主持人：葛成军　**Open Access**

热带露地西瓜生产中全生物降解地膜的应用筛选

刘明柯#，张琼宽，马春花，吴乾兴，李　帅，杨小锋*
（海南大学 南繁学院（三亚南繁研究院），海南 三亚 572025 中国）

摘　要：为解决传统聚乙烯地膜在热带地区露地西瓜生产中引发的“白色污染”问题，筛选可替代 PE 地膜的全生物降解地膜。本试验以聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯（PBAT）、木质素、聚乳酸（PLA）、聚碳酸亚丙酯（PPC）等为原料的 9 种生物降解地膜为试验材料，以普通 PE 地膜为对照（CK），探究全生物降解地膜在土壤水热效应、西瓜生长、产量品质及降解特性上的应用效果。结果表明，供试降解地膜在保温保墒及促进西瓜生长方面的效果与 CK 无显著差异。其中，F6 处理（PBAT+PPC，0.012 mm）在提升果实边糖含量（9.53%）方面表现最佳；F9 处理（PBAT+PLA，0.012 mm）的单瓜质量（6.80 kg）与单位面积产量（136.04 t·hm^{-2}）表现稳定，且略优于 CK。地膜降解观测显示，在所有全生物降解地膜中，F9 处理的降解速率最慢，仅次于 CK。在成本方面，F6 和 F9 的总成本（约 4 100 元·hm^{-2}）较 CK（约 3 900 元·hm^{-2}）提高约 5.1%。综上，厚度为 0.012 mm 的 F6 与 F9 地膜因其降解周期与西瓜生育期匹配良好，能在关键生育期维持稳定的土壤环境，具备在热带地区露地西瓜生产中替代传统 PE 地膜的推广潜力。

关键词：全生物降解地膜；露地西瓜；降解速率；产量
中图分类号：S651　**文献标志码：**A　**文章编号：**1674 − 7054(2026)06 − 1077 − 10
刘明柯, 张琼宽, 马春花, 等. 热带露地西瓜生产中全生物降解地膜的应用筛选[J]. 热带生物学报(中英文), 2026, 17(6): 1077−1086.　DOI: 10.15886/j.cnki.rdswxb.20250121　CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswxb.20250121

农用地膜已发展成为仅次于种子、化肥和农药的第四大农业生产资料[1]，中国是世界上最大的农膜生产国和使用国[2]。农用地膜具有提高地温、保持土壤水分、抑制杂草生长、延长作物生长周期、提早作物成熟时间及提高作物产量的作用[3−6]。目前应用的地膜多以化学纤维为原料，主要成分为聚乙烯或聚氯乙烯，在田间可长期残留且几十年内难以降解[7]，残留的地膜在土壤中会干扰作物根系发育、使土壤逐渐板结、肥力下降，最终导致作物产量的下降[8−10]。传统聚乙烯（Polyethylene，PE）地膜在自然环境中难以降解，随着使用量的持续增加，残留地膜在土壤中不断累积，导致“白色污染”问题日益严峻[11−13]。这些地膜在使用后极易因耕作、紫外线照射等影响而破碎[14]，即便进行人工回收，仍有大量碎片残留于土壤中，会破坏土壤结构，影响作物根系生长，对农业可持续发展构成威胁。推广应用可降解地膜是解决当前白色污染，实现农业绿色可持续发展的重要途径[15]。目前市面较为主流的是光降解地膜、氧化生物降解地膜以及全生物降解地膜[16,17]。

全生物降解地膜是以生物基可降解材料为主要原料，在自然条件下可被微生物完全分解，最终生成二氧化碳和水，对环境无任何污染[6]。全生物降解地膜作为治理农田白色污染的理想材料，已在玉米、大蒜、萝卜、花生等作物生产中得到广泛应用，具有节省劳力、降低污染及生态环保等优势[18]。关于可降解地膜在西瓜（*Citrullus lanatus*）上的应用研究相对较少，且现有成果多集中在设施大棚栽培上[19]，对于可降解地膜在露地西瓜上的研究仍较为有限。热带地区冬季白天气温较高，但昼夜温差较大。地膜覆盖能够起到稳定根区土壤温度的作用，为根系创造一个温湿度相对稳定的生长环境。而且在高温高湿的环境下非常有利于杂草的生长，还容易滋生病虫害。地膜覆盖能有效减

CC BY 4.0
收稿日期：2025−09−13　**修回日期：**2026−01−05
基金项目：三亚科技“繁星”专项科研项目（2024KJFX031）
#**第一作者：**刘明柯（2000—），男，海南大学南繁学院 2023 级硕士研究生。E-mail: 2286710990@qq.com
*__通信作者：__杨小锋（1977—），男，研究员。研究方向：设施园艺与循环农业。E-mail: 994469@hainanu.edu.cn

少土壤水分蒸发，抑制杂草萌发和生长，保障西瓜在关键生育期的水分供应，这对于稳定产量和品质至关重要。

本研究在海南省三亚市露地环境下，开展多种材质与厚度的全生物降解地膜的田间比较试验，旨在评估全生物降解地膜在促进西瓜生长发育、提升产量与品质方面的作用，并监测其降解过程。通过与传统 PE 地膜覆盖进行对比，分析两者在土壤理化性质、西瓜生长表现、产量水平及降解特性上的差异，力求筛选出适合热带地区露地西瓜种植的全生物降解地膜材料，从而为其在露地西瓜生产中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 供试的全生物降解地膜 F1 ~ F9 由山东清田塑工有限公司提供，普通 PE 地膜购于三亚市崖州区农资店。地膜详细信息见表 1。供试西瓜品种为“麒麟无籽”，先育种后进行瓜苗移栽。该西瓜生育期 90 d，抗性强、中心可溶性固形物含量高。PBAT（聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯）是一种新型的生物降解塑料，具备良好的生物降解性。木质素是一种天然存在的复杂高分子聚合物，是植物细胞壁的重要成分，但其降解速率通常非常缓慢。PPC（聚碳酸亚丙酯）是一种以二氧化碳和环氧丙烷为原料合成的环保材料，因其具有光降解和生物降解性，同时还具有优良阻隔氧气和水性能。PLA（聚乳酸）是一种典型的生物基降解塑料，由可再生的植物资源所提取淀粉原料制成，在高温高湿环境中，其水解过程会显著加快。

表 1 不同生物降解地膜基本情况

Tab. 1 Basic situation of different biodegradable mulch films

处理 Treatment	产地 Locality	材质 Material	厚度/mm Thickness	颜色 Color	参考价格/（元·kg^{-1}） Reference price
CK	海南	PE	0.025	银黑色	8.5
F1	山东	PBAT+木质素	0.008	黑色	32
F2	山东	PBAT+木质素	0.010	黑色	32
F3	山东	PBAT+木质素	0.012	黑色	32
F4	山东	PBAT+PPC	0.008	黑色	32
F5	山东	PBAT+PPC	0.010	黑色	32
F6	山东	PBAT+PPC	0.012	黑色	32
F7	山东	PBAT+PLA	0.008	黑色	32
F8	山东	PBAT+PLA	0.010	黑色	32
F9	山东	PBAT+PLA	0.012	黑色	32

注：不同材质地膜密度不同。

Note: Different materials have different film densities.

1.2 试验设计 试验于 2024 年 12 月—2025 年 4 月在三亚市育才生态区海南万禾保生物科技有限公司榴莲种植基地进行，采用随机区组设计，将 9 种地膜按材料（PBAT+木质素、PBAT+PPC、PBAT+PLA）和厚度（0.008、0.010、0.012 mm）进行归类并形成 3×3 组合，外加 CK（PE, 0.025 mm）共设置 10 个处理，每个处理重复 3 次，每个小区面积为 12 m^2。种植密度为株距 40 cm，行距 60 cm，周围设置保护行。地膜均为垄上覆膜，宽幅均为 1.2 m，比植株行距大 1 倍。整地后于 2024 年 12 月 21 日覆膜，12 月 25 日瓜苗移栽，2025 年 2 月 17 日授粉。西瓜采用三蔓整枝，每株留 2 个瓜，采用人工授粉，挂牌标记授粉日期。所有处理水肥管理均一致，病虫害草防治措施同当地常规管理。

1.3 项目测定 1）土壤温度及含水量：供试西瓜的整个生育过程可划分为 4 个阶段——伸蔓期（SS），一般出现在定植后约 20 d；开花坐果期（FS），大约在定植后 45 d；膨瓜期（ES），约为定植后 60 d；成熟期（MS），通常在定植后 90 d 左右。这 4 个时期开展测定指标：采用 GSP-8G 型温湿度联网监测仪（江苏精创电气股份有限公司）测量不同处理 10 cm 和 20 cm 土层温度和含水量，选择晴天 08:00、14:00、18:00 对土壤温度进行记录；土壤含水量在晴天 08:00—09:00 测定。

2）植物生长指标：每小区内随机抽取 5 株植株，并挂牌加以标识，3 次重复，于膨瓜期（ES，定植后 60 d）用钢卷尺直接测定主蔓长、茎粗、叶绿素及叶面积，计算平均值。

3）产量及果实特性：果实成熟后按小区采摘，将该小区内所有植株的产量相加作为该小区总产量，并依据小区面积换算出单位面积产量。每个处理从同一授粉日期果实中随机抽取 15 个，测定

平均单瓜质量及果实的纵径和横径, 并据此计算果形指数(纵径/横径)。果实心糖和边糖含量使用爱宕 PAL-1 型便携式数显糖度计测定。

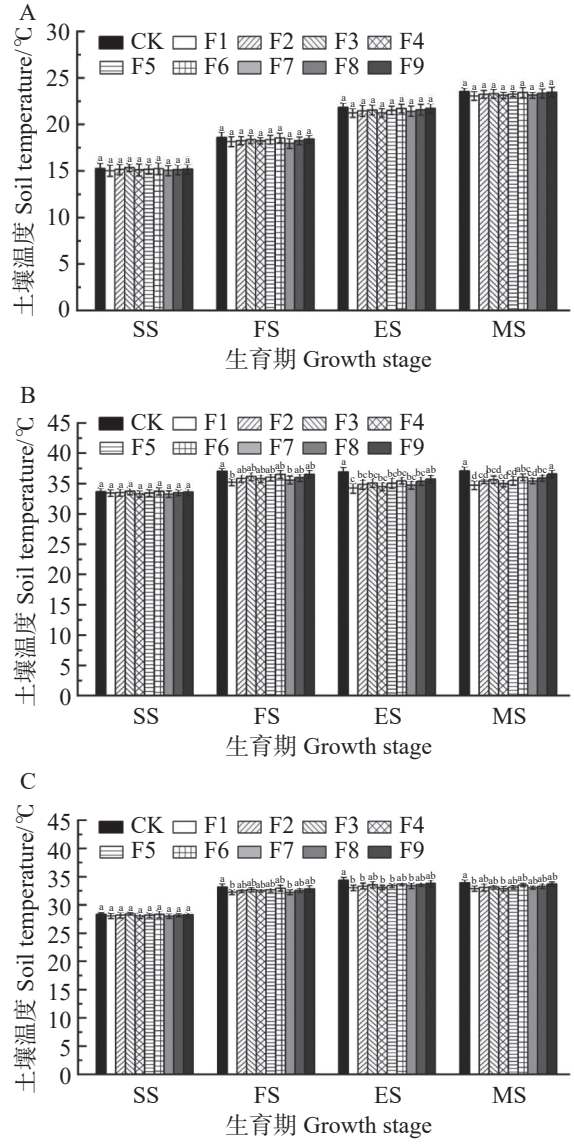
(4)地膜降解速率观测: 每个处理选取 1 个固定点进行长期监测, 记录各处理进入诱导期、开裂期、大裂期、碎裂期及无膜期的时间。从覆膜后第 28 天起, 使用钢尺对地膜产生的裂缝进行测量并记录, 每隔 5 d 观测一次, 直至收获结束。各阶段定义如下: 阶段 A(诱导期), 指垄面地膜每 1 m 范围内出现 3 处及以上裂缝、裂缝宽度≤2 cm 的时间; 阶段 B(开裂期), 指裂缝宽度>2 cm 且<20 cm 的时间; 阶段 C(大裂期), 指裂缝宽度≥20 cm 的时间; 阶段 D(碎裂期), 指垄(畦)面地膜破碎, 且最大残片面积≤16 cm^2 的时间; 阶段 E(无膜期), 指垄(畦)面基本看不到地膜残留的时间。

1.4　数据分析　使用 Microsoft Excel 2021 进行数据整理; 利用 SPSS v27 对数据进行相关性分析(图基检验); 借助 Origin 2024 绘制图形。

2　结果与分析

2.1　生物降解地膜对土壤温度及含水量的影响

由图 1 和图 2 可知, 随着土层深度的增加, 土壤温度也逐渐下降。总体而言, 各处理下土壤温度日变化规律基本一致, 均表现为 14:00 最高, 08:00 最低, 18:00 出现回落。值得注意的是, 20 cm 土层温度日变化振幅显著弱于 10 cm 土层。从“同材料不同厚度”角度分析, 对于 PBAT+木质素组(F1/F2/F3), 随着厚度从 0.008 mm 增至 0.012 mm, 地膜在膨瓜期后期的完整性保持得更好。具体表现为在 14:00 的高温时段, 与 08:00 的土壤温度相比, F3 处理的温度升幅较高, 因此与 F1 相比, F3 在 14:00 与 CK 的土壤温差也更小。在 PBAT+PPC 组(F4/F5/F6)中, 0.012 mm 的 F6 在整个生育后期, 尤其是 14:00 时段的温度保持性均优于同组更薄的 F4 与 F5, 甚至在伸蔓期的 08:00 与 14:00, 其土壤温度略高于 CK。同样, 在 PBAT+PLA 组(F7/F8/F9)中, 更厚的 F9 在绝大多数测定时期与时间点上, 其保温效果与 CK 最为接近。从“同厚度不同材料”的横向对比来看, 在 0.008 mm 厚度水平上, 3 种材料(F1/F4/F7)均因降解较早而在膨瓜期 14:00 出现明显的午后温度回落。在 0.010 mm 厚度水平上, F5 与 F8 的保温效果与 CK 接近, 但至



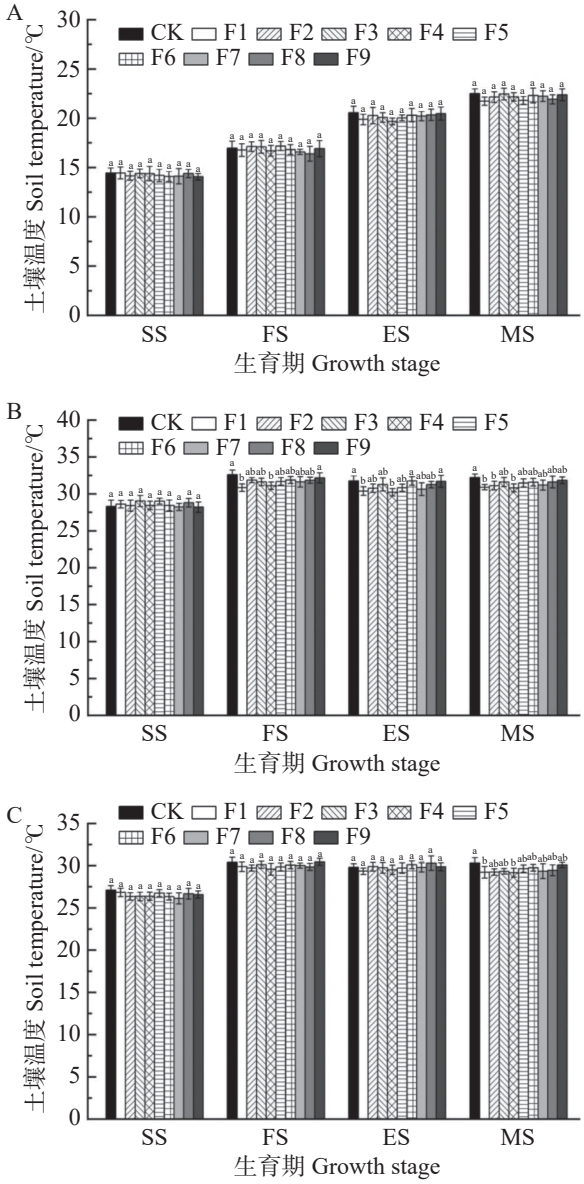
A. 8:00土壤温度; B. 14:00土壤温度; C. 18:00土壤温度。
A. Soil temperature at 8:00; B. Soil temperature at 14:00; C. Soil temperature at 18:00.

图 1　不同地膜覆盖对 10 cm 土壤温度的影响
Fig. 1　Effects of different mulch films on soil temperature at 10 cm soil depth

注: 不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference (P < 0.05), the same below.

成熟期 14:00, 其 20 cm 土层温度(31.48 ℃, 31.62 ℃)略低于 CK(32.22 ℃)。在 0.012 mm 的最优厚度下, 不同材料间的细微差异依然存在, F6 与 F9 在生育后期维持午后土壤温度的能力优于 F3。

试验结果表明, 在西瓜生长前期, 生物降解地膜由于材质完整, 对膜下土壤有较好的保温效果, 且与传统 PE 地膜的保温效果较为接近。在整个生育期 08:00, 各个地膜处理间温度无明显变化, 是由于该时间段为一天中温度较低、相对湿度较

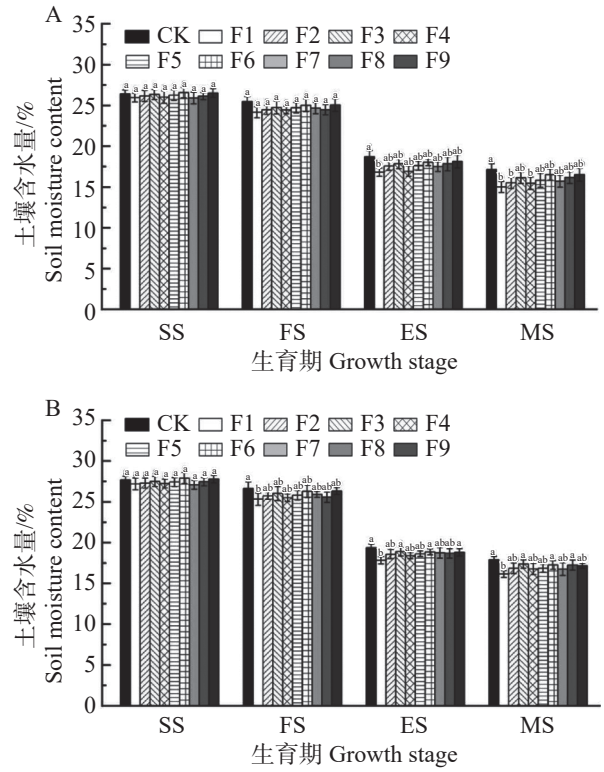


A. 8:00 土壤温度；B. 14:00 土壤温度；C. 18:00 土壤温度。
A. Soil temperature at 8:00; B. Soil temperature at 14:00; C. Soil temperature at 18:00.

图 2 不同地膜覆盖对 20 cm 土壤温度的影响
Fig. 2 Effects of different mulch films on soil temperature at the 20 cm soil depth

大的时段，此时太阳辐射还未能给地表土壤带来充足的热量，致使不同地膜处理之间的温差较小，差异不显著。综合来看，20 cm 土层温度波动较 10 cm 更平滑、差异更小。

由图 3 可知，各处理下土壤含水量的变化规律一致，且 20 cm 土层的含水量波动幅度显著弱于 10 cm 土层，体现了深层土壤对表层水分变化的缓冲作用。其中，在伸蔓期 8:00，F6 与 F9 的 10 cm 土层含水量（26.57%、26.53%）甚至略高于 CK（26.44%）；同一阶段 20 cm 土层时，F6 与 F9（27.91%、27.81%）含水量仍高于 CK（27.70%），但差异未达显著水平。这表明在生育前期，厚度为 0.012 mm 的全生物降解地膜能够提供与 PE 地膜相当的保墒效果。然而，随着生育进程推进，地膜材质的耐降解性成为主导保水效果的关键。至开花坐果期时，所有降解地膜的 20 cm 土层含水量均低于 CK（26.66%），其中 PBAT+木质素组最薄的地膜 F1（25.33%）与 CK 相比存在显著差异，标志其功能已进入衰退期。进入水肥需求高峰的膨瓜期，地膜保水效应的差异进一步扩大，F9 在 10 cm 土层含水量（18.12%）较 CK（18.72%）下降最少。这凸显出降解速率最慢的 F9 在西瓜需水关键期维持土壤水分方面的优势。相反，至成熟期，厚度较小的 F1、F2 和 F4 即使在清晨蒸散较弱的 08:00，其土壤含水量也显著低于 CK，表明其保墒功能已因过早降解而严重受损。材料类型和厚度共同决定了保水效应的持续性。在相同厚度下（0.012 mm），PBAT+PLA（F9）和 PBAT+PPC（F6）的后期保水能力显著优于 PBAT+木质素（F3），证明材质的耐降解性更



A. 10 cm土壤含水量；B. 20 cm土壤含水量。
A. Soil moisture content at 10 cm soil depth; B. Soil moisture content at 20 cm soil depth.

图 3 不同地膜覆盖对土壤含水量的影响
Fig. 3 Effects of different mulch films on soil moisture content

为重要。而在相同材料组内, 增加厚度(如从 0.008 mm 增至 0.012 mm)能有效延缓功能衰退。这表明耐降解性材料并搭配适当厚度, 是确保降解地膜保水效应覆盖作物全生育期的关键。

结果表明, 全生物降解地膜在西瓜生长前中期能够提供与传统 PE 地膜相当的保墒效果, 但西瓜生育后期的土壤含水量显著低于前中期, 这主要是因为在西瓜生育后期, 为降低裂瓜率并提升果实风味, 灌溉量会相应减少。在西瓜生长初期, 土壤水分的损失以蒸发为主, 地膜覆盖能够有效阻隔土壤与大气间的水分交换, 为幼苗生长提供有利环境。然而, 在西瓜生长中后期, 随着生物降解地膜的降解破损, 其保温保湿作用减弱, 而传统 PE 地膜仍保持较好的完整性, 因此土壤含水量高于生物降解地膜。

2.2　生物降解地膜对西瓜生长的影响　由表 2 可知, 地膜的材质和厚度较 CK 对西瓜生长差异不显著, 并未产生显著抑制作用, 且厚度递增并未导致西瓜生长受显著影响。在主蔓长方面, PBAT+PLA 组的 F9 表现出最高的主蔓长, 为 314.67 cm, 各处理间的差异不显著, PBAT+PLA 组的生长表现略优, 依次为 F9(314.67 cm)> F8(313.13 cm)> F7(309.80 cm)。与 CK 相比, PBAT+PLA 组的 F7 和 F8 在茎粗方面呈显著下降趋势, 其中 F7 较 CK 减少 7.23%, F8 较 CK 减少 8.98%, 其余降解地膜对茎粗的影响不明显。叶绿素方面除 F1 较 CK 显著下降 5.33% 外, 其余地膜与 CK 之间差异不显著。这表明生物降解地膜对西瓜叶绿素的影响较小, 整体上维持在与对照组相近的水平。关于叶面积方面, PBAT+PLA 组的 F9 在所有组别中表现最佳, 为 477.22 cm^2, 其次为 F7 的叶面积, 平均为 475.84 cm^2; F4 的叶面积最低, 为 471.44 cm^2, 表明地膜材料和厚度对西瓜叶面积的影响较为有限。综合来看, F9 在西瓜各项生长指标上与 CK 相比差异不大, 且在某些生长指标上略有优势, 能够基本满足生产需求, 可以代替传统 PE 地膜使用。然而, 较小厚度的 F1 和 F5 在部分生长指标上存在不足, 还有待进一步改善。

2.3　生物降解地膜对西瓜产量及果实性状的影响

由表 3 可知, 不同类型地膜处理较 CK 对西瓜果实纵径、横径和果形指数均未表现出显著差异。从“同材料不同厚度”角度分析, 增加厚度对果实糖度积累显示出积极的促进作用, 在 PBAT+木质素组中, 随着厚度从 0.008 mm(F1)增加至 0.012 mm (F3), 心糖含量由 10.93% 提升至 11.32%, 与 CK (11.64%)的差距缩小。这一规律在 PBAT+PPC 组和 PBAT+PLA 组中更为明显: 最厚的 F6(PBAT+PPC)处理在心糖(11.68%)与边糖(9.53%)含量上均达到组内最高值, 且与 CK 最为接近; 同样, 最厚的 F9(PBAT+PLA)处理的心糖(11.62%)和边糖

表 2　不同地膜覆盖对西瓜生长指标的影响

Tab. 2　Effects of different mulching materials on watermelon growth

处理 Treatment	主蔓长/cm Main vine length	茎粗/mm Diameter of Stem	叶绿素/(mg·g^{-1}) Chlorophyll	叶面积/cm^2 Area of leaf
CK	(312.27±4.76)^{a}	(8.02±0.39)^{a}	(61.70±2.71)^{a}	(472.28±6.64)^{a}
F1	(309.33±5.41)^{a}	(7.78±0.66)^{ab}	(58.41±3.07)^{b}	(471.85±6.77)^{a}
F2	(308.20±3.90)^{a}	(7.92±0.32)^{a}	(62.00±2.62)^{a}	(472.96±7.58)^{a}
F3	(313.30±7.04)^{a}	(7.81±0.47)^{ab}	(61.03±3.82)^{a}	(472.65±5.63)^{a}
F4	(308.87±5.24)^{a}	(7.97±0.33)^{a}	(63.21±3.64)^{a}	(471.44±5.62)^{a}
F5	(311.80±6.47)^{a}	(7.64±0.57)^{abc}	(60.73±2.97)^{a}	(471.87±7.64)^{a}
F6	(314.07±6.38)^{a}	(7.75±0.27)^{ab}	(61.21±2.60)^{a}	(471.49±7.65)^{a}
F7	(309.80±7.70)^{a}	(7.44±0.49)^{bc}	(61.61±2.85)^{a}	(475.84±6.53)^{a}
F8	(313.13±4.41)^{a}	(7.30±0.58)^{c}	(61.41±2.87)^{a}	(473.24±6.91)^{a}
F9	(314.67±7.93)^{a}	(7.78±0.51)^{ab}	(61.17±2.54)^{a}	(477.22±6.61)^{a}

注: 不同字母表示处理间差异显著(P<0.05), 下同。

Note: Different letters indicate significant differences (P < 0.05) among treatments, similarly hereinafter.

(9.41%)含量也优于同组较薄处理，其数值与CK(11.64%、9.47%)几乎持平。从“同厚度不同材料”的横向比较来看，在最优的 0.012 mm 厚度水平上，材料间的差异得以清晰体现。PBAT+PPC材质的 F6 处理在糖度积累上表现最佳，其心糖与边糖含量(11.68%、9.53%)均为所有处理中的最高值。相比之下，同厚度的 F3(PBAT+木质素)和F9(PBAT+PLA)糖度指标略低，但三者与 CK 均无显著差异，显示出 0.012 mm 厚度的降解地膜在保障果实品质上的稳定性。在较薄的厚度水平(0.008 和 0.010 mm)上，各材料处理与 CK 的差距相对较大，且材料间差异不明显。

表 3　不同地膜覆盖对西瓜果实特性的影响

Tab. 3　Effects of different mulch films on fruit characteristics of watermelon

处理 Treatment	纵径/cm Longitudinal diameter	横径/cm Transverse diameter	果形指数 Fruit index	心糖/% Central sugar content	边糖/% Edge sugar content
CK	(23.61±1.44)^{a}	(23.35±1.29)^{a}	(1.01±0.04)^{a}	(11.64±0.72)^{a}	(9.47±0.70)^{a}
F1	(22.79±1.07)^{a}	(23.17±0.79)^{a}	(0.98±0.06)^{a}	(10.93±0.68)^{a}	(8.77±0.76)^{a}
F2	(23.16±1.01)^{a}	(23.43±1.28)^{a}	(0.99±0.03)^{a}	(11.46±0.72)^{a}	(9.31±0.74)^{a}
F3	(23.75±0.84)^{a}	(23.39±0.96)^{a}	(1.02±0.03)^{a}	(11.32±0.67)^{a}	(9.08±0.68)^{a}
F4	(23.36±1.21)^{a}	(23.22±0.94)^{a}	(1.01±0.03)^{a}	(11.16±0.84)^{a}	(8.84±0.72)^{a}
F5	(22.99±0.92)^{a}	(23.61±0.89)^{a}	(0.97±0.03)^{a}	(11.44±0.74)^{a}	(9.28±0.61)^{a}
F6	(23.43±0.77)^{a}	(23.88±1.03)^{a}	(0.98±0.02)^{a}	(11.68±0.72)^{a}	(9.53±0.68)^{a}
F7	(23.22±1.13)^{a}	(23.13±0.88)^{a}	(1.00±0.03)^{a}	(11.55±0.94)^{a}	(9.35±0.90)^{a}
F8	(23.47±0.84)^{a}	(23.84±0.88)^{a}	(0.98±0.02)^{a}	(11.28±0.81)^{a}	(8.93±0.80)^{a}
F9	(23.59±0.86)^{a}	(24.07±1.13)^{a}	(0.98±0.03)^{a}	(11.62±0.58)^{a}	(9.41±0.80)^{a}

由图 4 可知，多数全生物降解地膜在西瓜产量指标上无显著差异，但不同材质与厚度处理的表现存在明显梯度。从“同材料不同厚度”分析，地膜厚度对产量表现出明显正向效应。在 PBAT+PLA 组(F7/F8/F9)中，单瓜质量与单位面积产量随厚度增加而递增，其中 F9(0.012 mm)单瓜质量和单位面积产量最高，分别达到 6.80 kg 和 136.04 t·hm^{-2}，较 CK(134.17 t·hm^{-2})提升了 1.39%，在所有处理中表现最优。PBAT+PPC 组(F4/F5/F6)也呈现类似规律，单位面积产量随厚度增加从 127.76 t·hm^{-2}(F4)提升至 130.57 t·hm^{-2}(F6)。PBAT+木质素组(F1/F2/F3)的产量随厚度增加而略有上升，但其绝对产量水平整体低于其他 2 组材料。从“同厚度不同材料”比较看，在 0.012 mm 厚度水平上，PBAT+PLA 组的 F9 在产量上表现较好，其单位面积产量(136.04 t·hm^{-2})略高于同厚度 PBAT+木质素组的

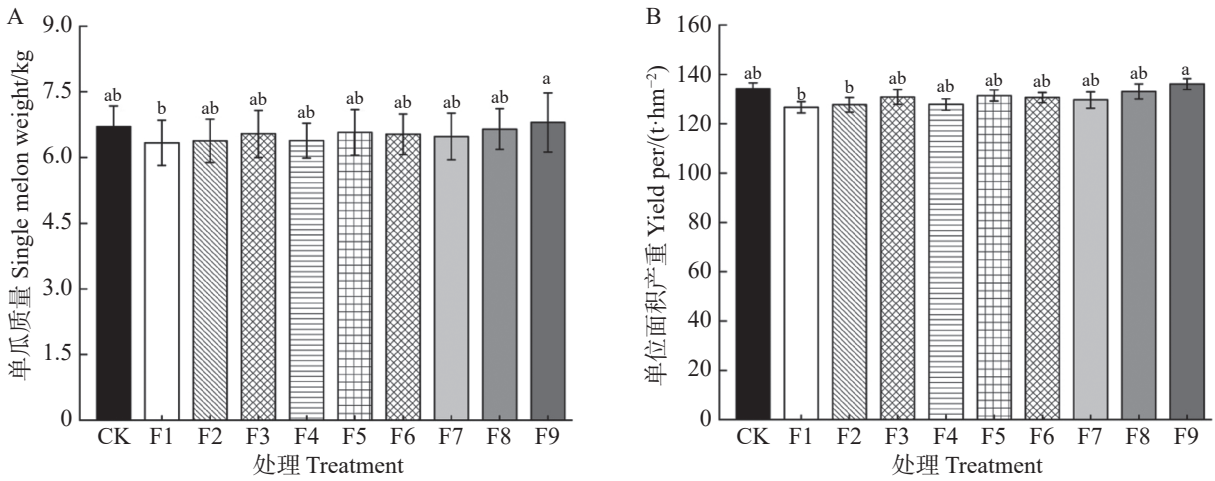


图 4　不同地膜覆盖对西瓜单瓜质量(A)及单位面积产量(B)的影响

Fig. 4　Effects of different mulch films on single fruit weight (A) and yield per unit area (B) in watermelon

F3(130.84 t·hm^{-2})和 PBAT+PPC 组的 F6(130.57 t·hm^{-2}), 且较 CK(134.17 t·hm^{-2})提高了 1.39%。在 0.008 mm 和 0.010 mm 厚度水平上, 不同材料处理间的产量差异均未达显著水平。与 CK 相比, F9 在所有产量指标上均无显著差异, 且在数值上略有提升, 表明其具备替代传统 PE 地膜的能力。

2.4　不同地膜生育期内的降解观测情况　由表 4 可知, 全生物降解地膜在西瓜生育时期内的降解过程表现为覆膜后 28 d 开始出现裂纹, F9(PBAT+PLA, 0.012 mm)诱导期最长达 50 d, 即 1 m 长的地膜出现了 3 处以上≤2 cm 裂缝, 在覆膜后的第 43 天进入开裂期, 即垄面地膜出现宽度>2 cm 且<20 cm 的裂缝; 9 种全生物降解地膜进入大裂期的时间在 58 ~ 101 d, 此时西瓜正处于膨大—成熟期, 生殖生长的关键时期。在覆膜后 79 ~ 120 d, 地膜表面出现网状裂纹, 大部分膜体破碎成小块, 整体已失去韧性, 而 CK 在西瓜全生育期内没有出现明显降解。不同材料的降解速率从快到慢排序为 PBAT+木质素 > PBAT+PPC > PBAT+PLA > PE,不同厚度的地膜降解速率由快到慢依次为 0.008 mm > 0.010 mm > 0.012 mm。因此得出 F9 处理在地膜老化性能方面表现较好。

表 4　不同地膜生育期内的降解观测情况

Tab. 4　Observation of degradation of mulch films during different growth periods

处理 Treatment	诱导期/d Induction period	开裂期/d Dehiscence period	大裂期/d Rupture period	破裂期/d Crushing period
F1	28	43	58	79
F2	31	48	64	87
F3	37	56	76	103
F4	32	50	67	91
F5	36	54	72	99
F6	41	63	85	118
F7	35	54	73	99
F8	42	66	89	120
F9	50	75	101	>120

2.5　不同地膜处理的成本效益分析　由表 5 可知, 供试 9 种全生物降解地膜的市场价格统一为 32 元·kg^{-1}, 用量范围约为 87 ~ 129 kg·hm^{-2}, 相应成本为 2 800 ~ 4 100 元·hm^{-2}。作为对照的普通 PE 地膜价格约为 8.5 元·kg^{-1}, 但由于其材料密度与厚度特性, 用量约为 199.4 kg·hm^{-2}, 成本约为 17 00 元·hm^{-2}。若仅比较地膜购置成本, 全生物降解地膜投入较普通 PE 地膜高出 1 100 ~ 2 400 元·hm^{-2}。然而, 经济效益分析需综合考虑后续管理成本。全生物降解地膜的核心优势在于其无需回收的特性。西瓜收获后, 地膜可随作物残体直接粉碎还田, 进而实现完全降解, 节省了传统 PE 地膜所需的田间捡拾人工。按当地工价计算, 1 hm^2 地大概节约 15 个用工、折算效益 2250 元。综合来看, 全生物降解地膜与普通 PE 地膜之间成本与效益相当, 具备推广价值。

3　讨　论

研究表明, 可降解地膜在土壤保温保墒方面与普通地膜表现基本一致[20−21]。试验结果表明, 10 cm 和 20 cm 土层处土壤温度在 8:00 最低, 14:00 最高, 18:00 出现一定程度回落, 且各地膜处理在 14:00 的温差最大, 而在 8:00 差异较小, 这与李若帆等[22]的研究结论类似。其中 10 cm 土层的温度波动幅度更大, 而 20 cm 土层因其较大的热容, 温度曲线更为平缓、昼夜温差较小。总体而言, 9 种生物降解地膜与 CK 在 10 和 20 cm 深度的土壤温度表现出相似保温效果, 与已有研究相符[23]。从“同材料不同厚度”角度看, 厚度为 0.012 mm 的地膜在午后(14:00—18:00)维持温度能力最强, 表现为降解进程更缓、保温效果也更持久。而“同厚度不同材

表 5　不同地膜经济效益成本比较

Tab. 5　Comparison of the economic benefits and costs of different mulch films

地膜 Plastic mulch	单价/(元·kg^{-1}) Unit price	投入量/(kg·hm^{-2}) Application rate	捡膜费用/(元·hm^{-2}) Cost of plastic film collection	总成本/(元·hm^{-2}) Total cost
普通PE地膜 Conventional PE film	8.5	199.4	2200	3900
全生物降解地膜 Fully biodegradable mulch film	32	87 ~ 129	0	2800 ~ 4100

料”看，PLA 和 PPC 材料在 0.012 mm 厚度下的保温效果更接近传统 PE 地膜，而木质素材料在 0.008 mm 厚度下表现出较快的降解速率，导致午后温度回落较为明显。这一发现表明，随着地膜厚度的增加，增温保墒效应越好[24]。研究表明，降解地膜的保墒效果相比露地栽培具有明显优势，但整体效果略低于普通地膜[25−26]。该试验结果发现，在伸蔓期与开花授粉期，无论是 10 还是 20 cm 土层，各处理的土壤含水量与 CK 的差异不显著，日均土壤水分变化不大，说明地膜覆盖能够减少土壤水分的蒸发，提高土壤的保水能力[27]。然而，随着生育期的进展，膜体逐渐降解破损，部分降解地膜（如 F8）在 10 cm 土层的含水量显著低于 CK。综合来看，降解地膜的保墒优势主要体现在生育前中期，而后期在膜体完整性丧失后，差异逐渐扩大。

研究表明，降解地膜在西瓜产量和品质方面与普通地膜相比差异不大[28]。试验结果显示，在植株生长方面，多数降解地膜的主蔓长、叶绿素含量和叶面积等关键生长指标与 CK 无显著差异，表明其对西瓜的正常生长发育未产生抑制作用，这与吴科生等[29] 的研究结果相似。然而，部分降解地膜（如 F7 和 F8）在茎粗方面上显著低于 CK，茎粗是反映植株营养生长势和机械支撑能力的重要指标，其下降可能与地膜在生育后期降解破损后，对植株基部的物理支撑作用减弱有关。在果实品质方面，生物降解地膜与传统地膜相比，果实的纵径、横径和果形指数没有显著差异，结果与已有研究一致[30]。在决定风味品质的果实含糖量上，F6 和 F9 表现优异，其中 F6 边糖含量为 9.53%，F9 心糖含量为 11.62%。这表明厚度为 0.012 mm 的 F6 与 F9 地膜能通过其优异且持久的保温保墒性能，在西瓜果实膨大与成熟期这一糖分积累的关键阶段，促进同化产物向果实的转运与积累。在西瓜产量方面，F9 的单位面积产量为 136.04 $t·hm^{-2}$，略高于 CK（134.17 $t·hm^{-2}$）。已有研究表明，与生产上常用的 0.008 ~ 0.010 mm 地膜相比，0.012 mm 地膜覆盖有明显的增温保墒效果，提高了作物产量[31]。西瓜果实膨大期对水分胁迫极为敏感，F6 和 F9 通过维持更稳定的土壤水分供应，有效减少水分胁迫对果实膨大的不利影响，保障同化产物向果实的顺畅转运，从而在产量和品质上实现更优解。

降解地膜的分解过程一般可划分为 5 个阶段：诱导期、开裂期、大裂期、破裂期和无膜期[32]。不同材料的降解地膜在各阶段所持续的时间存在差异[33]。试验结果表明，地膜的降解速率同时受材料本性和厚度的双重调控，其排序为 PBAT+木质素 > PBAT+PPC > PBAT+PLA，且在同一材料内，厚度越小，降解越快。这一发现为针对特定作物和特定生育期选择合适的地膜产品提供了直接依据。从地膜覆盖至试验结束，整个试验过程历时 120 d，全生物降解地膜在露地西瓜生长前期能保持良好的完整性，自覆膜后 28 d 开始发生裂解，至 120 d 全生物降解地膜出现网状裂纹。对于西瓜这类生育期较长（90 d 以上）的作物，地膜降解过快会导致其在生长中后期过早失去保墒功能，无法在需水需肥最旺盛的膨瓜期发挥保墒增温作用；而降解过慢则可能引发后续的残膜回收问题[34]。从试验中发现，F6 和 F9 的降解速率最为适中，其在覆膜后 60 d 左右（即西瓜进入膨瓜期时）才开始进入开裂期，直至收获时（覆膜后 120 d）处于大裂期至碎裂期，完美覆盖了西瓜的整个生育周期。

地膜材质与厚度是影响其成本效益的关键[35]。供试全生物降解地膜市场价格（32 元·kg^{-1}）约为 PE 地膜（8.5 元·kg^{-1}）的 3.8 倍。尽管由于材料密度与厚度差异，F6 和 F9 的用量（129 $kg·hm^{-2}$）较 CK（199.4 $kg·hm^{-2}$）减少约 35%，但材料成本仍达到约 4100 元·hm^{-2}，显著高于 CK 约 1 700 元·hm^{-2}，初始成本高出约 2 400 元·hm^{-2}。由于普通 PE 地膜需要回收，后续增加管理成本，所以全生物降解地膜与普通 PE 地膜之间成本与效益相当。虽然 F6 与 F9 单位成本最高，但其优异的农学表现与适中的降解周期共同保障种植收益的最大化。反之，较薄的地膜（如 0.008 mm）初始成本更低，但因过早降解可能导致生育后期保温保墒功能衰退，存在减产风险。因此，选择性价比更高的 F6 或 F9 地膜，是实现经济与环保效益双赢的关键。

尽管本研究可为热带地区露地西瓜生产提供有价值的参考，但仍存在一些局限性。试验仅在单一地点和单一生产季进行，未能涵盖不同气候年份及土壤类型的影响；研究主要聚焦地膜的农学效应，尚未深入评估其长期使用对土壤生态的潜在影响。未来研究需结合多年份、多环境试验及经济性分析，以全面支撑可降解地膜在热带露地西瓜生产中的推广应用。

4　结　论

试验结果表明, 相较于传统 PE 地膜, 供试全生物降解地膜在增温保墒、促植株生长、维持产量与品质等核心农艺性状上无显著差异; F6 改良果实品质优势显著, F9 产量稳定性平稳, 略优于 CK。地膜降解特性受材料类型与厚度共同调控, 厚度控制在 0.012 mm 是平衡功能持续性与适时降解性的关键阈值, 厚度偏小或降解过快会导致作物生育后期保水保温功能衰退。成本分析表明, F6 与 F9 每 hm^2 总成本较 CK 提升约 5.1%, 二者保温保墒性能与降解周期可保障经济效益最大化。厚度 0.012 mm 的 PBAT+PPC(F6)与 PBAT+PLA(F9)全生物降解地膜性能优良, 可增温保墒, 在西瓜全生育周期维持稳定土壤水热环境。因此, F6 与 F9 可作为热带露地西瓜生产的理想环保替代材料, 具备替代普通 PE 地膜推广应用的潜力。

参考文献:

[1] 舒帆. 我国农用地膜利用与回收及其财政支持政策研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.

[2] 张中一, 施正香, 周清. 农用化学品对生态环境和人类健康的影响及其对策[J]. 中国农业大学学报, 2003(2): 73−77. https://doi.org/10.3321/j.issn:1007-4333.2003.02.019

[3] 张俊鹏, 刘祖贵, 孙景生, 等. 不同水分和覆盖处理对土壤水热和夏玉米生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2): 25−28. https://doi.org/10.13522/j.cnki.ggps.2015.02.006

[4] Qin S H, Zhang J L, Dai H L, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 87−94. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.015

[5] 吕敬军, 张贵国, 陈香艳, 等. 不同地膜覆盖栽培对花生经济性状及产量的影响与效益分析[J]. 花生学报, 2010, 39(4): 38−41. https://doi.org/10.14001/j.issn.1002-4093.2010.04.010

[6] 攸学松, 马超, 王广世, 等. 不同生物降解膜在西瓜生产上的应用分析[J]. 蔬菜, 2023(11): 11−15. https://doi.org/10.26924/j.cnki.sczz.2023.11.001

[7] 王亭亭, 李梅, 江伟, 等. 聚乳酸地膜在大棚西瓜种植中的应用研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6): 536−542. https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0140

[8] Liu Y, Huang Q, Hu W, et al. Effects of plastic mulch film residues on soil-microbe-plant systems under different soil pH conditions[J]. Chemosphere, 2021, 267: 128901. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128901

[9] Qi Y L, Ossowicki A, Yang X M, et al. Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 387: 121711. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121711

[10] Qi Y L, Yang X M, Pelaez A M, et al. Macro- and micro- plastics in soil-plant system: effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth[J]. Science of the Total Environment, 2018, 645: 1048−1056. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.229

[11] 胡灿. 新疆典型区域地膜残留污染现状与防控方案[J]. 农业工程技术, 2019, 39(36): 39−45. https://doi.org/10.16815/j.cnki.11-5436/s.2019.36.010

[12] 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. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128590

[13] Bläsing M, Amelung W. Plastics in soil: analytical methods and possible sources[J]. Science of the Total Environment, 2018, 612: 422−435. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086

[14] O'Kelly B C, El-Zein A, Liu X L, et al. Microplastics in soils: an environmental geotechnics perspective[J]. Environmental Geotechnics, 2021, 8(8): 586−618. https://doi.org/10.1680/jenge.20.00179

[15] 张俊丽, 索龙, 景鹏娟, 等. 生物降解地膜的增温保墒及增产效应研究进展[J]. 农业与技术, 2021, 41(15): 113−115. https://doi.org/10.19754/j.nyyjs.20210815030

[16] 朱文博, 姚颜莹, 李琳, 等. 示范推广可降解地膜 治理农田“白色污染”[J]. 当代农机, 2023(10): 69−70. https://doi.org/10.3969/J.ISSN.1673-632X.2023.10.023

[17] 岳翔, 王金宝, 李虹, 等. 基于绿色农业视角的生物可降解地膜现状研究[J]. 农业科技与信息, 2023(3): 90−94. https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6997.2023.03.022

[18] 陈坤梅, 喻春明, 王晓飞, 等. 全生物降解地膜对湖南不同地区果蔬生长的影响[J]. 中国麻业科学, 2024, 46(1):24−31.https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-3532.2024.01.004

[19] 段青青, 张禄祺, 张自坤, 等. 可降解地膜对露地小型西瓜生长及产量的影响[J]. 北方园艺, 2020(14): 18−24. https://doi.org/10.11937/bfyy.20194567

[20] 李仙岳, 彭遵原, 史海滨, 等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 97−103. https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.015

[21] 张杰, 任小龙, 罗诗峰, 等. 环保地膜覆盖对土壤水分及米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 14−19. https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2010.06.003

[22] 李若帆. 不同覆膜条件对春玉米种植的作用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.

[23] 周奕含, 魏宏磊, 于欣志, 等. 不同地膜覆盖对冷凉区玉米田土壤温、湿度和产量的影响[J]. 玉米科学, 2025, 33(12): 111−118. https://doi.org/10.13597/j.cnki.maize.science.20251213

[24] 张靖, 刘强, 邓超超. 河西绿洲玉米免耕连作的地膜厚度适宜性研究[J]. 农业科技与信息, 2023(12): 40−

44. https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-6997.2023.12.011
[25] 李开宇, 肖继兵, 杨宁, 等. 不同可降解地膜对土壤水热变化和玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(5): 194−199. https://doi.org/10.11838/sfsc.1673-6257.18443
[26] 焦坤, 陈殿绪, 侯敬铖, 等. 生物降解膜对土壤物理性状及花生荚果产量的影响[J]. 山东农业科学, 2018, 50(12): 64−67. https://doi.org/10.14083/j.issn.1001-4942.2018.12.013
[27] 李亚珍, 陈志丕, 叶元生, 等. 秸秆带状覆盖对旱地冬小麦旗叶水势及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(2): 197−204. https://doi.org/10.7606/j.issn.1009-1041.2023.02.09
[28] 邵伟强, 马骥驯, 冯玉飞, 等. 全生物降解膜在西瓜生产上的应用试验初报[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(10): 1725−1727. https://doi.org/10.16178/j.issn.0528-9017.20161054
[29] 吴科生, 车宗贤, 卢秉林, 等. 地膜颜色和厚度对玉米生长及产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2020(5): 4−7. https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1463.2020.05.002
[30] 史震伟, 李帅, 易晴, 等. 生物降解地膜覆盖对黄瓜生长发育和光合作用的影响[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(6): 48−51. https://doi.org/10.3969/j.issn.0517-6611.2025.06.012
[31] 丁云鹏, 潘文辉, 龙美, 等. 地膜厚度与揭膜时间对旱作农田春玉米生长及残膜回收的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(8): 1096−1104. https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2481.2022.08.04
[32] 刘姝彤, 张宝时, 金胜利, 等. 不同全生物可降解地膜降解特征及其对马铃薯产量的影响[J]. 中国农技推广, 2019, 35(12): 65−68. https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-381X.2019.12.025
[33] 袁海涛, 于谦林, 王丽红, 等. 可降解地膜降解性能及对棉花生长的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(增刊 1): 347−352. https://doi.org/10.7668/hbnxb.2017.S1.060
[34] 李虹, 马建军, 王金保, 等. 不同地膜厚度对旱地土壤理化性质及玉米生长和残膜回收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2026, 44(2): 212−223.
[35] 张华峰, 余耀波, 张蕾琛, 等. 全生物降解地膜在设施小型西瓜生产中的应用[J]. 湖北农业科学, 2024, 63(S1): 163−167. https://doi.org/10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2024.S1.033

Screening of fully biodegradable mulch films for their application in watermelon production in tropical open fields

Liu Mingke[#], Zhang Qiongkuan, Ma Chunhua, Wu Qianxing, Li Shuai, Yang Xiaofeng[*]
（Nanfan School/Sanya Nanfan Institute, Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China）

Abstract: To address the issue of "white pollution" caused by conventional polyethylene mulch films in open-field watermelon production in tropical regions, fully biodegradable mulch films capable of replacing PE films were screened. Nine biodegradable mulch films made from polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT), lignin, polylactic acid (PLA), polypropylene carbonate (PPC) were employed to mulch the watermelon open fields with conventional PE film as the control (CK) to investigate their application effects on soil water-heat effects, watermelon growth and yield quality, and film biodegradation characteristics. The results indicated that the tested biodegradable films showed no significant difference from CK in terms of heat retention, soil moisture conservation, and promotion of watermelon growth. Of the treatments, Treatment F6 (PBAT + PPC, 0.012 mm) demonstrated the highest fruit edge sugar content (9.53%). Treatment F9 (PBAT+PLA, 0.012 mm) exhibited stable individual melon weight (6.80 kg) and yield per unit area (136.04 t·hm^{-2}), slightly outperforming the CK. Mulch degradation observations revealed that among all the fully biodegradable films, Treatment F9 exhibited the slowest degradation rate, second only to the CK. Regarding costs, the total cost per hm^2 for Treatments F6 and F9 (approximately 4100) increased by about 5.1% compared to CK (approximately 3900). In summary, the 0.012 mm thick films in Treatments F6 and F9 demonstrate promising potential for replacing conventional PE films in open-field watermelon production in tropical regions. Their degradation cycles align well with the watermelon growth period, maintaining stable soil conditions at the critical growth stages.

Keywords: fully biodegradable mulch film; open-field watermelons; degradation rate; yield

(责任编辑:张 瑁)