects of biodegradable mulch film applied in field and its effect on yield of succeeding crop early rice[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(23): 1-3 (in Chinese).
- [11] 张会平, 谢东, 李发勇, 陈明周. 生物降解地膜及其应用研究进展[J]. 甘蔗糖业, 2018, 47(3): 60-64.
ZHANG HP, XIE D, LI FY, CHEN MZ. Research progress of biodegradable plastic film and its application[J]. Sugarcane and Canesugar, 2018, 47(3): 60-64 (in Chinese).
- [12] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 全生物降解农用地面覆盖薄膜: GB/T 35795—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Biodegradable mulching film for agricultural uses: GB/T 35795—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese).
- [13] BRANNIGAN RP, DOVE AP. Synthesis, properties and biomedical applications of hydrolytically degradable materials based on aliphatic polyesters and polycarbonates[J]. Biomaterials Science, 2017, 5(1): 9-21.
- [14] ALHARBI N, GUTHOLD M. Mechanical properties of hydrated electrospun polycaprolactone (PCL) nanofibers[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2024, 155: 106564.
- [15] INKINEN S, HAKKARAINEN M, ALBERTSSON AC, SÖDERGÅRD A. From lactic acid to poly(lactic acid) (PLA): characterization and analysis of PLA and its precursors[J]. Biomacromolecules, 2011, 12(3): 523-532.
- [16] 陈国强, 刘心怡, 刘絮. 聚羟基脂肪酸酯在组织工程中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(11): 1657-1662.
CHEN GQ, LIU XY, LIU X. Application of polyhydroxyalkanoates in tissue engineering[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2023, 51(11): 1657-1662 (in Chinese).
- [17] 杨志海, 谢众, 任鑫祺, 庄启昕. 生物可降解 PHB 材料的研究[J]. 中国塑料, 2023, 37(4): 95-103.

- YANG ZH, XIE Z, REN XQ, ZHUANG QX. Research progress in biodegradable PHB materials[J]. *China Plastics*, 2023, 37(4): 95-103 (in Chinese).
- [18] MANDRAGUTTI T, JARSO TS, GODI S, BEGUM SS, BEULAH K. Physicochemical characterization of polyhydroxybutyrate (PHB) produced by the rare halophile *Brachybacterium paraconglomeratum* MTCC 13074[J]. *Microbial Cell Factories*, 2024, 23(1): 59.
- [19] RAHMAYANTI W, NAGARAJAN S, SU CC, NURKHAMIDAH S, LEE LT, WOO EM. Nano-assembly architectures and structural iridescence in poly(3-hydroxybutyric acid-co-3-hydroxyvaleric)[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(11): 6229-6240.
- [20] 李鑫, 李想, 杨浦. PBAT基降解薄膜的阻隔性能[J]. *塑料*, 2024, 53(6): 102-105.
- LI X, LI X, YANG P. Barrier properties of PBAT-based degradable films[J]. *Plastics*, 2024, 53(6): 102-105 (in Chinese).
- [21] 王美珍, 张玉, 孟兵, 邓晶晶. PBAT的加工性能与降解性能[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(5): 68-74.
- WANG MZ, ZHANG Y, MENG B, DENG JJ. Processing performance and degradability of PBAT[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(5): 68-74 (in Chinese).
- [22] TROFIMCHUK ES, CHERNOV IV, TOMS RV, RZHEVSKIY SA, ASACHENKO AF, PLUTALOVA AV, SHANDRYUK GA, CHERNIKOVA EV, BELETSKAYA IP. Novel simple approach for production of elastic poly(propylene carbonate)[J]. *Polymers*, 2024, 16(23): 3248.
- [23] 金琰, 蔡凡凡, 王立功, 宋超, 金文雄, 孙俊芳, 刘广青, 陈畅. 生物可降解塑料在不同环境条件下的降解研究进展[J]. *生物工程学报*, 2022, 38(5): 1784-1808.
- JIN Y, CAI FF, WANG LG, SONG C, JIN WX, SUN JF, LIU GQ, CHEN C. Advance in the degradation of biodegradable plastics in different environments[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022, 38(5): 1784-1808 (in Chinese).
- [24] TYAGI P, AGATE S, VELEV OD, LUCIA L, PAL L. A Critical review of the performance and soil biodegradability profiles of biobased natural and chemically synthesized polymers in industrial applications[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(4): 2071-2095.
- [25] 张莉娟, 陈洁, 敖瑞雪, 赵秀兰. 土壤中生物降解塑料的降解过程及其对土壤动物的影响[J]. *环境科学*, 2025, 46(2): 1145-1154.
- ZHANG LJ, CHEN J, AO RX, ZHAO XL. Degradation processes of biodegradable plastics in soil and their effects on soil animals[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(2): 1145-1154 (in Chinese).
- [26] AL HOSNI AS, PITTMAN JK, ROBSON GD. Microbial degradation of four biodegradable polymers in soil and compost demonstrating polycaprolactone as an ideal compostable plastic[J]. *Waste Management*, 2019, 97: 105-114.
- [27] SOULENTHON P, SUZUKI M, TACHIBANA Y, FURUKORI M, SAITO T, KAWAMURA R, BANKOLE PO, KASUYA KI. *Halopseudomonas* sp. MFKK-1: a marine-derived bacterium capable of degrading poly(butylene succinate-co-adipate), poly(ϵ -caprolactone), and poly(butylene adipate-co-terephthalate) in marine ecosystems[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2025, 232: 111161.
- [28] HAIDER TP, VÖLKER C, KRAMM J, LANDFESTER K, WURM FR. Plastics of the future The impact of biodegradable polymers on the environment and on society[J]. *Angewandte Chemie (International Ed)*, 2019, 58(1): 50-62.
- [29] 贾骏, 段嫛嫛, 周建学, 张少锋. 聚己内酯电纺纤维支架材料对骨髓基质细胞增殖及分化的影响[J]. *第四军医大学学报*, 2007(13): 1153-1155.
- JIA J, DUAN YY, ZHOU JX, ZHANG SF. Effect of polycaprolactone-based electrospun nanofibrous framework on proliferation and differentiation of bone marrow stromal cells *in vitro*[J]. *Journal of the Fourth Military Medical University*, 2007(13): 1153-1155 (in Chinese).
- [30] MA QF, SHI K, SU TT, WANG ZY. Biodegradation of polycaprolactone (PCL) with different molecular weights by *Candida antarctica* lipase[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2020, 28(11): 2947-2955.
- [31] FENG SS, YUE Y, CHEN JF, ZHOU J, LI YW, ZHANG QZ. Biodegradation mechanism of polycaprolactone by a novel esterase MGS0156: a QM/MM approach[J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2020, 22(12): 2332-2344.
- [32] 于丹, 付晓, 李凡, 陈珊. 一株可降解聚己内酯的细菌菌株选育及其生物降解过程[J]. *吉林农业大学学报*, 2017, 39(5): 539-543.
- YU D, FU X, LI F, CHEN S. Breeding and biodegradation of a PCL degradable bacterial strain[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2017, 39(5): 539-543 (in Chinese).
- [33] TSENG M, HOANG KC, YANG MK, YANG SF, CHU WS. Polyester-degrading thermophilic *Actinomyces* isolated from different environment in Taiwan, China[J]. *Biodegradation*, 2007, 18(5): 579-583.
- [34] IKURA Y, KUDO T. Isolation of a microorganism capable of degrading poly-(L-lactide)[J]. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 1999, 45(5): 247-251.
- [35] PRANAMUDA H, TOKIWA Y, TANAKA H. Polylactide degradation by an *Amycolatopsis* sp.[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(4): 1637-1640.
- [36] NAKAMURA K, TOMITA T, ABE N, KAMIO Y. Purification and Characterization of an extracellular poly(L-lactic acid) depolymerase from a soil isolate, *Amycolatopsis* sp. strain K104-1[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(1): 345-353.
- [37] LI F, WANG S, LIU WF, CHEN GJ. Purification and characterization of poly(L-lactic acid)-degrading enzymes from *Amycolatopsis orientalis* ssp. *orientalis*[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2008, 282(1): 52-58.
- [38] WILLIAMS DF. Enzymic hydrolysis of polylactic acid[J]. *Engineering in Medicine*, 1981, 10(1): 5-7.
- [39] ODA Y, YONETSU A, URAKAMI T, TONOMURA K. Degradation of Polylactide by Commercial Proteases[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2000, 8(1): 29-32.

- [40] MATSUDA E, ABE N, TAMAKAWA H, KANEKO J, KAMIO Y. Gene cloning and molecular characterization of an extracellular poly(L-lactic acid) depolymerase from *Amycolatopsis* sp. Strain K104-1[J]. *Journal of Bacteriology*, 2005, 187(21): 7333-7340.
- [41] KHANDARE SD, CHAUDHARY DR, JHA B. Marine bacterial biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) plastic[J]. *Biodegradation*, 2021, 32(2): 127-143.
- [42] BUBPACHAT T, SOMBATSOMPOP N, PRAPAGDEE B. Isolation and role of polylactic acid-degrading bacteria on degrading enzymes productions and PLA biodegradability at mesophilic conditions[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, 152: 75-85.
- [43] AKUTSU Y, NAKAJIMA-KAMBE T, NOMURA N, NAKAHARA T. Purification and properties of a polyester polyurethane-degrading enzyme from *Comamonas acidovorans* TB-35[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, 64(1): 62-67.
- [44] AKUTSU-SHIGENO Y, TEERAPHATPORNCHAI T, TEAMTISONG K, NOMURA N, UCHIYAMA H, NAKAHARA T, NAKAJIMA-KAMBE T. Cloning and sequencing of a poly(DL-lactic acid) depolymerase gene from *Paenibacillus amylolyticus* strain TB-13 and its functional expression in *Escherichia coli*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(5): 2498-2504.
- [45] WATANABE T, SUZUKI K, SHINOZAKI Y, YARIMIZU T, YOSHIDA S, SAMESHIMA-YAMASHITA Y, KOITABASHI M, KITAMOTO HK. A UV-induced mutant of *Cryptococcus flavus* GB-1 with increased production of a biodegradable plastic-degrading enzyme[J]. *Process Biochemistry*, 2015, 50(11): 1718-1724.
- [46] SHALEM A, YEHEZKELI O, FISHMAN A. Enzymatic degradation of polylactic acid (PLA)[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2024, 108(1): 413.
- [47] 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).
- [48] PÉREZ-ARAUZ AO, AGUILAR-RABIELA AE, VARGAS-TORRES A, RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ AI, CHAVARRÍA-HERNÁNDEZ N, VERGARA-PORRAS B, LÓPEZ-CUELLAR MR. Production and characterization of biodegradable films of a novel polyhydroxyalkanoate (PHA) synthesized from peanut oil[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2019, 20: 100297.
- [49] CHHETRI G, KIM HJ, JEON JM, YOON JJ. Isolation of *Massilia* species capable of degrading poly(3-hydroxybutyrate) isolated from eggplant (*Solanum melongena* L.) field[J]. *Chemosphere*, 2024, 368: 143776.
- [50] ABE H, DOI Y. Structural effects on enzymatic degradabilities for poly[(R)-3-hydroxybutyric acid] and its copolymers[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 1999, 25(1/2/3): 185-192.
- [51] LUSTY CJ, DOUDOROFF M. Poly-beta-hydroxybutyrate depolymerases of *Pseudomonas lemoignei*[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1966, 56(3): 960-965.
- [52] MUKAI K, YAMADA K, DOI Y. Efficient hydrolysis of polyhydroxyalkanoates by *Pseudomonas stutzeri* YM1414 isolated from lake water[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 1994, 43(3): 319-327.
- [53] TANIO T, FUKUI T, SHIRAKURA Y, SAITO T, TOMITA K, KAIHO T, MASAMUNE S. An extracellular poly(3-hydroxybutyrate) depolymerase from *Alcaligenes faecalis*[J]. *European Journal of Biochemistry*, 1982, 124(1): 71-77.
- [54] MUKAI K, YAMADA K, DOI Y. Enzymatic degradation of poly(hydroxyalkanoates) by a marine bacterium[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 1993, 41(1): 85-91.
- [55] KASUYA K, INOUE Y, TANAKA T, AKEHATA T, IWATA T, FUKUI T, DOI Y. Biochemical and molecular characterization of the polyhydroxybutyrate depolymerase of *Comamonas acidovorans* YM1609, isolated from freshwater[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(12): 4844-4852.
- [56] CHEK MF, KIM SY, MORI T, ARSAD H, SAMIAN MR, SUDESH K, HAKOSHIMA T. Structure of polyhydroxyalkanoate (PHA) synthase PhaC from *Chromobacterium* sp. USM2, producing biodegradable plastics[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 5312.
- [57] 侯丽君. 不同类型塑料降解菌的筛选及降解机理初探[D]. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2020.
- HOU LJ. Screening of different types of plastic degrading bacteria and preliminary study on degradation mechanism[D]. Yangling: Master's Thesis of Northwest A&F University, 2020 (in Chinese).
- [58] BANDOPADHYAY S, LIQUET Y, GONZÁLEZ JE, HENDERSON KB, ANUNCIADO MB, HAYES DG, DEBRUYN JM. Soil microbial communities associated with biodegradable plastic mulch films[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 587074.
- [59] 刘佳茜, 侯丽君, 刘婷婷, 王沛媛, 高祥, 林雁冰. PBAT地膜降解菌的筛选及其降解特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(1): 129-136.
- LIU JX, HOU LJ, LIU TT, WANG PY, GAO X, LIN YB. Isolation of PBAT plastic-degrading bacteria and their degradation characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 129-136 (in Chinese).
- [60] SUN WX, ZHANG YZ, ZHANG H, WU H, LIU Q, YANG F, HOU MZ, Qi YJ, ZHANG WB. Exploitation of *Enterobacter hormaechei* for biodegradation of multiple plastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 907: 167708.
- [61] JIA XB, ZHAO K, ZHAO J, LIN CQ, ZHANG H, CHEN LJ, CHEN JC, FANG Y. Degradation of poly(butylene adipate-co-terephthalate) films by *Thermobifida fusca* FXJ-1 isolated from compost[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 441: 129958.
- [62] 张敏, 孟庆阳, 刁晓倩, 翁云宣. PLA/PBAT共混物的降解性能研究[J]. *中国塑料*, 2016, 30(8): 79-86.
- ZHANG M, MENG QY, DIAO XQ, WENG YX. Biodegradation behavior of PLA/PBAT blends[J]. *China Plastics*, 2016, 30(8): 79-86 (in Chinese).

- [63] QIU YZ, WANG P, ZHANG LX, LI CM, LU JX, REN LH. Enhancing biodegradation efficiency of PLA/PBAT-ST20 bioplastic using thermophilic bacteria co-culture system: new insight from structural characterization, enzyme activity, and metabolic pathways[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 477: 135426.
- [64] ZHANG YL, GAO W, MO AY, JIANG J, HE DF. Degradation of polylactic acid/polybutylene adipate films in different ratios and the response of bacterial community in soil environments[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 313: 120167.
- [65] HAN YJ, TENG Y, WANG X, REN WJ, WANG XM, LUO YM, ZHANG HM, CHRISTIE P. Soil type driven change in microbial community affects poly(butylene adipate-co-terephthalate) degradation potential[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(8): 4648-4657.
- [66] DRESLER K, van den HEUVEL J, MÜLLER RJ, DECKWER WD. Production of a recombinant polyester-cleaving hydrolase from *Thermobifida fusca* in *Escherichia coli*[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2006, 29(3): 169-183.
- [67] GOUDA MK, KLEEBERG I, VAN DEN HEUVEL J, MÜLLER RJ, DECKWER WD. Production of a polyester degrading extracellular hydrolase from *Thermomonospora fusca*[J]. *Biotechnology Progress*, 2002, 18(5): 927-934.
- [68] WALLACE PW, HAERNVALL K, RIBITSCH D, ZITZENBACHER S, SCHITTMAYER M, STEINKELLNER G, GRUBER K, GUEBITZ GM, BIRNER-GRUENBERGER R. PpEst is a novel PBAT degrading polyesterase identified by proteomic screening of *Pseudomonas pseudoalcaligenes*[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, 101(6): 2291-2303.
- [69] YANG Y, MIN J, XUE T, JIANG PC, LIU X, PENG RM, HUANG JW, QU YY, LI X, MA N, TSAI FC, DAI LH, ZHANG Q, LIU YL, CHEN CC, GUO RT. Complete biodegradation of poly(butylene adipate-co-terephthalate) via engineered cutinases[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1645.
- [70] 陶剑, 胡丹, 刘莉, 孔梅梅, 宋存江, 王淑芳. PLA, PPC和PHBV共混物的热性能、力学性能和生物降解性能研究[J]. *离子交换与吸附*, 2010, 26(1): 59-67.
TAO J, HU D, LIU L, KONG MM, SONG CJ, WANG SF. Thermal characteristics, mechanical properties and degradability of PLA/PPC/PHBV blends[J]. *Ion Exchange and Adsorption*, 2010, 26(1): 59-67 (in Chinese).
- [71] DU LC, MENG YZ, WANG SJ, TJONG SC. Synthesis and degradation behavior of poly(propylene carbonate) derived from carbon dioxide and propylene oxide[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 92(3): 1840-1846.
- [72] LIANG J, ZHANG JF, YAO ZM, LUO SY, TIAN L, TIAN CJ, SUN Y. Preliminary findings of polypropylene carbonate (PPC) plastic film mulching effects on the soil microbial community[J]. *Agriculture*, 2022, 12(3): 406.
- [73] 张加凡. PPC地膜对土壤群落的影响及促降解菌株的筛选[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
ZHANG JF. Effects of PPC film mulching on soil community and screening of pro-degrading strains[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022 (in Chinese).
- [74] 孙雨, 张加凡, 田春杰. 一种高效降解PPC地膜的方法: CN114570751A[P]. 2022-06-03.
- [75] TSUBOI S, HOSHINO YT, YAMAMOTO-TAMURA K, UENISHI H, OMAE N, MORITA T, SAMESHIMA-YAMASHITA Y, KITAMOTO H, KISHIMOTO-MO AW. Enhanced biodegradable polyester film degradation in soil by sequential cooperation of yeast-derived esterase and microbial community[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2024, 31(9): 13941-13953.
- [76] BONIFER KS, WEN XF, HASIM S, PHILLIPS EK, DUNLAP RN, GANN ER, DEBRUYN JM, REYNOLDS TB. *Bacillus pumilus* B12 degrades polylactic acid and degradation is affected by changing nutrient conditions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 2548.
- [77] PANYACHANAKUL T, KITPREEHAVANICH V, TOKUYAMA S, KRAJANGSANG S. Poly(dl-lactide)-degrading enzyme production by immobilized *Actinomyces keratinilytica* strain T16-1 in a 5-L fermenter under various fermentation processes[J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2017, 30: 71-76.
- [78] OLIVEIRA J, ALMEIDA PL, SOBRAL RG, LOURENÇO ND, GAUDÊNCIO SP. Marine-derived *Actinomycetes*: biodegradation of plastics and formation of PHA bioplastics: a circular bioeconomy approach[J]. *Marine Drugs*, 2022, 20(12): 760.
- [79] CHATHALINGATH N, KINGSLEY JS, GUNASEKAR A. Biosynthesis and biodegradation of poly(3-hydroxybutyrate) from *Priestia flexa*: a promising mangrove halophyte towards the development of sustainable eco-friendly bioplastics[J]. *Microbiological Research*, 2023, 267: 127270.
- [80] WANG YJ, HU T, ZHANG WT, LIN JW, WANG ZY, LYU SX, TONG HB. Biodegradation of polylactic acid by a mesophilic bacteria *Bacillus safensis*[J]. *Chemosphere*, 2023, 318: 137991.
- [81] HUANG QY, HIYAMA M, KABE T, KIMURA S, IWATA T. Enzymatic self-biodegradation of poly(L-lactic acid) films by embedded heat-treated and immobilized proteinase K[J]. *Biomacromolecules*, 2020, 21(8): 3301-3307.
- [82] SABAPATHY PC, DEVARAJ S, PARTHIPAN A, KATHIRVEL P. Polyhydroxyalkanoate production from statistically optimized media using rice mill effluent as sustainable substrate with an analysis on the biopolymer's degradation potential[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 126: 977-986.
- [83] CHAN CM, VANDI LJ, PRATT S, HALLEY P, RICHARDSON D, WERKER A, LAYCOCK B. Insights into the biodegradation of PHA/wood composites: micro-

- and macroscopic changes[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2019, 21: e00099.
- [84] SONG ZW, ZHAO L, BI JG, TANG QY, WANG GD, LI YX. Classification of degradable mulch films and their promotional effects and limitations on agricultural production[J]. *Agriculture*, 2024, 14(8): 1235.
- [85] 张敬勋. 聚碳酸亚丙酯在膜制品中的应用研究[D]. 青岛: 青岛科技大学硕士学位论文, 2017.
- ZHANG JX. Study on the application of polypropylene carbonate in film products[D]. Qingdao: Master's Thesis of Qingdao University of Science & Technology, 2017 (in Chinese).
- [86] SKARIYACHAN S, TASKEEN N, KISHORE AP, KRISHNA BV. Recent advances in plastic degradation: from microbial consortia-based methods to data sciences and computational biology driven approaches[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 426: 128086.
- [87] SANDER M. Biodegradation of polymeric mulch films in agricultural soils: concepts, knowledge gaps, and future research directions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(5): 2304-2315.
- [88] JU ZC, DU XF, FENG K, LI SZ, GU SS, JIN DC, DENG Y. The succession of bacterial community attached on biodegradable plastic mulches during the degradation in soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 785737.
- [89] ROMANO I, VENTORINO V, SCETTINO M, MAGARACI G, PEPE O. Changes in soil microbial communities induced by biodegradable and polyethylene mulch residues under three different temperatures[J]. *Microbial Ecology*, 2024, 87(1): 101.
- [90] XIONG XB, WANG PY, ZHAO ZY, WANG J, LIU ST, MEI FJ, WANG WY, WANG YB, FANG XW, ZHU Y, ZHANG JL, WANG N, JIN JM, TAO HY, XIONG YC. Can biodegradable film replace polyethylene film to obtain similar mulching effects on soil functions and maize productivity in irrigation region A three-year experimental appraisal[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 486: 144473.
- [91] HUO YX, DIJKSTRA FA, POSSELL M, SINGH B. Mineralisation and priming effects of a biodegradable plastic mulch film in soils: influence of soil type, temperature and plastic particle size[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 189: 109257.
- [92] PISCHEDDA A, TOSIN M, DEGLI-INNOCENTI F. Biodegradation of plastics in soil: the effect of temperature[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, 170: 109017.
- [93] DI MOLA I, VENTORINO V, COZZOLINO E, OTTAIANO L, ROMANO I. Biodegradable mulching vs traditional polyethylene film for sustainable solarization: chemical properties and microbial community response to soil management[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 163: 103921.
- [94] 闫靖华, 费政军. 降解地膜对棉花农艺性状及土壤养分的影响[J]. *农业科技通讯*, 2019(5): 133-135, 137.
- YAN JH, FEI ZJ. Effects of degradable plastic film on agronomic traits of cotton and soil nutrients[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2019(5): 133-135, 137 (in Chinese).
- [95] 魏宏磊. 冷凉地区不同地膜覆盖对玉米田土壤温度、养分和酶活性的影响[D]. 长春: 吉林农业大学硕士学位论文, 2021.
- WEI HL. Effects of different plastic film mulching on soil temperature, nutrient and enzyme activity in corn field in cold region[D]. Changchun: Master's Thesis of Jilin Agricultural University, 2021 (in Chinese).
- [96] 王卫星, 杨娟, 杨斌. 大豆覆盖 PBAT 全生物降解地膜种植效果[J]. *农业工程技术*, 2024, 44(1): 18-19, 31.
- WANG WX, YANG J, YANG B. Planting effect of soybean covered with PBAT biodegradable plastic film[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2024, 44(1): 18-19, 31 (in Chinese).
- [97] 赵军, 李金海. PBAT 型全生物降解地膜对棉花产量及土壤理化性质的影响[J]. *中国沼气*, 2022, 40(3): 43-49.
- ZHAO J, LI JH. Effects of PBAT type biodegradable plastic film on plant yield and soil physical and chemical properties[J]. *China Biogas*, 2022, 40(3): 43-49 (in Chinese).
- [98] WANG A, CHANG QT, CHEN CS, ZHONG XQ, YUAN KX, YANG MH, WU W. Degradation characteristics of biodegradable film and its effects on soil nutrients in tillage layer, growth and development of taro and yield formation[J]. *AMB Express*, 2022, 12(1): 81.
- [99] 齐英, 董彰, 田尧甫, 冯志新, 江艳, 李静, 熊瑞冰, 张军帅. 可降解地膜覆盖对花生产量影响及土壤残膜存留效应研究[J]. *农业工程技术*, 2024, 44(21): 43-46.
- [100] PALSIKOWSKI PA, ROBERTO MM, SOMMAGGIO LRD, SOUZA PMS, MORALES AR, MARIN-MORALES MA. Ecotoxicity Evaluation of the biodegradable polymers PLA, PBAT and its blends using *Allium cepa* as test organism[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, 26(3): 938-945.
- [101] MUROI F, TACHIBANA Y, KOBAYASHI Y, SAKURAI T, KASUYA KI. Influences of poly(butylene adipate-co-terephthalate) on soil microbiota and plant growth[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, 129: 338-346.
- [102] SATTI SM, SHAH AA. Polyester-based biodegradable plastics: an approach towards sustainable development[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2020, 70(6): 413-430.
- [103] BALESTRI E, MENICAGLI V, LIGORINI V, FULIGNATI S, RASPOLLI GALLETTI AM, LARDICCI C. Phytotoxicity assessment of conventional and biodegradable plastic bags using seed germination test[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 569-580.
- [104] SCHÖPFER L, MENZEL R, SCHNEPF U, RUESS L, MARHAN S, BRÜMMER F, PAGEL H, KANDELER E. Microplastics effects on reproduction and body length of the soil-dwelling nematode *Caenorhabditis elegans*[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 41.
- [105] SUN YZ, DUAN CX, CAO N, DING CF, HUANG Y, WANG J. Biodegradable and conventional microplastics exhibit distinct microbiome, functionality, and metabolome changes in soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127282.