

赵子豪, 步恒通, 段思彤, 等. 不同降解膜覆盖对向日葵开花期光合特征及干物质积累的影响[J]. 山西农业科学, 2026, 54(2): 112-119.

ZHAO Z H, BU H T, DUAN S T, et al. Effects of different degradable film coverage on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation in sunflower during flowering[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(2): 112-119.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.02.14

## 不同降解膜覆盖对向日葵开花期光合特征及干物质积累的影响

赵子豪<sup>1</sup>, 步恒通<sup>1</sup>, 段思彤<sup>1</sup>, 张一迪<sup>1</sup>, 肖 洒<sup>1</sup>, 张向前<sup>2</sup>,  
王伟妮<sup>3</sup>, 刘俊梅<sup>3</sup>, 邢 俊<sup>4</sup>, 王登云<sup>5</sup>, 张德健<sup>1</sup>

(1. 内蒙古大学 生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010070; 2. 内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古 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 017200; 4. 鄂尔多斯市达拉特旗农牧技术推广中心,  
内蒙古 鄂尔多斯 014300; 5. 磴口县农牧业技术推广中心, 内蒙古 磴口 015200)

**摘 要:**为明确不同降解膜覆盖处理对向日葵开花期光合特性及干物质积累的影响,以向日葵品种三瑞10号为试材,设置兰州降解黑膜覆盖(LX)、吉林降解黑膜覆盖(JL)、兴安盟降解黑膜覆盖(XAM)、苏州降解黑膜覆盖(SZ)、上海降解黑膜覆盖(SH)、普通黑膜覆盖(CK)共6个处理,并对不同覆膜处理下向日葵开花期的净光合速率日变化、光响应曲线及干物质积累量进行分析。结果表明,除SH处理的净光合速率日变化呈双峰曲线变化趋势外,其他降解膜处理和CK均呈单峰曲线变化趋势,且于13:00达到峰值。各覆膜处理的向日葵叶片蒸腾速率、气孔导度均呈现单峰变化规律,胞间CO<sub>2</sub>浓度日变化呈先降低后升高的变化趋势。所有处理的光响应曲线均拟合较好,R<sup>2</sup>值均大于0.99,其中,XAM、SH处理的最大净光合速率最高,均为65.00 μmol/(m<sup>2</sup>·s),LX处理次之,SZ处理最小。CK与LX处理的干物质积累量较大,分别为406.18、382.58 g/株。同时,在产量方面,SH处理的产量最高,为4 259.29 kg/km<sup>2</sup>,LX处理次之。综上,SH、LX处理均可作为向日葵种植的优选覆膜方案。

**关键词:**降解膜;向日葵;光合特性日变化;光响应曲线;干物质积累

中图分类号:S565.5 文献标识码:A 文章编号:1002-2481(2026)02-0112-08

### Effects of Different Degradable Film Coverage on Photosynthetic Characteristics and Dry Matter Accumulation in Sunflower during Flowering

ZHAO Zihao<sup>1</sup>, BU Hengtong<sup>1</sup>, DUAN Sitong<sup>1</sup>, ZHANG Yidi<sup>1</sup>, XIAO Sa<sup>1</sup>, ZHANG Xiangqian<sup>2</sup>,  
WANG Weini<sup>3</sup>, LIU Junmei<sup>3</sup>, XING Jun<sup>4</sup>, WANG Dengyun<sup>5</sup>, ZHANG Dejian<sup>1</sup>

(1. School of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China; 2. Inner Mongolia Academy of Agriculture & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 3. Erdos Center for Agriculture and Animal Husbandry Ecology and Resource Protection, Erdos 017200, China; 4. Dalat Banner Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center, Erdos 014300, China; 5. Dengkou County Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center, Dengkou 015200, China)

**Abstract:** To elucidate the effects of different degradable film coverage treatments on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation in sunflower during flowering, in this study, a sunflower variety Sanrui 10 was employed as the experimental material, six treatments were established: Lanzhou degradable black film coverage(LX), Jilin degradable black film coverage(JL), Xing'an League degradable black film coverage(XAM), Suzhou degradable black film coverage(SZ), Shanghai degradable black film coverage(SH), and conventional black film coverage(CK), and the diurnal variation of net

收稿日期:2024-12-24

基金项目:鄂尔多斯市“揭榜挂帅”项目(JBGS-2021-001)

作者简介:赵子豪,在读硕士,研究方向:土壤耕作与农田生态,E-mail:zzh8015@foxmail.com

通信作者:张德健,教授,博士,主要从事旱作农业及农田生态治理研究,E-mail:zhangdejian00@163.com

photosynthetic rate, light response curves, and dry matter accumulation in sunflower during flowering under different film coverage treatments were analyzed. The results indicated that, except for the SH treatment exhibiting a double-peak pattern in net photosynthetic rate, all other degradable film treatments and the CK showed a single-peak pattern, peaking at 13:00. Transpiration rates and stomatal conductance of sunflower leaves under all treatments followed a single-peak pattern, while intercellular CO<sub>2</sub> concentration exhibited a diurnal trend of initial decrease followed by increase. Photoresponse curves for all treatments exhibited good fit with  $R^2$  values exceeding 0.99. The maximum net photosynthetic rate ( $Pn_{max}$ ) of the XAM and SH treatments was the highest, both at 65.00  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , followed by the LX treatment, and the SZ treatment was the lowest. The CK and LX treatments exhibited higher total dry matter accumulation, at 406.18 and 382.58 g/plant respectively. Concurrently, the SH treatment yielded the highest harvest at 4 259.29 kg/ka, followed by the LX treatment. In summary, both SH and LX treatments represented the optimal coverage schemes for sunflower cultivation.

**Keywords:** degradable film; sunflower; diurnal variation of photosynthetic characteristics; photoresponse curve; dry matter accumulation

地膜覆盖技术是20世纪中叶随着塑料工业的兴起而发展起来的<sup>[1]</sup>,为了满足世界人口日益增长的粮食需求<sup>[2]</sup>,现代农业生产严重依赖塑料薄膜,主要应用于土壤覆盖、温室覆盖以及青贮饲料等多个场景<sup>[3-5]</sup>。地膜覆盖因具有保温、保墒、防除杂草等优势而被广泛应用。地膜覆盖技术在产生巨大效益的同时,也带来了一系列污染危害,大量残留的塑料薄膜会对土壤结构、水分和养分的运输以及作物生长产生不利影响,从而破坏农业环境,降低作物产量<sup>[6-7]</sup>。与传统地膜相比,生物可降解地膜易于分解<sup>[8]</sup>,可有效减少“白色污染”,降低对环境的破坏及土壤的污染<sup>[9-10]</sup>。生物可降解地膜现今被广泛应用于小麦、棉花、玉米、向日葵、马铃薯等作物<sup>[11]</sup>。王艺君<sup>[12]</sup>研究表明,传统地膜和生物可降解地膜均可提高玉米抽雄吐丝期光合性能,但二者间差异较小。覆膜处理下玉米灌浆期干物质积累量较不覆膜处理显著增加8.74%~38.85%。林荫荫等<sup>[13]</sup>研究发现,生物可降解地膜覆盖处理下,花生花针期、结荚期和饱果成熟期的光合速率均显著高于不覆膜处理,地上部、地下部干物质积累量均高于不覆膜处理。石艳艳等<sup>[14]</sup>研究发现,生物可降解地膜覆盖下马铃薯播后120 d块茎干物质积累量均显著高于对照,其生物量的有效积累促进了产量的提高。目前,虽有大量研究已经探讨了覆膜对作物光合性能、干物质积累及产量的影响,但生物可降解地膜对向日葵光合日变化、光响应曲线,特别是开花期光合性能的研究还较少。

本研究系统分析不同降解膜覆盖下向日葵光合变化规律及其对于干物质积累量和产量的影响,旨在为向日葵开花期干物质积累调控及适宜降解

膜的选择提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗树林召镇西海心(40°29'N, 109°52'E),海拔为1 010 m,属温带大陆性季风气候;日照充足,四季分明,年平均气温为6.8℃,最低气温为-17.9℃,最高气温为34.3℃,有效积温为3 000~3 200℃,无霜期135~150 d;年平均降雨量为240~360 mm,主要集中在6—9月,年平均蒸发量为1 950~2 200 mm。试验地土壤为潮土,0~20 cm基础地力土壤有机质含量为14.24 g/kg, pH值为8.32,全磷含量为0.86 g/kg,全氮含量为0.67 g/kg,全钾含量为4.10 g/kg。

### 1.2 试验材料

供试向日葵品种为三瑞10号,由三瑞农业科技股份有限公司提供;地膜规格统一为宽700 mm,厚0.08 mm,分别为兴安盟降解黑膜、兰州降解黑膜、吉林降解黑膜、苏州降解黑膜、上海降解黑膜和包头普通塑料黑膜。

### 1.3 试验设计

试验设置兰州降解黑膜覆盖(LX)、吉林降解黑膜覆盖(JL)、兴安盟降解黑膜覆盖(XAM)、苏州降解黑膜覆盖(SZ)、上海降解黑膜覆盖(SH)、普通塑料地膜覆盖(CK)共6个处理,向日葵采用宽窄行种植模式,宽行行距为90 cm,窄行行距为40 cm,种植密度为2.7万株/hm<sup>2</sup>,小区面积为155 m<sup>2</sup>,3次重复,施入混合肥(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) 375 kg/hm<sup>2</sup>,追施尿素225 kg/hm<sup>2</sup>,除覆膜处理不同外,其他管理同大田管理。

## 1.4 测定指标及方法

1.4.1 开花期光合日变化 随机选取不同覆膜处理中 3 株健康生长的向日葵,采用 LI-6800 便携式光合系统分析仪(LI-COR)进行光合参数净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )的检测。于晴天 6:00—18:00 每隔 2 h 测定一次向日葵光合参数,并于 13:00 增加一次参数测定。测定前先利用感光元件测定外界光照强度,将光源与外界光照强度设置一致,减少光照强度波动对结果影响,测定时放置二氧化碳小钢瓶避免空气  $CO_2$  波动影响,仪器气体流速为 400 mmol/s。

1.4.2 光响应曲线测定 选择少云的晴天,在向日葵开花期随机选取各个不同覆膜处理中 3 株顶部展开、叶长势相当、叶面积大小相似的向日葵植株进行测定,取平均值。采用 LI-6800 便携式光合系统分析仪进行光响应曲线测定,光源提供 0~2 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (光强设定为:0、20、40、80、100、200、400、600、800、1 000、1 200、1 300、1 400、1 600、1 800、2 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )。

1.4.3 光响应曲线模拟方程 利用非直角双曲线(Non-rectangular hyperbola equation)模型对向日葵叶片的净光合速率( $P_n$ )和光合有效辐射(PAR)之间的关系进行分析。

$$P_n = \left\{ Q \times PAR + P_{n_{\max}} - \text{SQRT}[(Q \times PAR + P_{n_{\max}}) \times (Q \times PAR + P_{n_{\max}}) - 4Q \times K \times PAR \times P_{n_{\max}}] \right\} \times 2K - R_d \quad (1)$$

式中, $P_{n_{\max}}$ 为最大净光合速率; $Q$ 为表观量子效率; $K$ 是光响应曲线曲角; $R_d$ 为暗呼吸速率。

光补偿点(Light compensation point, LCP)和光饱和点(Light saturation point, LSP)采用以下公式进行计算。

$$LCP = R_d / Q \quad (2)$$

$$LSP = (P_{n_{\max}} + R_d) / Q \quad (3)$$

1.4.4 干物质积累量测定 向日葵开花时期将植株按茎、叶、叶柄、花盘不同器官分开,冲洗干净且用滤纸吸干后剪碎,置于烘箱,在 105  $^{\circ}\text{C}$  条件下杀青 30 min,然后将温度降至 80  $^{\circ}\text{C}$  烘 8~12 h 至恒质量为止,冷却称质量。

## 1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2019 进行数据处理,采用 Origin 2022 制图,采用 SPSS 22.0 进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同覆膜处理下向日葵开花期净光合速率的日变化

从图 1 可以看出,不同覆膜处理的向日葵,开花期净光合速率存在差异。其中,SH 处理净光合速率日变化呈双峰曲线,其他处理均呈单峰曲线。6:00—12:00,由于环境中光照强度增加各处理的净光合速率呈快速增长趋势。在 13:00 时,CK、SZ、JL、LX、XAM 处理净光合速率达到峰值,分别为 39.89、35.48、42.38、40.88、40.21  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。SH 处理的净光合速率在 12:00 出现第 1 个波峰,为 41.40  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ;12:00—13:00,由于气温升高出现“光合午休”现象,导致气孔关闭,净光合速率下降为 38.99  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ;13:00—14:00 净光合速率又上升为 39.09  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ;14:00—18:00,各处理的净光合速率均呈下降趋势。各处理的全天平均净光合速率由大到小依次为 SH>JL>LX>SZ>CK>XAM。

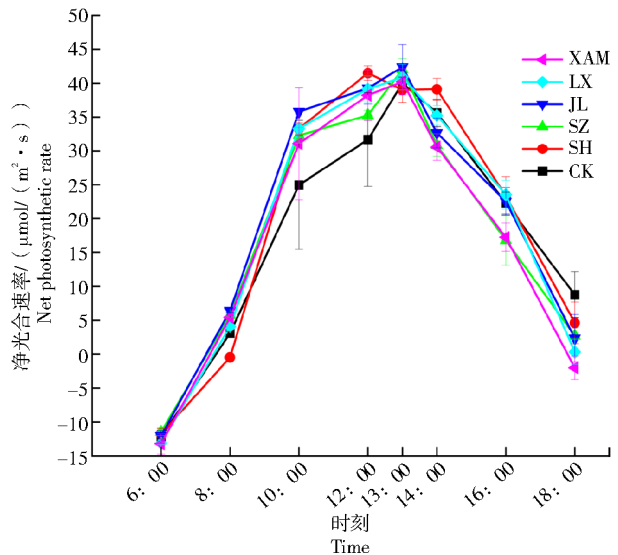


图 1 不同覆膜处理下向日葵开花期净光合速率日变化

Fig.1 Diurnal variation of net photosynthetic rate in sunflower during flowering under different film coverage

### 2.2 不同覆膜处理下向日葵开花期气孔导度的日变化

从图 2 可以看出,膜覆盖下向日葵气孔导度日变化为双峰曲线。8:00—12:00,各处理的气孔导度变化与净光合速率变化相似,整体呈上升趋势

势,但达到波峰的时间有所不同,气孔导度在12:00达到波峰,其中,SH处理和CK气孔导度无明显差异,分别为1.73、1.70 mol/(m<sup>2</sup>·s),SZ、XAM处理的气孔导度无明显差异,分别为1.57、1.56 mol/(m<sup>2</sup>·s);12:00—13:00各处理的气孔导度呈快速下降趋势;13:00—14:00各处理的气孔导度呈上升趋势,其中,14:00 SH处理和CK的气孔导度高于其他处理;14:00—18:00各处理气孔导度呈逐渐降低的趋势。SH处理的全天气孔导度平均值最大,CK次之,XAM处理最低,为1.15 mol/(m<sup>2</sup>·s)。

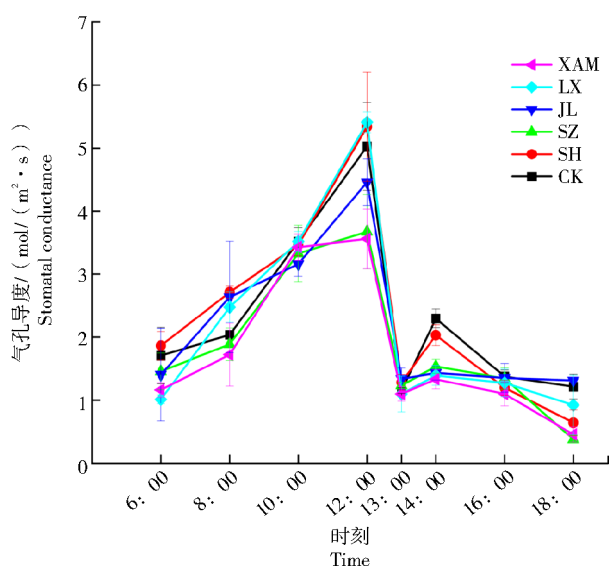


图2 不同覆膜处理下向日葵开花期气孔导度日变化  
Fig.2 Diurnal variation of stomatal conductance in sunflower during flowering under different film coverage

### 2.3 不同覆膜处理下向日葵开花期胞间CO<sub>2</sub>浓度的日变化

从图3可以看出,膜覆盖下向日葵开花期叶片胞间CO<sub>2</sub>浓度日变化趋势表现为广口“V”形,6:00—12:00各处理的胞间CO<sub>2</sub>浓度呈逐渐下降趋势,在12:00时迅速下降,在13:00降至最低值。各处理在13:00时的胞间CO<sub>2</sub>浓度由高到低依次为SZ>SH>CK>JL>XAM>LX;13:00—18:00各处理的胞间CO<sub>2</sub>浓度均呈上升趋势,其中,在18:00时XAM处理胞间CO<sub>2</sub>浓度达到最高,较CK、SH、SZ处理分别提高了15.62、16.38、19.46 μmol/mol。各处理的全天气间CO<sub>2</sub>浓度平均值由大到小依次为CK>SH>SZ>LX>JL>XAM。

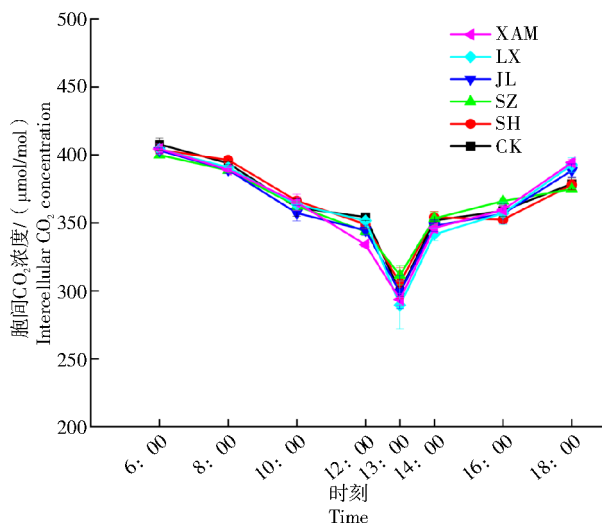


图3 不同覆膜处理下向日葵开花期胞间CO<sub>2</sub>浓度日变化  
Fig.3 Diurnal variation of intercellular CO<sub>2</sub> concentration in sunflower during flowering under different film coverage

### 2.4 不同覆膜处理下向日葵开花期蒸腾速率的日变化

不同膜覆盖处理下向日葵开花期蒸腾速率日变化如图4所示。

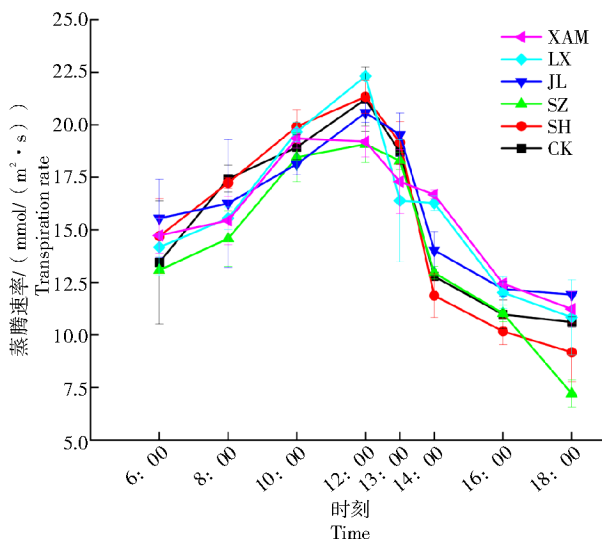


图4 不同膜覆盖处理下向日葵开花期蒸腾速率日变化  
Fig.4 Diurnal variation of transpiration rate in sunflower under different film coverage

从图4可以看出,不同覆膜处理的蒸腾速率日变化趋势呈单峰曲线,XAM处理在10:00出现第1次波峰,其蒸腾速率为19.35 mmol/(m<sup>2</sup>·s);其余各处理均在12:00出现波峰,其中,LX处理蒸腾速率最大,为22.31 mmol/(m<sup>2</sup>·s),且与SZ、JL、XAM

处理之间均存在差异;在 12:00—14:00,各处理的蒸腾速率均呈快速下降趋势;在 14:00 时,LX 处理的蒸腾速率较 CK、SH、SZ、JL 处理分别提高了 27.39%、37.15%、25.71%、16.04%。各处理的全天蒸腾速率平均值由高到低依次为 JL>LX>SH>XAM>CK>SZ。

2.5 不同覆膜处理下向日葵开花期光响应曲线

通过非直角双曲线模型对不同膜覆盖处理下向日葵开花期叶片净光合速率与光合有效辐射的关系进行模拟,结果如图 5 所示。

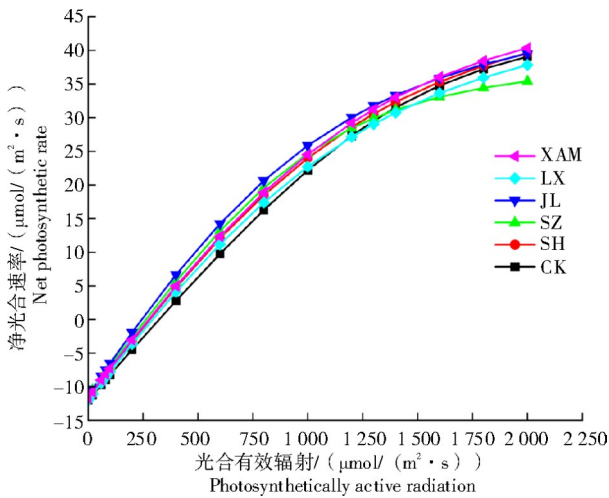


图 5 不同覆膜处理下向日葵开花期光响应曲线

Fig.5 Photoresponse curves of sunflower during flowering under different film coverage

由图 5 可知,不同覆膜处理下,向日葵最大净

光合速率对光强的响应表现为米氏响应规律。不同覆膜处理在光合有效辐射为 0~300 μmol/(m²·s) 时,向日葵开花期叶片净光合速率由负值逐渐增长为正值;光合有效辐射为 300~1 200 μmol/(m²·s) 时,净光合速率呈直线上升趋势;光合有效辐射为 1 200~1 600 μmol/(m²·s) 时,向日葵开花期叶片净光合速率呈平稳上升趋势;光合有效辐射大于 1 600 μmol/(m²·s) 时,向日葵开花期叶片净光合速率趋于稳定。

从表 1 可以看出,不同覆膜处理下,向日葵开花期叶片的光响应曲线拟合较好,且不同处理间光响应曲线参数的响应效应存在较大差异。XAM、SH 处理的 P<sub>nmax</sub> 均为 65.00 μmol/(m²·s),较 SZ、JX、LX 处理、CK 分别增加了 19.12%、3.34%、2.52%、7.88%。CK 的光响应曲线(K)最大,为 0.916,JX 处理的 K 值最小,为 0.782,其余各处理的 K 值由大到小依次为 SZ>XAM>SH>LX。各处理的表现量子效率(Q)由大到小依次为 JX>SZ>XAM=SH>LX>CK。LX 处理和 CK 的暗呼吸速率(R<sub>d</sub>)最大,均为 12.00 μmol/(m²·s),SH、XAM、SZ、JX 处理的暗呼吸速率分别为 11.77、11.63、11.40、11.34 μmol/(m²·s)。各处理的光补偿点(LCP)由高到低依次为 CK>LX>SH>XAM>SZ>JX,且各处理的 LCP 分别为 315.79、279.07、267.5、264.32、253.33、231.43 μmol/(m²·s)。各处理的光饱和点(LSP)由高到低依次为 CK>SH>XAM>LX>JX>SZ。

表 1 不同覆膜处理下向日葵开花期光响应曲线的模拟参数

Tab.1 Simulation parameters of the photoresponse curves of sunflower during flowering under different film coverage

处理 Treatment	P <sub>nmax</sub> / (μmol/(m²·s))	K	Q/ (μmol/(m²·s))	R <sub>d</sub> / (μmol/(m²·s))	LCP/ (μmol/(m²·s))	LSP/ (μmol/(m²·s))	R <sup>2</sup>
CK	59.88	0.916	0.038	12.00	315.79	1 891.58	0.998
SH	65.00	0.812	0.044	11.77	267.50	1 744.77	0.999
SZ	52.57	0.887	0.045	11.40	253.33	1 421.56	0.999
JX	62.83	0.782	0.049	11.34	231.43	1 513.67	1.000
LX	63.36	0.803	0.043	12.00	279.07	1 740.23	0.999
XAM	65.00	0.827	0.044	11.63	264.32	1 741.59	0.999

2.6 不同覆膜处理下向日葵开花期各部位干物质积累量及产量分析

由表 2 可知,LX、SZ 处理、CK 的向日葵茎干物质积累量均显著高于其他处理(P<0.05);LX 处理的叶片干物质积累量最高,较 SH、JX 处理分别显著增加了 25.80%、25.21%(P<0.05);LX 处

理的叶柄干物质积累量最大,较 SH 处理显著增加了 40.39%(P<0.05),各处理的叶柄干物质积累量由高到低依次为 LX>XAM>CK>JX>SZ>SH;XAM、LX、JX、SZ、SH 处理的花盘干物质积累量均显著低于 CK(P<0.05)。各处理的总干物质积累量均显著低于 CK(P<0.05)。

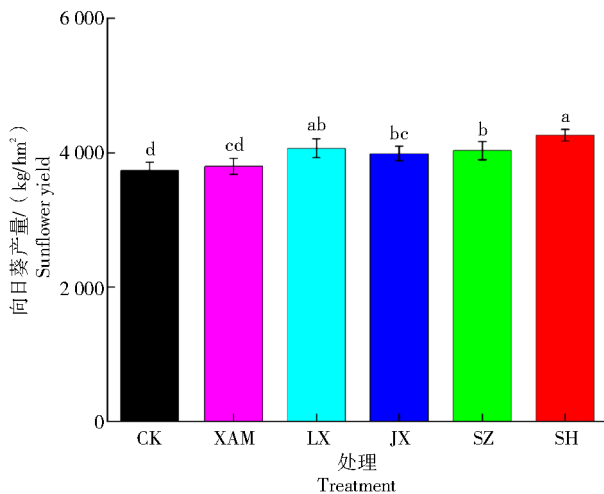
表2 不同覆膜处理下向日葵开花期各部位干物质积累量分析  
 Tab.2 Analysis of dry matter mass in different parts of sunflower during flowering under different film coverage

处理 Treatment	茎干物质积累量 Stems dry matter accumulation	叶干物质积累量 Leaf dry matter accumulation	叶柄干物质积累量 Petioledry matter accumulation	花盘干物质积累量 Disk dry matter accumulation	总干物质积累量 Total dry matter accumulation
XAM	170.93±13.62ab	80.41±11.85ab	32.79±4.01ab	76.40±5.27b	360.53±26.06bcd
LX	189.28±8.31a	96.10±4.18a	36.77±0.38a	60.43±3.79c	382.58±14.98ab
JX	154.01±8.37bc	76.75±10.58b	29.39±3.78ab	73.17±7.07bc	333.33±33.99cd
SZ	181.90±8.37a	88.29±2.37ab	29.38±1.97ab	70.85±8.53bc	370.43±16.90abc
SH	149.04±6.98c	76.39±2.87b	26.19±0.71b	71.75±5.76bc	323.37±9.09d
CK	185.49±4.62a	87.81±8.02ab	31.00±5.11ab	101.88±7.09a	406.18±7.04a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences among the different treatments( $P<0.05$ ).

由图6可知,各处理的向日葵产量由高到低依次为SH>LX>SZ>JL>XAM>CK,SH处理的产量为4 259.29 kg/km<sup>2</sup>,较CK增加了13.93%,其余处理较CK也有不同程度的增产,增产幅度为1.58%~13.93%,除XAM处理外,其他处理均显著高于CK( $P<0.05$ )。



不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )

Different lowercase letters indicated significant differences among the different treatments( $P<0.05$ )

图6 不同覆膜处理下向日葵产量分析

Fig.6 Analysis of sunflower yield under different film coverage

### 3 结论与讨论

光合作用是植物生长发育中重要的生理过程,也是保障作物产量形成的重要因素,提高向日葵光合性能是保障其产量形成的有效途径之一<sup>[15]</sup>。

本研究发现,不同膜覆盖下向日葵开花期净光合速率日变化存在差异,其中,SH处理为双峰曲线,出现“光合午休”现象,与董睿潇等<sup>[16]</sup>研究结果一致;其余处理均为单峰曲线,与王璐等<sup>[17]</sup>报道的覆膜下全生育时期向日葵净光合速率呈单峰曲线的结果一致。气孔作为植物叶片与外界进行气体交换的主要通道,也是影响植物进行光合速率的主要因素。本研究发现,各处理的气孔导度在12:00达到峰值,于12:00—13:00呈快速下降趋势。这一变化可能与气温升高导致的叶片失水加剧、空气湿度降低有关<sup>[18]</sup>。与此同时,胞间CO<sub>2</sub>浓度在13:00达到最低值,蒸腾速率也在12:00—14:00时段呈现明显降低趋势,这一系列变化相互印证。这与孙延亮等<sup>[19]</sup>、URBAN等<sup>[20]</sup>研究结果一致,强光照和高温导致叶片失水较快,诱导气孔部分关闭,进而导致胞间CO<sub>2</sub>浓度降低。

植物的光响应曲线反映自身光合速率随光合有效辐射变化的特性,而且在低光合有效辐射下,植物净光合速率对光合有效辐射的响应曲线是评价植物光合能力的有力工具<sup>[21-22]</sup>。本研究发现,不同覆膜处理下向日葵光合曲线拟合得出表观量子效率(Q)为0.038~0.049,该结果处于合理范围内。各处理的Q由高到低依次为JX>SZ>SH=XAM>LX>CK。随着光合有效辐射增加,各处理下向日葵的净光合速率呈先升高后趋于平缓或略有下降的趋势,这与金建新等<sup>[23]</sup>的研究结果一致。本研究采用非直角双曲线模型进行拟合,响应曲线表现为一条渐近线,表明在本研究的光强范围内未出现光抑制现象,其中,SH,XAM处理的Pn<sub>max</sub>均达到了较高水平。本研究还发现,不同覆膜处

理的 LCP 为 231.43~315.79  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ; LSP 为 1 421.56~1 891.58  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 这与云文丽等<sup>[24]</sup>发现的阳性植物 LSP(1 500~2 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )一致; 本研究得出的 LCP 则远高于其 LCP(50~100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )。表明向日葵具备典型阳生植物的光合特性, 对光照需求高, 耐阴性较差。

覆膜处理通过改善向日葵的光合特性, 改变了其干物质的积累与分配过程。本研究发现, 在开花期不同覆膜处理下, LX 处理的叶、茎物质积累量分别为 96.10、189.28 g, 显著高于其他处理。这与凌一波等<sup>[25]</sup>的研究结果一致, 该研究同样发现较高的净光合速率能显著促进向日葵茎粗的增加。在总干物质积累量方面, CK 和 LX 处理的总干物质积累量分别达到 406.18、382.58 g, 均显著高于其他覆膜处理。这与邓银珍等<sup>[26]</sup>和 HAO 等<sup>[27]</sup>的研究结果一致, 表明覆膜处理能够有效提高向日葵的干物质积累。然而进一步分析发现, 在 LX 处理、CK 中, 叶片干物质积累过多, 这可能导致叶片变厚、细胞间隙减少, 从而限制气体交换效率, 降低作物的光合效率<sup>[28]</sup>。此外, 当茎部干物质积累过多时, 植株可能会发生过度木质化, 即茎的机械组织比例升高。尽管木质化增强了茎的支撑能力和硬度, 但同时削弱了茎内水分与养分的长距离运输效率。这会限制上部叶片的光合作用并降低籽粒的灌浆效率, 从而导致产量下降。在产量表现方面, SH 处理最高, 达到 4 259.29  $\text{kg}/\text{km}^2$ , 而 LX 处理次之。

本研究探究了不同覆膜处理对向日葵开花期的光合性能及其干物质积累与产量的影响。结果表明, 不同膜覆盖处理显著影响了向日葵的光合参数与产量表现。其中, LX 处理的胞间  $\text{CO}_2$  浓度显著降低, 蒸腾速率和气孔导度达到最大峰值, 显示出较高的光合效率。同时, 在产量方面, SH 处理表现最优, 达到 4 259.29  $\text{kg}/\text{km}^2$ , 而 LX 处理次之。综上, SH、LX 处理均可作为向日葵种植的优选覆膜方案。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG M M, XUE Y H, JIN T, et al. Effect of long-term biodegradable film mulch on soil physicochemical and microbial properties[J]. *Toxics*, 2022, 10(3): 129.
- [2] GODFRAY H C J, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people[J]. *Science*, 2010, 327: 812-818.
- [3] BRIASSOULIS D, WAAIJENBERG D, GRATRAUD J, et al. Mechanical properties of covering materials for greenhouses: part 1, general overview[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1997, 67(2): 81-96.
- [4] DILARA P A, BRIASSOULIS D. Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as greenhouse covering materials[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2000, 76(4): 309-321.
- [5] 陈阔, 吴健龙, 韩浩然, 等. 不同区域覆膜对玉米产量和经济效益的影响[J]. *山西农业科学*, 2025, 53(5): 21-29.  
CHEN K, WU J L, HAN H R, et al. Effects of different mulching methods on maize yield and economic benefits across diverse regions[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2025, 53(5): 21-29.
- [6] 曹玉军, 程兆东, 郑百行, 等. 地膜覆盖残留的危害及防治对策研究[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(6): 258-259.  
CAO Y J, CHENG Z D, ZHENG B H, et al. Harm and prevention countermeasures of plastic film mulching residue[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(6): 258-259.
- [7] 李开宇, 杨宁, 冯良山, 等. 地膜覆盖带来的残膜污染与解决对策[J]. *农机使用与维修*, 2019(2): 29-30.  
LI K Y, YANG N, FENG L S, et al. Residual film pollution caused by plastic film mulching and its countermeasures[J]. *Agricultural Mechanization Using & Maintenance*, 2019(2): 29-30.
- [8] 曹晓庆, 李璐, 张锋伟, 等. 五种常见可降解地膜的研究应用现状和展望[J]. *核农学报*, 2023, 37(5): 1076-1087.  
CAO X Q, LI L, ZHANG F W, et al. Research and application status of five common types of degradable mulching films[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(5): 1076-1087.
- [9] 赵沛义, 康暄, 妥德宝, 等. 降解地膜覆盖对土壤环境和旱地向日葵生长发育的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(6): 84-89.  
ZHAO P Y, KANG X, TUO D B, et al. Research of soil environment and sunflower growth in dry land mulching degradable plastic film[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(6): 84-89.
- [10] 骆永明, 周倩, 章海波, 等. 重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(10): 1021-1030.  
LUO Y M, ZHOU Q, ZHANG H B, et al. Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(10): 1021-1030.
- [11] LIU E K, HE W Q, YAN C R. 'White revolution' to 'white pollution': agricultural plastic film mulch in China[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(9): 091001.
- [12] 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.  
WANG Y J. Effects of different plastic film mulching on soil physicochemical properties and maize yield[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [13] 林萌萌, 孙涛, 尹继乾, 等. 不同生物降解地膜对花生光合特性和产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(27): 190-197.

- LIN M M, SUN T, YIN J Q, et al. Effects of different biodegradable films mulching on the photosynthetic characteristics and yield of peanut[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(27):190-197.
- [14] 石艳艳, 马志花, 吴春花, 等. 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, et al. 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.
- [15] FREDEEN A L, GAMON J A, FIELD C B. Responses of photosynthesis and carbohydrate-partitioning to limitations in nitrogen and water availability in field-grown sunflower[J]. Plant, Cell & Environment, 1991, 14(9):963-970.
- [16] 董睿潇, 王永庆, 王鑫博, 等. 盐胁迫对食用型向日葵现蕾期叶片光合性能与冠层结构的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(1):141-152.
- DONG R X, WANG Y Q, WANG X B, et al. Effects of salt stress on photosynthetic characteristics and canopy structure of edible sunflower leaves at budding stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(1):141-152.
- [17] 王璐. 水分调亏对河西绿洲凉凉灌区食用向日葵光合特性、产量及品质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- WANG L. Effect of regulated water deficit on photosynthetic characteristics, yield, and quality of edible sunflower in the cold irrigation area of Hexi oasis[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.
- [18] 魏凤国. 光合作用中几个问题的释疑[J]. 中学生物教学, 2022(13):47-49.
- WEI F G. Interpretation of several problems in photosynthesis[J]. Teaching of Middle School Biology, 2022(13):47-49.
- [19] 孙延亮, 魏孔钦, 刘选帅, 等. 紫花苜蓿光合日进程及光合产物分配对施磷的响应[J]. 草业学报, 2022, 31(12):85-94.
- SUN Y L, WEI K Q, LIU X S, et al. Diurnal changes in photosynthesis and photosynthetic product partitioning in alfalfa in response to phosphorus application[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(12):85-94.
- [20] URBAN J, INGWERS M, MCGUIRE M A, et al. Stomatal conductance increases with rising temperature[J]. Plant Signaling & Behavior, 2017, 12(8):e1356534.
- [21] 杨阳, 马绎皓, 王润元, 等. 干旱胁迫下半干旱雨养区春小麦光响应曲线的拟合[J]. 中国农学通报, 2020, 36(29):15-21.
- YANG Y, MA Y H, WANG R Y, et al. Simulation of light response curve of spring wheat in semi-arid rainfed area under drought stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(29):15-21.
- [22] 杨雯, 张静, 何卫凯, 等. 不同光照强度对4种罗勒属植物叶绿素荧光和光合生理的影响[J]. 河南农业科学, 2025, 54(5):113-123.
- YANG W, ZHANG J, HE W K, et al. Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence and photosynthetic physiology of four basil plants[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(5):113-123.
- [23] 金建新, 李株丹, 黄建成, 等. 宁夏引黄灌区不同灌水处理下春小麦光响应曲线模型研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9):182-190.
- JIN J X, LI Z D, HUANG J C, et al. Study on light response curve model of spring wheat under different irrigation treatments in Ningxia Yellow River irrigation area[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9):182-190.
- [24] 云文丽, 侯琼, 王海梅, 等. 河套灌区食用向日葵光合作用的光响应曲线分析[J]. 中国油料作物学报, 2013, 35(4):405-410.
- YUN W L, HOU Q, WANG H M, et al. Light response curve of edible sunflower photosynthesis in Hetao irrigation district[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2013, 35(4):405-410.
- [25] 凌一波, 冯云格, 王斌杰, 等. 密度与行距配置对向日葵冠层结构及光合特性的影响[J]. 作物杂志, 2022(3):155-160.
- LING Y B, FENG Y G, WANG B J, et al. Effects of density and row spacing on canopy structure and photosynthetic characteristics in sunflower[J]. Crops, 2022(3):155-160.
- [26] 邓银珍, 景慧, 张国梧. 全生物降解地膜在高寒地区马铃薯作物上的应用效果探究[J]. 青海农技推广, 2023(2):54-58.
- DENG Y Z, JING H, ZHANG G W. Study on the application effect of biodegradable plastic film in potato crops in Alpine region[J]. Qinghai Agro-Technology Extension, 2023(2):54-58.
- [27] HAO Y Q, MIN J, JU S R, et al. Possible hazards from biodegradation of soil plastic mulch: increases in microplastics and CO<sub>2</sub> emissions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 480:136178.
- [28] 刘明秀, 梁国鲁. 植物比叶质量研究进展[J]. 植物生态学报, 2016, 40(8):847-860.
- LIU M X, LIANG G L. Research progress on leaf mass per area[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(8):847-860.