

普通地膜残膜及生物降解地膜应用 对番茄种植影响的研究进展

赵敏¹, 张长明², 王元军¹

(1. 济宁学院生命科学与工程学院 山东曲阜 273155; 2. 德州市农业农村局 山东德州 253000)

摘要: 番茄是重要的农产品之一, 普通地膜残膜影响其产量及品质。为提高番茄种植中对普通地膜残膜危害的认识和推动生物降解地膜的合理应用, 从土壤质量和种子萌发、生长、产量、品质等方面综述传统地膜残膜对番茄种植的影响, 从生物降解地膜的降解特性系统阐述其创新研发及在番茄种植中的应用优势, 并针对治理番茄种植中残膜污染提出生物降解地膜创新与风险评估、智能回收机械研发、地膜减量替代等重点发展方向, 可为推广生物降解地膜、综合治理残膜污染提供指导。

关键词: 番茄; 普通地膜; 残膜; 生物降解地膜; 智能回收机械

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)08-009-06

Research progress on the effects of ordinary plastic film residues and biodegradable plastic film application on tomato planting

ZHAO Min¹, ZHANG Changming², WANG Yuanjun¹

(1. College of Life Science and Engineering, Jining University, Qufu 273155, Shandong, China; 2. Dezhou Agriculture Village Bureau, Dezhou 253000, Shandong, China)

Abstract: Tomato is an important vegetable crop, and the ordinary plastic film residue affects its yield and quality. To enhance the understanding of the harm of ordinary plastic film residue and promote the rational application of biodegradable plastic film, this paper systematically analyzes the effects of ordinary plastic film residue on tomato cultivation, including soil quality, seed germination, plant growth, yield and quality. Simultaneously, the research progress of biodegradable plastic film from the perspective of degradation characteristics of residual film pollution in tomato planting, three key development directions are proposed: the innovation and risk assessment of biodegradable plastic film, the research and development of intelligent recycling machinery, and the research on plastic film replacement and reduction, aiming to provide guidance for the promotion of biodegradable plastic film and the comprehensively management of plastic film pollution.

Key words: Tomato; Ordinary plastic film; Residual film; Biodegradable plastic film; Intelligent recycling machinery

地膜覆盖技术研究起源于日本, 1955 年首先应用于草莓覆盖生产, 我国于 20 世纪 70 年代引进该技术用于蔬菜栽培。80 年代初地膜覆盖技术应用于番茄生产并取得了显著成效, 推动了番茄栽培的早熟与增产等, 成为番茄栽培中关键性农艺措施之一。然而, 覆膜采用聚乙烯(PE)等普通地膜, 其难降解特性造成大量残膜滞留土壤, 形成了持续性土壤残膜污染, 对番茄生产和品质构成了威胁。研究发现, 残膜降解释放的微塑料、纳米塑料和邻苯二甲酸酯等对蔬菜安全构成了新的挑战。因此, 在番茄种植中治理残膜污染具有重要意义。近年来, 生

物降解地膜作为替代方案受到广泛关注, 但其应用效果与潜在风险仍需系统解析。笔者基于番茄的现有研究, 从普通地膜残膜的多维度影响、生物降解地膜的应用潜力及挑战两方面展开论述, 以期对番茄种植的可持续发展提供理论支持。

1 普通地膜残膜对番茄种植的影响

1.1 残膜对土壤水分分配及酶代谢的协同劣化

有研究发现, 在印度苏鲁尔地区塑料薄膜覆盖种植番茄 10 a(年)土壤中累积残膜 0~10 cm 碎片最多, 形态以薄膜形式碎片最多^[1]。这类残膜可以

收稿日期: 2024-06-25; 修回日期: 2025-02-21

基金项目: 国家大豆产业技术体系建设项目(CARS-04-CES31); 山东省本科教学改革研究面上项目

作者简介: 赵敏, 女, 讲师, 研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: qfzhaomin@163.com

通信作者: 王元军, 男, 教授, 研究方向为生物资源开发等。E-mail: 350740228@qq.com

阻断或阻塞土壤连续孔径等,主要影响土壤水分分配及土壤酶代谢。室内土箱模拟试验也表明,滴灌条件下残膜可降低土壤孔隙度或者阻隔孔隙连续性,严重阻碍土壤水分和溶质运动,出现土壤表层积水和深层入渗受限,导致 30 cm 以下土壤含水量降低,显著影响土壤含水量^[2]。同时,残膜降解释放的聚苯乙烯纳米塑料(PSNPs)以及邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)对土壤酶活性产生拮抗作用。PSNPs 抑制番茄根际土壤中碱性磷酸酶活性;DEHP 提高土壤过氧化氢酶活性,但抑制蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶活性^[3]。不过,PSNPs 可通过吸附降低 DEHP 生物有效性,部分缓解其对酶活性的抑制作用,揭示了残膜污染对土壤代谢影响的复杂性。

土壤酶是土壤新陈代谢的重要因素,与微生物一起推动物质转化。残膜通过影响土壤代谢进而影响土壤肥力。值得注意的是,实际上关于残膜对蔬菜种植土壤肥力影响的研究并没有引起广泛的关注,这主要是由于蔬菜栽培施肥丰富、管理细致,提高了土壤有机质、无机-有机复合体含量,削弱了残膜所带来的不利影响,所以此方面研究开展较少。

1.2 残膜对番茄种子萌发与根系发育的联动调控

种子萌发和根系发育是两个紧密相连的生理过程。残膜释放的微塑料以及有害物质可能对种子萌发造成不利影响。如 PSNPs 对番茄种子萌发呈现浓度依赖性效应,低质量浓度($0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)可通过激活 α -淀粉酶活性、加强淀粉和蔗糖代谢、氨基酸代谢以促进发芽速率,这应是诱发了番茄种子的应激适应;而高质量浓度($1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)则抑制水通道蛋白基因 *Slapp2* 的表达(下调了 90%),导致水分吸收受阻、抑制种子萌发^[3]。此外,PSNPs 与重金属 Cu、Cd 的协同作用可加剧种子毒性效应,降低发芽率、发芽势、发芽指数等^[3-4]。

根系发育方面,残膜可导致番茄生长耕层土(30~50 cm)水分分配失常及深层水分匮乏,而且残膜会降低根中 IBA 含量、增加 ABA 含量,抑制侧根生长,加之 PSNPs、DEHP 均促进番茄中营养元素(磷、钾、钠、镁和钙)由地下部分向地上部分转移,对根系生长起负向作用^[3-5]。因而,直接造成番茄适宜生长区重心上移,根系整体结构发育不良。在我国西北地区开展的温室盆栽试验表明,随残膜量($80 \sim 1280 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)增加,番茄的根长和根表面积显著减少,根体积和直径减少不明显^[6]。另外,尽管残膜对番茄苗期、开花期和坐果期根系生长均有抑制作用,但是需特别关注苗期残膜对根系的抑制作用

强于开花坐果期,可能与后者代谢重心向果实转移有关。

1.3 残膜对番茄地上生长及产量的级联效应

残膜影响土壤水分和养分,加之根系发育整体较小且分布偏上,导致地上部分生理代谢、营养生长不良和番茄产量下降。田间试验表明,随残膜量增加,叶绿素含量先升后降,SOD 活性逐渐下降,POD 活性和 MDA 含量呈现递升趋势,这种逆境胁迫在番茄生育后期随植株逐渐强壮而减弱,乃至恢复正常水平,但是地上部分生长以及产量受影响显著,尤其当残膜量大于 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量明显降低^[7]。从生理上分析,尽管逆境胁迫可导致幼苗光合速率和气孔导度水平随残留量的增加而提高,但会降低开花坐果期和膨大期光合速率和气孔导度,从而导致番茄的早熟及产量降低^[8]。另外,DEHP 可以解离叶片叶绿体中的类囊体颗粒和薄片,阻碍光合作用,也导致番茄株高、地上部分生物量和最终产量显著降低。

还有研究显示,滴灌条件下残膜会造成番茄产量下降,但差异不显著。随残膜量增加,其对番茄产量并没有表现出越来越强的抑制作用,呈现残膜量 $200 \sim 600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 区间负面影响逐渐减弱、产量逐步回升趋势^[9],这主要是由于滴灌条件下的低灌水量使得残膜对设施番茄产量和水分利用效率的影响不显著。另有研究表明,适当提高灌溉量有助于减轻残膜带来的负面效应,使得残膜对番茄株高与茎粗生长的影响不明显^[10]。水分管理对残膜的负面效应具有调节潜力,应根据生产方式科学制定灌水方式和灌水量以减轻残膜对番茄生长发育的影响。

总之,残膜可导致生育期提前以及生产期缩短、果实早熟,直接导致番茄产量下降。在番茄种植中需要注意:基于应激反应,残膜促进番茄早发育,如生物量积累的始期和盛期提前。同时,残膜导致肥水吸收有限,根系发育不良,出现收获后番茄早衰现象。根据以上情况,可以考虑调整肥水管理策略,如苗期提前施肥和灌水、加强收获后管理等,以减轻残膜所带来的不利影响。

1.4 残膜对番茄品质的非线性调控

残膜量影响番茄风味指标。田间试验结果表明,残膜($200, 400, 800, 1600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)对维生素 C、可溶性糖和硝酸盐含量呈正向影响,对有机酸含量呈负向影响^[8]。温室盆栽试验结果还表明,果形指数、番茄红素含量随残膜量增加而降低^[6]。也有研

究认为,残膜量对有机酸含量影响不大,但可显著提高番茄糖酸比^[9]。由于单一指标无法有效评估番茄果实的综合质量,利用主成分分析对上述指标进行综合排名为 $1000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} > \text{CK}$ (空白对照) $> 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} > 600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中 $1000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 残膜处理番茄品质排名第一,但产量最差,不利于番茄的高产高效^[7]。另一项引入主成分分析和模糊综合评判的评价排序则不同,为 CK (空白对照) $> 80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} > 160 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} > 320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} > 640 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} > 1280 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。还有结合产量进行品质综合评价,结果表明, $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 残膜量提高番茄综合质量,但当残膜量超过 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,综合质量迅速下降^[8]。

上述评价结果有差异,残膜通过水分胁迫调控番茄风味指标,呈现“低促高抑”效应,少量残膜可以兼顾产量和品质的共同提升。因此,合理利用覆膜,并精准控制残留量,可实现番茄风味提升与综合质量稳定的双重目标。

2 生物降解地膜在番茄种植中的应用潜力与挑战

鉴于普通地膜残膜累积引发了一系列问题,治理残膜污染十分必要。大力推广生物降解地膜是治理残膜污染的根本途径,可避免普通地膜清除和处置过程导致的经济和环境问题,实现番茄种植的生态化及可持续性。

2.1 生物降解地膜的降解特性与功能创新

英国在 1973 年提出生物降解塑料的概念,制成可生物降解的淀粉 PE; 80 年代又成功制成聚 β -羟基丁酸酯薄膜。我国从 80 年代中期开始先后开展了淀粉添加型生物降解薄膜、全生物降解薄膜的研发,生物可降解膜已在大田作物、蔬菜种植中得到广泛应用,成为推动绿色农业发展的重要力量。

生物降解地膜是以生物降解聚合物为原料生产的自然环境条件下可为微生物降解的塑料薄膜,分成两类:天然生物降解聚合物地膜,采用淀粉、纤维素、甲壳素、壳聚糖等天然材料生产;生物降解脂肪族聚酯地膜,如聚羟基脂肪酸酯 PHA、聚己内酯 PCL、聚乳酸 PLA、聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯 PBAT 等^[11]。生物降解地膜在番茄生产中具有良好的降解特性,可经细菌、真菌和放线菌等侵蚀,使聚合物组分水解、电离或质子化,产生机械性破坏而分裂成低聚物碎片,再经酶分解或氧化降解生成小分子化合物,直至分解成 CO_2 和 H_2O ^[12]。以 PBAT

膜为例,在新疆大田番茄种植使用 60 d 后开始进入诱导期,100 d 内降解率达 60.98%^[13]。进一步深入研究发现,生物降解地膜微塑料也具有良好的降解特性。经 20、40 d 降解,PE、PP 微塑料表面均保持较好完整性,降解痕迹不明显,而 PLA、PBAT 微塑料发生降解,表面出现不同程度裂纹和孔洞,且 40 d 的降解程度大于 20 d,PLA 的降解程度大于 PBAT^[14]。降解过程中微生物发挥了关键作用,通过富集培养从聚乳酸塑料生态位分离得到 5 株高效降解菌,分别为菌株 L5 (*Streptomyces exfoliatus*)、P7 (*Bacillus zanthoxyli*)、W2 (*Kocuria assamensis*)、L1 (*Pseudomona aeruginosa*)、L5 和 W1 (*Kocuria salina*),均具有降解聚乳酸塑料能力,且不会对番茄生长产生危害^[15]。

除了关注降解特性,功能性、复合型生物降解地膜的创新开发是重要发展亮点。如将 PBAT 与聚乳酸木质素复合可提高力学性能,在北京日光温室覆盖 131 d 后降解程度达到 1 级(裂纹开始出现),埋藏 160 d 后失重率为 57.82%;PBAT 与聚乳酸腐植酸复合则显著提高土壤有机质含量,增加毛壳菌相对丰度,有助于提高番茄品质^[16]。基于氧化淀粉和羧甲基壳聚糖开发生物降解地膜,并结合了携带咯菌腈的 ZIF-8,可显著提高地膜延迟释放咯菌腈的能力,实现持续控制土传疾病,对尖孢镰孢菌具有良好抑制作用^[17]。Merino 等^[18]在 PLA 中添加蔬菜废弃物如菠菜茎、番茄渣和可可壳等非食用植物废料,获得了高度可拉伸的生物降解地膜,拉伸强度为 10~24 MPa,断裂伸长率达 460%,且添加的蔬菜废物可改善 PLA 生物降解性、提供微量和大量营养元素。此外,还有开发的生物基降解液态地膜,集农药、肥料和农膜于一身,可较好地促进番茄生长发育及改善沙地生态环境^[19]。

2.2 生物降解地膜对番茄根际土壤生态的影响

2.2.1 对增温保墒的积极影响 生物降解地膜的增温保墒效果明显优于不覆膜,但不及普通地膜^[20]。大田试验结果表明,在番茄幼苗期和开花结果期,PBAT 膜的保温保湿能力与 PE 膜相当;但是由于其降解速率较大,成熟期 PBAT 膜下土壤湿度显著低于 PE 膜而高于露地,对番茄的生长、产量和品质未产生显著的负面影响^[13]。故番茄种植中使用生物降解地膜替代普通地膜具有可行性,但是研发中应注意其降解时机的控制,防止番茄生育后期地膜过早裂解导致增温保墒效果大幅降低,影响产量。生物降解地膜颜色差异对降解速率影响不明

显,但是应用效果有差异。如黑色氧化生物双降解膜在新疆大田因吸热效应与白色膜相比,加工番茄苗期可提高 5 cm 土层温度 1.18 °C,0~60 cm 土壤含水率 3.43%,尤其在干旱地区对番茄幼苗生长更具优势^[21]。

2.2.2 残膜对土壤生态的负面影响 普通地膜需要物理去除,否则残膜累积会造成土壤污染和生态破坏。生物降解地膜即使在覆膜期内无法完全降解,在生长季节结束时翻耕到土壤中,最终降解为 CO₂ 和 H₂O。但是其高残留量仍可能引发多重生态风险。以设施番茄为例,通过盆栽控制试验证实生物降解地膜残膜(BDRF)增加土壤容重,并阻碍土壤水分垂向运移;PE 残膜处理对速效磷和土壤 pH 值影响不显著,但是 BDRF 处理使 pH 值显著降低,且当残膜量 $\geq 720 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时速效磷含量显著降低^[22],可能是 pH 值降低导致磷结合形成难溶性化合物,有效性降低。

生物降解地膜残膜也扰动土壤微生物区系变化,并影响群落的多样性和丰富度,导致真菌(尤其是子囊菌)和变形菌门、放线菌门和厚壁菌门细菌富集,进而影响土壤代谢。如两种聚乳酸塑料(PLA 和 PT)残膜对番茄根际土壤变形菌门(Proteobacteria)和放线菌门(Actinobacteriota)影响较大,PLA 残膜使得 Actinobacteriota 相对丰度减少 0.5%;PT 残膜使得 Actinobacteriota 相对丰度减少 8.0%,Proteobacteria 相对丰度增加 6.5%^[15]。

2.3 生物降解地膜对番茄种植的影响

2.3.1 对番茄产量和品质的积极影响 在海南地区的大田试验结果表明,覆盖 PBAT 与 PE 对番茄叶片数的影响效果相似,番茄单位面积结果数效果相当,生产上 PBAT 可替代 PE 地膜^[12]。但是,由于水热条件的差异在南疆干旱地区番茄产量 PBAT 处理显著低于 PE 处理 3.14%、高于露地处理 63.38%^[13],对圣马尔扎诺番茄研究表明,黑色可生物降解薄膜(MB12)比露地 1 m² 果实数量明显增加,产量增加 25%^[23]。而且,大田试验结果还表明,黑色生物降解地膜比白色膜的田间番茄总产量高 2.56%~5.48%^[20]。有学者认为生物降解膜 Ecovio(可堆肥聚合物)和 MaterBi(淀粉基材料)覆膜使得土温升高,并影响番茄代谢组变化,产生了亲脂性抗氧化活性和更高的抗坏血酸积累量,故较露地对照产生了更多商品番茄果实^[24]。以农用秸秆资源化利用形成的生物降解液态地膜处理沙培番茄,土壤有机质含量、叶片净光合速率、速效氮含量均显著高于对

照,叶绿素含量提高 8.24%,说明了生物降解地膜能有效促进番茄生长和产量增加^[19]。然而,也有研究结果表明,生物降解膜导致产量下降^[25],新疆昌吉市大田试验结果表明,MaterBi 生物降解膜和自制 PBS 完全生物降解膜提高了加工番茄的成熟度和单株果数,但单果质量和产量降低^[26]。以上情况可能与膜局部降解后地温偏低或者生物降解膜的材料有关。因此,生物降解地膜对产量的影响还有待具体分析。

生物降解地膜对番茄品质提升有正向作用。意大利露天条件下圣马尔扎诺番茄覆膜试验中 MB12 对番茄品质的所有调查性状都有积极影响(硬度除外),决定果实亨特色度比 a/b 最高值,可溶性固形物总量、类胡萝卜素、类黄酮、多酚和抗坏血酸含量增加,并且抗氧化活性升高 24.1%^[23],这些积极作用可能与 MB12 为淀粉基原材料、堆肥有关。意大利南部温室番茄栽培试验也表明,MaterBi 中的 MB N8 地膜覆膜后果实产量、总作物生物量、叶面积指数、果实干物质含量和可溶性固形物含量、可滴定酸含量、果实硬度、抗氧化浓度和活性均最高,同时颜色成分在 a 值、L 值也最高^[27]。另外,覆盖 PBAT/聚乳酸腐植酸复合生物降解膜比覆盖 PE 番茄产量及可溶性固形物、维生素 C 和番茄红素含量增加,总酸含量和硬度降低^[16]。可见,生物降解膜能够提高番茄品质,但是引起品质提高的实际因素可能比较复杂。通过上述案例的具体分析可知,可能是生物降解地膜降解本身引起了番茄应激反应,或者改变了土壤中微生物群落,更主要是增加了腐植酸、土壤肥力等。

2.3.2 残膜对番茄种植的负面影响 生物降解地膜残膜的降解作用对根系生长和养分吸收的阻碍作用减弱,促进了根系对土壤中养分的利用。然而,生物降解地膜残膜的负面影响也不容忽视。低残膜量起促进作用,过高则起抑制作用。如 PBAT 低残留量可抑制番茄茎粗增加,高残留量可显著抑制番茄叶片生长并导致产量降低,且残留量越高,产量下降越明显^[12]。同时,残膜降解过程中产生的碎片、微塑料以及释放出的化合物可能对番茄生长发育产生不利影响。Serrano^[28]将番茄种子播种在盆中进行围隔试验,聚羟基丁酸酯残膜严重抑制番茄生长达 90%,其大多数田间风化残膜处理表现出生长迟缓,且比原始未风化残膜对植物的影响更大。然而,原始的和田间风化的 PE 残膜并没有发现任何影响,说明不是残膜的物理存在影响植物发育,

很可能是野外风化的生物降解残膜在降解过程中释放的化合物影响了植物-土壤环境。还有研究表明,生物降解地膜微塑料显著降低了土壤微生物多样性,毒性作用表现为可降解微塑料>难降解微塑料,生物基微塑料>石化基微塑料^[29],进一步证实生物降解残膜所带来的负面影响。

综上所述,番茄种植使用生物降解地膜较露地产量有提升,多功能生物降解地膜也有助于番茄品质的全面提升。但是,不能忽视的是目前对于生物降解地膜可能造成的食品安全以及生态威胁的研究并不充分,在推广应用以及研发中要重视其潜在风险的分析 and 应对。

3 展望

3.1 开展番茄生物降解地膜的深度创新及风险评估

当下国家大力推广生物降解地膜,并取得了一定成效。但是依然存在一些问题,如异质性栽培条件适应性差、地膜应用成本过高、潜在风险缺乏评估等。基于番茄生长发育特性和高品质产品的开发,合理确定生物降解膜最优耐候期,研发多功能、复合型番茄专用生物降解地膜将是今后的重点发展方向。开发中可以考虑同时集成增温保墒、防病增质、肥力补充、特色产品打造等功能,对提升地膜应用效果具有关键性作用。重视光降解技术的应用和植物纤维地膜的开发。光降解技术是一种创新的塑料降解方法,利用可见光催化作用将塑料分子迅速分解为小分子化合物以实现快速降解;植物纤维地膜材料来源广且具有可持续性;二者都是环保领域的重要创新成果。同时,还要开展生物降解地膜降解机制的深度研究,重视混合生物降解聚合物技术,关注和筛选高效降解微生物,全面建立完善的监控机制以科学评估其潜在风险,确保生物降解地膜适用、安全、高效。

3.2 研发实用性强和生产效率高的番茄残膜回收智能装备

目前,鉴于生物降解地膜应用效果尚不及普通地膜,普通地膜应用回收依然是地膜应用中的关键问题。除了依靠人工回收外,开发高效的残膜回收机器人等智能装备是必然措施。随着人工智能的发展,智能装备开发具有广阔的空间,尤其对保护设施下的精作栽培更具有特殊意义。目前,尚缺乏专门的温室番茄残膜回收智能装备,即使在番茄露天栽培中残膜回收机械的应用也十分有限。因此,

依据不同类型番茄的种植特点,结合现代物联网、大数据技术等新质技术以开发有针对性、自动化和智能化的地膜回收设备已成为重要的研发课题。

3.3 探索完善的番茄种植地膜减量替代技术

地膜减量替代技术是当前农业发展的重要方向之一,不仅可以减少资源浪费和环境污染,还可以促进农业可持续发展。因此,探索完善的番茄种植地膜减量替代技术是建立绿色、生态化番茄种植模式的必然要求。除了应用生物降解地膜外,更有意义的是基于地膜覆盖技术的适应性评价,以积极改革番茄种植农艺措施,探索无膜或少膜栽培技术,实施生物质覆盖,或者利用先进技术控制温度和水肥等,这不仅有助于提高番茄品质、降低成本、提高番茄种植效益,也是确保番茄食品安全性和实现农业资源生态循环利用的必然选择。

参考文献

- [1] KUMAR M V, SHEELA A M. Effect of plastic film mulching on the distribution of plastic residues in agricultural fields[J]. Chemosphere, 2021, 273: 128590.
- [2] 邹小阳. 残膜量对土壤水分运移和温室番茄生长的影响[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2017.
- [3] 刘思民. 纳塑料与塑料添加剂对作物苗期生长和根际行为的联合效应[D]. 江苏无锡:江南大学, 2023.
- [4] 郭琳琳, 郭琛, 王品苏, 等. 纳米塑料与铜复合对番茄种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(2): 80-87.
- [5] 高青海, 陆晓民. 残留地膜对番茄幼苗形态和生理特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(5): 425-429.
- [6] ZOU X Y, NIU W Q, LIU J J, et al. Effects of residual mulch film on the growth and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. Water Air Soil Pollution, 2017, 228(2): 71.
- [7] 杨彩霞. 不同残膜量对番茄生长发育、产量和品质的影响[D]. 太原:太原理工大学, 2021.
- [8] LI Z R, MA J J, SUN X H, et al. Plastic pollution in soil and crops: Effects of film residuals on soil water content and tomato physiology[J]. Agronomy, 2022, 12(5): 1222.
- [9] 张雯宇. 地膜残留对设施番茄土壤水分、产量和水分利用效率的影响[D]. 太原:太原理工大学, 2021.
- [10] 李卓然, 马娟娟, 郑利剑, 等. 地膜残留对设施番茄生长及果实品质的影响[J]. 节水灌溉, 2022(4): 65-70.
- [11] 于婕, 侯贤清. 我国可降解地膜应用现状及发展建议[J]. 现代农业科技, 2024(21): 112-114.
- [12] 王梅洁. 地膜残留对番茄和茄子产量和品质的影响及其降解特性研究[D]. 海口:海南大学, 2022.
- [13] WUFUER R, DUO J, PEI L, et al. Feasibility study on the application of biodegradable plastic film in farmland soil in southern Xinjiang, China-planting tomatoes as an example[J]. Toxics, 2023, 11(5): 467.
- [14] 吴婉晴. 可生物降解微塑料对上海青生理指标及转录代谢的

- 影响研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2023.
- [15] 段一凡. 聚乳酸塑料对植物根际微生物群落的影响及其降解菌的筛选与应用[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [16] LU L, HAN Y, WANG J Y, et al. PBAT/PLA humic acid biodegradable film applied on solar greenhouse tomato plants increased lycopene and decreased total acid contents[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 871: 162077.
- [17] LV Z, MENG X H, LIANG Q W, et al. A biodegradable oxidized starch/carboxymethyl chitosan film coated with pesticide-loaded ZIF-8 for tomato fusarium wilt control[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 259 (2): 129249.
- [18] MERINO D, ZYCH A, ATHANASSIOU A. Biodegradable and biobased mulch films: highly stretchable PLA composites with different industrial vegetable waste[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2022, 14(41): 46920-46931.
- [19] 游诗尧. 新型生物基/纸膜对番茄生长、生理和土壤理化性质的影响研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [20] 贾浩. 水氮耦合对降解膜覆盖滴灌加工番茄耗水及生长特性的影响研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2022.
- [21] 周振鹏. 加工番茄降解膜覆盖磁化水滴灌技术研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2024.
- [22] 胡琪. 地膜残留对农田水土环境的影响及其综合效应评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [23] DI MOLA I, COZZOLINO E, OTTAIANO L, et al. Biodegradable mulching film vs. traditional polyethylene: Effects on yield and quality of san marzano tomato fruits[J]. *Plants-Basel*, 2023, 12(18): 3203.
- [24] STAROPOLI A, DI MOLA I, OTTAIANO L, et al. Biodegradable mulch films and bioformulations based on *Trichoderma* sp. and seaweed extract differentially affect the metabolome of industrial tomato plants[J]. *Journal of Fungi*, 2024, 10(2): 97.
- [25] 王斌, 万艳芳, 王金鑫, 等. PBAT 型全生物降解膜对南疆番茄产量及土壤理化性质的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(5): 640-648.
- [26] 胡伟, 邵华伟, 孙九胜, 等. Mater-Bi 和 PBS 可生物降解膜降解特征及对加工番茄的影响[J]. *北方园艺*, 2014(22): 36-38.
- [27] COZZOLINO E, SEKARA A, POKLUDA R, et al. Plant growth, yield, fruit quality and residual biomass composition of tomato as affected by mulch type[J]. *Acta Horticulturae*, 2020, 1271: 465-472.
- [28] SERRANO-RUIZ H, MARTIN-CLOSAS L, PELACHO A M. Impact of buried debris from agricultural biodegradable plastic mulches on two horticultural crop plants: Tomato and lettuce[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856(2): 159167.
- [29] 常兵磊. 微塑料与 Cd 复合暴露对蔬菜生长和 Cd 积累的影响[D]. 济南: 济南大学, 2024.