

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2026.03.005

王超, 王浩天, 陈洁, 等. 生物降解地膜的增温性能及其对渝西丘陵区嫩南瓜产量的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2026, 48(3): 47-58.

生物降解地膜的增温性能及其 对渝西丘陵区嫩南瓜产量的影响

王超¹, 王浩天¹, 陈洁¹, 王春丽², 卞京军²,
张孝君³, 熊万彬³, 黄青丽³, 赵秀兰¹

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业生态与资源保护站, 重庆 401120;
3. 重庆市璧山区现代农业发展促进中心, 重庆 402760

摘要: 为比较不同生物降解地膜在重庆西部丘陵区瓜果类蔬菜栽培中应用的田间适应性, 以不覆膜和聚乙烯(PE)地膜为对照, 采用田间试验, 比较了 3 种黑色生物降解地膜(BS、HB、SH)和 1 种白色生物降解地膜(SHB)垄面的降解情况及其对土壤温度和嫩南瓜产量的影响。结果表明: 4 种生物降解地膜在覆膜 37~66 d 后进入诱导期, 其降解率在 64.27%~82.72%之间, 显著高于 PE 地膜(降解率 7.23%), 且以 SHB 进入诱导期的时间最早, 降解率最高。生物降解地膜的增温效应受地膜颜色、降解程度、作物郁闭度及气象因素的影响。随着作物生育期的推进, BS 和 SH 生物降解地膜的增温效应相较于 PE 地膜呈增高-降低-增高的“U”型变化, 但不同地膜间差异不显著; HB 及 SHB 的增温效应逐渐降低, 其中 SHB 的增温效应在前 30 d 高于 PE 地膜及黑色降解地膜, 之后因其降解及杂草遮阴增强而逐渐降低, 60 d 后不再具有增温效应。地膜覆盖的增温效应在多云天和晴天高于阴天及雨天。土壤日温度变化分析表明, 地膜覆盖可以延迟土壤最低温出现时间, 提高土壤最低温度, 并提高土壤温度最高值及温度日较差, 其变化幅度由大到小依次为 SHB、3 种黑色生物降解地膜和 PE 地膜, 且最低温的变幅大于最高温的变幅, 表明地膜的增温效应与其对热辐射的透过率有关。与 PE 地膜相比, 生物降解地膜覆盖对嫩南瓜产量的影响不显著, 白色生物降解地膜压草效果弱, 建议在渝西丘陵地区瓜果类蔬菜栽培中推广应用黑色生物降解地膜。

关键词: 生物降解地膜; 土壤温度; 嫩南瓜; 产量

中图分类号: S642.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2026)03-0047-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Warming Effects of Biodegradable Mulch Films and Their Influences on the Yield of Tender Pumpkins in the Hilly Area of Western Chongqing

收稿日期: 2025-03-13

基金项目: 农业农村部项目(A120201)。

作者简介: 王超, 硕士研究生, 主要从事土壤污染控制方面的研究。

通信作者: 赵秀兰, 教授。

WANG Chao¹, WANG Haotian¹, CHEN Jie¹,
WANG Chunli², BIAN Jingjun², ZHANG Xiaojun³,
XIONG Wanbin³, HUANG Qingli³, ZHAO Xiulan¹

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. Chongqing Agricultural Ecology and Resource Protection Station, Chongqing 401120, China;

3. Chongqing Bishan District Modern Agricultural Development Promotion Center, Chongqing 402760, China

Abstract: To investigate the field adaptability of different biodegradable mulch films (BMFs) for fruit vegetables cultivation, a field experiment was conducted in the hilly area of western Chongqing. Three black BMFs (BS, HB, SH) and one white biodegradable film (SHB) were tested, with no mulch and polyethylene (PE) mulch film serving as controls. The study investigated film degradation behavior and its effects on soil temperature and the yield of tender pumpkin. The results showed that the four BMFs entered the induction period after 37–66 days of mulching, and their degradation rates ranged from 64.27% to 82.72%, which were significantly higher than that of PE film (7.23%). Among them, SHB entered the induction period earliest and exhibited the highest degradation rate. The warming effect of BMFs was affected by the film color and degradation degree, crop canopy density and meteorological conditions. With the progress of crop growth, the warming effect of BS and SH BMFs relative to the PE mulch films showed a U-shaped trend (increase-decrease-increase), but the differences among films were not significant. In contrast, the warming effect of HB and SHB films gradually declined. Notably, SHB showed a stronger warming effect than both PE film and black BMFs within the first 30 days. However, this effect diminished thereafter due to progressive film degradation and enhanced weed shading, resulting in a complete loss of warming capability after 60 days. The warming effect was more marked on cloudy and sunny days than on overcast and rainy days. The analysis of daily soil temperature changes showed that film mulching delayed the occurrence of the daily minimum temperature, elevated both the minimum and maximum soil temperatures, and increased the diurnal temperature range. These changes decreased in the order of SHB, three black BMFs, and PE mulch film, and the variation in minimum temperature was greater than that in maximum temperature, suggesting that the warming effect is related to the transmittance of thermal radiation. BMFs treatments resulted in no significant differences in the yield of tender pumpkin compared with PE mulch film treatment. As the white BMFs are weak in weed control, it is recommended that black BMFs be applied in the cultivation of fruit vegetable in the hilly area of western Chongqing.

Key words: biodegradable mulch films; soil temperature; tender pumpkin; yield

地膜具有增温、保墒、抑草等功能,在缩短作物成熟周期、提高作物产量和改善作物品质等方面发挥着重要作用,地膜覆盖技术已成为我国最重要的农业技术之一^[1-3]。但当前广泛使用的地膜为低密度聚乙烯膜,其在自然环境中难降解、回收困难,长期高强度使用易导致其在土壤中残留,形成大小不同的塑料碎片或微塑料(直径 ≤ 5 mm的塑料碎片和颗粒),从而破坏土壤结构,影响土壤水分和养分的垂直迁移,导致耕地质量下降,影响作物生长和产量,形成塑料污染,给农田生态系统产生巨大的负面影响^[4],已成为限制农业绿色发展的重要因素。

随着国家绿色农业发展战略的实施,生物降解地膜作为传统塑料地膜的替代品受到广泛关注^[5]。生物降解地膜指的是以聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)、聚乳酸(PLA)、聚丁二酸丁二醇酯(PBS)等聚酯类物质为原料制作,在自然环境中可被微生物降解为水、二氧化碳等简单物质,从而有效避免传统 PE 地膜因难以降解而导致的地膜残留污染问题^[6]。但是,受作物种类、覆膜方式、灌水量和气候条件等因素

的影响,生物降解地膜在不同区域的降解性能不同,其在增温保墒和提高作物产量方面的效应也不一样^[7]。如在玉米^[8]、棉花^[9]、马铃薯^[10]、番茄^[11]等农作物中的田间应用表明,生物降解地膜具有良好的增温保墒效果,在改善作物生长环境、提高作物产量方面与常规PE地膜功效相当,在一定程度上可以替代常规PE地膜推广应用^[12-13]。研究还表明,生物降解地膜还能避免作物生长后期因常规地膜覆盖导致的地温过高而引起的作物减产^[14]。但也有研究发现,生物降解地膜在增温保墒效果和提早作物成熟方面不及常规PE地膜^[15]。因此,通过大田试验评估不同区域的降解特征及其应用效果是生物降解地膜在该区域成功应用的前提。但关于生物降解地膜在重庆西部(渝西)丘陵地区蔬菜栽培中的应用研究还很少。

土壤温度是保障作物生长发育最重要的条件之一^[16],关系着作物能否正常出苗、正常生长及作物产量和质量的优劣。地膜覆盖通过增强对太阳辐射的吸收达到增温作用^[17]。增温效应是衡量地膜覆盖功效的重要指标之一,比较不同生物降解地膜覆盖条件下土壤温度的变化特征及其影响因素,有助于阐明生物降解地膜覆盖功效及其作用机制。渝西地区为典型的低山丘陵地区,土壤肥沃,水热资源丰富,现代农业较为发达。该区域夏季以种植茄瓜果类等大宗蔬菜为主,其中嫩南瓜为主要的瓜果蔬菜之一,具有重要的经济价值和药用价值,在长江流域广泛栽培,且在重庆种植面积呈逐年增加的趋势^[18]。南瓜也是地膜覆盖种植的作物之一^[19]。本研究采用大田试验,通过比较不同企业生产的生物降解地膜的降解性能、增温效应和嫩南瓜产量差异,探讨生物降解地膜在渝西丘陵区嫩南瓜栽培中应用的可行性,以期地为地膜的科学使用提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于2022年3—7月在重庆璧山区八塘镇国家现代农业园区的伟正蔬菜基地进行,该基地地形为丘陵,海拔258 m,属亚热带湿润季风气候区,年平均气温18.0℃,年平均降雨量1 064.7 mm。根据璧山历史天气查询网站(<https://lishi.tianqi.com/bishan/index.html>)获得,试验期间的降雨量为774.82 mm,平均气温为23.3℃(图1)。

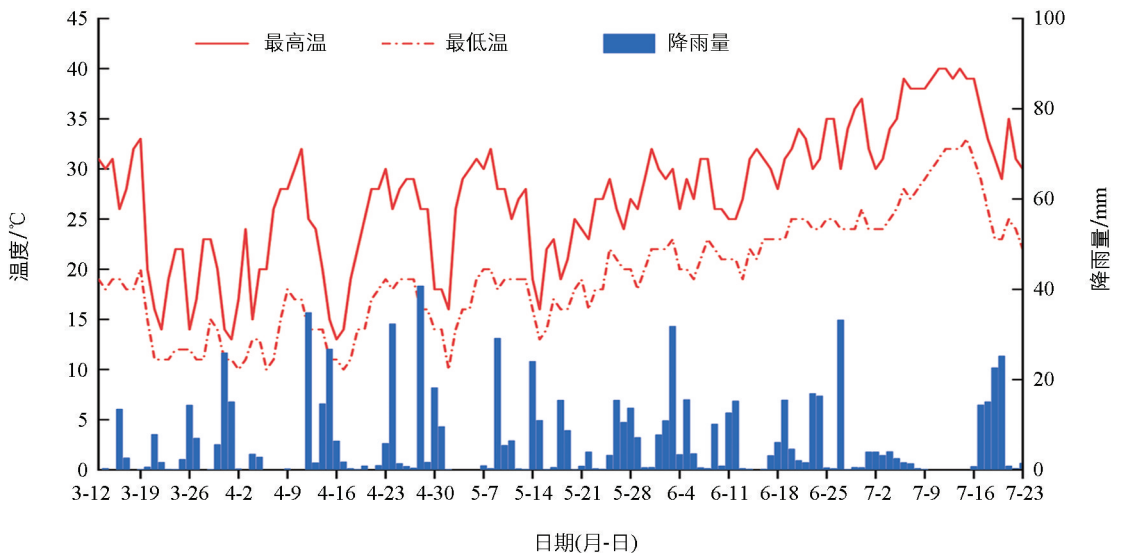


图1 试验地3—7月气温及降雨量

该基地种植的蔬菜主要有南瓜、茄子、四季豆、黄瓜、包菜、花菜、儿菜、莴笋等。试验地土壤属侏罗纪沙溪庙组岩层发育的中性紫色土。0~20 cm 耕层土壤性质如下:pH值6.60,有机质16.85 g/kg、全氮1.26 g/kg、全磷1.42 g/kg、全钾4.78 g/kg、无机氮11.66 mg/kg、速效磷92.15 mg/kg、速效钾230.87 mg/kg,质地为黏壤质。

1.2 试验设计

试验共设6个处理,分别为裸地(CK,不覆膜)、常规聚乙烯塑料地膜(PE)、3种黑色生物降解地膜(分

别记为 BS、HB、SH)和 1 种白色生物降解地膜(SHB)。其中, 3 种黑色生物降解地膜分别购于国内 3 家生物降解地膜生产企业, 白色生物降解地膜与 SH 地膜来源于同一生产企业, 常规聚乙烯塑料地膜(PE)为银黑色, 由当地农户提供。生物降解地膜主要成分为 PBAT 及 PBAT/PLA 共混体系, 厚度为 0.01 mm, 宽度 120 cm。试验重复 3 次, 随机排列, 试验区域面积约 600 m²。

嫩南瓜品种为一串玲, 采用起垄搭架栽培, 垄高 10 cm, 垄宽 100 cm, 沟宽 30~40 cm。覆膜当天破膜移栽, 苗龄为 2 叶 1 心。移栽时间为 2022 年 3 月 15 日, 移栽后用细土将膜口盖严, 行距 1.4 m, 株距 70 cm, 种植密度约 10 200 株/hm²。水肥、灌溉及其他田间管理措施与当地大田一致。

1.3 分析测试指标与方法

1.3.1 地膜降解情况测定

地膜垄面的降解情况采用目测和固定框拍照相结合的方法进行观测^[20]。即在每个小区中央设观测点, 放置大小为 50 cm×50 cm 的观测框, 拍照记录地膜降解情况, 同时观测试验区域其他处地膜的裂纹及裂缝大小、破碎程度等, 并参照杨惠娣等^[21]的方法对地膜的降解情况进行分级(表 1)。地膜的观测频率为覆膜后前 30 d, 每 10 d 观测 1 次; 覆膜后 31~75 d, 每 5 d 观测 1 次; 之后每 10 d 观测 1 次, 如遇下雨可适当调整。

表 1 垄(畦)地膜降解时期及其分级依据

阶段	诱导期(A)	开裂期(B)	大裂期(C)	碎裂期(D)	无膜期(E)
评价标准	垄(畦)出现多处(每延长 3 处以上)≤2 cm 自然裂缝或孔洞	膜出现 2~20 cm 自然裂缝或孔洞(直径)	垄(畦)面地膜出现≥20 cm 自然裂缝	地膜柔韧性尽失, 并出现碎裂, 最大地膜残片面积≤16 cm ²	垄(畦)面基本不见地膜残片

地膜降解率测定: 测产结束后, 在每个试验区域随机选择 3 个样点, 量取膜面长度 1 m, 取出其中可见的地膜及其碎片, 洗净, 在阴凉处晾干后称重, 根据地膜重量损失量计算地膜降解率。计算公式如下:

$$M = (M_0 - M_1) / M_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: M 为地膜降解率(%); M_0 为覆膜前地膜质量(g); M_1 为收获后回收地膜质量(g)。

1.3.2 土壤温度测定

采用 HOBO-U21 水下温度记录仪记录每个处理土壤 10 cm 处的土壤温度, 记录时间间隔为 1 h, 土壤日均温为当日 24 个监测数据的平均值, 记录时间为 2022 年 3 月 14 日—7 月 11 日, 共 120 d(含首尾)。

1.3.3 作物产量及性状测定

在每个试验区域划定 25 株(约 25 m²)植株, 做好标记, 在南瓜果实长到适合销售时(0.4~0.5 kg)进行收获称重, 记录产量, 汇总同一试验区域多次收获的重量, 折合成总产量。收获计产时间为 2022 年 5 月 7 日—6 月 26 日。

1.4 数据处理与分析

数据计算采用 Excel 2019 进行, 方差分析和不同处理间差异的多重比较采用 SPSS 20.0 软件进行, 图形绘制采用 Origin 2021 进行, 显著性水平设为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 地膜降解情况

随着地膜覆盖时间的延长, 不同地膜的破损情况存在一定差异(表 2)。其中, PE 地膜在覆膜后 87 d 出现微小孔洞, 进入诱导期, 但试验结束时膜面仍未出现≥2 cm 孔洞或裂纹, 未进入开裂期。而生物降解地膜逐渐降解, 覆盖一段时间后表面出现大小不同的裂纹、孔洞或裂缝, 随着时间推移, 这些裂纹、孔洞或裂缝不断加大。根据表 1 的划分标准, 生物降解地膜进入诱导期、开裂期、大裂期和碎裂期出现的时间分别为 37~66、54~94、72~107 和 84~127 d, 所有地膜均未到无膜期。

4 种生物降解地膜中, 进入诱导期的时间以 SHB 处理最早, SH 处理最晚, 进入开裂期的时间也以

SHB处理最早,BS处理最晚。试验结束后,生物降解地膜的降解率在64.27%~82.72%之间,远高于PE地膜(降解率为7.23%),其中,生物降解地膜降解率由大到小依次为SHB、HB、BS、SH。

表2 不同地膜的降解时期及降解率

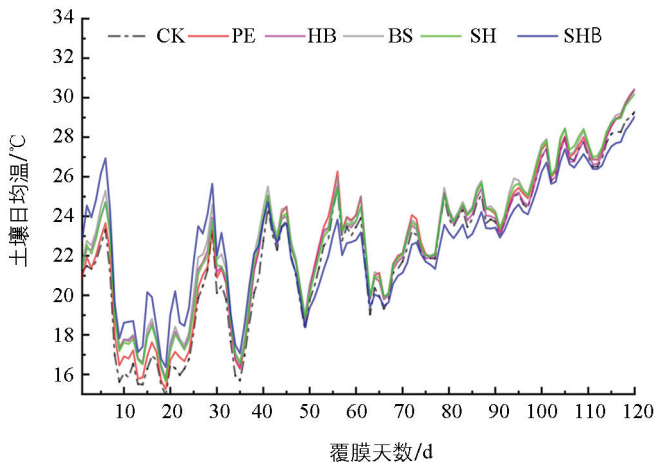
处理	诱导期(A)	开裂期(B)	大裂期(C)	碎裂期(D)	无膜期(E)	降解率/%
PE	87	—	—	—	—	7.23
HB	54	72	86	100	—	75.31
BS	60	94	107	127	—	67.51
SH	66	84	107	127	—	64.27
SHB	37	54	72	84	—	82.72

注:—表示地膜未进入该阶段。

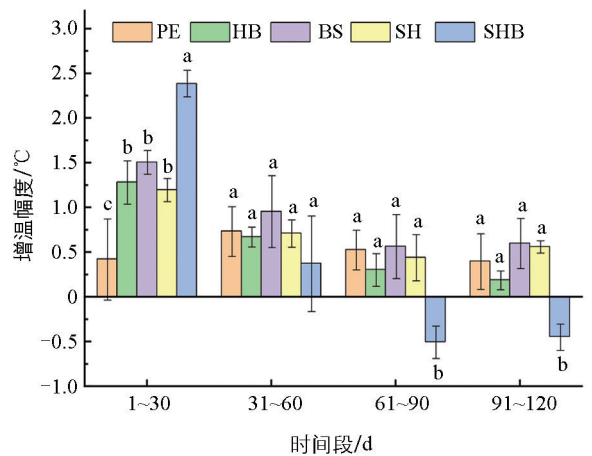
2.2 地膜覆盖对土壤温度的影响

2.2.1 土壤日均温度的动态变化

整个生育期,所有处理土壤日均温随气温呈波动性变化(图2a),但各覆膜处理的增温效果存在不同。其中,PE、HB、BS、SH和SHB处理土壤日均温较裸地(CK)分别提升0.53、0.60、0.90、0.72和0.49℃,与PE相比,3种黑色生物降解地膜的增温效果更好,白色生物降解地膜整体较弱。将覆膜时间分成1~30、31~60、61~90和91~120d共4个时间段,各时间段地膜的增温效应见图2b。与CK相比,覆膜1~30d,PE地膜、3种黑色生物降解地膜和SHB处理土壤日均温分别提高0.4、1.2~1.5和2.4℃,增温效果生物降解地膜显著高于PE地膜($p < 0.05$),且以SHB处理效果最显著,黑色生物降解地膜间差异无统计学意义($p > 0.05$);覆膜31~60d,覆膜处理日均温分别提高0.73、0.67~0.95、0.37℃,与PE相比,BS增幅略高,HB和SH相近,SHB降低,但不同覆膜处理间差异无统计学意义($p > 0.05$);覆膜61~90d和91~120d,PE地膜处理日均温分别提高0.52℃和0.39℃,3种黑色生物降解地膜处理分别提高0.30~0.56℃和0.19~0.60℃,与PE地膜相比,增温效果BS略高,HB略低,SHB则分别降低0.50℃和0.44℃。即地膜的增温效应PE地膜在31~60d时最佳,生物降解地膜在覆膜前30d效果最佳,且以白色降解地膜增温幅度最大。随着覆膜时间延长,HB和SHB的增温效果降低,BS和SH处理在61~90d时达最低值,90d后又略有提高,呈“高-低-高”“U”字型变化。总体上,整个生育期黑色生物降解地膜的增温效应与PE地膜相当或更好,能将土壤温度保持在一个较高水平,而白色生物降解地膜在60d后不再具有明显增温效果。



a. 不同覆膜处理下土壤日均温变化



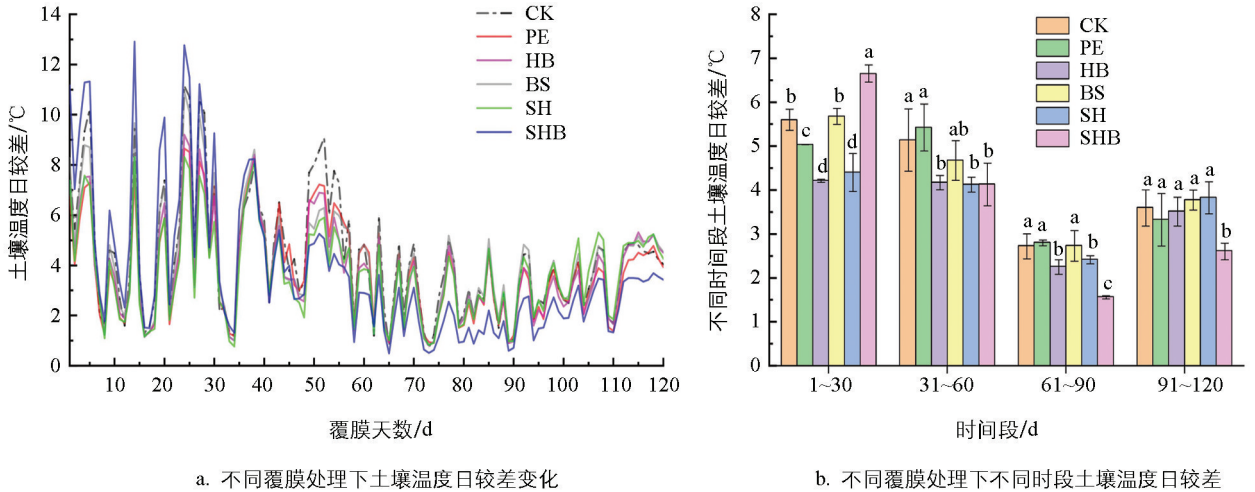
b. 不同覆膜处理下土壤增温幅度

不同小写字母表示不同时间段内不同地膜增温效果差异有统计学意义($p < 0.05$)。

图2 不同类型地膜覆盖对土壤温度的影响

2.2.2 土壤温度日较差的动态变化

土壤温度的日较差为 1 天中温度最大值与最小值的差值。整个生育期(图 3a), CK、PE、HB、BS、SH 和 SHB 处理土壤温度日较差分别为 0.71~11.15、0.90~8.65、0.80~9.20、0.77~10.93、0.81~8.32 和 0.49~12.91 °C; 平均值分别为 4.29、4.24、3.52、3.96、3.72 和 3.79 °C, 变异系数分别为 56.02%、52.19%、52.99%、53.67%、50.21%和 76.73%。即土壤温度日较差的变异以 SHB 处理最大, 其次为 CK, PE 地膜及 3 种黑色生物降解地膜覆盖处理的变异相近, 且均低于对照组。表明白色生物降解地膜覆盖土壤温度变化更剧烈, 而黑色生物降解地膜对土壤温度的波动具有一定的减缓作用。



不同小写字母表示不同时间段内不同地膜保温效应差异显著($p < 0.05$)。

图 3 不同地膜覆盖下土壤温度日较差及其变化

不同时间段地膜覆盖处理土壤温度日较差变化见图 3b。随着覆膜时间延长, 土壤温度日较差呈“降低—升高”的趋势变化, 在 61~90 d 时达到最低值, 90 d 后有所升高。与 CK 相比, 不同处理各时段日较差的变化不同。覆膜 1~30 d, PE、HB 及 SH 覆膜处理日较差差异有统计学意义($p < 0.05$), BS 处理差异无统计学意义($p > 0.05$), SHB 差异有统计学意义($p < 0.05$); 覆膜 31~60 d, 日较差除 PE 略有增加外, 其余地膜覆盖处理均降低, 其中 HB、SH 与 SHB 处理下降幅度差异有统计学意义($p < 0.05$); 覆膜 61~90 d, 日较差表现为 PE、BS 差异无统计学意义($p > 0.05$), HB 及 SH、SHB 差异有统计学意义($p < 0.05$); 覆膜 91~120 d, 日较差 3 种黑色降解膜处理略高于 PE, 但差异无统计学意义($p > 0.05$), SHB 差异有统计学意义($p < 0.05$)。总体看, PE 除前 30 d 显著降低日较差外, 其余时段对日较差影响差异无统计学意义($p > 0.05$); BS 对土壤日较差影响差异无统计学意义($p > 0.05$), 而 HB 与 SH 在覆膜后前 90 d 均能降低土壤日较差, 差异有统计学意义($p < 0.05$), 90 d 后, 各处理地膜对日较差均差异无统计学意义($p > 0.05$), 但 SHB 除覆膜前 30 d 外, 均能降低土壤日较差, 差异有统计学意义($p < 0.05$)。

2.2.3 不同天气下的土壤温度日变化

基于历史气象数据, 在 3 月 12 日—4 月 10 日期间选择典型天气, 研究不同天气条件下地膜覆盖对土壤温度日变化的影响。此阶段地膜未进入诱导期, 作物处于苗期, 遮阴效果弱, 能较好反映不同地膜的增温性能。选择的典型天气日应在该日前后天气无剧烈变化。如图 4 所示, 晴天(4 月 8 日)、多云天(3 月 28 日)、阴天(3 月 23 日)和雨天(3 月 31 日)地膜处理土壤温度分别增加 2.45 ± 1.06 、 2.23 ± 1.05 、 2.02 ± 0.44 和 1.04 ± 0.36 °C。4 种天气条件下, 各处理土壤温度均经历了“下降—上升—下降”的正弦曲线型变化, 但不同处理的曲线特征值存在一定差异。晴天, CK 处理谷值在 7:00 处, 覆膜处理谷值时间略有滞后, 集中在 8:00—9:00 之间, SHB、3 种黑色生物降解地膜和 PE 地

膜土壤温度谷值较CK分别提高约3.37、2.26~2.52和1.52℃;峰值除PE及SH处理延至18:00外,其余处理均在17:00出现,其大小PE及SH处理分别低0.69℃和0.35℃,SHB、BS及HB分别提高4.16、1.74和0.30℃,日较差依次为SHB,CK与BS处理,HB、PE及SH处理。多云天(3月28日),各处理土壤温度谷值和峰值出现时间分别为8:00和17:00,SHB、3种黑色生物降解地膜和PE地膜的谷值较CK分别提高2.72、2.16~2.37和1.60℃,峰值PE处理降低0.26℃,SHB和3种黑色生物降解地膜分别提高6.19℃和(1.17~2.38)℃,日较差SHB最高,其次为3种黑色生物降解地膜处理,PE处理相对较低;阴天(3月23日),土壤温度各覆膜处理谷值出现时间与晴天一致,峰值出现时间除SH处理外均在17:00,SHB、3种黑色生物降解地膜和PE处理谷值较CK分别提高1.82、1.58~1.75和1.09℃,峰值的变化分别为3.02、0.91~1.60和0.32℃,日较差SHB处理最高,其次为CK和BS处理,PE处理最低;雨天,土壤温度日变化比较复杂,土壤温度谷值出现时间因地膜的不同在8:00~12:00之间,整体日变化幅度较小,未表现出明显单一峰值特征,与CK相比,SHB、3种黑色生物降解地膜和PE地膜谷值分别提高1.34、1.06~1.10和0.14℃,峰值的变化分别为1.27、0.53~0.66和-0.10℃,日较差以CK最高(1.57℃),其次为SHB(1.50℃),PE最低。总体看,地膜的增温效应在晴天和多云天最为明显,雨天最弱。地膜覆盖能延缓土壤温度达到最低温度的时间,提高土壤最低温度,对土壤最高温度的影响因地膜类型不同而异。

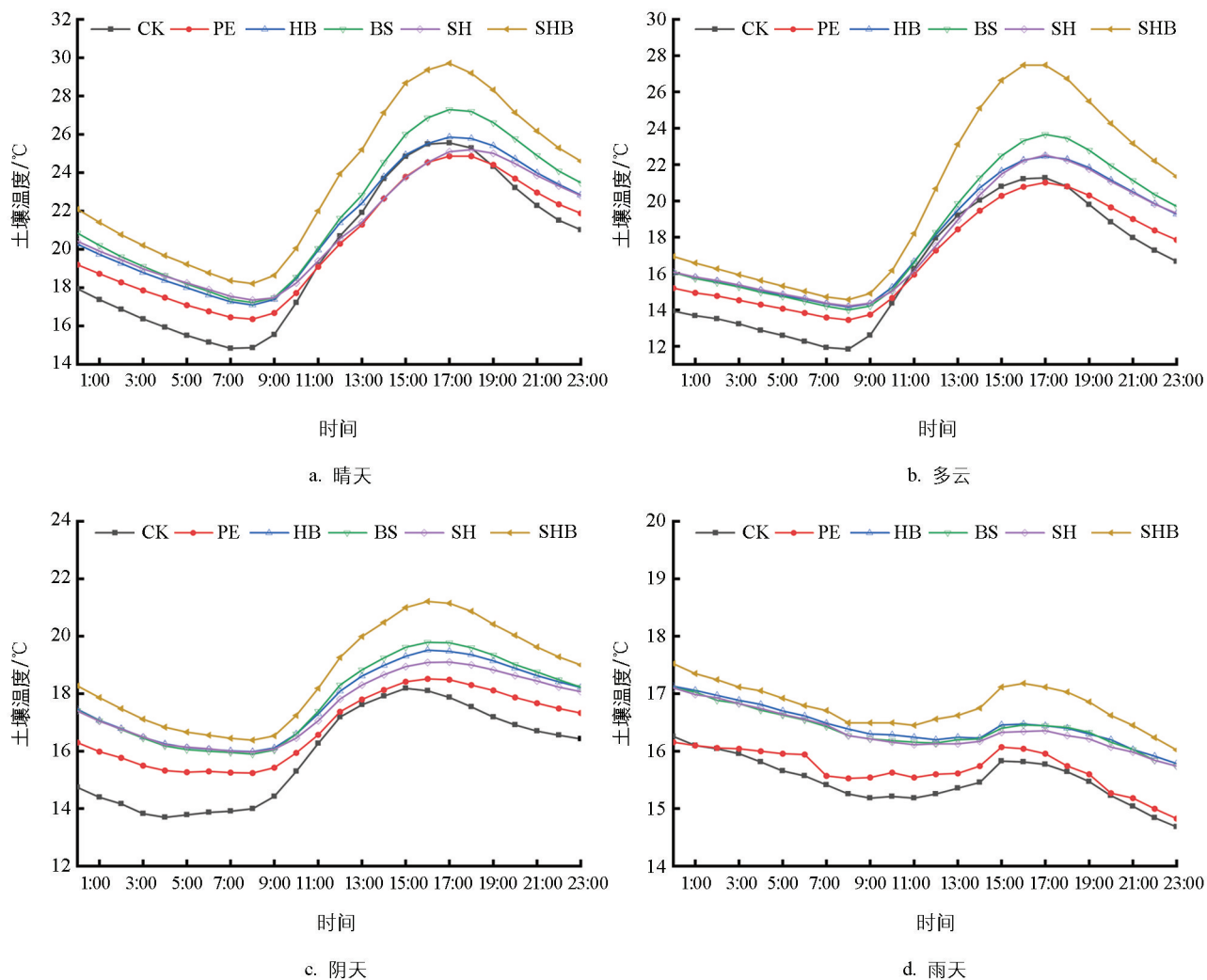


图4 不同天气条件与地膜覆盖下土壤温度的日变化

2.3 不同地膜覆盖对嫩南瓜产量及经济效益的影响

汇总多次收获的南瓜产量,折算后不同处理嫩南瓜的产量见表 3。本研究嫩南瓜的产量在 $(21\ 078 \pm 2\ 325) \sim (26\ 232 \pm 2\ 925)$ kg/hm^2 之间。与 CK 相比,不同地膜处理的增产幅度在 5.6%~24.5% 之间,5 种覆膜处理的增产幅度以 HB 处理最高,SHB 处理最低,但不同地膜处理间的差异无统计学意义($p > 0.05$)。

根据嫩南瓜每公顷产量,按当年 2.0 元/kg 价格计算每公顷效益。假设正常种植条件下各处理整地、施肥和田间管理的成本一致,不同处理间的差异仅在地膜购置与回收、杂草去除方面,与裸地相比,覆膜处理增加的收益见表 3。与产量的变化一致,3 种黑色生物降解地膜覆盖增加的收益高于 PE 地膜,以 HB 处理最明显,而 SHB 处理增加的收益低于 PE 地膜。

表 3 不同地膜覆盖对种植嫩南瓜产量及经济效益的影响

处理	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	单价/ ($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总效益/ ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)	地膜成本/ ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)	除草成本/ ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)	地膜回收成本/ ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)	相比如对照收益变化/ ($\text{元} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	21 078.3b	2	42 156.6	0	2 400	—	—
PE	22 653.4ab	2	45 306.8	1 080	—	1 200	3 270.2
HB	26 232.4a	2	52 464.8	3 375	—	—	9 333.2
BS	23 964.1ab	2	47 928.2	3 375	—	—	4 796.6
SH	23 692.5ab	2	47 385.0	3 375	—	—	4 253.4
SHB	22 264.6ab	2	44 529.2	3 375	—	—	1 397.6

注:不同小写字母表示不同处理下南瓜产量的差异有统计学意义($p < 0.05$),嫩南瓜当年单价按 2.0 元/kg 计;PE 地膜和生物降解地膜分别按 90 和 135 kg/hm^2 计,单价分别按 12 和 25 元/kg 计;除草和地膜回收分别按每公顷地 30 和 15 个劳动力计,每个劳动力 80 元。

3 讨论和结论

3.1 讨论

3.1.1 生物降解地膜的降解特性

生物降解地膜的降解时间和降解程度不仅受其组成材料的影响,还与气候、作物等多方面条件有关^[22],因而不同条件下获得的结果不一。王艺君^[23]在宁夏的试验表明,生物降解地膜在 40 d 进入诱导期,作物收获后降解率为 41.71%;党宇腾^[24]在陕西黄土高原的研究发现,覆膜 60 d 左右生物降解地膜进入诱导期,表面出现细小裂纹,试验结束后降解率为 12.2%~18.5%;苏海英等^[25]在新疆也观察到,以 PBAT 型生物降解地膜 50~65 d 进入诱导期,番茄收获后降解面积达 60%。本研究中的 3 种黑色生物降解地膜在 54~64 d 进入诱导期,降解率为 64.27%~75.31%,进入诱导期的时间与上述研究的结果相近,但表现出更好的降解性能,这可能与本试验地湿度和温度较高有关,而且由于不同企业的聚合物成分、配比及添加剂种类和数量不同,导致 3 种黑色生物降解地膜的降解时间和降解率也有一定差异。相比黑色生物降解地膜,白色生物降解地膜进入诱导期的时间(37 d)更早,降解率(82.72%)更高,这与其热辐射强和光透射率更高,有利于自身的光氧化和热氧化降解有关^[26],也与其增温效应明显提高从而增强了环境中的微生物活性,促进了地膜的生物降解有关^[27]。此外,由于透光性好,白色生物降解地膜覆盖为杂草生长提供了良好的水、热、光条件,旺盛杂草的穿刺作用加快了白色生物降解地膜的裂解。

3.1.2 生物降解地膜的增温效应及影响因素

地膜覆盖通过改变土壤热通量,进而影响土壤的温度^[28]。地膜对土壤温度的增减效应与其对热量

的吸收、保留潜能及降解程度有关,并受地膜材料性质(如组成、颜色、厚度等)、作物遮蔽程度、气象条件等因素的影响^[29]。本研究中,0~30 d生物降解地膜的增温效果好于PE地膜,其中,白色生物降解地膜显著好于黑色降解地膜,而3种黑色生物降解地膜间的差异不显著,表明在本研究条件下相比材质,生物降解地膜的颜色对增温效果的影响更大。相比黑色降解地膜,白色降解地膜的增温效应更明显,这与其热辐射强、光透射率更高,有更多的热量进入土壤有关^[30]。随着覆膜时间延长,生物降解地膜逐渐降解,增温效应降低,但因太阳辐射增加,PE保持了较好的增温效应,黑色生物降解地膜与PE的差异变小。60 d后植物生长旺盛,叶片的遮挡效应增强,导致3种黑色生物降解地膜的增温效应与PE地膜差异不显著;但作物生长后期(覆膜90 d后),植株长势变弱,遮光效应减弱,残留的生物降解地膜与土壤表面有较多的接触,BS及SH仍具有与PE地膜相当的增温效果^[31],整体呈阶段性变化,局部表现为“高-低-高”的“U”字型特征。尽管HB的增温效应随嫩南瓜的生长逐渐降低,但总体上3种黑色生物降解地膜的增温效应与PE地膜相当或更好,这与其他研究者在玉米^[32]、甜瓜^[33]、马铃薯^[34]等作物上的结果在总体趋势上一致。白色生物降解地膜的增温效果在30 d后高于PE地膜,60 d后不再具有明显的增温效应,这与其降解时间早、降解程度高有关,也与其覆盖下密集的杂草对太阳辐射的遮挡作用较强有关。土壤温度变化是土壤随太阳辐射变化而吸收或释放热量的过程^[35]。通过土壤温度的日变化能更好分析生物降解地膜增温效应的发生机制。本研究中,受太阳高度角变化的影响,各处理土壤温度的日变化均呈“降低-升高-降低”的正弦形变化,这与其他研究者的结果一致^[36]。地膜覆盖能改变土壤热量的输入和输出,进而影响土壤温度的谷值和峰值出现的时间及其大小^[37]。本研究中,PE覆膜后前30 d能显著降低日较差,BS在覆膜31~60 d土壤日较差略有降低,而HB与SH在覆膜后前90 d均能降低土壤日较差,而SHB除覆膜前30 d显著增高外,其余时间均显著降低。表明地膜覆盖下土壤日较差的变化受覆盖时间及地膜类型的影响。为明确不同地膜对热量吸收和释放的差异,研究了苗期不同天气下土壤温度的增温效果及日变化。本研究中,增温效果晴天和多云天优于阴天和雨天,结果与杨世佳等^[38]的研究一致,但本研究表明,在4种天气条件下,增温效果由高到低依次为白色生物降解地膜、黑色生物降解地膜和PE地膜,与其报道的雨转阴天气白色地膜增温幅度比黑色地膜更加明显的结果不同,其原因有待进一步研究。

本研究中,与对照相比,地膜覆盖能延缓土壤温度最低值出现的时间,提高土壤最低温,且4种天气条件下的增幅由高到低依次为白色降解地膜、黑色降解地膜和PE地膜。土壤温度峰值出现的时间除生物降解地膜在阴天和雨天延迟外,其余变化不明显;土壤温度峰值除PE地膜在晴天、多云天及雨天降低外,其余时间峰值的增幅及日较差的变化趋势与生物降解地膜一致。总体看,在苗期及覆膜早期阶段生物降解地膜的增温效应较PE地膜更好,这与其具有较高的透射率、能吸收更多太阳辐射从而提高温度峰值有关^[39],其中白色生物降解地膜表现尤为明显。

3.1.3 生物降解地膜对嫩南瓜产量的影响

地膜覆盖通过改善土壤水热状况,影响作物生长进程及养分吸收,最终引起作物产量变化^[40]。目前关于生物降解地膜与常规地膜增产效果的比较研究,存在低于、相近及较高3种不同的结果。如Gu等^[12]在陕西黄土高原为期3年的田间试验显示,生物降解地膜覆盖较PE地膜覆盖油菜的平均产量低5.8%;Sun等^[41]在山东的试验表明,生物降解地膜与传统PE地膜处理花生的产量相近;王梅洁^[42]在海南的试验也表明,生物降解地膜覆盖下番茄产量比常规PE地膜高8.95%。造成上述差异的原因可能与不同地膜引起的水热条件或养分利用状况的变化有关。如邓路等^[43]发现,PE地膜、白色生物降解地膜和黑色生物降解地膜处理的增温保墒效果在玉米生育前期差距较小,对玉米产量影响不大。翟勇全等^[44]报道,生物降解膜覆盖在提升玉米产量、促进干物质积累和氮素吸收利用方面与普通地膜覆盖效果相近。Yang等^[45]发现,

适当降解速率的生物降解地膜通过影响土壤水分和温度,调节土壤 TN 和 NO^- 含量,使马铃薯产量较 PE 地膜提高。程万莉等^[46]报道,生物降解地膜的降解过程与其增温性能变化基本一致,满足了马铃薯前期生长所需的温度条件,后期较低的土壤温度延缓了植株衰老,延长了干物质积累的时间,进而提高了马铃薯产量。本研究中,相较于露地,地膜覆盖提高了嫩南瓜的产量,但与 PE 地膜相比其增产效果差异无统计学意义,说明在本试验条件下温度不是限制嫩南瓜产量的一个主要因素。但是,由于该区域早春易出现低温、幼苗易受冷害的情况,仍需地膜覆盖以提高土壤温度,维持根系活性,使嫩南瓜平稳度过幼苗期,缓解幼苗生长受到抑制的风险。本研究还发现,白色生物降解地膜在前期增温效果十分明显,但其产量较 CK 差异无统计学意义,这可能与其降解速率过快、增温保墒效果减弱有关,也可能是其促进杂草生长,大量杂草与作物争夺养分,导致嫩南瓜养分吸收不足,从而影响了其增产效果^[15]。鉴于本研究区域属温暖湿润的亚热带气候,杂草极易生长,从减轻地膜残留和除草成本方面考虑,建议在嫩南瓜栽培上推广应用黑色生物降解地膜。

3.2 结论

1) 白色生物降解地膜进入诱导期的时间和降解率均高于黑色生物降解地膜。

2) 随着覆盖时间延长,SH 和 BS 黑色生物降解地膜的增温效应呈“增高-降低-升高”的“U”型变化,增温效应与 PE 地膜相当或更好,而白色生物降解地膜的增温效应降低,60 d 后不再具有明显的增温效果,即地膜的增温效应因降解程度和作物遮蔽效应的增加而降低。相较于地膜材料,在本研究条件下地膜颜色较其材质对增温效果影响更大。此外,晴天和多云天的增温效果优于阴天和雨天。生物降解地膜因其对热辐射具有较高的透射率,较 PE 地膜有更好的增温效应,特别是白色生物降解地膜。

3) 3 种黑色生物降解地膜覆盖增加的收益高于 PE 地膜,以 HB 处理最明显,而 SHB 处理增加的收益低于 PE 地膜。

4) 生物降解地膜覆盖提高了土壤温度,但并未显著提高嫩南瓜的产量,从压草及降低地膜残留的角度出发,建议使用黑色生物降解地膜替代传统 PE 地膜。

参考文献:

- [1] KOSKEI K, MUNYASYA A N, WANG Y B, et al. Effects of Increased Plastic Film Residues on Soil Properties and Crop Productivity in Agro-Ecosystem [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 414: 125521.
- [2] 贺阳剑,江长胜,张文晓,等. 地膜和生物炭对菜地土壤剖面温室气体的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2025, 47(5): 141-153.
- [3] 宋稳锋,王志远,吴心瑶,等. 不同保水剂及覆盖材料对西南旱作农田土壤特性和油菜生长的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(3): 88-99.
- [4] 巩文雯,王甲辰,董文涛,等. 基于文献计量的全球生物降解地膜研究进展与热点分析 [J]. *土壤通报*, 2024, 55(1): 254-264.
- [5] WANG K, MIN W, FLURY M, et al. Impact of Long-Term Conventional and Biodegradable Film Mulching on Microplastic Abundance, Soil Structure and Organic Carbon in a Cotton Field [J]. *Environmental Pollution*, 2024, 356: 124367.
- [6] 马明生,郭贤仕,柳燕兰. 全生物降解地膜覆盖对旱地土壤水分状况及春小麦产量和水分利用效率的影响 [J]. *作物学报*, 2020, 46(12): 1933-1944.
- [7] 王斌,万艳芳,王金鑫,等. PBAT 型全生物降解地膜对南疆棉花和玉米产量及土壤理化性质的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(1): 148-156.
- [8] YIN M H, LI Y N, FANG H, et al. Biodegradable Mulching Film with an Optimum Degradation Rate Improves Soil Environment and Enhances Maize Growth [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 216(C): 127-137.
- [9] WANG Z H, WU Q, FAN B H, et al. Testing Biodegradable Films as Alternatives to Plastic Films in Enhancing Cotton

- (*Gossypium Hirsutum* L.) Yield under Mulched Drip Irrigation [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 192: 196-205.
- [10] GAO X H, XIE D, YANG C. Effects of a PLA/PBAT Biodegradable Film Mulch as a Replacement of Polyethylene Film and Their Residues on Crop and Soil Environment [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 255: 107053.
- [11] ZHANG X Y, YOU S Y, TIAN Y Q, et al. Comparison of Plastic Film, Biodegradable Paper and Bio-Based Film Mulching for Summer Tomato Production: Soil Properties, Plant Growth, Fruit Yield and Fruit Quality [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 38-48.
- [12] GU X B, CAI H J, FANG H, et al. Soil Hydro-Thermal Characteristics, Maize Yield and Water Use Efficiency as Affected by Different Biodegradable Film Mulching Patterns in a Rain-Fed Semi-Arid Area of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106560.
- [13] SOUZA P M S, SOMMAGGIO L R D, MARIN-MORALES M A, et al. PBAT Biodegradable Mulch Films: Study of Ecotoxicological Impacts Using *Allium Cepa*, *Lactuca Sativa* and HepG2/C3A Cell Culture [J]. *Chemosphere*, 2020, 256: 126985.
- [14] 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.
- [15] YIN T, YAO Z P, YAN C R, et al. Maize Yield Reduction Is More Strongly Related to Soil Moisture Fluctuation than Soil Temperature Change under Biodegradable Film vs Plastic Film Mulching in a Semi-Arid Region of Northern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 287: 108351.
- [16] LIU Y, YANG S J, LI S Q, et al. Growth and Development of Maize (*Zea mays* L.) in Response to Different Field Water Management Practices: Resource Capture and Use Efficiency [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 606-613.
- [17] 方彦杰, 张绪成, 于显枫, 等. 旱地全膜覆土穴播荞麦田土壤水热及产量效应研究 [J]. *作物学报*, 2019, 45(7): 1070-1079.
- [18] 张谊模, 吴霜, 刘吉振, 等. 南瓜新品种蜜宝的选育 [J]. *种子*, 2020, 39(7): 128-130.
- [19] 张富林, 蔡金洲, 范先鹏, 等. 地膜南瓜适宜覆膜厚度初步研究 [J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(23): 5755-5757.
- [20] 白如霄, 王瑞楠, 和海秀, 等. 生物降解地膜对塔额盆地甜菜产量及含糖率的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023(12): 236-241.
- [21] 杨惠娣, 唐赛珍. 降解塑料试验评价方法探讨 [J]. *塑料*, 1996(2): 16-22.
- [22] KASIRAJAN S, NGOUAJIO M. Polyethylene and Biodegradable Mulches for Agricultural Applications: A Review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(2): 501-529.
- [23] 王艺君. 不同地膜覆盖对土壤理化性状及玉米产量的影响 [D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [24] 党宇腾. 生物降解膜覆盖与施氮对旱作农田土壤微环境及玉米产量形成的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [25] 苏海英, 宝哲, 刘勤, 等. 新疆加工番茄应用 PBAT 全生物降解地膜可行性 [J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(4): 615-622.
- [26] 路海东, 薛吉全, 郭东伟, 等. 覆黑地膜对旱作玉米根区土壤温湿度和光合特性的影响 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 129-135.
- [27] 徐松, 王敬敬, 周婷婷, 等. 聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯塑料地膜高效降解菌群筛选及其群落结构演替特征 [J]. *微生物学通报*, 2018, 45(11): 2341-2352.
- [28] 王宁, 冯克云, 南宏宇, 等. 生物降解膜对甘肃河西棉花的生态生物学效应 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3607-3614.
- [29] CHEN N, LI X Y, ŠIMUNEK J, et al. Evaluating the Effects of Biodegradable and Plastic Film Mulching on Soil Temperature in a Drip-Irrigated Field [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105116.
- [30] 张玉洁, 王宁, 杨彬, 等. 不同颜色地膜覆盖对盐碱地水热盐状况及向日葵产量和水分利用效率的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(11): 1-10.

- [31] 袁海涛, 于谦林, 贾德新, 等. 氧化-生物双降解地膜降解性能及其对棉花生长的影响 [J]. 棉花学报, 2016, 28(6): 602-608.
- [32] 张旺旺. 氧化生物双降解地膜降解性能及其对东北雨养春玉米生长的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- [33] WANG Y J, JIA X F, OLASUPO I O, et al. Effects of Biodegradable Films on Melon Quality and Substrate Environment in Solar Greenhouse [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 829: 154527.
- [34] 李玲, 靳拓, 张杰, 等. 全生物降解地膜的降解特征及其对马铃薯产量的影响 [J]. 湖南农业科学, 2022(6): 10-13.
- [35] 强蓉蓉, 马建涛, 柴雨葳, 等. 覆盖对旱地玉米土壤温度及产量的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(2): 83-89, 97.
- [36] 陈继康, 李素娟, 张宇, 等. 不同耕作方式麦田土壤温度及其对气温的响应特征——土壤温度日变化及其对气温的响应 [J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2592-2600.
- [37] 郭永忠, 许浩, 韩新生, 等. 不同覆盖材料对红梅杏园土壤温度日变化的影响 [J]. 宁夏农林科技, 2024, 65(6): 29-35.
- [38] 杨世佳, 陈瑾, 张毅, 等. 不同颜色地膜覆盖对玉米土壤温度、杂草发生及玉米产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(22): 92-96.
- [39] JONES H, BLACK T A, JASSAL R S, et al. Characterization of Shortwave and Longwave Properties of Several Plastic Film Mulches and Their Impact on the Surface Energy Balance and Soil Temperature [J]. *Solar Energy*, 2021, 214: 457-470.
- [40] XU J, LI C F, LIU H T, et al. The Effects of Plastic Film Mulching on Maize Growth and Water Use in Dry and Rainy Years in Northeast China [J]. *PLoS One*, 2015, 10(5): e0125781.
- [41] SUN T, LI G, NING T Y, et al. Suitability of Mulching with Biodegradable Film to Moderate Soil Temperature and Moisture and to Increase Photosynthesis and Yield in Peanut [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 214-223.
- [42] 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.
- [43] 邓路, 崔巍平. 生物降解膜对土壤温、湿及玉米生长的影响 [J]. 节水灌溉, 2020(6): 1-7, 13.
- [44] 翟勇全, 魏雪, 付江鹏, 等. 全生物降解膜覆盖对玉米生长、产量及氮素利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(11): 2041-2051.
- [45] YANG C, ZHAO Y, LONG B B, et al. Biodegradable Mulch Films Improve Yield of Winter Potatoes through Effects on Soil Properties and Nutrients [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 264: 115402.
- [46] 程万莉, 樊廷录, 王淑英, 等. 全生物降解地膜覆盖对河西灌区马铃薯田耕层土温及产量的影响 [J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(9): 815-821.

责任编辑 崔玉洁