



李保成, 白梓辰, 秦书勉, 刘丹, 韩云飞, 张乐, 杜二小, 高宏艳, 张向前, 王伟妮, 任永峰. 不同类型降解膜覆盖对玉米干物质积累、分配和转运及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(01): 21-34.

LI Baocheng, BAI Zichen, QIN Shumian, LIU Dan, HAN Yunfei, ZHANG Le, DU Erxiao, GAO Hongyan, ZHANG Xiangqian, WANG Weini, REN Yongfeng. Effects of different types of degradable film mulching on the accumulation, allocation and translocation of dry matter, and yield of maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(01): 21-34.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.01.03

不同类型降解膜覆盖对玉米干物质积累、分配和 转运及产量的影响

李保成^{1,2} 白梓辰¹ 秦书勉¹ 刘丹¹ 韩云飞^{1,2} 张乐^{1,2} 杜二小^{1,2} 高宏艳^{1,2}
张向前¹ 王伟妮³ 任永峰^{1,2*}

(1. 内蒙古自治区农牧业科学院 资源环境与可持续发展研究所, 呼和浩特 010031;

2. 内蒙古自治区旱作农业重点实验室, 呼和浩特 010031;

3. 鄂尔多斯市农牧业生态与资源保护中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017101)

摘要 为探究覆盖不同类型生物可降解地膜对玉米干物质积累、分配和转运及产量的影响, 于2023—2024年在内蒙古自治区达拉特旗东海心村, 设置聚乙烯地膜(PE)、快速生物降解膜(M₁)、慢速生物降解膜(M₂)和中速生物降解膜(M₃)4种覆膜处理, 以无覆膜处理作为对照(CK), 测定土壤含水率及玉米茎、叶、苞叶、穗的干物质积累量和产量等指标, 并解析不同处理下玉米干物质积累分配转运特征。结果表明: 与CK相比, 4种覆膜处理均可显著提高0—40 cm土壤含水量($P < 0.05$)。M₃的玉米籽粒产量最高, 2023和2024年其产量分别为15 302.35和15 509.71 kg/hm², 分别较PE、M₁、M₂和CK处理增产6.22%~6.57%、12.37%~12.54%、2.58%~3.72%和20.22%~23.46%。M₃可显著提高灌浆-成熟期玉米地上部干物质积累量, 其干物质积累量分别较M₁、M₂和PE处理高出14.56%~30.79%、6.22%~11.18%和7.25%~23.46%。经Logistic模型拟合显示, M₃的干物质增长速率(v)最大, 分别较CK、M₁、M₂和PE高20.67%、12.45%、6.39%和3.15%。随玉米生育进程推进, 叶的干物质占比呈逐渐降低趋势; 茎的干物质占比呈单峰曲线变化, 峰值出现在大喇叭口期; 而穗的干物质占比则持续递增, 成熟期达到最大值, 其中M₃的穗部干物质占比最高, 分别比M₁、M₂、PE和CK高出17.74%、6.61%、10.39%和20.62%。M₃的干物质转运表现最优, 在花前阶段其营养器官干物质转运量(DMR)、营养器官干物质转运率(DMRE)和营养器官干物质积累对籽粒干物质积累贡献率(DMRCG)较PE分别升高24.76%、19.53%和31.02% ($P < 0.05$); 花后阶段, M₃的DMA最大, 分别比M₂和PE高11.56%和28.92%。综上, 覆盖中速生物降解膜处理(M₃)可通过提高玉米地上部干物质最大积累速率, 增加玉米干物质积累量, 提升花前干物质积累量对籽粒的贡献率和花后干物质积累量, 进而增大穗部干物质分配比例, 最终实现玉米籽粒产量的提高。

关键词 玉米; 干物质; 积累; 分配; 转运; 产量

中图分类号 S513

文章编号 1007-4333(2026)01-0021-14

文献标志码 A

Effects of different types of degradable film mulching on the accumulation, allocation and translocation of dry matter, and yield of maize

LI Baocheng^{1,2}, BAI Zichen¹, QIN Shumian¹, LIU Dan¹, HAN Yunfei^{1,2}, ZHANG Le^{1,2},
DU Erxiao^{1,2}, GAO Hongyan^{1,2}, ZHANG Xiangqian¹, WANG Weini³, REN Yongfeng^{1,2*}

收稿日期: 2025-03-17; 接受日期: 2025-04-28

基金项目: 鄂尔多斯市“揭榜挂帅”项目(JBGS-2021); 内蒙古自治区科技计划(2023SKYPT0045)

第一作者: 李保成(ORCID:0009-0004-2517-5189), 研究实习生, 主要从事旱作农业技术研究, E-mail: 2531171640@qq.com

通讯作者: 任永峰(ORCID:0009-0001-0858-0949), 研究员, 主要从事旱作农业技术研究, E-mail: renyongfeng_1984@163.com

- (1. Institute Resources, Environment and Sustainable Development Institute, Inner Mongolia Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China;
2. Inner Mongolia Key Laboratory of Dryland Agriculture, Hohhot 010031, China;
3. Ordos Agricultural and Animal Husbandry Ecology and Resources Conservation Center, Ordos 017101, China)

Abstract To explore the effects of different types biodegradable film mulching on dry matter's accumulation, distribution and transport, and yield of maize, in Donghai Xin Village, Dalat Banner, Inner Mongolia Autonomous Region. From 2023 to 2024, four mulching treatments, polyethylene mulch film (PE), rapid biodegradable film (M_1), slow biodegradable film (M_2) and medium-speed biodegradable film (M_3) with no mulching treatment as a control (CK) were set in Donghai Xin Village, Dalat Banner, Inner Mongolia Autonomous Region. Soil moisture content, dry matter accumulation and yield of maize stems, leaves, bracts and ears were measured, and the dry matter accumulation and distribution and transport characteristics of maize under different treatments were analyzed. The results showed that: Compared with CK, the soil moisture content of 0-40 cm was significantly increased by both the biodegradable film and the polyethylene film treatment ($P < 0.05$). The yield of maize in M_3 treatment was the highest, with the yield of 15 302.35 and 15 509.71 kg/hm² in 2023 and 2024, respectively, compared with PE, M_1 , M_2 and CK treatments, the yield increased by 6.22%-6.57%, 12.37%-12.54%, 2.58%-3.72% and 20.22%-23.46%, respectively. M_3 treatment could effectively increase the dry matter accumulation of aboveground maize from the grain filling stage to maturity stage, and its dry matter accumulation was 14.56%-30.79%, 6.22%-11.18% and 7.25%-23.46% higher than that of M_1 , M_2 and PE treatments, respectively. The Logistic model fitting showed that the dry matter growth rate (v) of M_3 treatment was the largest, which was 20.67%, 12.45%, 6.39% and 3.15% higher than that of CK, M_1 , M_2 and PE, respectively. The dry matter allocation in the aboveground part of maize was specific to the growth period, and the proportion of leaves gradually decreased. The proportion of stem allocation changed in a unimodal curve, and the peak appeared in the large trumpet stage. The proportion of dry matter in the ear continued to increase, reaching the maximum value at the maturation stage, and the proportion of dry matter in the ear of M_3 was the highest, which was 17.74%, 6.61%, 10.39% and 20.62% higher than that of M_1 , M_2 , PE and CK, respectively. The dry matter transport performance of M_3 treatment was the best, at the pre-flowering stage, the dry matter transport (DMR), dry matter transport rate (DMRE) of pre-flowering vegetative organs and the contribution rate of dry matter accumulation (DMRCG) of pre-flowering vegetative organs to grain dry matter accumulation (DMRCG) increased by 24.76%, 19.53% and 31.02%, compared with PE treatment ($P < 0.05$), respectively. The dry matter accumulation (DMA) of M_3 at the post-flowering stage was the largest, which was 11.56% and 28.92% higher than that of M_2 and PE treatments, respectively. In conclusion, medium-speed biodegradable film treatment (M_3) increased the maximum dry matter accumulation rate of maize aboveground, increased the dry matter accumulation rate of maize, increased the contribution rate of dry matter accumulation before flowering to grain and dry matter accumulation after flowering, and then increased the dry matter allocation ratio of ears, and finally achieved the increase of maize grain yield.

Keywords maize; dry matter; accumulation; allocation; translocation; yield

玉米作为我国主要粮食作物之一,保证其高产和稳产对国家粮食安全具有重要的战略意义^[1-3]。地膜覆盖因其可减少地表水分蒸发、提升土壤温度及抑制杂草生长等功效,已成为北方玉米增产增效的核心农艺措施^[4-5]。然而,伴随传统聚乙烯(PE)或聚氯乙烯(PVC)地膜的大规模使用,土壤中不可降解的残膜污染问题日益凸显^[6]。这些残留物不仅导致农田土壤结构破坏、地力衰退,还会降低土壤渗透性和持水能力,严重抑制作物根系发育,降低

玉米产量^[7-9]。生物可降解地膜的保水增温性能与传统地膜相近,在土壤环境中可以分解,显著降低了土壤污染风险^[10-13]。因此,开展生物可降解地膜覆盖研究对农田生态保护和玉米生产可持续发展具有重要意义。

针对生物降解膜覆盖对玉米干物质积累和产量的影响已有诸多研究,张杰^[14]研究表明相较于无覆盖处理,覆盖生物降解膜可显著提升玉米干物质重和产量。翟勇全等^[15]研究表明,与不覆膜相比,

覆生物降解膜2年后,玉米地上部干物质积累量平均增加了10.82%,最大累积速率提高了0.034 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$),最大累积速率出现时间提前了6.86 d,而与普通地膜覆盖处理无显著差异;对生物降解膜和普通地膜处理的玉米产量比较发现,2种覆膜处理的玉米产量亦无显著差异^[15-16]。申丽霞等^[17]研究却发现,可降解地膜覆盖在玉米生育前中期具有较好的土壤保温保墒作用,能显著促进玉米地上部干物质的积累,但到玉米生育中后期其作用较PE地膜有所减弱,导致玉米产量较使用PE地膜有所降低。还有研究表明,可降解地膜覆盖下的玉米产量较PE地膜升高3.67%~16.65%^[18-19]。

目前有关不同降解周期的生物可降解膜覆盖对春玉米干物质积累分配、转运和产量影响的研究鲜见报道。本研究在内蒙古典型引黄灌区达拉特旗设置不同降解周期的生物可降解地膜覆盖处理,测定土壤含水率和玉米茎、叶、苞叶、穗的干物质积累量及产量等指标,并解析不同处理下玉米干物质

积累分配转运特征,旨在探明玉米干物质积累分配转运对生物可降解膜覆盖的响应机制,以为内蒙古引黄灌区春玉米稳产高产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2023—2024年在内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗树林召镇东海心村(40°29'N,109°52'E,海拔1 042 m)实施,该区域属典型温带大陆性气候区。该区域气候特征表现为冬季严寒、夏季酷热,全年降水稀少、昼夜温差大。年均气温为6.1~7.1℃,年蒸发量达2 115 mm。区域光热资源丰富,年日照时数约3 000 h,无霜期135~150 d,年均降水量240~360 mm,约70%降水量集中于6—9月,见图1。供试土壤为潮土,0—20 cm耕作层土壤容重测定值为1.35 g/cm³,有机质含量为6.86 g/kg,全氮0.43 g/kg,有效磷含量为2.32 mg/kg,速效钾含量为96.4 mg/kg。

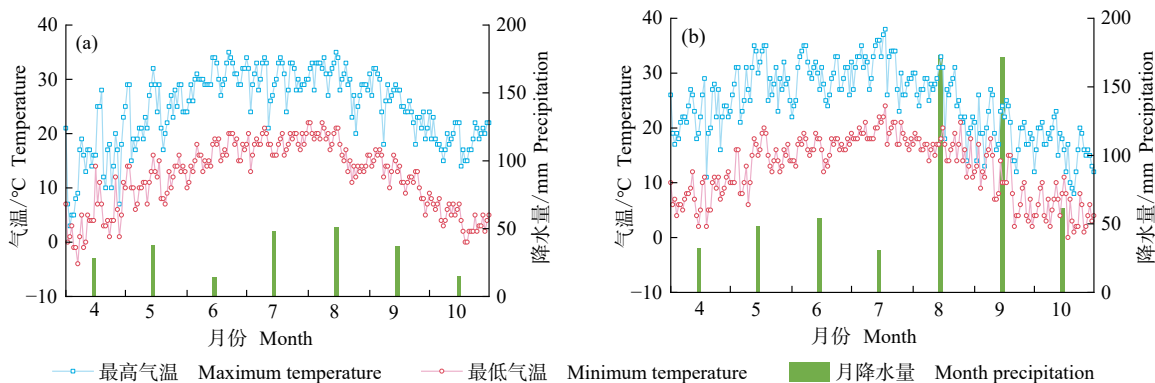


图1 2023(a)和2024年(b)玉米生育期内试验区的降水和气温

Fig. 1 Precipitation and temperature in the experimental area during the maize growth period in 2023 (a) and 2024 (b)

1.2 试验设计

供试玉米品种为当地主栽玉米品种‘禾众玉11’,购自内蒙古利禾农业科技发展有限公司。试验采用大区试验设计,设置传统聚乙烯地膜(PE)、快速全生物降解膜(M₁)、慢速全生物降解膜(M₂)和中速全生物降解膜(M₃)4种地膜覆盖处理,以裸地无覆膜为对照(CK)。所有地膜规格统一为700 mm幅宽、0.008 mm厚度,不同地膜裂解特性见表1。本试验单区面积为150 m²(3 m×50 m),试验于每年4月下旬播种,10月中旬收获,播种方式为机械穴播,膜上播种2行,行距60 cm,株距20 cm。水分管理方面,全生育期灌溉定额为2 400 m³/hm²,按

播前:苗期:拔节期:抽雄吐丝期:灌浆期=1:1:2:2:2进行灌溉。施肥体系由基肥和追肥构成,基肥:拔节期:抽雄期:灌浆期=2:3:3:2分期施用,氮肥为尿素(N 46 g/100 g)300 kg/hm²,磷肥施用磷酸二铵(N 18 g/100 g, P₂O₅ 46 g/100 g)200 kg/hm²,钾肥施用氯化钾(K₂O 60 g/100 g)100 kg/hm²。其他管理同当地一般大田。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水率

在苗期(V₄)、拔节期(V₆)、大喇叭口期(V₁₂)、吐丝期(R₁)、灌浆期(R₃)、成熟期(R₆),使用土钻每隔20 cm土层取土样,采用烘干称重法^[20]测定土壤含

表1 不同地膜的降解时间

Table 1 Degradation time of different degrading membranes d

处理 Treatment	诱导期 Induction period	开裂期 Cracking period	大裂期 Great fissure period	破裂期 Rupture period
M ₁	40	57	77	123
M ₂	70	80	100	150
M ₃	55	68	90	110
PE	115	135		

注:M₁,快速生物可降解膜;M₂,慢速生物可降解膜;M₃,中速生物可降解膜;PE,聚乙烯地膜。下同。
Note: M₁, rapid biodegradable membrane; M₂, slow biodegradable membrane; M₃, medium-speed biodegradable membrane; PE, polyethylene mulch. The same below.

水量。

$$SWC=\frac{W_1-W_2}{W_2-W}$$

式中:SWC为土壤含水率,%;W为铝盒重,g;W₁为鲜土重,g;W₂为干土重,g。

1.3.2 地上部干物质积累量

在苗期(V₄)、拔节期(V₆)、大喇叭口期(V₁₂)、吐丝期(R₁)、灌浆期(R₃)、成熟期(R₆),于各大区地膜覆盖带内随机选取10株代表性植株。清除表面附着物后,按茎、叶、穗、苞叶进行分离,置于烘箱中在105℃下杀青30 min,随后调整至80℃恒温持续烘干至质量恒定,测定干物质重,g。

地上部干物质积累速率(v)计算公式如下:

$$v=\frac{D_2-D_1}{T_2-T_1}$$

式中:v为玉米干物质积累速率,g/(株·d);D₁和D₂分别为T₁和T₂时期所对应的玉米地上部干物质积累量,g。

采用Logistic方程拟合玉米干物质积累过程,进行求导可知增长速率方程,对增长速率方程进行求导,并令所得导数=0,可得最大干物质积累速率及达到最大积累速率时对应的出苗后天数。计算公式如下:

$$D=\frac{M}{1+Ae^{-kt}}$$

式中:D为不同时期干物质积累量,g;M为干物质积累潜力,即最大干物质质量,g;A、k为模型固定系数;t为出苗后天数,d。

地上部干物质转运量计算公式如下:

$$DMR=G_1-G_2$$
$$DMRE=\frac{DMR}{G_1}$$

$$DMRCG=\frac{DMR}{G_2}$$

$$DMA=G_3-G_4$$

$$DMAC=1-DMRCG$$

式中:DMR为花前营养器官干物质转运量,g;DMRE为花前营养器官干物质转运率,%;DMRCG为花前营养器官干物质积累对籽粒干物质积累的贡献率,%;DMA为花后干物质积累量,g;DMAC为花后干物质积累对籽粒干物质积累贡献率,%;G₁为吐丝期(R₁)营养器官干物质积累量,g;G₂为成熟期(R₆)营养器官干物质积累量,g;G₃为成熟期(R₆)干物质积累量,g;G₄为吐丝期(R₁)干物质积累量,g。

1.3.3 产量

在玉米收获期,待籽粒乳线消失,黑色层出现,收取各处理区1膜全部果穗,脱粒后采用山东泽顺电子科技有限公司谷物水分测量仪(8188-A)测定籽粒含水量,以玉米籽粒含水率14%折算最终玉米产量,kg/hm²。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2021软件进行数据整理,SPSS 27.0统计学软件进行单因素方差分析和显著性检验,采用Origin 2024b软件进行作图。

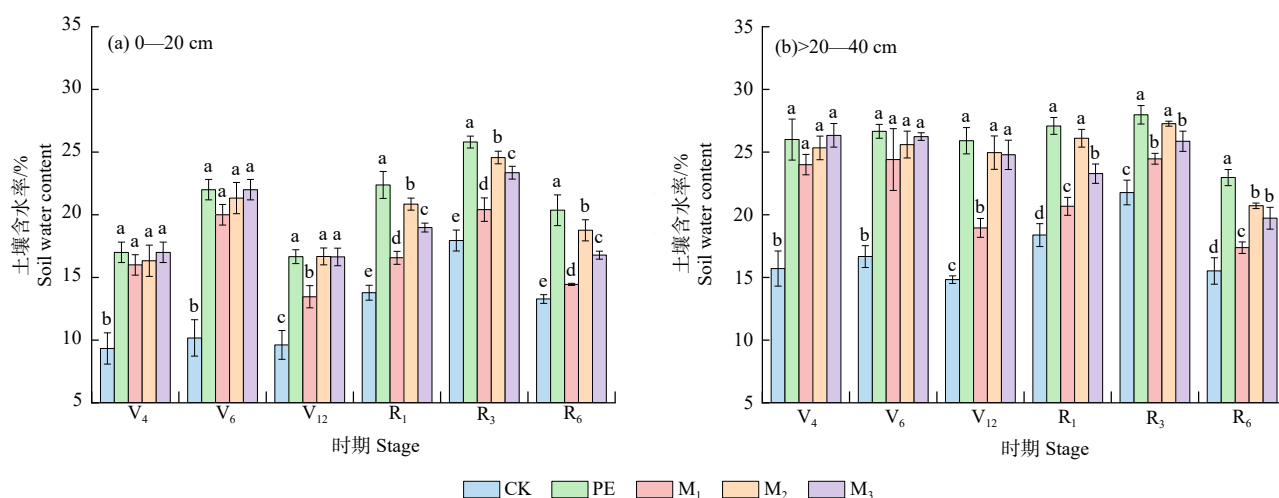
2 结果与分析

2.1 不同生物可降解地膜覆盖对土壤含水率的影响

由图2和图3可知,2年的玉米苗期(V₄)-成熟期(R₆),与无覆膜处理(CK)相比,覆盖快速生物降解膜(M₁)、慢速生物可降解地膜(M₂)和中速生物可降解地膜(M₃)和聚乙烯地膜处理(PE)均可提高0—40 cm土层的土壤含水率。2个试验年度,随生

育期推进,0—20 cm 土层的各处理土壤含水率变化情况基本一致;苗期(V_4)和拔节期(V_6)的 PE、 M_1 、 M_2 和 M_3 处理间无显著差异($P>0.05$);从大喇叭口期(V_{12})开始 M_1 的土壤含水率逐渐降低,降幅为10.02%~29.80%;吐丝期(R_1)-成熟期(R_6),土壤含水率由高到低均为 $PE>M_2>M_3>M_1>CK$,吐丝期(R_1)、灌浆期(R_3)和成熟期(R_6)的 PE 土壤含水率分别较 M_1 、 M_2 、 M_3 高 6.47%~28.46%、6.95%~

35.06%、5.06%~22.87%。 >20 —40 cm 土层中,苗期(V_4)各覆膜处理的土壤含水率无显著差异,拔节期(V_6)和大喇叭口期(V_{12}), M_1 的土壤含水率最低; R_1 - R_6 ,土壤含水率由高到低均为 $PE>M_2>M_3>M_1>CK$,吐丝期(R_1)、灌浆期(R_3)和成熟期(R_6)的 PE 土壤含水率分别较其他覆膜处理高 6.30%~33.49% (R_1)、3.63%~17.58% (R_3)和 7.82%~26.44% (R_6)。



V_4 , 苗期; V_6 , 拔节期; V_{12} , 大喇叭口期; R_1 , 吐丝期; R_3 , 灌浆期; R_6 , 成熟期。不同小写字母表示在玉米相同生育期内不同处理在 $P<0.05$ 水平具有显著性差异。下同。

V_4 , seedling stage; V_6 , jointing stage; V_{12} , large bell stage; R_1 , silking stage; R_3 , grouting stage; R_6 , maturity stage. Different lowercase letters indicate significant differences at the $P<0.05$ level within the same growth of maize. The same below.

图 2 2023 年不同处理的土壤含水率动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of soil moisture content under different treatments in 2023

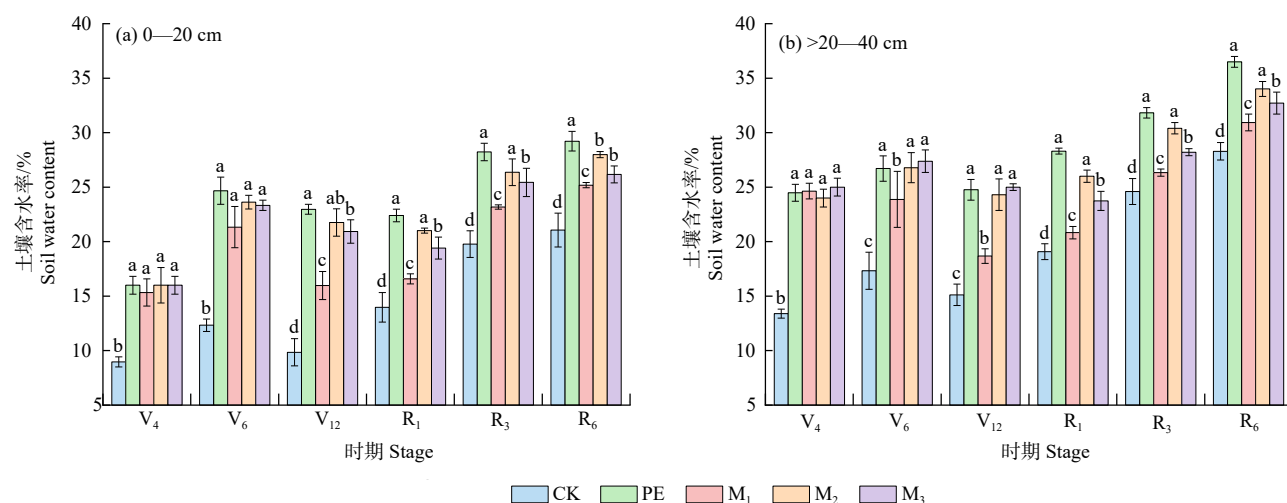


图 3 2024 年不同处理的土壤含水率动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of soil moisture content under different treatments in 2024

2.2 不同生物可降解地膜覆盖对玉米地上部干物质积累量的影响

由图4可知,各覆膜处理玉米地上部干物质积累量均显著高于无覆膜处理($P<0.05$)。苗期(V_4)-拔节期(V_6),各覆膜处理的玉米地上部干物质积累量无显著差异($P>0.05$)。进入大喇叭口期(V_{12}), M_1 的玉米地上部干物质积累量分别较 M_2 、 M_3 和PE降低8.34%、7.41%和7.71%($P<0.05$), M_2 、 M_3 、PE处理间无显著差异($P>0.05$)。吐丝期

(R_1),PE、 M_2 和 M_3 的地上部玉米干物质积累分别较 M_1 升高7.31%、8.29%和16.07%($P<0.05$)。进入灌浆期(R_3)后,PE与 M_2 的玉米地上部干物质积累量无显著差异($P>0.05$), M_3 的玉米地上部干物质积累量最大,分别较PE、 M_1 和 M_2 增加15.10%、23.77%和9.25%($P<0.05$)。成熟期(R_6)各处理地上部干物质积累量由高到低为 $M_3>M_2>PE>M_1$; M_3 的地上部玉米干物质积累分别较PE、 M_1 和 M_2 升高20.83%、29.96%和9.77%。

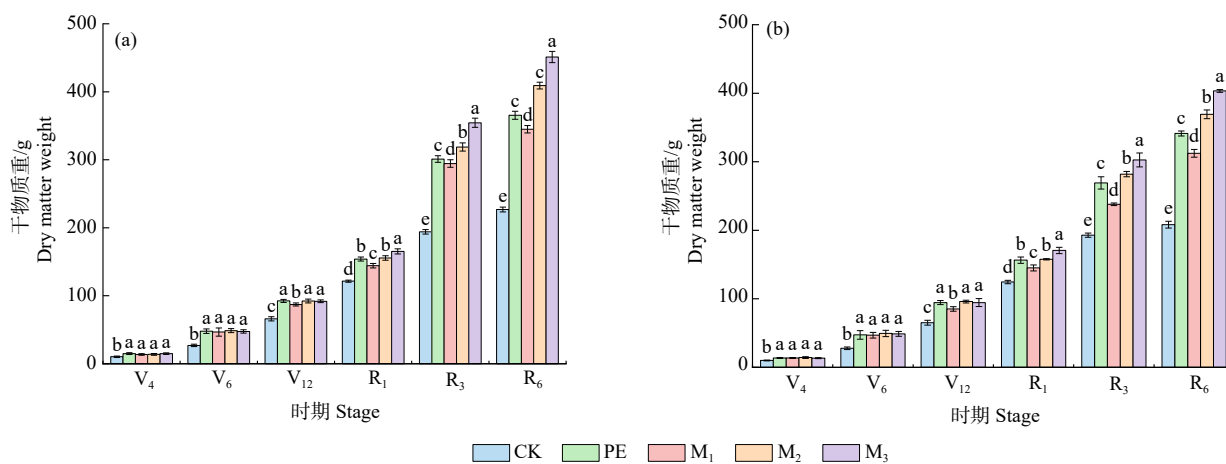


图4 2023(a)和2024年(b)不同处理的玉米地上部干物质积累动态

Fig. 4 Dynamics of aboveground maize dry matter accumulation under different treatments in 2023 (a) and 2024 (b)

2.3 不同生物可降解地膜覆盖对玉米地上部干物质积累速率的影响

由图5可知,CK的玉米地上部干物质积累速率最低。2个试验年度,苗期(V_4)-大喇叭口期(V_{12}),各覆膜处理的地上部干物质积累速率(v)均无显著差异

($P>0.05$)。大喇叭口期(V_{12}), M_1 的地上部玉米干物质积累速率分别较 M_2 、 M_3 和PE降低20.49%、22.28%和21.37%($P<0.05$), M_2 、 M_3 、PE的玉米干物质积累量无显著差异($P>0.05$)。2个试验年度内,随着生育进程推进,各处理玉米地上部干物质积累速率呈先上升

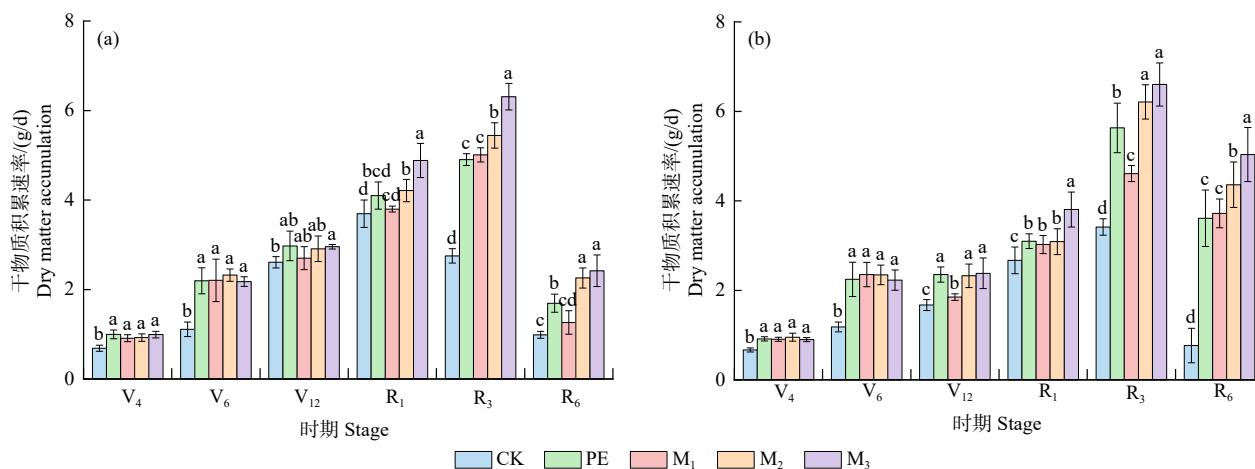


图5 2023(a)和2024年(b)不同处理的玉米地上部干物质积累速率

Fig. 5 Dynamics of aboveground maize dry matter accumulation rate under different treatments in 2023 (a) and 2024 (b)

后降低趋势,至灌浆期(R_3)达到最大值。灌浆期(R_3), M_3 的玉米地上部干物质积累速率表现最优,分别较PE、 M_1 和 M_2 高22.96%、34.59%和11.09% ($P<0.05$)。成熟期各处理地上部玉米干物质积累速率均较灌浆期有所降低,但 M_3 仍维持较高的干物质积累速率,分别较PE、 M_1 和 M_2 高41.19%、63.43%和11.33%。全生育期干物质积累速率动态分析表明, M_3 可显著提高吐丝期(R_1)后的玉米地上部干物质积累速率,而且减缓了灌浆期(R_3)-成熟期(R_6)玉米地上部干物质积累速率的降低。

2.4 不同生物可降解地膜覆盖对玉米地上部干物质最大增长速率及其出现时间的影响

由表2可知,2个试验年度内,各处理的最大干物

质增长速率表现为 $M_3>M_2>PE>M_1>CK$,4个覆膜处理的地上部最大干物质增长速率(v_{max})较CK高29.68%~68.74%,且干物质最大增长速率出现的时间较CK延后3.87~18.64 d。 M_2 和 M_3 的地上部 v_{max} 分别较PE高7.18%和20.48%。2023和2024年玉米干物质最大增长速率出现时间表现有所不同,2023年出现时间表现为 $M_3>M_2>PE>M_1>CK$, M_2 和 M_3 分别较PE推迟3.69和4.18 d,PE较 M_1 推迟1.8 d;2024年为 $M_3>M_2>M_1>PE>CK$,其中 M_1 、 M_2 和 M_3 分别较PE推迟2.06、2.33和3.58 d。可见,与其他处理相比, M_3 通过增大玉米干物质最大增长速率,进而有效促进玉米干物质积累。

表 2 不同处理下玉米地上干物质积累的 Logistic 方程回归分析

Table 2 Logistic equation analysis on aboveground dry matter accumulation of maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	R^2	最大增长速率出现时间/d Maximum growth rate emergence time	$v_{max}/(g/d)$
2023	PE	$y=365.46/(1+23.41e^{-0.0563r})$	0.991	56.01	5.14
	M_1	$y=344.96/(1+24.24e^{-0.0588r})$	0.986	54.21	5.07
	M_2	$y=409.08/(1+28.50e^{-0.0549r})$	0.987	59.70	5.61
	M_3	$y=451.21/(1+29.28e^{-0.0561r})$	0.991	60.19	6.32
	CK	$y=226.89/(1+26.85e^{-0.0605r})$	0.995	50.34	3.43
2024	PE	$y=341.24/(1+23.85e^{-0.0540r})$	0.986	58.73	4.61
	M_1	$y=312.34/(1+21.98e^{-0.0508r})$	0.977	60.79	3.96
	M_2	$y=369.19/(1+24.82e^{-0.0526r})$	0.985	61.06	4.85
	M_3	$y=403.34/(1+28.93e^{-0.0540r})$	0.986	62.31	5.44
	CK	$y=208.26/(1+19.74e^{-0.0683r})$	0.997	43.67	3.55

2.5 不同生物可降解地膜覆盖对玉米干物质分配的影响

由图6可知,从苗期(V_4)-成熟期(R_6),玉米叶的干物质分配比例逐渐降低;茎的干物质分配比例先上升后下降,在大喇叭期(V_{12})达到最大;穗的干物质分配比例随着生育时期推进逐渐增加,于成熟期(R_6)达到峰值;苞叶则呈下降趋势。各处理不同生育时期玉米植株地上部各器官的干物质分配不尽相同,苗期(V_4)-成熟期(R_6),茎的干物质分配比例均以CK最高。叶的干物质分配比具有年际差异,2023年,苗期(V_4)-大喇叭口期(V_{12}),PE叶的干物质分配比例最高,比其他处理高2.28%~44.52%;吐丝期(R_1)各覆膜处理间无显著差异 ($P>0.05$),但均显著高于CK ($P<0.05$);灌浆期

(R_3)和成熟期(R_6) M_3 的叶片干物质分配比例最高。2024年,苗期(V_4)-大喇叭口期(V_{12}),叶片的干物质分配比例最高的是 M_3 ;吐丝期(R_1),4个覆膜处理叶的干物质占比无显著差异 ($P>0.05$),但显著高于CK ($P<0.05$);成熟期(R_6),各处理叶片干物质占比无显著差异 ($P>0.05$)。穗的干物质分配表现最优的也是 M_3 ,吐丝期(R_1)-成熟期(R_6), M_3 穗的干物质分配比分别较 M_1 、 M_2 、PE和CK高17.74%~50.07%、6.61%~20.02%、10.39%~20.50%和20.62%~124.18% ($P<0.05$)。

2.6 不同生物可降解地膜覆盖对玉米干物质转运的影响

由表3可知,2个试验年度内,无覆膜处理(CK)的花前干物质转运量(DMR)、花前干物质转运率

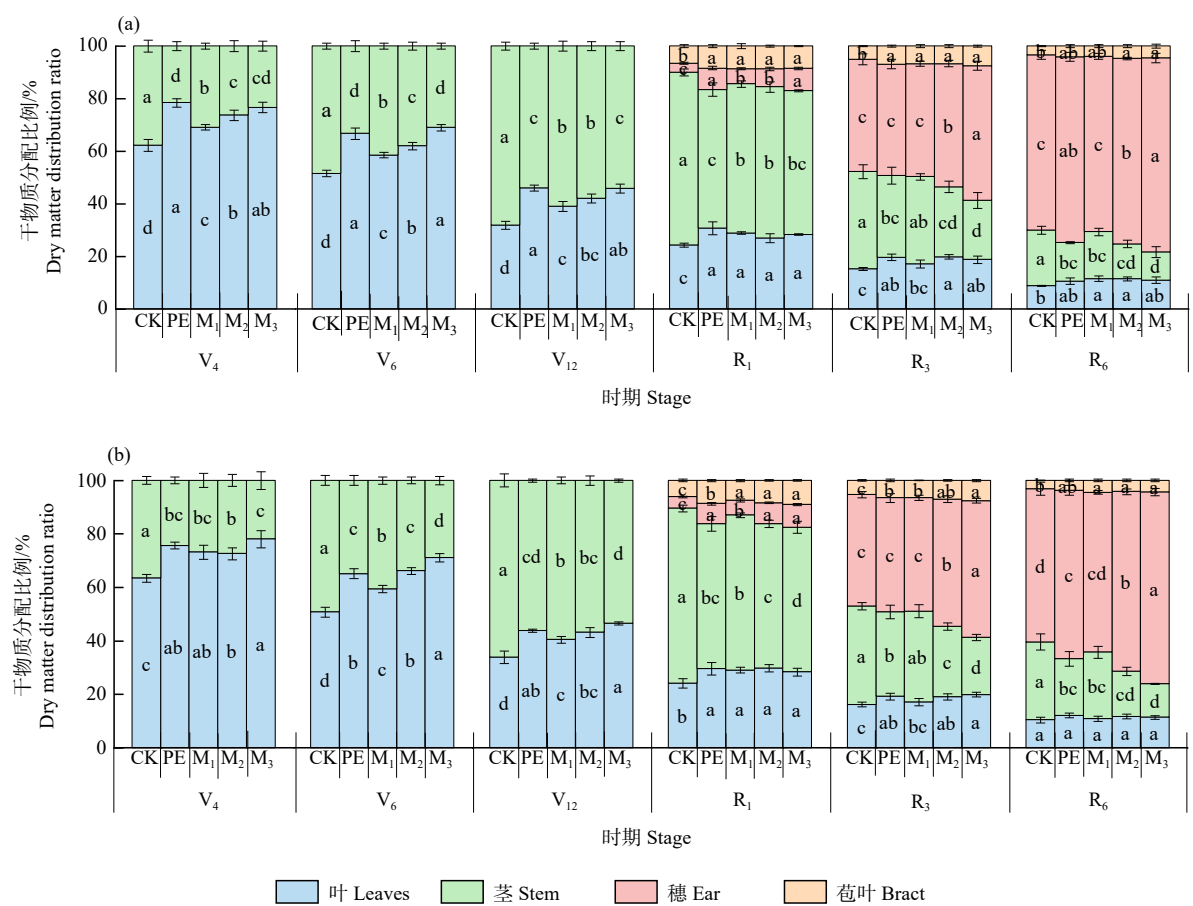


图6 2023(a)和2024年(b)不同生育时期不同处理的玉米地上部干物质分配比例

Fig. 6 Dynamics of aboveground maize dry matter distribution ratio under different treatments in 2023 (a) and 2024 (b)

表3 不同处理的玉米干物质转运特征

Table 3 Dry matter transport characteristics of maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	花前 Pre-anthesis			花后 Post anthesis	
		DMR/g	DMRE/%	DMRCG/%	DMA/g	DMAC/%
2023	PE	32.97±2.21 ^b	11.13±0.43 ^b	19.56±4.01 ^b	214.78±11.33 ^c	76.61±1.78 ^b
	M ₁	23.49±2.49 ^d	10.23±1.25 ^b	15.37±4.82 ^{bc}	200.79±10.86 ^c	80.73±1.73 ^a
	M ₂	28.22±0.50 ^c	9.79±0.24 ^c	16.43±4.90 ^{bc}	253.57±7.30 ^b	79.67±0.61 ^a
	M ₃	36.04±16.70 ^a	12.69±0.97 ^a	26.51±1.31 ^a	286.02±5.18 ^a	74.68±1.70 ^c
	CK	13.79±1.26 ^c	8.48±0.38 ^d	11.41±2.38 ^c	138.71±2.40 ^d	81.36±3.67 ^a
2024	PE	23.97±6.09 ^b	9.61±2.15 ^b	15.29±2.70 ^{ab}	184.80±4.21 ^c	83.71±4.30 ^c
	M ₁	16.33±2.04 ^c	8.75±1.08 ^c	11.00±2.79 ^{bc}	166.57±7.66 ^d	87.91±1.86 ^b
	M ₂	19.20±6.14 ^{bc}	9.16±2.15 ^b	14.50±1.37 ^b	211.44±3.53 ^b	83.51±3.73 ^c
	M ₃	35.00±2.53 ^a	12.10±0.58 ^a	19.15±2.94 ^a	232.74±6.16 ^a	77.46±1.38 ^d
	CK	7.45±3.58 ^d	6.27±2.91 ^d	6.37±0.77 ^d	100.32±2.09 ^c	94.06±2.18 ^a

注:DMR,花前营养器官干物质转运量;DMRE,花前营养器官干物质转运率;DMRCG,花前营养器官干物质积累对籽粒干物质积累的贡献率;DMA,花后干物质积累量;DMAC,花后干物质积累对籽粒干物质积累贡献率。

Note: DMR, dry matter transport of vegetative organs before flowering; DMRE, dry matter transport rate of vegetative organs before flowering; DMRCG, contribution rate of dry matter accumulation of vegetative organs to grain dry matter accumulation before flowering; DMA, post-flowering dry matter accumulation; DMAC, the contribution rate of post-flowering dry matter accumulation to grain dry matter accumulation.

(DMRE)、花前干物质转运对籽粒干物质积累贡献率(DMRCG)均低于4个覆膜处理。 M_3 的干物质转运表现最优,在花前阶段其DMR、DMRE和DMRCG较PE分别增加24.76%、19.53%和31.02% ($P < 0.05$);花后阶段, M_3 的干物质积累量(DMA)最大,分别比 M_2 和PE高11.56%和28.92%; M_1 的DMA较PE下降8.06%。花后干物质积累对籽粒的贡献率(DMAC)存在年际差异,2023年各处理由高到低为 $CK > M_1 > M_2 > PE > M_3$,2024年为 $CK > M_1 > PE > M_2 > M_3$ 。由此可见, M_3 可有效提高花前营养器官干

物质向籽粒的转运及花后的干物质积累量。

2.7 不同生物可降解地膜覆盖对玉米产量的影响

由图7可知,2023年, M_3 的玉米籽粒产量最高,为15 302.35 kg/hm²,分别较PE、 M_1 、 M_2 和CK增产6.57%、12.54%、3.72%和20.22%;PE和 M_2 的玉米产量无显著差异($P > 0.05$)。2024年,玉米产量最高的处理亦为 M_3 ,其产量为15 509.71 kg/hm²,分别较PE、 M_1 、 M_2 和CK增产6.22%、12.37%、2.58%和21.13%。综合2年结果, M_3 的产量显著高于其他处理,具有产量优势。

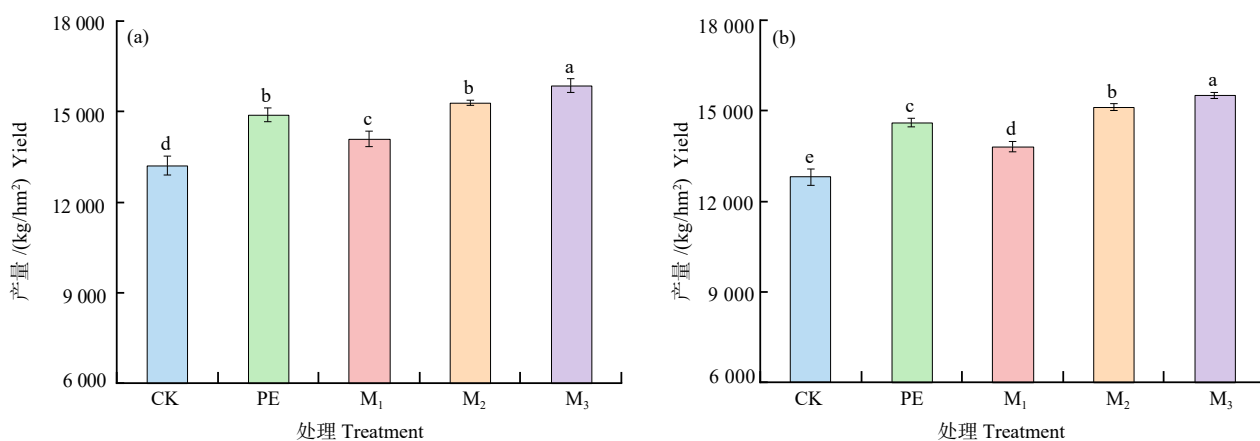


图7 2023(a)和2024年(b)不同处理下玉米产量

Fig. 7 Yield of maize in different treatments in 2023 (a) and 2024 (b)

3 讨论

3.1 不同生物可降解地膜覆盖对农田土壤含水率的影响

覆盖地膜能有效改善土壤的水分状况,在玉米苗期-拔节期,降解膜可有效维持土壤水分^[21]。申丽霞等^[17]研究表明,降解膜覆盖可提高玉米生育前期0—40 cm的土壤水分;赵爱琴等^[22]研究表明,降解膜覆盖可提高玉米苗期-拔节期土壤贮水量;王鑫等^[23]研究表明,降解膜在玉米生长前期具有明显保水效果。本研究结果表明,与无覆膜处理(CK)相比,生物降解膜覆盖(M_1 、 M_2 、 M_3)和聚乙烯地膜覆盖(PE)处理均可显著提高0—40 cm土层土壤含水率,与马明生等^[18]研究结果类似。孟玉等^[24]研究表明,玉米苗期-吐丝期,覆盖降解膜处理的土壤含水率与PE相比无显著差异。本研究中大喇叭口期-成熟期,4种降解覆盖处理的土壤含水率较PE均有所降低,这与丁宗江等^[25]研究结果不一致,可能因

为随着生育进程推进,降解膜出现不同程度的裂解,其阻隔水分蒸发的功能逐渐减弱,导致保墒效率降低^[26]。

3.2 不同生物可降解地膜覆盖对玉米干物质积累量的影响

内蒙古沿黄灌区春玉米生产面临低温与水分胁迫双重逆境,制约植株前期干物质积累及形态建成^[27-28]。在农业生产实践中,通过优化农艺措施以提高作物干物质积累量并改善其干物质分配比例,是作物获得高产的重要途径^[29-31]。本研究表明,与无覆膜处理(CK)相比,各覆膜处理均可显著提高玉米地上部干物质积累量及积累速率(图4),可能因为地膜覆盖能够提升土壤温度、减少水分蒸发,间接促进玉米根系向深层土壤延伸,增强玉米植株对深层水分的利用,进而促进植株前期的生长发育与干物质积累^[32-33]。2023和2024年苗期(V_4)和拔节期(V_6)各覆膜处理的地上部干物质积累量无显著差异($P > 0.05$),这可能是由于各种地膜在该阶段

尚未发生裂解,其蓄水保墒与增温效应相近所致^[34];进入大喇叭口期(V_{12})聚乙烯地膜(PE)、慢速生物降解膜(M_2)和中速生物可降解膜(M_3)处理无显著差异($P>0.05$),但均显著高于快速生物降解膜(M_1)处理($P<0.05$);这可能与 M_1 地膜过早降解导致土壤温度和湿度下降有关^[35];抽雄吐丝期(R_1), M_3 表现出最高的地上部干物质积累量,显著优于 M_2 和PE。这可能源于此阶段 M_3 开始可控降解,其降解产物可被土壤微生物利用,促进土壤养分活化,可提高植株对土壤养分的高效利用^[36-37],避免了传统PE地膜持续覆盖引发的土壤高温胁迫、根系损伤及透气性降低等问题^[2,38]。在灌浆期和成熟期, M_2 的干物质积累量显著高于PE,这可能是因为 M_2 地膜适时降解形成更优土壤环境,有利于玉米生长发育和干物质积累^[39-40]。

3.3 不同生物可降解地膜覆盖对玉米干物质积累速率的影响

本研究中,CK的干物质积累速率(v)显著低于各覆膜处理,与岳德成^[41]的研究结果相一致。这可能由于不覆盖处理使生育前期农田土壤温度和水分供应不足,导致干物质积累受到抑制^[15,41]。Logistic拟合方程分析表明,各覆膜处理通过维持较长时间的干物质积累过程,增大玉米地上部干物质积累速率,进而提升玉米的干物质积累。 M_3 的玉米干物质积累最大增长速率($v_{\max}$)更高,且出现得更晚,这可能是中速降解膜(M_3)在玉米生育前期可提供稳定土壤水热条件,后期通过可控降解避免高温和水分胁迫等不利影响,进而改善作物生长势,延长干物质积累时间,提高了干物质积累速率^[42]。

3.4 不同生物可降解地膜覆盖对玉米干物质分配及转运的影响

从干物质分配特征来看,成熟期, M_3 的穗部干物质分配比例显著高于其他处理,这与营养生长阶段的 M_3 玉米叶片干物质分配比例较高相关(图6),扩大了玉米的光合面积,促进了玉米的干物质积累,为玉米植株穗部的高效分配奠定基础^[43];籽粒干物质的形成主要源于花后的干物质有效积累和花前营养器官的干物质高效转运^[44],高智挺^[45]研究表明,降解膜覆盖处理较PE膜处理的玉米花后干物质积累量高3.28%~5.37%。本研究中, M_3 的花后干物质积累量和花前干物质转运对籽粒贡献率均显著高于PE,这与历艳璐等^[46]研究结果基本一

致。此外本研究还发现,快速生物降解膜覆盖处理(M_1)的花前干物质转运量、花前干物质转运率、花前干物质转运对籽粒干物质积累贡献率均低于PE处理,这可能是由于 M_1 的膜过早地降解^[32],保墒和保温效果减弱^[47],不能为玉米生育前期提供所需的土壤水分条件所致。

3.5 不同生物可降解地膜覆盖对玉米产量的影响

王聪^[11]研究表明,生物降解膜处理与聚乙烯膜处理之间产量无显著差异,但均显著高于无覆膜处理。本研究发现,全生物降解地膜和聚乙烯地膜覆盖处理下玉米籽粒产量较无覆膜处理高7.30%~20.67%($P<0.05$),其原因可能是由于地膜覆盖具有保温保墒和抑制杂草生长等多重效应,而保温保墒效应为玉米正常生长发育提供了良好的土壤水热环境,抑制杂草生长效应减弱了杂草与玉米对土壤养分的竞争力,促进玉米植株对土壤养分的高效利用^[48-49]。郭强等^[50]研究指出,全生物降解地膜覆盖可导致作物产量较普通聚乙烯地膜覆盖降低。然而,本研究发现,在内蒙古沿黄灌区试验条件下,2年中, M_3 的玉米产量较PE升高6.8%~9.2%($P<0.05$);2024年 M_2 的产量较PE高4.3%($P<0.05$),2023年 M_2 与PE的产量差异不显著($P>0.05$);2年中 M_1 的产量则较PE下降7.1%~8.9%($P<0.05$)。这一结果与翟勇全等^[15]、马健祯等^[16]的结论存在差异,推测其成因与生态区域特异性因素密切相关^[51],包括供试玉米品种的生理特性^[52]、试验地年均积温^[53]、降水分布特征^[54]、以及降解膜裂解速率^[55]等有关。本研究通过2年田间验证,探明在内蒙古沿黄灌区,使用中速生物降解膜覆盖(M_3)可实现玉米产量的提升。本研究中基于内蒙古沿黄灌区2年田间试验研究结果,对于其他区域适应性,以及降解膜覆盖对玉米产量的长期影响仍需进一步深入研究。

4 结 论

与无覆膜处理(CK)相比,覆盖快速(M_1)、慢速(M_2)、中速生物可降解膜(M_3)和聚乙烯膜处理(PE)均可显著提高0—40 cm土壤含水量。 M_3 可有效提高灌浆期-成熟期玉米地上部干物质积累量,其干物质积累量分别较 M_1 、 M_2 和PE高14.56%~30.79%、6.22%~11.18%、7.25%~23.46%;经Logistic模型拟合显示, M_3 的干物质最大增长速率

($v_{\max}$)最大,较其他处理高 3.15%~20.67%。穗部的干物质分配比例随生育期推进持续递增, M_3 的穗部干物质积累量最高,分别比 M_1 、 M_2 、PE 和 CK 高出 17.74%~50.07%、6.61%~20.02%、10.39%~20.50% 和 20.62%~124.18%。 M_3 的干物质转运表现最优,花前的干物质积累量(DMR)、营养器官干物质转运率(DMRE)和营养器官干物质积累对籽粒干物质积累贡献率(DMRCG)较 PE 分别增加 24.76%、19.53% 和 31.02%($P<0.05$);花后 M_3 的干物质积累量(DMA)最大,分别比 M_2 和 PE 高 11.56% 和 28.92%。综上,中速生物可降解膜覆盖处理(M_3)可提高玉米地上干物质最大积累速率,提升花前干物质积累量向籽粒的转运和花后的干物质积累量,进而增大穗部干物质的分配比例,最终实现玉米籽粒产量的提高。

参考文献 References

- [1] 严昌荣,何文清,薛颖昊,刘恩科,刘勤. 生物降解地膜应用与地膜残留污染防治防控[J]. 生物工程学报, 2016, 32(6): 748-760
Yan C R, He W Q, Xue Y H, Liu E K, Liu Q. Application of biodegradable plastic film to reduce plastic film residual pollution in Chinese agriculture[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2016, 32(6): 748-760 (in Chinese)
- [2] 李仙岳,冷旭,张景俊,郭宇,丁宗江,胡小东,朱昆仑. 北方干旱区降解膜覆盖农田玉米生长和氮素利用模拟及优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 113-121
Li X Y, Leng X, Zhang J J, Guo Y, Ding Z J, Hu X D, Zhu K L. Simulation and optimization of maize growth and nitrogen utilization under degradation film mulching in arid areas of North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(5): 113-121(in Chinese)
- [3] 李少昆,赵久然,董树亭,赵明,李潮海,崔彦宏,刘永红,高聚林,薛吉全,王立春,王璞,陆卫平,王俊河,杨祁峰,王子明. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959
Li S K, Zhao J R, Dong S T, Zhao M, Li C H, Cui Y H, Liu Y H, Gao J L, Xue J Q, Wang L C, Wang P, Lu W P, Wang J H, Yang Q F, Wang Z M. Advances and prospects of maize cultivation in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 1941-1959(in Chinese)
- [4] Iacuzzi N, Tortorici N, Ida D M, Alaimo F, Cozzolino E, Sarno M, Mori M, Tuttolomondo T. Biodegradable mulching films affect soil temperature and agronomic performance of open field eggplant in hot-arid environments [J/OL]. *Italian Journal of Agronomy*, (2024-12-25). DOI:doi. org/10. 1016/ j. ijaagro. 2024. 100025
- [5] Zhou Z P, Liu J, Zhang J, Zhang J Z, Li W H, Wen Y, Chen R, Chen P P, Li H Q, Gao X H, Zhu Y, Wang Z H. Combining magnetized water with biodegradable film mulching reshapes soil water-salt distribution and affects processing tomatoes' yield in the arid drip-irrigated field of Northwest China [J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2024-08-28). DOI: 10. 1016/ j. agwat. 2024. 109021
- [6] 吕一涵,周杰,杨亚东,臧华栋,胡跃高,曾昭海. 微塑料对农田生态系统的影响:研究现状与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(1): 1-14

- Lyu Y H, Zhou J, Yang Y D, Zang H D, Hu Y G, Zeng Z H. Microplastics in agroecosystem: Research status and future challenges [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(1): 1-14(in Chinese)
- [7] Yang X M, Lwanga E H, Bemani A, Gertsen H, Salanki T, Guo X T, Fu H M, Xue S, Ritsema C, Geissen V. Biogenic transport of glyphosate in the presence of LDPE microplastics: A mesocosm experiment[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 829-835
- [8] 张丹,刘宏斌,马忠明,唐文雪,魏焘,杨虎德,李俊改,王洪媛. 残膜对农田土壤养分含量及微生物特征的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(2): 310-319
Zhang D, Liu H B Ma Z M, Tang W X, Wei T, Yang H D, Li J G, Wang H Y. Effect of residual plastic film on soil nutrient contents and microbial characteristics in the farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(2): 310-319 (in Chinese)
- [9] 李亮亮. 贵州农田土壤残膜赋存特征及生物降解地膜的应用示范[D]. 贵阳: 贵州民族大学, 2023
Li L L. Occurrence characteristics of farmland soil residual film and application demonstration of biodegradable film in Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou Minzu University, 2023 (in Chinese)
- [10] 王宁,冯克云,南宏宇,李亚兵. 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
Wang N, Feng K Y, Nan H Y, Li Y B. Ecological and biological effects of biodegradable film on cotton in Hexi area of Gansu , Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3607-3614(in Chinese)
- [11] 王聪. 生物降解膜在旱地的降解特征及对土壤—玉米体系的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022
Wang C. Degradation characteristics of biodegradable films in the dry land and the impact of biodegradable film mulching on the soil-corn system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022(in Chinese)
- [12] 向午燕,冯晨,冯良山,刘琪,张丽莉,白伟,杨宁,郑家明,孙占祥. PBAT 全生物降解地膜在辽西半干旱区的降解及残留特性[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(12): 45-53
Xiang W Y Feng C, Feng L S, Liu Q, Zhang L L, Bai W, Yang N, Zheng J M, Sun Z X. Degradation and residual characteristics of PBAT fully biodegradable plastic film in semi-arid area in western Liaoning [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(12): 45-53(in Chinese)
- [13] 吴梅,张金珠,王振华,朱艳,宋利兵,宗睿,韩悦. 加气滴灌和可降解膜覆盖对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2022, 30(9): 1425-1438
Wu M, Zhang J Z, Wang Z H, Zhu Y, Song L B, Zong R, Han Y. Effects of aerated drip irrigation and degradable film mulching on growth and water use of maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(9): 1425-1438 (in Chinese)
- [14] 张杰. 环保型地膜覆盖对土壤环境的影响及玉米生长的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010
Zhang J. Influences of different covering materials mulching on soil environment and response of the corn growth[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010(in Chinese)
- [15] 翟勇全,魏雪,付江鹏,马琨,贾彪. 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
Zhai Y Q, Wei X, Fu J P, Ma K, Jia B. Effects of fully biodegradable film mulch on growth, yield, and nitrogen utilization of maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(11): 2041-2051(in Chinese)
- [16] 马健斌,马琨,贾彪,翟勇全,运彬媛,张昊,姬丽,李稼润. 降解膜覆盖与氮肥配施技术对宁夏玉米生产效益的影响[J]. 中国农业气象, 2023, 44(05): 386-397
Ma J Z, Ma K, Jia B, Zhai Y Q, Yun B Y, Zhang H, Ji L, Li J R. Effects

- of degradable film mulching and combined application of nitrogen fertilizer on maize production benefit in Ningxia [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2023, 44(5): 386-397 (in Chinese)
- [17] 申丽霞, 兰印超, 李若帆. 不同降解膜覆盖对土壤水热与玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 200-206
- Shen L X, Lan Y C, Li R F. Effects of different degradable films on soil moisture, temperature and growth of maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(1): 200-206 (in Chinese)
- [18] 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
- Ma M S, Guo X S, Liu Y L. Effects of full biodegradable film on soil water status and yield and water use efficiency of spring wheat in dryland[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(12): 1933-1944 (in Chinese)
- [19] 杨赵昱, 王静, 吕雯, 孙豪杰, 任鸿武, 马维薇, 侯嘉娜. PBAT对盐碱地玉米根区土壤水盐及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 343-351
- Yang Z Y, Wang J, Lü W, Sun H J, Ren H W, Ma W W, Hou J N. Effects of PBAT on soil water and salt in maize root zone and maize yield in saline-alkali land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6): 343-351 (in Chinese)
- [20] 张学礼, 胡振琪, 初士立. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 土壤通报, 2005, (1): 118-123
- Zhang X L, Hu Z Q, Chu S L. Methods for measuring soil water content: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1): 118-123 (in Chinese)
- [21] 王斌, 万艳芳, 王金鑫, 孙九胜, 王新勇, 槐国龙, 孔立明. PBAT型全生物降解地膜对新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
- Wang B, Wan Y F, Wang J X, Sun J S, Wang X Y, Huai G L, Kong L M. Effects of PBAT biodegradable plastic mulch film on soil physical and chemical properties and yields of cotton and maize in Southern Xinjiang, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 148-156 (in Chinese)
- [22] 赵爱琴, 李子忠, 龚元石. 生物降解地膜对玉米生长的影响及其田间降解状况[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(2): 74-78
- Zhao A Q, Li Z Z, Gong Y. S. Effects of biodegradable mulch film on corn growth and its degradation in field [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10(2): 74-78 (in Chinese)
- [23] 王鑫, 胥国斌, 任志刚, 张占军, 简毓峰, 张永明. 无公害可降解地膜对玉米生长及土壤环境的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, (1): 78-81
- Wang X, Xu G B, Ren Z G, Zhang Z J, Jian Y F, Zhang Y M. Effects of environment-friendly degradable films on corn growth and soil environment. [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1): 78-81 (in Chinese)
- [24] 孟玉, 王振华, 李文昊, 宗睿, 王天宇, 朱金儒. 降解膜覆盖对滴灌玉米土壤水温变化及其生长的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(2): 192-202
- Meng Y, Wang Z H, Li W H, Zong R, Wang T Y, Zhu J R. Effects of degradable film mulching on soil hydrothermal variation and growth of maize under drip irrigation [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(2): 192-202 (in Chinese)
- [25] 丁宗江, 李仙岳, 郭宇, 冷旭, 王美荣. 干旱沙区降解膜覆盖的玉米生长与耗水规律[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(11): 1092-1097
- Ding Z J, Li X Y, Guo Y, Leng X, Wang M R. Growth and water consumption of maize under degradable mulch in arid sandy area[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(11): 1092-1097 (in Chinese)
- [26] 代立兰, 赵亚兰, 李明凯, 王锦, 张光全, 曹靖. 不同类型地膜覆盖对旱作区饲用玉米生长及土壤水热状况的影响[J]. 寒旱农业科学, 2025(7): 628-632
- Dai L L, Zhao Y L, Li M K, Wang J, Zhang G Q, Cao J. Effects of different types of film mulching on the growth of forage maize and soil hydrothermal status in dry farming areas[J]. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 2025(7): 628-632 (in Chinese)
- [27] Žydelis R, Weihermüller L, Herbst M, Klosterhalfen A, Lazauskas S. A model study on the effect of water and cold stress on maize development under nemoral climate [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 169-179
- [28] 张冬梅, 黄学芳, 姜春霞, 张伟, 王晓娟, 刘化涛, 闫六英, 刘恩科, 翟广谦. 冷凉区旱地玉米微垄覆膜土壤水热及产量效应研究[J]. 作物杂志, 2019(2): 115-121
- Zhang D M, Huang X F, Jiang C X, Zhang W, Wang X J, Liu H T, Yan L Y, Liu E K, Zhai G Q. Effects of micro-ridge film mulching on soil water and temperature and yield of dryland maize in cold areas[J]. *Crops*, 2019(2): 115-121 (in Chinese)
- [29] 李青军, 张炎, 胡伟, 孟凤轩, 冯广平, 胡国智, 刘新兰. 氮素运筹对玉米干物质积累、氮素吸收分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 755-760
- Li Q J, Zhang Y, Hu W, Meng F X, Feng G P, Hu G Z, Liu X L. Effects of nitrogen management on maize dry matter accumulation, nitrogen uptake and distribution and maize yield[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 755-760 (in Chinese)
- [30] 殷文, 冯福学, 赵财, 于爱忠, 柴强, 胡发龙, 郭瑶. 小麦秸秆还田方式对轮作玉米干物质累积分配及产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(5): 751-757
- Yin W, Feng F X, Zhao C, Yu A Z, Chai Q, Hu F L, Guo Y. Effects of wheat straw returning patterns on characteristics of dry matter accumulation, distribution and yield of rotation maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(5): 751-757 (in Chinese)
- [31] 农梦玲, 魏贵玉, 李伏生. 不同时期根区局部灌溉对玉米干物质积累和水氮利用的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(5): 115-120
- Nong M L, Wei G Y, Li F S. Effect of partial root-zone irrigation at different growth stages on dry mass accumulation and water and nitrogen use of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(5): 115-120 (in Chinese)
- [32] Li F M, Wang J, Xu J Z, Xu H L. Productivity and soil response to plastic film mulching durations for spring wheat on entisols in the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 78(1): 9-20
- [33] 孙仕军, 隋文华, 陈伟, 苏通宇, 郇恩博, 张岐, 孟维忠. 地下水埋深对辽宁中部地区玉米根系和干物质积累的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 497-506
- Sun S J, Sui W H, Chen W, Su T Y, Tai E B, Zhang Q, Meng W Z. Effects of groundwater depth on root system and dry matter accumulation of maize in central Liaoning Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 497-506 (in Chinese)
- [34] 李夏浩祺. 可降解地膜对旱地农田水-碳-氮循环过程的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2025.
- Li X H Q. Effect of degradable plastic film on water-carbon-nitrogen cycle in dryland farmland [D] Yang Ling: Northwest A&F University, 2025 (in Chinese)
- [35] 董立国, 蔡进军, 张源润, 李生宝. 降解地膜过早破裂对玉米地土壤水分温度及产量的影响[J]. 农学报, 2016, 6(4): 66-69
- Dong L G, Cai J J, Zhang Y R, Li S B. Premature fracture of degradable mulch on soil temperature, moisture and corn yield [J]. *Journal of Agriculture*, 2016, 6(4): 66-69 (in Chinese)
- [36] 李铭轩, 吉德昌, 王政宇, 徐英德, 贾照杰, 李诗彤, 常艺, 冯良山, 张哲, 冯晨, 丁凡. 生物降解地膜对土壤微生物丰度、活性及群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1758-1767
- Li M X, Ji D C, Wang Z Y, Xu Y D, Jia Z J, Li S T, Chang Y, Feng L S,

- Zhang Z, Feng C, Ding F. Effects of biodegradable plastic film mulching on soil microbial abundance, activity, and community structure [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(8): 1758-1767(in Chinese)
- [37] 路露, 韩荧, 刘梓桐, 钱晶晶, 闫妍, 孙玉军. 两种新型生物降解地膜对番茄生长及土壤微生物、酶活性的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(5): 101-106
- Lu L, Han Y, Liu Z T, Qian J J, Yan Y, Sun Y J. Effects of two new biodegradable films on tomato growth and soil microbial and enzyme activities [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(5): 101-106(in Chinese)
- [38] 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
- Dang Y T. Effects of biodegradable mulch film and nitrogen application on soil microenvironment and maize yield formation in dry farming fields[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022(in Chinese)
- [39] 石艳艳, 马志花, 吴春花, 周永瑾, 李荣. 垄作沟覆地膜对旱地马铃薯光合特性及产量形成的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(5): 1288-1297
- Shi Y Y, Ma Z H, Wu C H, Zhou Y J, Li R. Effects of ridge tillage with film mulching in furrow on photosynthetic characteristics of potato and yield formation in dryland farming[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(5): 1288-1297(in Chinese)
- [40] 张久明, 迟凤琴, 宿庆瑞, 匡恩俊, 张磊, 金梁, 郭文义, 徐军生. 不同有机物料还田对土壤结构与玉米光合速率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(1): 56-61
- Zhang J M, Chi F Q, Su Q R, Kuang E J, Zhang L, Jin L, Guo W Y, Xu J S. Effect of different organic material turnover on soil structure and maize photosynthetic rate [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(1): 56-61(in Chinese)
- [41] 岳德成, 吴崇义, 史广亮, 姜延军, 李青梅, 柳建伟, 韩菊红, 胡冠芳. 3种地膜在不同覆膜方式下的控草效果及对玉米生长发育的影响[J]. 植物保护, 2018, 44(3): 74-81
- Yue D C, Wu C Y, Shi G L, Jiang Y J, Li Q M, Liu J W, Han J H, Hu G F. Influences of film mulching methods on growth and development of maize and weed control effect[J]. *Plant Protection*, 2018, 44(3): 74-81(in Chinese)
- [42] 刘玉兵, 卢华兵, 吕学高, 曹春信, 黄洪明, 石丽敏, 刘新华. 不同降解膜对高粱土壤水温变化及其品质的影响[J/OL]. 分子植物育种, (2023-11-03) [2025-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231103.0935.002.html>
- Liu Y B, Lu H B, Lü X G, Cao C X, Huang H M, Shi L M, Liu X H. Effects of different degradable films on soil water temperature and nutrient quality of sorghum[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, (2023-11-03) [2025-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20231103.0935.002.html> (in Chinese)
- [43] 刘群, 穆兴民, 袁子成, 高航, 张睿. 生物降解地膜自然降解过程及其对玉米生长发育和产量的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 126-129
- Liu Q, Mu X M, Yuan Z C, Gao H, Zhang R. Degradation of biodegradable mulch film and its effect on growth and yield of maize[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(6): 126-129(in Chinese)
- [44] 尚永盼, 于爱忠, 王玉珑, 王鹏飞, 李悦, 柴健, 吕汉强, 杨学慧, 王凤. 绿洲灌区绿肥还田利用方式对玉米干物质积累、分配及产量的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(3): 686-694
- Shang Y P, Yu A Z, Wang Y L, Wang P F, Li Y, Chai J, Lyu H Q, Yang X H, Wang F. Effects of green manure application methods on dry matter accumulation, distribution, and yield of maize in oasis irrigation area[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(3): 686-694(in Chinese)
- [45] 高智挺. 不同地膜的降解特性及其对玉米生长和土壤水热特征的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022
- Gao Z T. Degradation characteristics of different mulching films and their effects on maize growth and soil hydrothermal properties [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022(in Chinese)
- [46] 历艳璐, 王俊鹏, 于欣志, 魏宏磊, 陈麒宇, 赵洪祥, 徐晨, 边少锋, 张治安. 冷凉区不同地膜覆盖对玉米干物质和氮素积累与分配的影响[J]. 作物杂志, 2022(5): 124-129
- Li Y L, Wang J P, Yu X Z, Wei H L, Chen Q Y, Zhao H X, Xu C, Bian S F, Zhang Z A. Effects of mulching different plastic films on accumulation and distribution of dry matter and nitrogen in maize in cold and cool areas[J]. *Crops*, 2022(5): 124-129(in Chinese)
- [47] 张俊丽, 索龙, 景鹏娟, 焦雪丽. 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
- Zhang J L, Suo L, Jing P J, Jiao X L. Research progress on the effect of increasing temperature, preserving moisture and increasing yield of biodegradable plastic film[J]. *Agriculture and Technology*, 2021, 41(15): 113-115(in Chinese)
- [48] 李凯, 罗世武, 王湛, 杨军学, 王勇, 王斐, 张建彤. 不同类型地膜覆盖对宁夏旱作区土壤环境及饲用型作物生长的影响[J]. 河南农业科学, 2025, 54(1): 90-100
- Li K, Luo S W, Wang Z, Yang J X, Wang Y, Wang F, Zhang J T. Effects of different types of surface mulching on soil environment and growth of forage crop in Ningxia dry farming area[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2025, 54(1): 90-100(in Chinese)
- [49] 潘春丹, 陆晓莉, 顾雪梅, 谭禾平. 不同地膜覆盖对土壤温度、杂草控制和甜玉米生长的影响[J]. 上海农业学报, 2023, 39(6): 66-70
- Pan C D, Lu X L, Gu X M, Tan H P. Effects of different plastic film mulching on soil temperature, weed control and growth of sweet maize[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2023, 39(6): 66-70(in Chinese)
- [50] 邹强, 王振华, 郑旭荣, 张金珠, 李文昊. PBAT生物降解膜覆盖对绿洲滴灌棉花土壤水热及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 135-143
- Wu Q, Wang Z H, Zheng X R, Zhang J Z, Li W H. Effects of biodegradation film mulching on soil temperature, moisture and yield of cotton under drip irrigation in typical oasis area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16): 135-143(in Chinese)
- [51] 宝音巴特, 王婧瑜, 朱景嵩, 朴春红, 谷岩. 吉林省不同生态区域玉米产量及构成因素的差异性[J]. 分子植物育种, 2017, 15(9): 3819-3824
- Baoyin B, Wang J Y, Zhu J S, Piao C H, Gu Y. Difference of maize yield and component factor of different ecology zones in Jilin Province [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(9): 3819-3824(in Chinese)
- [52] 孙梦宇, 纪萌, 李长青, 王硕, 佟丙辛, 孙志梅. 现代玉米品种的产量差异及高产玉米品种的典型生物学特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(2): 226-237
- Sun M Y, Ji M, Li C Q, Wang S, Tong B X, Sun Z M. Yield differences of modern maize varieties and typical biological characteristics of high-yield maize varieties[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(2): 226-237(in Chinese)
- [53] 张泽民, 吕昌河. 青藏高原不同积温条件下春小麦光温生产潜力及其对气候变化的响应[J]. 中国农业科学, 2022, 55(11): 2135-2149
- Zhang Z M, Lü C H. Photo-temperature potential yield of spring wheat at different accumulated temperature ranges and its response to climate change in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(11): 2135-2149(in Chinese)
- [54] 覃大静, 刘嘉欣, 肖名忠, 林凯荣, 胡茂川. 中国南方地区降水年内分布变化及其对作物产量的可能影响[J]. 地理科学进展, 2025, 44(5): 1050-1059
- Qin D J, Liu J X, Xiao M Z, Lin K R, Hu M C. Variability of annual distribution of precipitation in Southern China and its impact on crops[J]. *Progress in Geography*, 2025, 44(5): 1050-1059(in Chinese)
- [55] 穆晓国, 高虎, 李海俊, 高富成, 张莹, 叶林. 不同地膜的降解性能与力学特

性及其对南瓜生长的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(11): 2382-2390
Mu X G, Gao H, Li H J, Gao F C, Zhang Y, Ye L. Degradation and
mechanical properties of different mulch films and their effects on pumpkin

growth[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(11):
2382-2390(in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 李保成, 硕士, 内蒙古自治区农牧业科学院, 研究实习员, 研究方向为旱作农业技术。曾参与国家重点研发计划、内蒙古自治区“科技兴蒙”行动重点专项和内蒙古创新基金项目等5项, 发表学术论文4篇, 参与发明专利2项, 参与编撰专著1部。



通讯作者简介: 任永峰, 博士, 内蒙古自治区农牧业科学院资源环境与可持续发展研究所研究员, 研究方向为旱作农业生态及农田生态治理。主持和参与国家重点研发计划、国家自然科学基金以及内蒙古自治区科技计划重大专项等国家及省部级项目30余项。荣获国家科技进步奖二等奖1项, 内蒙古科技进步奖特等奖1项、二等奖2项, 内蒙古农牧业丰收奖二等奖1项; 授权专利36件, 制定标准17项, 主编著作1部、副主编著作3部, 发表学术论文70余篇。