

DOI: 10.12357/cjea.20240715

CSTR: 32371.14.cjea.20240715

苏笑星, 王林林, 李萌, 马雪婷, 李玲玲, 李世清. 加厚地膜及其免耕两年使用对玉米产量、水分利用效率及地膜回收率的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(9): 1858–1869

SU X X, WANG L L, LI M, MA X T, LI L L, LI S Q. Effects of thickened plastic film and its two-year reuse with no tillage on maize yield, water use efficiency, and plastic film recycling rate[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(9): 1858–1869

加厚地膜及其免耕两年使用对玉米产量、水分利用效率及地膜回收率的影响*

苏笑星^{1,2}, 王林林^{1,2**}, 李 萌^{1,2}, 马雪婷^{1,2}, 李玲玲^{1,2}, 李世清^{1,3}

(1. 省部共建干旱生境作物学国家重点实验室 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学资源与环境学院 兰州 730070)

摘 要: 如何提高玉米产量和降低残膜污染是黄土高原半干旱区玉米生产急需解决的问题。本研究于 2023—2024 年在甘肃农业大学旱作农业综合试验站开展田间试验。研究地膜厚度及其免耕两年使用对陇中旱地玉米产量、水分利用效率 (WUE) 及地膜回收率的影响, 设置地膜利用方式 (T1: 新膜; T2: 免耕地膜两年使用) 和地膜厚度 (H1: 0.01 mm; H2: 0.015 mm; H3: 0.02 mm) 二因素试验, 共 6 个处理。结果表明, 相比免耕地膜两年使用, 新膜在 H1、H2 和 H3 厚度下苗期—拔节期 0~25 cm 土层的平均土壤温度分别显著增加 6.71%、5.60% 和 5.77%; 而在拔节期—成熟期, 新膜和免耕地膜两年使用的土壤平均温度差异不显著。在新膜和免耕地膜两年使用下, H2 和 H3 处理的成熟期干物质积累量和产量差异均不显著; 而在 H1 厚度下, 成熟期干物质积累量和产量新膜较免耕地膜两年使用处理分别提高 14.54% 和 24.10%。免耕地膜两年使用情况下加厚地膜 (H2 和 H3) WUE 较普通地膜 (H1) 显著提高 26.78% 和 29.71%。在新膜处理下, 3 种厚度地膜的玉米净收益和产投比差异不显著; 而在免耕地膜两年使用情况下, H2 和 H3 较 H1 分别显著增加玉米净收益 45.74% 和 46.10%, 产投比分别显著提高 11.11% 和 9.63%。免耕地膜两年使用处理较新膜处理显著降低了地膜回收率, 但加厚地膜 (H2 和 H3) 较普通地膜 (H1) 在免耕地膜两年使用下能显著提高地膜回收率。结果说明新膜使用下加厚地膜的增产增收效应不明显; 而免耕地膜两年使用下加厚地膜的增产增收效应显著。因此, 综合考虑产量、水分利用效率、地膜回收率 and 经济效益, 0.015 mm 地膜结合其免耕两年使用是黄土高原旱农区适宜的地膜措施。

关键词: 玉米; 地膜厚度; 免耕地膜两年使用; 产量; 经济效益; 地膜回收率

中图分类号: S513; S316

* 国家自然科学基金 (42167008)、甘肃省科技重大专项 (25ZDNA007)、甘肃省农业生态与资源保护技术推广总站农业生态环境保护专项新技术 (新设备) 研发推广项目 (HT-SHGK-2024-037) 和加厚高强度易回收地膜关键指标研究及产品质量地方标准制定项目 (GSAU-JSFW-2022-23) 资助

** 通信作者: 王林林, 主要研究方向为旱地作物高产高效绿色生产研究。E-mail: wangll@gsau.edu.cn

苏笑星, 主要研究方向为作物水肥高效利用。E-mail: 2232645352@qq.com

收稿日期: 2024-11-10 接受日期: 2025-03-27

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (42167008), the Major Science and Technology Project of Gansu Province (25ZDNA007), Gansu Provincial Agricultural Ecology and Resource Protection Technology Extension Station Special New Technology (New Equipment) R&D and Promotion Project for Agricultural Ecological Environmental Protection (HT-SHGK-2024-037), and Research on Key Indicators of Thickened High-strength and Recyclable Plastic Film and Local Standard Formulation Project for Product Quality (GSAU-JSFW-2022-23).

** Corresponding author, E-mail: wangll@gsau.edu.cn

Received Nov. 10, 2024; accepted Mar. 27, 2025

Effects of thickened plastic film and its two-year reuse with no tillage on maize yield, water use efficiency, and plastic film recycling rate*

SU Xiaoxing^{1,2}, WANG Linlin^{1,2**}, LI Meng^{1,2}, MA Xueting^{1,2}, LI Lingling^{1,2}, LI Shiqing^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Resources and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Increasing maize yield and reducing residual film pollution remain important issues that need to be addressed for maize production in the semi-arid region of the Loess Plateau. A field experiment was conducted to investigate the effects of different plastic film thicknesses and their two-year reuse under no-till conditions on maize yield, water use efficiency (WUE), and film recovery rate in central Gansu Province from 2023 to 2024. The experimental design included two factors: plastic film utilization methods (T1: new film; T2: two-year reuse of plastic film with no till) and plastic film thickness (H1: 0.01 mm; H2: 0.015 mm; H3: 0.02 mm), with six treatments. The results showed that compared with the two-year reuse of plastic film with no till, new plastic film under H1, H2, and H3 significantly increased the average soil temperature in the 0–25 cm layer during the seedling to jointing stages by 6.71%, 5.60%, and 5.77%, respectively. From the jointing to maturity stages, no significant differences in the average soil temperature in the 0–25 cm layer were observed between the new film and the two-year reuse of plastic film with no till. Both the new film and two-year reuse of plastic film with no-till treatments showed no significant differences in harvest biomass or yield between H2 and H3. Under the H1 thickness, the dry matter accumulation at maturity and the yield of new plastic film increased by 14.54% and 24.10%, respectively, compared to the two-year use of no-till plastic film mulch. Thicker films (H2 and H3) significantly increased WUE by 26.78% and 29.71%, respectively, compared to H1. Under the new film, the net income or ratio of output to input was not significantly different for H1, H2, and H3. Under two-year reuse of plastic film with no till, H2 and H3 increased net income by 45.74% and 46.10%, respectively, and elevated the ratio of output to input by 11.11% and 9.63%, respectively, compared to H1. Although two-year reuse of plastic film with no till significantly reduced the film recovery rate compared to the new film, thicker films under two-year reuse with no till significantly improved the recovery rate compared to H1. These results indicate that under the new film, thicker films did not significantly increase yield or net income; however, thicker films under two-year reuse with no till significantly enhanced yield and net income. Therefore, considering the yield, WUE, film recovery, and economic benefits, a 0.015 mm plastic film combined with two-year reuse of plastic film under no-till conditions is a suitable plastic film measure for arid agricultural areas in the Loess Plateau.

Keywords: maize; film thickness; two-year reuse of plastic film with no-till; yield; ratio of output to input; plastic film recycling rate

黄土高原地区是我国重要的干旱半干旱农业生产区,其耕地面积约1500万 hm^2 ,是我国重要的粮食生产区,在保障国家粮食安全方面发挥了重要角色^[1],但低温、干旱是限制该地区农业生产的主要因素之一。但地膜覆盖解决了该区农业生产中水热不足问题^[2],有效协调了环境与作物的供需关系,增产效应明显,使玉米(*Zea mays* L.)成为黄土高原西部地区的第一大粮食作物^[3-4]。据统计资料^[5],我国地膜覆盖面积从2015年的1834万 hm^2 增加到2024年的2200万 hm^2 ,覆盖全国约12%的耕地,地膜年使用量从2015年的145.5万t增加到2024年的200万t。然而,大量地膜应用带来的“白色污染”越来越严重^[6-7],其原因主要是生产中多使用0.005~0.01 mm的地膜,一季作物生产后地膜老化严重,容易破碎,导致作物收获时其强度不足以支持其被完整揭起,导致地膜清理不彻底^[8-9]。为了避免残膜污染问题,美国和日本等发达国家生产中应用的地膜厚度均高于我国制定的标准(美国0.024 mm,日本0.015 mm),且使用后强

制回收^[10]。

目前的覆膜方式多为每年使用新地膜为主,地膜用量大,造成残膜污染^[11],严重威胁土壤健康与粮食安全,受到世界各国的关注。为解决地膜残留问题,使用可降解地膜,但其成本较高,微塑料污染潜在风险大^[12]。因此,亟须研究加厚地膜及其免耕地膜两年使用对玉米产量及地膜回收率的影响,克制“白色污染”。研究表明,地膜厚度显著影响了土壤温度,加厚地膜较传统地膜具有更好的增温保墒效果,能提高春玉米的出苗率,促进干物质积累量,提高玉米产量^[8]。而且加厚地膜韧性大,抗拉伸性能强,抗老化效果好,且作物收获完进行地膜回收时不易破损,能提高地膜回收率^[13-14]。然而,地膜覆盖后的残留量会因作物种植密度不同而有所变化,稀植作物的地膜残留量通常低于密植作物。地膜厚度与残膜量之间呈二次曲线关系:在一定范围内,适当增加地膜厚度可减少残膜量。然而,当地膜厚度超过某一临界值后,单位面积内的残片质量增加,导致残留量不再

显著减少,甚至有所上升^[15-16]。因此,适宜厚度地膜对于降低残膜遗留量至关重要。降低地膜用量的另一种有效方法就是地膜再利用。苏永中等^[17]在绿洲灌区研究发现,与传统新覆膜比较,地膜再利用降低了作物产量。胡琦^[18]研究发现,随着地膜使用年限的增加,地膜破损率也不断增加,改变了水分和养分环境,进而降低了玉米产量。

虽然已有一些研究报道了地膜厚度或者免耕两年使用对玉米产量的影响^[8-9,17],但以往研究多关注单一因素,免耕地膜两年使用有降低地膜回收率的风险,而加厚地膜由于增加了地膜用量,有增加农资投入的担忧。因此,本研究从生态角度和稳定产量角度考虑,通过田间试验,分析加厚地膜及其免耕地膜两年使用对玉米产量和地膜回收率的影响,是否能够实现“增厚降损-循环增效”的效果,以期地为地膜绿色应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究于 2023—2024 年在甘肃省定西市安定区李家堡镇甘肃农业大学旱作农业综合试验站进行(35.43°N, 104.62°E),试区年均气温 6.7 °C, ≥ 0 °C 积温 2 936.5 °C·d, ≥ 10 °C 积温 2 242.1 °C·d; 无霜期 140 天,平均海拔 2 000 m。多年平均降水 390.9 mm,平均蒸发量 1 531 mm。供试土壤为黄绵土,0~30 cm 土层土壤容重平均为 1.26 g·cm⁻³,pH 值 8.39,土壤有机质 10.71 g·kg⁻¹,全氮 0.71 g·kg⁻¹,全磷 1.59 g·kg⁻¹,速效磷 27.32 mg·kg⁻¹,速效钾 151.66 mg·kg⁻¹,凋萎湿度为 7.3%,田间持水量为 21.9%。2023 年玉米生育期降雨量为 292.01 mm,2024 年玉米生育期降雨量为 307.9 mm(图 1)。

1.2 试验设计

本研究采用两因素裂区试验设计,主因素为地膜使用方式(T1:新膜;T2:免耕地膜两年使用),副因素为地膜厚度(H1:0.01 mm;H2:0.015 mm;H3:0.02 mm),共 6 个处理,每个处理 3 次重复,共 18 个小区,小区面积为 86.4 m²(12 m×7.2 m)。新膜:当季玉米成熟收获后持续覆膜至次年 4 月,在每年 4 月底播种前进行揭膜,然后翻耕,施肥,旋耕,覆新膜。免耕地膜两年使用:第一季作物收获后持续覆膜,在第二季作物播种时,玉米直接点播在旧膜上,基肥采用穴施方式施入。所有处理施纯氮 200 kg·hm⁻²,其中基肥 80 kg(N)·hm⁻²,在拔节期通过穴施方法追肥 120 kg(N)·hm⁻²。磷肥每两年施用一次,磷肥(P₂O₅) 150

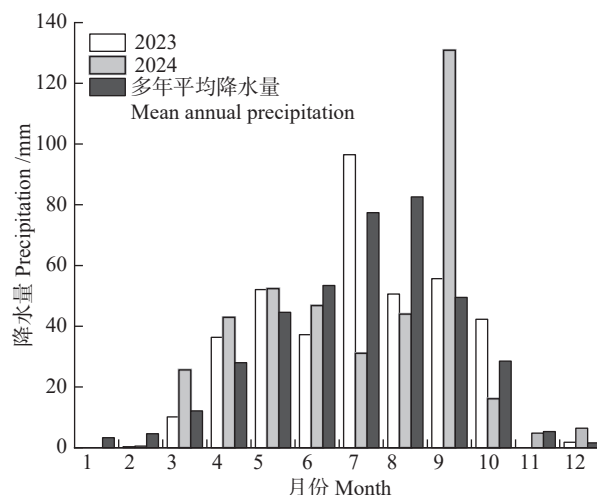


图 1 2023—2024 年试区月降水量

Fig. 1 Monthly precipitation from 2023 to 2024 at the experimental site

kg·hm⁻²全部做基肥一次投入,免耕两年用处理不再施磷肥。供试地膜为聚乙烯薄膜,由兰州金土地塑料制品有限公司生产。所有处理均采用全膜双垄沟播技术栽培(大垄:高 10 cm,宽 70 cm;小垄:高 15 cm,宽 40 cm),玉米于每年 4 月底播种,10 月初收获,玉米品种为‘先玉 698’,株距为 30 cm,种植密度 55 500 株·hm⁻²。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤温度测定

用直角红水地温计(LCD-11 型,衡水建兴仪表有限公司),测定小垄靠近玉米根部在 5、10、15、20 及 25 cm 土层土壤温度,从玉米苗期起,测定时间为每日的 18:00,每个生育时期连续观测 3 d,取其平均值作为该生育时期日平均土壤温度,于收获期后结束读取和记录。

1.3.2 干物质积累量测定

分别在玉米拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆中期和成熟期,每小区随机选取植株 3 株,105 °C 下烘箱杀青 30 min,然后 85 °C 烘干至恒重。

1.3.3 干物质积累转运量的计算

$$\text{花后干物质积累量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{成熟期生物量} - \text{开花期生物量} \quad (1)$$

$$\text{花后干物质积累对产量贡献率}(\%) = \frac{\text{花后干物质积累量}}{\text{产量}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{花前干物质向籽粒转运量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{开花期生物量} - \text{成熟期生物量(不含籽粒)} \quad (3)$$

花前存储干物质转运效率(%)=花前存储干物质
转运量/开花期生物量 $\times 100\%$ (4)

1.3.4 土壤含水量的测定

分别在玉米播种前、拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆中期和收获期通过打钻取土方法分别测定 0~200 cm 土壤水分,每 20 cm 为一层,每个小区取 3 个样点,采用烘干法测定土壤含水量。

土壤含水量的计算公式:

$$SWS = W \times \rho \times H \quad (5)$$

式中: SWS 为土壤含水量 (mm); W 为土壤含水率 (%); ρ 为土壤容重 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); H 为土层厚度 (cm)。

由于试验小区平整,试验区未产生深层渗漏和地下水补给,因此作物耗水量通过农田土壤水分平衡公式计算,由于有小区边界,地下水埋水较深,不考虑径流,水分向下渗漏和地下水向上渗透水分,公式为:

$$ET = (SWS1 - SWS2) + P \quad (6)$$

式中: ET 为作物耗水量 (mm); SWS1、SWS2 分别为播前和收获时 0~200 cm 土层的土壤含水量 (mm); P 为玉米生育期降水量 (mm)。

水分利用效率 (WUE) 的计算公式:

$$WUE = Y/ET \quad (7)$$

式中: WUE 为水分利用效率 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$); Y 为籽粒产量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); ET 为作物全生育期的耗水量 (mm)。

1.3.5 产量测定

在玉米成熟期,实收测产,各小区全部收获后,晾晒、脱粒,待籽粒水分含量 $\leq 14\%$ 时称重,根据每个小区实际占地面积计算实际公顷产量。

1.3.6 地膜抗拉伸强度测定

分别于玉米播前、拔节期、灌浆中期及成熟期,在各小区大垄顶部中心和小垄种植行正上方取纵向 50 cm $\times$ 横向 30 cm 的地膜各 3~5 个样本,避开明显破损或污染点,确保覆盖不同受力类型。带回实验室。按 GB/T 1040.1—2006 和 GB/T 1040.3—2006 规定的方法,测定纵向断裂标称应变,测样宽度为 10 mm,长度为 100 mm,夹具间初始距离为 50 mm,试验速度为 $(500\pm 50)\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,拉伸至试样断裂,测出最大拉伸负荷,精确到 0.01 N,重复 5 次,求其平均值。断裂标称应变按如下公式计算:

$$\varepsilon = \Delta L/L \quad (8)$$

式中: ε 为断裂标称应变 (%); ΔL 为夹具间距离的增

量 (mm); L 为夹具间的初始距离。

1.3.7 地膜回收率的测定

玉米收获后采用人工揭膜,将采集到的残膜带回实验室,去除杂草和泥土,将残膜展开后进行超声波清水洗涤,然后用滤纸吸干残膜上的水分,测量单位地膜面积,计算地膜回收率公式如下:

$$\text{地膜回收率}(\%) = \text{回收地膜面积}(\text{cm}^2)/\text{铺设地膜面积}(\text{cm}^2) \times 100\% \quad (9)$$

1.3.8 经济效益计算

总投入包括种子、化肥、机械、地膜和劳力等投入的总花费;产出包括玉米籽粒和秸秆。

$$\text{总产值} = \text{销售价格} \times \text{产量} \quad (10)$$

$$\text{净收益} = \text{总收益} - \text{总投入} \quad (11)$$

$$\text{产投比} = \text{总产值}/\text{总投入} \quad (12)$$

1.4 数据统计分析

用 Excel 2019 进行数据处理,用 SPSS 23.0 分析软件进行二因素方差分析,检验处理间各指标是否有显著性差异 ($P<0.05$),利用 Origin 2018 软件作图。

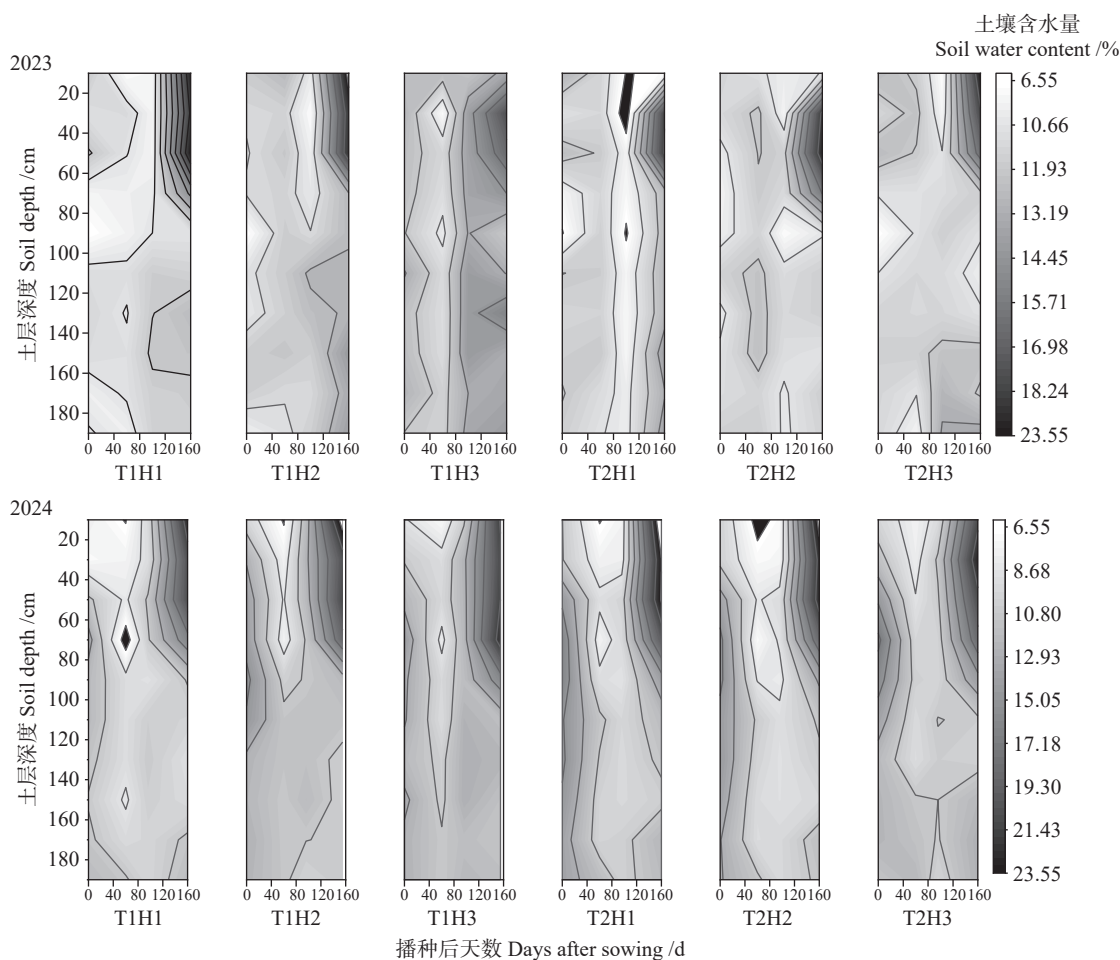
2 结果与分析

2.1 加厚地膜及免耕地膜两年使用对土壤含水量的影响

两年 0~200 cm 土壤含水量均表现出 $T1>T2$ (图 2),数据分析显示,在玉米播前, $T2$ 处理较 $T1$ 处理分别提高 0~20 cm 和 20~80 cm 土壤含水量 10.86% 和 6.93%,地膜厚度对玉米播前 0~20 cm 土壤含水量无显著影响。随着生育期的推进,拔节—收获期 (播种后 60~160 天左右), $T2$ 处理较 $T1$ 处理 0~20 cm 土壤含水量平均降低 6.32%,不同地膜厚度在 $T1$ 处理下差异不显著,在 $T2$ 处理下,表现出随地膜厚度增加而增加的趋势, $H2$ 和 $H3$ 较 $H1$ 提高了拔节—收获期土壤含水量 5.78%~11.84% 和 9.68%~11.32% (所列数据均为两年平均)。

2.2 加厚地膜及免耕地膜两年使用对土壤温度的影响

随着土层深度增加,土壤温度逐渐降低 (图 3a, 3b)。2023 年的土壤温度略微低于 2024 年,而 $T1$ 较 $T2$ 处理显著提高了苗期—拔节期 (播种后 30~60 天左右) 土壤温度 (图 3c, 3d)。在 $H1$ 、 $H2$ 和 $H3$ 厚度下, $T1$ 处理较 $T2$ 处理分别显著增加苗期—拔节期的土壤温度 6.71%、5.60% 和 5.77% ($P<0.05$),而各处理



T1: 新膜; T2: 免耕地膜两年使用; H1、H2 和 H3 分别表示地膜厚度 0.01、0.015 和 0.02。T1: new film; T2: two-year reuse of plastic film with no-till; H1, H2, and H3 represent the thickness of the plastic film at 0.01 mm, 0.015 mm, and 0.02 mm respectively.

图 2 2023—2024 年不同处理各生育时期土壤含水量的空间分布情况

Fig. 2 Spatial distribution of water content under different treatments for different growing periods in 2023–2024

的拔节期-成熟期(播种后 60~160 天左右)土壤温度差异不显著。在 T1 处理下, H2 和 H3 的土壤温度较 H1 提高 2.93% 和 2.40%, 但差异不显著; 在 T2 处理下, H2 和 H3 的土壤温度较 H1 分别显著提高 5.49% 和 5.07% ($P<0.05$)。

2.3 加厚地膜及免耕地膜两年使用对玉米干物质积累及干物质积累速率的影响

2024 年玉米单株干物质积累量显著高于 2023 年 ($P<0.05$), 且总体趋势表现为 T1 处理大于 T2 处理(图 4a, 4b)。两年平均数据显示, 在 T1 处理下, H2 处理成熟期(播种后 160 天左右)干物质积累量较 H1 提高 5.69%, 但未达显著水平, H3 较 H1 显著提高 8.44% ($P<0.05$); 在 T2 处理下, H2 和 H3 较 H1 处理分别显著提高 10.36% 和 15.82%。在 H1、H2 和 H3 厚度下, T1 较 T2 处理成熟期干物质积累量分别提高 14.54%、9.71% 和 7.20%。

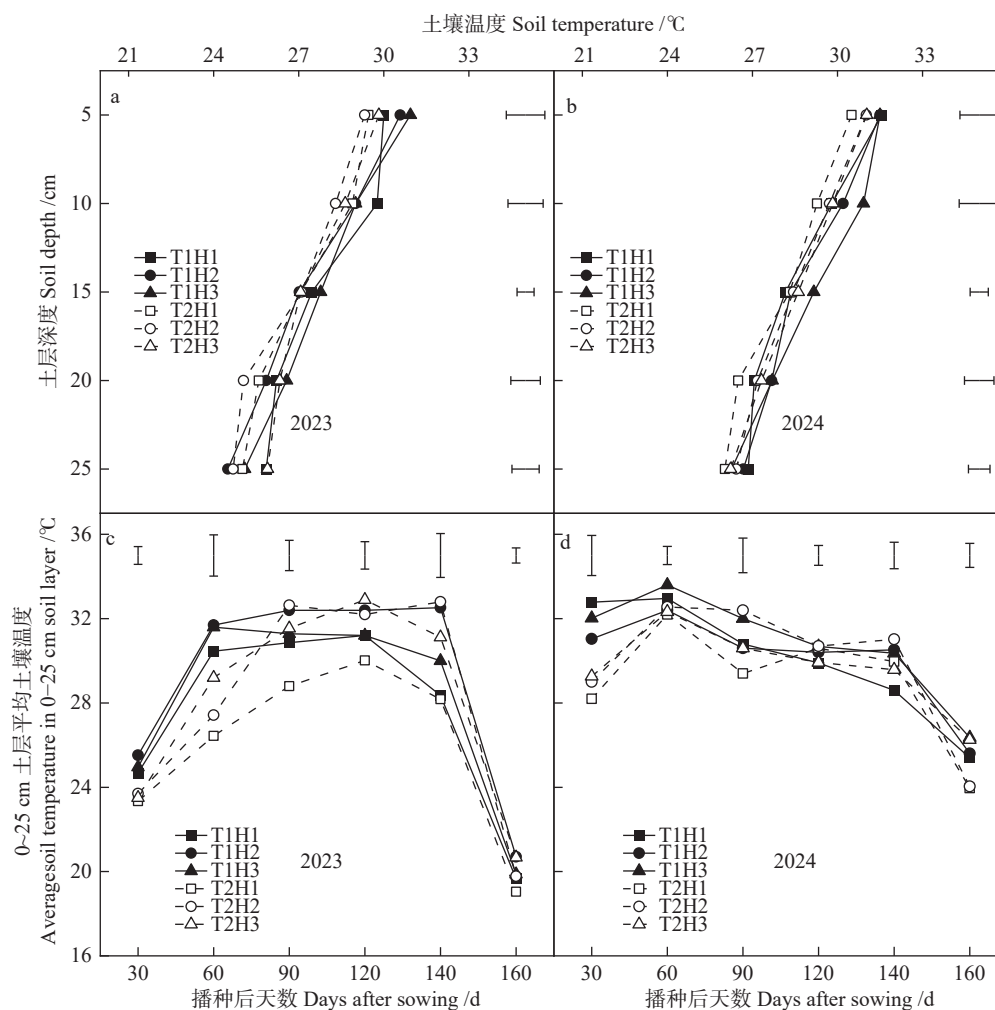
玉米的干物质积累速率呈现先增加后降低趋势,

在开花期(播种后 90~110 天左右)达到最高峰, 且 T1 大于 T2(图 4c, 4d)。在 H1、H2、H3 厚度下, T1 处理较 T2 干物质积累速率分别显著提高 27.02%、13.08% 和 19.78%。在 T1 处理下, H2 和 H3 较 H1 分别显著提高 9.42% 和 23.13% ($P<0.05$); 在 T2 处理下, H2 和 H3 较 H1 分别显著提高 22.8% 和 30.58% ($P<0.05$)。

地膜利用方式(T)×地膜厚度(H)的交互作用对花后干物质积累对产量贡献率、花前储存干物质向籽粒转运量及转运效率均有极显著影响 ($P<0.01$)(表 1)。在 T1 处理下, H2 和 H3 的花后干物质积累量较 H1 分别提高 19.00% 和 31.35% ($P<0.05$); 在 T2 处理下, H2 和 H3 较 H1 分别提高 6.44% 和 33.08% ($P<0.05$)。在 H2 和 H3 厚度下, T1 较 T2 分别显著提高花后干物质对产量贡献率 20.65% 和 12.72% ($P<0.05$)。

2.4 加厚地膜及免耕地膜两年使用对玉米产量的影响

地膜利用方式×地膜厚度的交互效应对产量影



T1: 新膜; T2: 免耕地膜两年使用; H1、H2 和 H3 分别表示地膜厚度 0.01 mm、0.015 mm 和 0.02 mm。误差棒表示 0.05 水平上的 LSD 值。T1: new film; T2: two-year reuse of plastic film with no-till; H1, H2, and H3 represent the thickness of the plastic film at 0.01, 0.015, and 0.02 mm, respectively. Error bars represent the LSD values at the 0.05 significance level.

图3 2023—2024 年不同处理各生育时期 0~25 cm 土层土壤温度动态变化

Fig. 3 Soil temperature dynamics in the 0–25 cm soil layer in different treatments for different growing periods from 2023 to 2024

响显著 ($P<0.05$), 两年间玉米产量均表现为 $T1>T2$ (表 1)。在 H1 厚度下, T1 处理的产量较 T2 处理提高 24.10% ($P<0.05$); 在 H2 和 H3 厚度下, T1 和 T2 处理的产量差异不显著。T1 处理下, 3 种厚度地膜的产量差异不显著; T2 处理下, H2 和 H3 较 H1 分别显著提高 17.35% 和 24.24% ($P<0.05$)。

2.5 加厚地膜及免耕地膜两年使用对土壤贮水量的影响

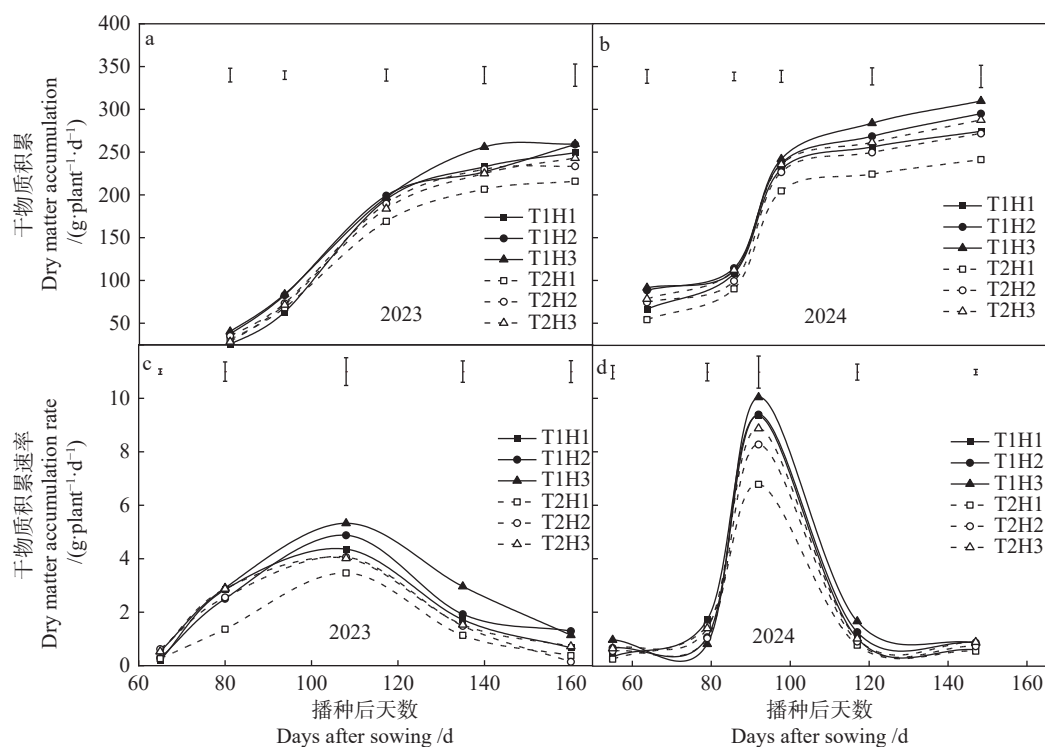
2024 年的播前和收获土壤贮水量均高于 2023 年 ($P<0.01$), 且播前的土壤贮水量随地膜厚度的增加而呈增加趋势 (表 1)。T1 处理的播前土壤贮水量比 T2 处理平均增加 4.24%。在 T1 处理下, 不同厚度地膜的播前土壤贮水量差异不显著; 在 T2 处理下, H2 和 H3 较 H1 平均分别提高 8.35% 和 12.40% ($P<0.05$)。在 H1 厚度下, T1 较 T2 平均提高播前土壤贮水量

7.88% ($P<0.05$), 但在 H2 和 H3 厚度下, 地膜利用方式对播前土壤贮水量影响不显著。

在 H1、H2 和 H3 厚度下, T1 处理的收获土壤贮水量较 T2 分别提高 7.22%、1.71% 和 4.06%。在 T1 处理下, H2 和 H3 较 H1 分别提高收获土壤贮水量 3.38% 和 7.77%; 在 T2 处理下, H2 和 H3 较 H1 分别提高 8.98% 和 11.04%。

2.6 加厚地膜及免耕地膜两年使用对水分利用效率的影响

所有处理的玉米耗水量差异均不显著 (表 1)。2024 年的玉米耗水量显著高于 2023 年, 而 2023 年的 WUE 显著大于 2024 年。地膜利用方式×地膜厚度的交互作用对 WUE 有显著影响。在 H1 厚度下, T2 处理的 WUE 较 T1 显著降低 19.26%; 在 H2 和 H3 厚度下, 地膜利用方式对 WUE 影响差异不显著。在 T1 处理



T1: 新膜; T2: 免耕地膜两年使用; H1、H2 和 H3 分别表示地膜厚度 0.01、0.015 和 0.02 mm。误差棒表示 0.05 水平上的 LSD 值。T1: new film; T2: two-year reuse of plastic film with no-till; H1, H2, and H3 represent the thickness of the plastic film at 0.01, 0.015, and 0.02 mm, respectively. Error bars represent the LSD values at the 0.05 significance level.

图 4 不同处理对玉米干物质积累及积累速率的影响

Fig. 4 The effect of different treatments on dry matter accumulation and accumulation rate of maize

下,地膜厚度并没有显著影响 WUE;而在 T2 处理下, H2 和 H3 较 H1 分别显著提高 26.78% 和 29.71%。

2.7 加厚地膜及免耕地膜两年使用对经济效益的影响

在投入方面,地膜利用方式主要影响地膜、劳力和机械,此外,投入随地膜厚度的增加而增加(表 2)。与 T2 处理相比, T1 处理地膜、劳力和机械投入分别提高 99.91%、70.59% 和 100%。T1 处理的平均总产值较 T2 提高 11.66% ($P<0.05$)。T1 处理下, H2 和 H3 较 H1 总产值分别提高 5.29% 和 6.86%,但差异均未达显著水平;在 T2 处理下, H2 和 H3 总产值较 H1 分别显著提高 14.14% 和 16.47% ($P<0.05$)。

T1 处理下,不同厚度地膜的净收益差异不显著; T2 处理下, H2 和 H3 较 H1 净收益分别显著增加 45.74% 和 46.10% ($P<0.05$), H2 和 H3 处理的净收益差异不显著。T2 处理的净收益和产投比较 T1 分别显著提高 147.63% 和 28.11% ($P<0.05$)。T1 处理下,3 种厚度地膜的产投比差异不显著; T2 处理下, H2 和 H3 较 H1 分别显著增加 11.11% 和 9.63% ($P<0.05$)。

2.8 加厚地膜及免耕地膜两年使用对地膜拉伸力的影响

地膜纵向断裂标称应变值在覆膜 120 天后出现

剧烈下降(图 5)。在覆膜后 320 天时, H2 和 H3 的地膜纵向断裂标称应变值较 H1 分别显著提高 21.32% 和 40.64%;在覆膜 720 天后, H2 和 H3 较 H1 分别显著提高 51.13% 和 59.20%。

2.9 加厚地膜及免耕地膜两年使用对地膜回收率的影响

T2 处理的地膜回收率较 T1 处理显著降低 30.03%(图 6)。H2 和 H3 处理显著高于 H1 处理,而 H2 和 H3 差异不显著。在 T1 处理下, H2 和 H3 较 H1 分别提高 6.09% 和 10.7% ($P<0.05$),在 T2 处理下, H2 和 H3 较 H1 分别显著提高 15.91% 和 20.45% (图 6)。

3 讨论

3.1 加厚地膜及免耕地膜两年使用对土壤温度和水分的影响

研究表明,地膜覆盖对土壤温度的影响主要发生在作物生长前期^[19]。本研究表明,在相同地膜厚度下,新膜处理的玉米苗期一拔节期土壤温度显著高于免耕地膜两年使用,而各处理拔节期一成熟期土壤温度差异较小,说明新膜在早期阶段有利于土壤增温,在玉米生长中后期的增温效应逐渐变小。本研究发现加厚地膜有利于促进土壤保温,与张俊等^[20]

表 1 2023—2024 年不同处理对玉米花后干物质积累及花前干物质转运、产量及水分利用效率的影响
Table 1 Effect of different treatments on dry matter accumulation after silking, dry matter remobilization, yield, and water use efficiency before silking of maize in 2023–2024

年份 Year	处理 Treatment	土壤贮水量 Soil water storage/mm		农田耗水量 Water consumption in farmland/mm	花后干物质 积累量 Dry matter accumulation after silking/(kg·hm ⁻²)	花后干物质 积累 对产量 贡献率 Dry matter accumulation after silking contribution rate to production/%	花前储存干物质 向籽粒转 运量 Store dry matter before silking and transfer to the grains volume/(kg·hm ⁻²)	花前储存 干物质 转运效率 Dry matter transport efficiency for before silking storage/%	籽粒产量 /(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
		播前 Pre-sowing	收获 Harvest							
2023	T1H1	270.4±9.1ab	310.4±16.0abc	252.1±6.9a	3 045.3±156.6b	69.7±1.91b	1 322.9±38.9b	12.26±0.44b	4 368±128b	17.32±0.61bc
	T1H2	281.6±9.4ab	321.5±6.4ab	252.1±5.2a	3 320.6±65.7ab	74.4±1.5ab	1 144.4±24.3c	10.60±0.18bc	4 465±95b	17.71±0.30b
	T1H3	292.0±8.6a	342.6±10.1a	241.4±11.0a	3 469.3±102.6a	77.6±3.6a	1 004.5±6.8d	9.31±0.25c	4 474±30b	18.53±0.49b
	T2H1	252.1±10.2b	285.1±6.2c	259.0±9.4a	2 604.1±56.7c	67.3±2.5b	1 264.9±48.1bc	11.72±0.51b	3 869±147a	14.94±0.65c
	T2H2	278.2±12.1b	304.9±11.9bc	245.4±7.9a	2 425.4±94.6c	57.4±1.7c	1 801.6±57.6a	16.69±0.87a	4 226±135b	16.00±0.83bc
	T2H3	281.9±9.9ab	324.0±18.9ab	229.8±5.5a	3 287.3±191.9ab	71.8±1.7ab	1 290.9±44.7b	11.96±0.57b	4 578±159b	19.92±0.95a
2024	T1H1	326.4±18.2a	345.9±6.4ab	288.4±9.2a	2 461.2±42.3d	54.3±1.7c	2 069.4±42.9a	16.12±0.91a	4 531±94ab	15.71±0.87ab
	T1H2	343.4±5.4a	357.0±18.6ab	294.3±10.7a	3 231.8±168.7b	67.1±2.4b	1 585.6±55.6bc	12.00±0.19bc	4 817±167a	16.37±0.26a
	T1H3	335.8±19.5a	364.7±14.1a	278.9±4.8a	3 763.5±145.3e	78.4±1.3a	1 038.1±34.8e	7.69±0.45d	4 802±161a	17.21±0.99a
	T2H1	301.0±16.3b	327.1±11.1b	281.8±11.9a	2 031.8±68.8a	61.5±2.6bc	1 270.7±38.3d	11.11±0.69c	3 301±99c	11.72±0.64c
	T2H2	321.2±9.8a	362.4±12.0ab	266.7±16.4a	2 507.8±83.4d	59.9±3.7bc	1 680.2±63.6b	13.28±0.40b	4 188±159b	15.70±0.48ab
	T2H3	339.9±11.6a	355.8±13.2ab	281.9±11.4a	2 880.5±107.9c	66.5±2.7b	1 449.6±56.9c	11.02±0.18c	4 330±167b	14.65±0.25b
平均 Average	T1H1	298.4±13.7a	328.2±11.2ab	270.3±8.0a	2 753.2±101.6cd	62.0±1.8cd	1 696.1±40.9a	14.19±0.67a	4 449±111a	16.51±0.75a
	T1H2	312.5±6.4a	339.3±12.5ab	273.2±7.9a	3 276.2±117.2bc	70.7±2.0b	1 365.0±39.7b	11.30±0.18b	4 641±131a	17.04±0.28a
	T1H3	313.9±14.1a	353.7±12.1a	260.2±7.9a	3 616.4±123.9a	78.0±2.4a	1 021.3±20.8c	8.50±0.35c	4 638±96a	17.87±0.74a
	T2H1	276.6±13.3b	306.1±8.6b	270.4±10.7a	2 317.4±62.7e	64.4±2.5bcd	1 267.8±43.2b	11.42±0.55b	3 585±123b	13.33±0.64b
	T2H2	299.7±11.0a	333.6±11.9ab	256.1±12.2a	2 466.7±89.0de	58.6±2.8d	1 740.6±60.6a	15.00±0.64a	4 207±147a	16.90±0.66a
	T2H3	310.9±10.8a	339.9±16.1ab	255.9±8.4a	3 083.9±149.1bc	69.2±2.2bc	1 370.2±50.3b	11.49±0.38b	4 454±163a	17.29±0.60a
年份 Year (Y)		**	**	**	**	**	**	ns	ns	**
地膜利用方式 Mulching film utilization methods (T)		ns	ns	ns	**	**	**	**	**	**
地膜厚度 Mulching film thickness (H)		*	**	ns	**	**	**	**	**	**
Y×T		ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
Y×H		ns	ns	ns	**	*	**	**	ns	**
T×H		*	ns	ns	ns	**	**	**	*	*
T×H×Y		ns	ns	ns	*	*	**	ns	ns	ns

T1: 新膜; T2: 免耕地膜两年使用; H1、H2和H3分别表示地膜厚度0.01、0.015和0.02 mm。表中数据为平均值±标准差。同一年份同一列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。*表示 $P<0.05$ 水平显著,**表示 $P<0.01$ 水平显著; ns: 差异不显著。T1: new film; T2: two-year reuse of plastic film with no-till; H1, H2, and H3 represent the thickness of the plastic film at 0.01, 0.015, and 0.02 mm, respectively. Data in the table are mean±standard deviation. Different lowercase letters in the same column of the same year indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). * denotes significance at $P<0.05$ level; ** denotes significance at $P<0.01$ level; ns: no significant difference.

和张丹等^[9] 研究结果一致。

免耕地膜两年使用能有效提高播前的土壤含水量, 与张展军等^[21] 研究结果一致。在玉米播种期—拔节期, 免耕地膜两年使用较新膜能显著提高 0~80 cm 土层土壤含水量, 可能是因为翻耕通常会加剧土壤水分蒸发, 而免耕则通过减少土壤扰动抑制了土壤水分蒸发, 从而提高了土壤贮水量^[19]。但在拔节期—收获期, 免耕地膜两年使用较新膜降低了表层 0~20 cm

表 2 2023—2024 年不同处理对玉米经济效益的影响
Table 2 Effect of different treatments on the economic performance of maize from 2023 to 2024

年份 Year	处理 Treatment	投入 Input/(¥·hm ⁻²)						产值 Output/(¥·hm ⁻²)			净收益 Net revenue (¥·hm ⁻²)	产投比 The ratio of output to input
		种子 Seed	肥料 Fertilizer	地膜 Plastic film	劳力 Labor	机械 Machine	总投入 Total input	籽粒 Grain	秸秆 Straw	总产值 Gross output value		
2023	T1H1	720	3 069	1 023	6 525	600	11 937	8 736.0±257.5a	4 734.9±115.6ab	13 470.9±414.4a	1 533.9±414.9c	1.13±0.03c
	T1H2	720	3 069	1 535	6 525	600	12 449	8 930.0±190.1a	4 954.8±86.4a	13 884.8±335.0a	1 435.7±335.3c	1.12±0.03c
	T1H3	720	3 069	2 046	6 525	600	12 960	8 947.6±60.3a	4 961.6±18.1a	13 909.6±447.8a	949.6±447.6c	1.07±0.06c
	T2H1	720	3 069	512	3 850	300	8 426	7 738.0±294.5b	4 057.8±138.8c	11 795.8±490.7b	3 369.8±490.1b	1.40±0.06b
	T2H2	720	3 069	768	3 825	300	8 682	8 452.6±270.4ab	4 366.1±99.6bc	12 818.1±313.2ab	4 136.1±313.8ab	1.48±0.04ab
	T2H3	720	3 069	1 023	3 825	300	8 937	9 156.4±317.8a	4 454.3±217.3bc	13 610.3±540.4a	4 673.3±540.2a	1.52±0.07a
2024	T1H1	720	3 069	1 023	6 525	600	11 937	9 061.0±188.7ab	4 394.5±110.9bc	13 456.5±577.2ab	1 519.5±577.4b	1.13±0.05c
	T1H2	720	3 069	1 535	6 525	600	12 449	9 634.7±334.6a	4 834.3±143.6ab	14 468.3±334.8ab	2 019.3±334.9b	1.16±0.03c
	T1H3	720	3 069	2 046	6 525	600	12 960	9 603.0±322.5a	5 260.8±149.4a	14 864.8±458.5a	1 904.8±458.3b	1.15±0.04c
	T2H1	720	3 069	512	3 825	300	8 426	6 602.9±199.6c	4 371.3±168.0bc	10 973.3±469.0c	2 547.3±468.0b	1.30±0.06b
	T2H2	720	3 069	768	3 825	300	8 682	8 376.0±317.7b	4 793.6±216.3ab	13 169.6±556.1b	4 487.6±556.0a	1.52±0.07a
	T2H3	720	3 069	1 023	3 825	300	8 937	8 660.0±334.6b	4 248.0±171.5c	12 908.0±390.3b	3 971.0±390.4a	1.44±0.05a
平均 Average	T1H1	720	3 069	1 023	6 525	600	11 937	8 899.0±268.1a	4 564.7±113.2bc	13 463.7±495.4a	1 526.7±495.4c	1.13±0.04c
	T1H2	720	3 069	1 535	6 525	600	12 449	9 282.4±222.3a	4 894.5±11.0ab	14 176.5±334.9a	1 727.5±334.3c	1.14±0.03c
	T1H3	720	3 069	2 046	6 525	600	12 960	9 275.3±262.9a	5 111.2±166.5a	14 387.2±455.2a	1 427.2±452.6c	1.11±0.03c
	T2H1	720	3 069	512	3 825	300	8 426	7 170.5±191.9b	4 214.5±153.3c	11 384.5±479.7b	2 958.5±479.7b	1.35±0.06b
	T2H2	720	3 069	768	3 825	300	8 682	8 414.3±247.5a	4 579.8±158.2bc	12 993.8±435.5a	4 311.8±435.6a	1.50±0.05a
	T2H3	720	3 069	1 023	3 825	300	8 937	8 908.2±294.2a	4 351.1±195.4c	13 259.1±465.1a	4 322.1±465.1a	1.48±0.06a
年份 Year (Y)								ns	ns	ns	ns	ns
地膜利用方式 Mulching film utilization method (T)								**	**	**	**	**
地膜厚度 Mulching film thickness (H)								**	**	**	*	*
Y×T								**	ns	ns	*	ns
Y×H								ns	ns	ns	ns	ns
T×H								*	ns	ns	*	**
T×H×Y								ns	*	ns	ns	ns

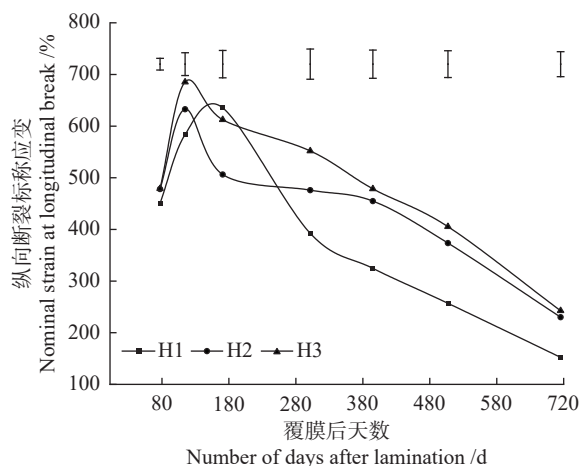
T1: 新膜; T2: 免耕地膜两年使用; H1、H2和H3分别表示地膜厚度0.01 mm、0.015 mm和0.02 mm。种子和肥料价格所有处理一致, 分别为720 ¥·hm⁻²和3 069 ¥·hm⁻²; 劳力包括整个生产过程中所投入的人工、畜力等, 按每天60元计算; 籽粒按2024年当地玉米收购价格2 ¥·kg⁻¹、秸秆0.5 ¥·kg⁻¹计。表中数据为平均值±标准差。同一年份同一列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。*表示0.05水平显著, **表示0.01水平显著; ns: 差异不显著。T1: new film; T2: two-year reuse of plastic film with no-till; H1, H2, and H3 represent the thickness of the plastic film at 0.01 mm, 0.015 mm, and 0.02 mm respectively. The prices of seeds and fertilizers were the same for all treatments, which were 720 ¥·hm⁻² and 3 069 ¥·hm⁻², respectively. Labor includes the labor and animal power invested in the whole production process, which is calculated at 60 ¥ per day. The grain is calculated according to the local corn purchase price of 2 ¥·kg⁻¹ and straw 0.5 ¥·kg⁻¹ in 2024. Data in the table are mean±standard deviation. Different lowercase letters in the same column of the same year indicate significant differences among different treatments (P<0.05). * denotes significance at 0.05 level; ** denotes significance at 0.01 level; ns: no significant difference.

土壤含水量, 这可能是由于免耕地膜两年使用的地膜由于破损较大, 增加了表层土壤水分的损失。唐文雪等^[22]研究指出, 免耕地膜再利用在第2年和第3年的保水效果明显低于第1年, 但是随地膜厚度增大, 土壤含水量呈增加趋势, 与本研究结果一致。这

些结果说明在地膜再利用方式下, 通过增加地膜厚度有利于土壤蓄水保墒^[23]。

3.2 加厚地膜及免耕地膜两年使用对玉米生长、产量、水分利用效率和经济效益的影响

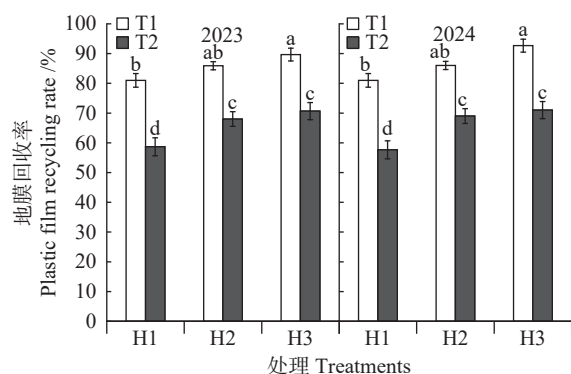
干物质积累是作物产量形成的基础。不同地膜



T1: 新膜; T2: 免耕地膜两年使用; H1、H2 和 H3 分别表示地膜厚度 0.01、0.015 和 0.02 mm。误差棒表示 0.05 水平上的 LSD 值。T1: new film; T2: two-year reuse of plastic film with no-till; H1, H2, and H3 represent the thickness of the plastic film at 0.01, 0.015, and 0.02 mm respectively. Error bars represent the LSD values at the 0.05 significance level.

图 5 2023—2024 年不同处理的地膜纵向断裂标称应变值随时间的变化

Fig. 5 The temporal variation of nominal strain at longitudinal rupture of mulch film under different treatments during 2023–2024 seasons



T1: 新膜; T2: 免耕地膜两年使用; H1、H2 和 H3 分别表示地膜厚度 0.01 mm、0.015 mm 和 0.02 mm。误差棒表示标准差; 小写字母表示 $P < 0.05$ 水平上的差异显著性。T1: new film; T2: two-year reuse of plastic film with no-till; H1, H2, and H3 represent the thickness of the plastic film at 0.01, 0.015, and 0.02 mm, respectively. The error bars represent the standard deviations and different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$.

图 6 2023—2024 年不同处理对地膜回收率的影响

Fig. 6 Impact of different treatments on film recovery rates from 2023 to 2024

利用方式通过改变土壤理化性质、水热状况等,对玉米生长产生影响^[24]。本研究发现,玉米产量和 WUE 在新膜下不受地膜厚度影响。但张丹等^[9]研究发现,在新膜处理下,增加地膜厚度可以增加产量和 WUE,这可能是本研究两年均为干旱年份,导致玉米产量较低,因此限制了加厚地膜对玉米产量和 WUE

的促进作用^[2,25]。

免耕地膜两年使用降低了玉米生长早期的土壤温度和生长后期的土壤水分,因此降低了干物质积累量和干物质积累速率,降低了产量和 WUE,与以往研究结果一致^[26-28]。但加厚地膜在免耕地膜两年使用下能削弱地膜两年使用的这些不利效应,这些结果暗示在免耕地膜两年使用下可以通过适当增加地膜厚度维持玉米产量和 WUE。Zhang 等^[29]研究发现,地膜再利用可以减少地膜使用量,降低农业资源的消耗,减少残膜污染,提高经济效益,与本研究结果一致。但是也有研究表明,免耕地膜两年使用由于显著降低了玉米产量,因此会降低经济效益^[18],这种不同的研究结果可能与地膜厚度及再利用年限有关,他们的研究中使用 0.01 mm 传统地膜,且免耕地膜持续再利用到第 3 年,因此导致地膜再利用处理第 3 季作物产量显著低于新膜。

3.3 加厚地膜及免耕地膜两年使用对地膜回收率及地膜拉伸力的影响

随着覆膜时间增加,地膜抗拉强度、抗撕裂性和抗冲击性降低,因此免耕地膜两年使用降低了地膜回收率^[30-31]。而增加地膜厚度能提高地膜力学性能^[32-34],因此加厚地膜提高了地膜回收率,与田馨等^[35]研究结论一致。但与 0.015 mm 地膜相比,0.02 mm 地膜增加了投入成本,没有显著提高经济效益。因此陇中旱农区推荐使用 0.015 mm 地膜,其在免耕地膜两年使用下增产增收的综合效益更好。

4 结论

加厚地膜提高了地膜回收率。新膜使用下,加厚地膜的增产和增益效果不明显,反而降低了产投比;而在免耕地膜两年使用下,加厚地膜能显著提高产投比和净收益。然而,0.02 mm 地膜较 0.015 mm 地膜并没有显著提高经济效益,反而增加了成本,降低了产投比。因此,陇中旱农区推荐使用 0.015 mm 地膜为宜,特别是其在免耕地膜两年使用下有更高的净收益及产投比,还能降低残膜污染量。

参考文献 References

- [1] LI F M, WANG P, WANG J, et al. Effects of irrigation before sowing and plastic film mulching on yield and water uptake of spring wheat in semiarid Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(2): 77–88
- [2] 谢军红, 柴强, 李玲玲, 等. 有机氮替代无机氮对旱作全膜双垄沟播玉米产量和水氮利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1199–1206
- XIE J H, CHAI Q, LI L L, et al. Effects of the substitution of

- inorganic nitrogen by organic nitrogen fertilizer on maize grain yield and water and nitrogen use efficiency under plastic film fully mulched ridge-furrow in semi-arid area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1199–1206
- [3] ZHANG S L, SADRAS V, CHEN X P, et al. Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to crop management[J]. *Field Crops Research*, 2014, 163: 55–63
- [4] 李尚中, 樊廷录, 王勇, 等. 不同覆膜集雨种植方式对旱地玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 458–466
- LI S Z, FAN T L, WANG Y, et al. Effects of plastic film mulching and rain harvesting modes on chlorophyll fluorescence characteristics, yield and water use efficiency of dryland maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 458–466
- [5] 中华人民共和国农业部农垦局. 中国农垦统计年鉴-2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015
- Bureau of State Farms and Land Reclamation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. *China State Farms Statistical Yearbook 2014*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015
- [6] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 269–272
- YAN C R, MEI X R, HE W Q, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11): 269–272
- [7] LEE J G, HWANG H Y, PARK M H, et al. Depletion of soil organic carbon stocks are larger under plastic film mulching for maize[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70(4): 807–818
- [8] 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
- DING Y P, PAN W H, LONG M, et al. Effects of film thickness and film-uncovering time on the growth of spring maize and the recovery of residual film in dry farmland[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(8): 1096–1104
- [9] 张丹, 王洪媛, 胡万里, 等. 地膜厚度对作物产量与土壤环境的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(2): 293–301
- ZHANG D, WANG H Y, HU W L, et al. Effect of film thickness on crop yield and soil environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 293–301
- [10] 孙仕军, 张旺旺, 刘翠红, 等. 氧化生物双降解地膜降解性能及其对东北雨养春玉米田间水热和生长的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(1): 72–80
- SUN S J, ZHANG W W, LIU C H, et al. Degradation property of oxo-biodegradable plastic film and its mulching effect on soil moisture, soil temperature and maize growth in rainfed North-east China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(1): 72–80
- [11] 祁虹, 赵贵元, 王燕, 等. 我国棉田残膜污染危害与治理措施研究进展[J]. *棉花学报*, 2021, 33(2): 169–179
- QI H, ZHAO G Y, WANG Y, et al. Research progress on pollution hazards and prevention measures of residual film in cotton field in China[J]. *Cotton Science*, 2021, 33(2): 169–179
- [12] 何文清, 严昌荣, 赵彩霞, 等. 我国地膜应用污染现状及其防治途径研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(3): 533–538
- HE W Q, YAN C R, ZHAO C X, et al. Study on the pollution by plastic mulch film and its countermeasures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 533–538
- [13] 陈发. 新疆残膜回收机械化技术研究、应用与建议[J]. *新疆农业科学*, 2008, 45(S2): 127–134
- CHEN F. Research, application and suggestion on mechanization technology of residual film recovery in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2008, 45(S2): 127–134
- [14] 何为媛, 李玫, 李真熠, 等. 重庆市地膜残留系数研究[J]. *农业环境与发展*, 2013, 30(3): 76–78
- HE W Y, LI M, LI Z Y, et al. Study on residual coefficient of plastic film in Chongqing[J]. *Agro-Environment & Development*, 2013, 30(3): 76–78
- [15] 蔡子睿, 杨相龙, 刘人杰, 等. 农用地膜残留及其防治技术研究[J]. *绿色科技*, 2020, 22(24): 89–91
- CAI Z R, YANG X L, LIU R J, et al. Research on agricultural film residual control and recovery technology[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2020, 22(24): 89–91
- [16] 于显枫, 赵记军, 马明生. 不同厚度地膜对废旧地膜残留、回收影响及其使用选择概述[J]. *农学学报*, 2021, 11(1): 32–36
- YU X F, ZHAO J J, MA M S. Film of different thickness: Effect on residual and recovery of waste film and selection[J]. *Journal of Agriculture*, 2021, 11(1): 32–36
- [17] 苏永中, 张珂, 刘婷娜, 等. 免耕旧膜再利用对玉米产量及灌溉水生产力的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(5): 491–498
- SU Y Z, ZHANG K, LIU T N, et al. Effects of No-tillage combined with reused plastic film mulching on maize yield and irrigation water productivity[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5): 491–498
- [18] 胡琦. 北方干旱区地膜复用结合免耕玉米农田水氮高效利用机制及制度优化[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
- HU Q. Mechanisms and system optimization for high use efficiency of water and nitrogen in a maize field under plastic film reuse combined with no-tillage in northern arid region[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024
- [19] 赵财, 陈桂平, 柴强, 等. 不同灌水水平下少耕地膜覆盖对玉米农田土壤温度和水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 152–157
- ZHAO C, CHEN G P, CHAI Q, et al. The effect of minimum tillage and mulching on soil temperature and WUE of maize under different irrigation levels[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 152–157
- [20] 张俊, 郝西, 臧秀旺, 等. 地膜厚度对花生生长发育和氮素积累的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(11): 3668–3675
- ZHANG J, HAO X, ZANG X W, et al. Effects of film thickness on growth and nitrogen accumulation of peanut[J]. *Chinese*

- Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3668–3675
- [21] 张展军, 杨宏伟, 樊志龙, 等. 绿洲灌区免耕一膜两年用玉米密植的水分承载潜力[J]. 中国农业科学, 2021, 54(16): 3406–3416
- ZHANG Z J, YANG H W, FAN Z L, et al. Water-carrying potential of no-tillage with plastic film mulching for 2-year coupled with maize high-density planting in oasis irrigation area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(16): 3406–3416
- [22] 唐文雪, 马忠明. 不同厚度地膜一膜三年覆盖对土壤水热效应、玉米产量及地膜残留的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(4): 153–161
- TANG W X, MA Z M. Effects of three-year mulching with different thicknesses of plastic film on soil water and heat effect, maize yield and film residues[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(4): 153–161
- [23] 郭辉, 于欣东, 靳伟, 等. 地膜拉伸力学模型及回收厚度研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 173–178
- GUO H, YU X D, JIN W, et al. Establishment of prediction model for tensile mechanics of plastic film and prediction of film thickness[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2020, 41(1): 173–178
- [24] 张丽华, 徐晨, 于江, 等. 半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 299–306
- ZHANG L H, XU C, YU J, et al. Effects of straw returning on soil moisture, temperature and maize yield in semi humid area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 299–306
- [25] XIE J H, WANG L L, LI L L, et al. Subsoiling increases grain yield, water use efficiency, and economic return of maize under a fully mulched ridge-furrow system in a semiarid environment in China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 199: 104584
- [26] 闫雅非, 刘景辉, 史建国. 旧膜对土壤温度和向日葵产量的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 206–210
- YAN Y F, LIU J H, SHI J G. Effects of old plastic film mulching on soil temperature and the yield of sunflower[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3): 206–210
- [27] 蔡丽君. 秸秆长期免耕覆盖对黑土有机碳和微生物碳代谢的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023
- CAI L J. Effect of long-term residue mulching on organic carbon and microbial carbon metabolism in no-tillage black soil farmland[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023
- [28] 梁全喜. 松嫩平原秸秆还田和耕作方式对土壤理化性状和作物产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- LIANG Q X. Effects of straw returning and tillage methods on soil physicochemical properties and crop yield in Songnen Plain[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023
- [29] ZHANG X L, ZHAO Y Y, ZHANG X T, et al. Re-used mulching of plastic film is more profitable and environmentally friendly than new mulching[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 216: 105256
- [30] BRIASSOULIS D. Mechanical behaviour of biodegradable agricultural films under real field conditions[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, 91(6): 1256–1272
- [31] PHILIP M, AL-AZZAWI F. Effects of natural and artificial weathering on the physical properties of recycled poly (ethylene terephthalate)[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, 26(8): 3139–3148
- [32] 张佳喜, 王学农, 张丽, 等. 农田地膜拉伸性能变化对缠绕式回收的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 41–47
- ZHANG J X, WANG X N, ZHANG L, et al. Effects of mechanical tensile properties of plastic film on plastic recycling method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(20): 41–47
- [33] 方旭, 靳伟, 张学军, 等. 农用地膜力学性能试验与分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(10): 203–207, 212
- FANG X, JIN W, ZHANG X J, et al. Testing and analysis of mechanical properties of agricultural ground membrane[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(10): 203–207, 212
- [34] 姜姐, 徐梓航, 胡跃鑫, 等. 相对分子量分布对双峰聚乙烯薄膜树脂性能的影响[J]. 中国塑料, 2019, 33(11): 12–17
- JIANG N, XU Z H, HU Y X, et al. Effect of molecular weight distribution on properties of bimodal polyethylene resin for films[J]. *China Plastics*, 2019, 33(11): 12–17
- [35] 田馨, 张涵, 孙诗冉, 等. 地膜材料与厚度对地膜回收及棉花生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(1): 206–214
- TIAN X, ZHANG H, SUN S R, et al. Influence of plastic film material and thickness on plastic film recovery and cotton growth[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(1): 206–214