



步恒通, 陈宣伊, 张向前, 王伟妮, 张德健, 师晶晶, 程玉臣, 孙霞, 刘敏. 降解膜覆盖对土壤水分时空动态变化特征及向日葵干物质积累的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 266-278.

BU Hengtong, CHEN Xuanyi, ZHANG Xiangqian, WANG Weini, ZHANG Dejian, SHI Jingjing, CHENG Yuchen, SUN Xia, LIU Min. Impact of biodegradable film mulching on the spatiotemporal dynamics of soil moisture and the accumulation of sunflower dry matter[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 266-278.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.23

降解膜覆盖对土壤水分时空动态变化特征及向日葵干物质积累的影响

步恒通¹ 陈宣伊¹ 张向前^{2*} 王伟妮³ 张德健^{1*} 师晶晶¹ 程玉臣²
孙霞³ 刘敏³

(1. 内蒙古大学 生命科学学院, 呼和浩特 010020;

2. 内蒙古自治区农牧业科学院 植物保护研究所, 呼和浩特 010031;

3. 内蒙古自治区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)

摘要 为揭示不同类型降解地膜覆盖对土壤水分时空动态变化规律, 进一步明确降解地膜覆盖对向日葵产量和水分利用效率差异性的影响。以向日葵三瑞10号为供试品种, 系统分析了2022年和2023年设置的兴安盟降解膜(XAM)、兰州降解膜(LZ)、吉林降解膜(JL)、苏州降解膜(SZ)、上海降解膜(SH)等5种生物降解地膜及普通塑料地膜覆盖对照(CK)共6个处理, 对向日葵全生育期土壤水分时空动态变化规律及干物质积累和水分利用效率的影响。结果表明: 生物降解地膜与普通塑料地膜覆盖处理的土壤含水量在向日葵生长前期差异不显著, 而在中后期普通地膜土壤含水量高于降解地膜; LZ和SH降解地膜处理成熟期植株干物质质量显著大于CK, 其他处理之间并未有显著差异, 不同处理向日葵干物质积累过程符合Logistic模型, 拟合度 R^2 均在0.925 9以上, 2年中, CK的干物质积累量最大增长速率均低于降解膜处理; 2022年SH处理产量为4 259.29(kg/hm²), 较CK的产量高出13.93%, 2023年SH处理产量为4 493.85(kg/hm²), 较CK高出23.44%; JL和SH降解膜处理平均水分利用效率为13.48和14.00/(hm²·mm), 较CK处理高出5.69%和9.17%。综合产量、水分利用效率等多方因素, SH和JL全生物降解地膜具有较好的产量和水分利用效率, 可在内蒙古黄河流域南岸灌区范围进行推广, 本研究可为缓解残膜污染和推动农田可持续发展提供理论依据。

关键词 向日葵; 降解膜; 干物质积累; 产量; 水分利用效率

中图分类号 S565.5

文章编号 1007-4333(2024)12-0266-13

文献标志码 A

Impact of biodegradable film mulching on the spatiotemporal dynamics of soil moisture and the accumulation of sunflower dry matter

BU Hengtong¹, CHEN Xuanyi¹, ZHANG Xiangqian^{2*}, WANG Weini³, ZHANG Dejian^{1*},
SHI Jingjing¹, CHENG Yuchen², SUN Xia³, LIU Min³

(1. School of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot 010020, China;

2. Plant Protection Institute, Inner Mongolia Academy of Agriculture & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China;

3. Ecological and Resource Protection Center of Agriculture and Animal Husbandry, Ordos City, Inner Mongolia Autonomous Region, Ordos 017200, China)

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 鄂尔多斯市“揭榜挂帅”项目(JBGS-2021-001); 中央引导地方科技发展资金(2022ZY0216)

第一作者: 步恒通(ORCID: 0009-0006-3935-9151), 硕士硕士生, E-mail: 761368017@qq.com

通讯作者: 张向前(ORCID: 0000-0001-5957-7646), 研究员, 主要从事土壤耕作与农业生态等研究, E-mail: zhangxiangqian_2008@126.com

张德健(ORCID: 0000-0002-2287-787x), 教授, 主要从事旱作农业及农田生态治理研究, E-mail: zhangdejian00@163.com

Abstract To uncover the spatiotemporal dynamics of soil moisture under various types of degradable film mulching and to further clarify the impact of degradable film mulching on the differences in sunflower yield and water use efficiency, we conducted a systematic analysis by taking sunflower variety Sanrui No. 10 as study object. A total five types of biodegradable films: Xing'an League degradable black film (XAM), Lanzhou degradable black film (LZ), Jilin degradable black film (JL), Suzhou degradable black film (SZ), and Shanghai degradable black film (SH), along with a conventional plastic film control (CK), were encompassed over the years 2022 and 2023. The effects of the treatments on the spatiotemporal dynamics of soil moisture, dry matter accumulation, and water use efficiency throughout the entire growth period of sunflowers were examined. The results indicated that there was no significant difference in soil moisture content between biodegradable films and conventional plastic film during the early growth stage of sunflowers. However, in the middle and late stages, the soil moisture content under conventional film was higher than that under degradable films. The LZ and SH degradable film treatments significantly surpassed the CK in terms of plant dry matter at maturity, and with no significant differences observed among the other treatments. The dry matter accumulation process of sunflowers under different treatments conformed to the Logistic model, with an R^2 fitting degree above 0.925 for all. Over the two-year period, the maximum growth rate of dry matter accumulation for CK was consistently lower than that of the degradable film treatments. In 2022, the SH treatment yielded 4,259.29 kg/hm², which was 13.93% higher than the CK yield. In 2023, the SH treatment produced 4,493.85 kg/hm², marking a 23.44% increase over CK. The water use efficiency for the JL and SH degradable film treatments was 13.48 and 14.00 kg/(hm²·mm), respectively, which was 5.69% and 9.17% higher than the CK treatment. Considering yield, water use efficiency, and other factors, the SH and JL fully biodegradable film mulching demonstrated superior performance in both yield and water use efficiency. These findings suggest that the SH and JL degradable films are suitable for promotion in the southern irrigation area of the Yellow River basin in Inner Mongolia. This study provides a theoretical foundation for mitigating the pollution caused by residual films and advancing sustainable agricultural practices.

Keywords sunflower; biodegradable film; dry matter accumulation; yield; water use efficiency

自上世纪 70 年代起,地膜覆盖技术在我国旱地作物生产中开始应用,80 年代中后期,该技术在内蒙古地区得到广泛应用^[1-2]。与裸露土壤相比,地膜覆盖能有效抑制土壤水分蒸发,改善土壤温度,促进种子萌发和幼苗生长,进而提高作物产量以及水分利用效率^[3]。此项技术成功解决了旱区农业生产中的“旱”与“寒”两大难题,还可以提高积温,延长生育期,使农田生产力得到显著提升。因此,地膜覆盖作物栽培技术被视为增强旱区耕地生产力的主要方式之一^[4]。但随着地膜技术的广泛推广和长期应用,研究发现聚乙烯薄膜在自然条件下难以降解,而且连年施用地膜和超薄地膜带来了严重的农田残膜污染问题。一定施用时间后土壤中的残膜积累不仅会导致土壤板结,致使土壤肥力逐渐下降^[5]还会影响作物根系的正常生长发育,进而干扰作物的正常生长。残留地膜碎裂成大小不一的碎块于土壤中,降低了土壤渗透性和土壤孔隙度,抑制作物根系发育及作物对水分的吸收,降低作物产

量^[6],而且还会对生态环境造成严重的“白色污染”。为解决这一问题,同时提高土壤生产能力,使用可降解生物地膜是农业生产发展解决残膜污染问题的主要途径之一,且具有较大的发展前景。以淀粉、纤维素、壳聚糖等天然材料为主要原料的完全生物可降解地膜^[7],可在自然条件下分解,其不仅具有保温、保墒效果,还可有效避免残膜对土壤环境的污染,降低作物减产的风险,可代替传统地膜推广使用。

向日葵是内蒙古中西部地区的主要经济作物,在沿黄流域灌区农田的种植面积逐年递增,2022 年,中国向日葵种植面积达到了 62.32 万 hm²,产量为 174.1 万 t,而内蒙古自治区作为中国最大的向日葵产区,种植面积为 42.3 万 hm²,占全国总种植面积的 67.79%,产量达 115.44 万 t,占全国总产量的 66.3%^[8]。为提高其结实率和籽实产量,推动当地农民脱贫致富、增产增收,向日葵覆膜种植技术已被深入研究并大力推广,且已取得显著成效。康虎

等^[9]、薛源清等^[10]、谷晓博等^[11]李强等^[12]的研究均显示生物可降解地膜覆盖处理与未覆盖处理相比能显著提高玉米产量,增产效应与普通塑料地膜无显著差异;邬强等^[13]和杨海迪等^[14]研究表明,降解地膜与未覆膜相比能显著提高土壤质量含水量和水分利用效率。目前可降解地膜的田间应用主要以粮食作物为主,作物品种相对单一,对于向日葵等经济作物的降解膜栽培技术研究报道尚少。因此,为解决内蒙古黄河流域南岸灌区向日葵覆膜种植残膜污染问题,本研究拟以5种不同的生物降解膜为研究对象,采用田间小区试验的方法,开展降解膜覆盖对农田土壤水分和向日葵生长发育及水分利用效率影响的研究,以期为区域农田降解膜合理选择施用和内蒙古向日葵产业可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2022—2023年在内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗树林召镇西海心试验田进行(地理坐标为40°29′6.09″N,109°52′24.9″E)。该地区海拔1 042 m,属于典型温带大陆性气候。其气候特点是干燥少雨,冬寒夏热,昼夜温差大。年平均蒸发量达到2 115 mm。年均日照时数约为3 000 h,春霜冻(终霜冻)一般于5月上中旬结束,而秋霜冻(初霜冻)则出现在9月下旬。该地区的平均无霜期为135~150 d,年均降水量240~360 mm。此外,该地区太阳能和风能资源丰富,主要土壤类型为潮土,耕地等级为六等地。试验田0~60 cm土壤的平均容重为1.5 g/cm³,属于典型的旱作灌溉农业区。适合小麦、玉米、向日葵等长日照作物以及喜温蔬菜辣椒和青椒的种植。

该地区2022年降水量为355.1 mm,其中6—9月为主要降水期,平均气温为6.98℃,最高气温达到34.3℃,最低气温低至-21.2℃;2023年,该地区降水量为215.9 mm,主要集中在7—9月份,年平均气温为7.71℃,最低气温为-27.9℃,最高气温达到33.9℃,详见图1。

1.2 试验材料及设计

本研究使用的地膜规格统一为宽700 mm、厚0.08 mm、降解时间为60~120 d的黑色全生物降解膜,向日葵为当地的主推品种三瑞10号。

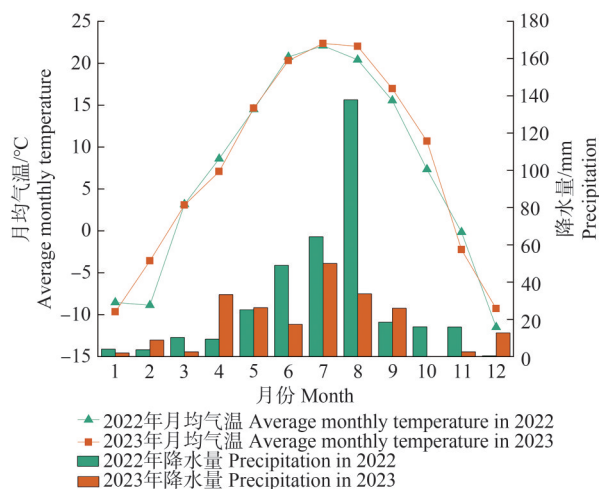


图1 2022和2023年试验地的月均气温和降水量情况

Fig. 1 Air temperature and precipitation of the test site of 2022 and 2023

试验共设置6种不同的覆膜处理,包括5种不同的降解膜和1种普通塑料地膜(CK)处理。具体为:兴安盟降解膜(XAM)、兰州降解膜(LZ)、吉林降解膜(JL)、苏州降解膜(SZ)、上海降解膜(SH)以及包头普通膜(CK)各处理播种面积均为465 m²。在5月中旬,进行适量灌水,灌水量为200 mm,具体播种日期分别为2022-05-29和2023-06-02,采用机械化宽窄行种植模式,一次性完成施肥、覆膜、播种、覆土、镇压等作业工序,窄行40 cm、宽行90 cm;同时施入混合肥(N-P₂O₅-K₂O)375 kg/hm²,追施尿素225 kg/hm²,根据当地种植习惯,试验地块在整个生长期将不进行灌溉处理,其他管理方式同大田。

1.3 样品采集及方法

1.3.1 土壤水分含量

土壤水分含量测定深度为0~60 cm土层,取样方法为0~20 cm每10 cm取1个土样,20 cm以下每20 cm取1个土样,总共涵盖了4个不同的土层;采用烘干法测量土壤水分含量,分别在向日葵田的播种期、苗期、现蕾期、开花期、灌浆期、成熟期进行土壤水分测定,每次测定重复3次。

土壤含水量($m(\text{水}):m(\text{土壤})$)计算公式为:

$$\text{土壤含水量} = \frac{m(\text{湿土} + \text{盒}) - m(\text{烘干土} + \text{盒})}{m(\text{烘干土} + \text{盒}) - m(\text{盒})}$$

×100%

土壤贮水量计算公式为:

$$W = 10 H \rho B$$

式中: W 为土壤储水量, mm; H 为土层深度, cm; ρ 为土壤干容重, g/cm³; B 为土壤含水量, %。

水分利用效率计算公式如下:

$$WUE = \frac{Y}{ET}$$

式中: WUE 为作物水分利用效率, kg/(hm²·mm); Y 为籽粒产量, kg/hm²。

$$ET = L + \Delta W + I$$

式中: ET 为作物耗水量, mm; L 为作物生育期降水量, mm; ΔW 为土层储水量的变化值, mm; I 为生育期内降雨量, mm。

1.3.2 出苗率

在播种后 28 d 调查出苗率, 每小区随机选择 10 m 双行, 记录幼苗数和播种的种子数, 重复 3 次。

$$\text{出苗率} = \frac{\text{苗数}}{\text{播种的种子数}} \times 100\%$$

1.3.3 叶面积

在向日葵生长各时期, 选择取样向日葵中的健康绿色叶片, 使用打孔器打孔, 并将孔片与所有所剩叶片分别烘干至恒重。叶面积计算公式如下:

$$\text{叶面积} = \frac{NS(W_p + W_r)}{W_p}$$

式中: N 为孔片数量; S 为打孔器面积, cm²; W_p 为孔片质量, g; W_r 为打孔后叶片所剩质量, g。

叶面积指数计算公式如下:

$$LAI = \frac{\sum(Q)}{q}$$

式中: LAI 为叶面积指数, (m²/m²); $\sum(Q)$ 为 667 m² 的叶片总面积, m²; q 为 667 m² 的地面面积, m²。

1.3.4 农艺性状测定

在 2022 年和 2023 年, 对向日葵的播种期、苗期、现蕾期、开花期、灌浆期和成熟期进行农艺性状测定。在每个阶段, 选择 3 株代表性且长势一致的植株, 齐地刈割后测量株高, 重复 3 次。将样品分为茎、叶、叶柄和花盘, 装入纱网袋, 放入烘箱中, 在 105 °C 下杀青 30 min, 再在 80 °C 下烘干至恒重, 用电子天平称重并记录。

采用 Logistic 方程拟合向日葵干物质积累过程, 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。

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

$$v = \frac{MAke^{-kt}}{(1 + Ae^{-kt})^2}$$

$$v_{\max} = \frac{kM}{4}$$

$$T = \frac{\ln A}{k}$$

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, g; A 、 k 为模型固定系数; t 为出苗后天数, d; v 为单株干物质积累速率, g/d; T 为干物质积累速率达到最大值对应的出苗后天数, d。

1.3.5 产量测定

在作物收获时, 每个处理选取 20 株具有代表性且长势一致的向日葵, 重复 3 次, 摘下花盘, 进行脱粒、晒干、称重等一系列措施。各小区单独收获测定小区实际产量, 最后折算公顷产量。

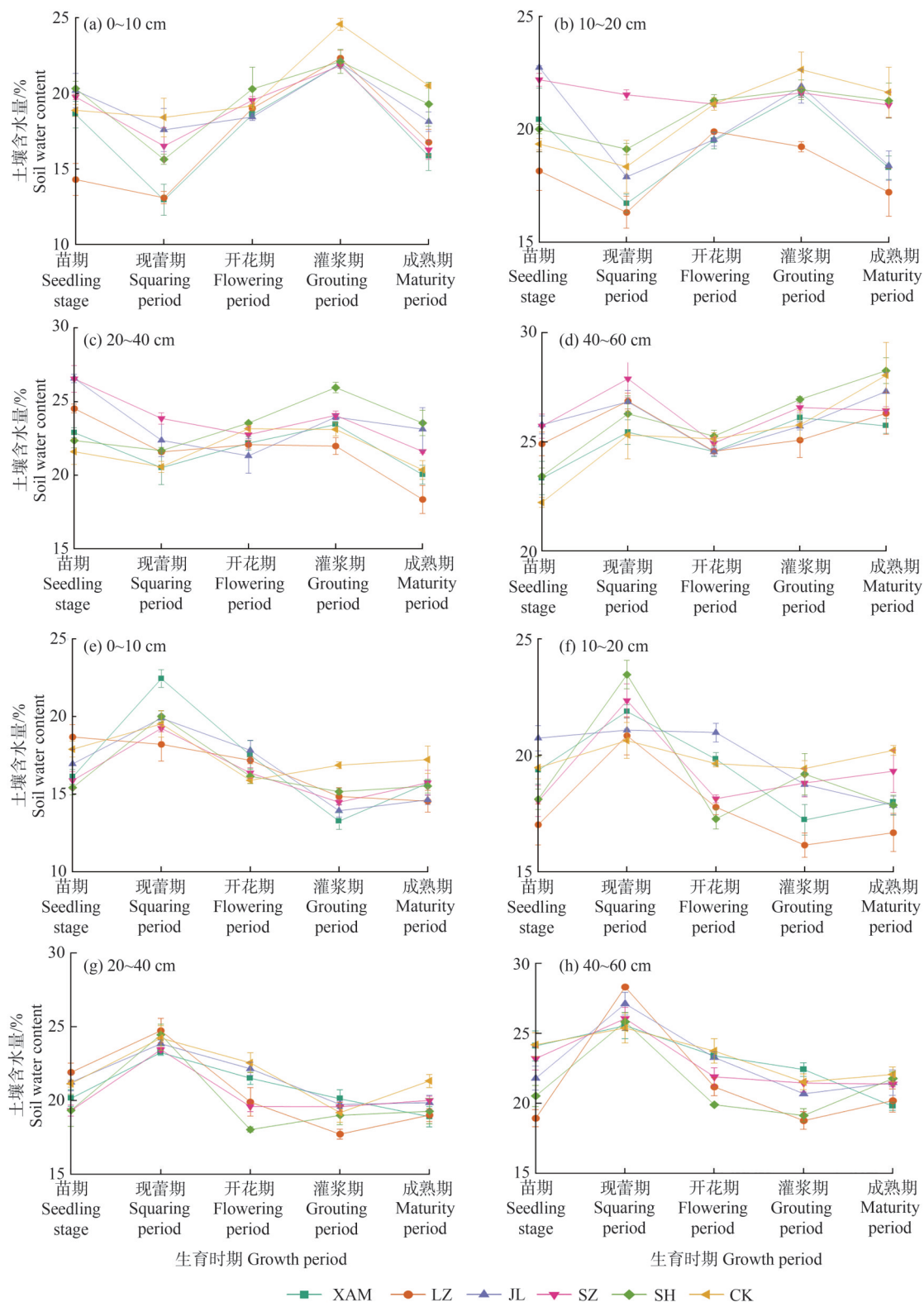
1.4 数据处理及分析

采用 Microsoft Excel 软件进行数据处理, 使用 Origin 2021 软件绘图, 并运用 SPSS Statistics 24 统计软件的最小显著差数法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 降解膜覆盖对向日葵田土壤水分时空动态变化特征的影响

不同种类降解地膜对 2022—2023 年向日葵土壤水分利用效率的影响结果见图 2。由图 2 可知: 2022 年不同降解地膜处理下的 0~40 cm 土层土壤含水量在向日葵整个生育期内表现为“N”型变化趋势; 而 40~60 cm 土层的土壤含水量则从苗期至现蕾期逐渐增加, 之后下降, 在开花期至成熟期期间逐步增加, 其峰值出现在现蕾期。由图 2(a) 可知: 在 0~10 cm 的土层中, 苗期阶段各处理含水量由高到低排序为 SH>JL>SZ>CK>XAM, LZ 处理的土壤含水量显著低于其他各处理 ($P<0.05$); 进入现蕾期, XAM 处理与 LZ 处理的土壤含水量也显著低于其他处理 ($P<0.05$); 在灌浆期与成熟期, CK 处理的土壤含水量则显著高于其他所有处理 ($P<0.05$), 而其他处理间的土壤含水量差异并不显著。由图 2(b) 可见: 在 10~20 cm 土层深度范围内, SZ 处理的土壤含水量在现蕾期显著高于其他处理 ($P<0.05$), 其他处理含水量由高到低排序为 SH>CK>JL>XAM>LZ; 到了灌浆期, LZ 处理的土壤含水量依旧显著低于其他处理 ($P<0.05$), 其他处



XAM、LZ、JL、SZ、SH和CK分别为兴安盟降解膜、兰州降解膜、吉林降解膜、苏州降解膜、上海降解膜以及包头普通塑料膜。下同。

XAM, LZ, JL, SZ, SH and CK represent Xinganmeng degradation film, Lanzhou degradation film, Jilin degradation film, Suzhou degradation film, Shanghai degradation film and Baotou ordinary plastic film, respectively. The same below.

图2 2022—2023年不同降解膜覆盖下生育期内不同土层含水量变化规律

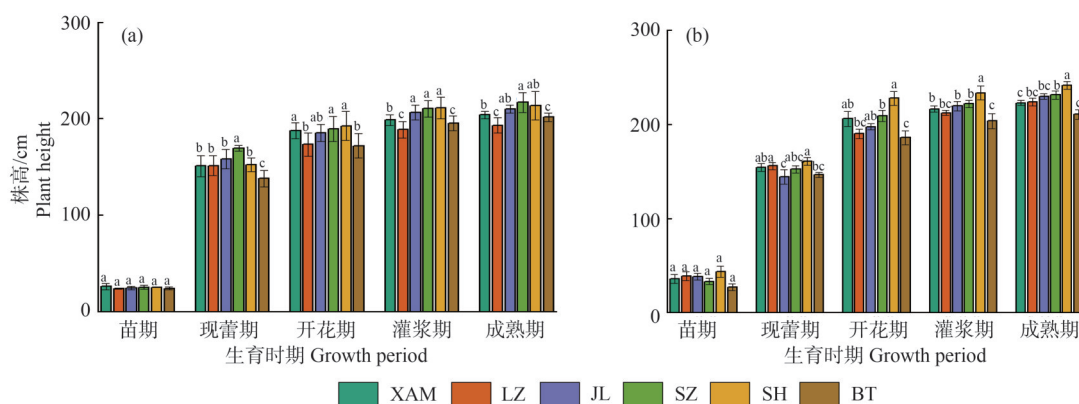
Fig. 2 Water content changes at different soil layers under different degradable films mulching during the fertility period of 2022 and 2023

理含水量由高到低排序为 CK>JL>SH>SZ>XAM; 进入成熟期, JL、LZ 和 XAM 处理的土壤含水量显著低于 CK、SH 和 SZ 处理 ($P<0.05$), 各处理含水量由高到低表现为 CK>SH>SZ>JL>XAM>LZ。由图 2(c) 和 (d) 可知: 20~60 cm 土层各处理土壤含水率由高到低表现为 SZ>JL>SH>LZ>CK>XAM。0~10 cm 成熟期土层土壤含水量由高到低表现为 CK>SH>JL>LZ>SZ>XAM, CK 处理和 SH 处理分别比 XAM 处理高出 25.20% 和 22.23%; >10~20 cm 土层土壤含水量以 SZ 处理最高, SH 处理次高, 分别比 LZ 处理高 20.45% 和 15.39%, 而灌浆期和成熟期土壤含水量均以 CK 处理最高, 分别较 LZ 处理高出 17.71% 和 25.67%。2023 年不同降解地膜处理下的 0~60 cm 土层土壤含水量在向日葵整个生育期内表现为倒“V”形曲线, 峰值出现在现蕾期, 之后下降。由图 2(e) 可知: 在 0~10 cm 的土层中, 苗期阶段, 各处理含水量由高到低排序为 LZ>CK>JL>XAM>SZ>SH, 各处理之间差异并未达到显著水平; 进入现蕾期, XAM 处理土壤含水量显著高于其他处理 ($P<0.05$); 在灌浆期与成熟期, CK 处理的土壤含水量显著高于其他处理, 而其他各处理间的土壤含水量差异并不显著。由图 2(f) 可见: 10~20 cm 土层深度范围内, JL 处理的土壤含水量在现蕾期显著高于其他处理 ($P<0.05$), 其他处理含水量由高到低排序为 CK>XAM>SH>SZ>LZ; 至灌浆期和成熟期, 均为 CK 处理的土壤含水量最高, 显著高于其他降解地膜处理。由图 2(g) 和 (h) 可见: 20~60 cm

土层各处理土壤含水量由高到低表现为 CK>JL>XAM>SZ>LZ>SH。在成熟期的 0~10 cm 土层中, 土壤含水量由高到低表现为 CK>SZ>XAM>SH>JL>LZ, CK 处理较 LZ 处理高出 18.37%。>10~20 cm 土层土壤含水率以 CK 处理最高, JL 处理次高, 分别比 LZ 处理高 12.38% 和 12.36%, 而灌浆期和成熟期土壤含水率均以 CK 处理最高, 分别较 LZ 处理高出 20.43% 和 21.20%。

2.2 不同降解膜覆盖对向日葵株高和叶面积指数的影响

不同降解地膜处理对向日葵株高的影响结果见图 3。可知: 2022 年和 2023 年向日葵的株高增长趋势呈现出相似的模式, 在苗期至现蕾期, 株高以线性方式增长, 随后增长速度放慢, 直至达到收获期。由图 3(a) 可知: 在 2022 年, 苗期各处理的向日葵长势大体一致, 但进入现蕾期后, 不同处理间的株高开始表现出明显的差异; SZ 处理的株高在现蕾期显著高于其他处理 ($P<0.05$), 随着生育时期的进展, SZ 处理、SH 处理和 JL 处理的株高一直在较高水平, 特别是与 XAM 和 LZ 处理相比, 株高差异达到显著水平 ($P<0.05$); 至成熟期, 各处理的株高排序为 SZ>SH>JL>XAM>LZ>CK, SZ 处理和 SH 处理的株高相较于 LZ 处理分别增加了 12.30% 和 10.54%。值得注意的是, 除了苗期, CK 处理的株高在所有观测时期均低于其他处理。由图 3(b) 可知: 在 2023 年, SH 处理在整个生育期中的株高均最高, 现蕾期时, 各处理的株高从高到低依次为 SH、LZ、XAM、SZ、CK 和 JL, 其中 SH 处理的株高



柱形图上方不同小写字母代表处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平。下同。

Different lowercase letters above the column represent the difference between treatments at $P<0.05$ significant level. The same below.

图 3 2022 年 (a) 和 2023 年 (b) 不同降解膜覆盖下向日葵株高变化

Fig. 3 Plant height changes of sunflower under different degradable films mulching on 2022 (a) and 2023 (b)

比CK处理高出11.52%;在开花期和灌浆期,CK处理的株高最低,LZ处理次之,均显著低于其他处理($P<0.05$);成熟期时,各处理的株高排序为SH、SZ、JL、LZ、XAM和CK,SH处理的株高分别比CK处理和XAM处理高出8.43%和14.65%。综合2022年和2023年的株高数据,2022年的向日葵株高平均比2023年低14.1 cm。

不同降解地膜处理对向日葵叶面积指数的影响结果见图4。根据图4所示:2022—2023年不同类型地膜覆盖下向日葵叶面积指数变化规律相似。自出苗后,叶生长迅速,叶面积持续呈线性增长趋势直至现蕾期;随后增长幅度放缓,在开花期达到最大值;

在灌浆开始后,向日葵营养物质主要输送到花盘中,植株下部叶片开始衰老死亡,向日葵叶面积因此下降,直至成熟收获。由图4(a)可知:2022年各处理的向日葵叶面积指数在开花期达到最大值,其中,CK处理显著低于SH和LZ处理($P<0.05$),但与其他降解膜处理无明显差异;在灌浆期,SH和LZ处理显著大于其余降解膜和CK处理,LZ处理叶面积指数在现蕾期开始到成熟期均为最大。由图4(b)可知,2023年,不同类型地膜处理的向日葵叶面积指数整体趋势与2022年无异,同样在开花期达到最大值,但各处理之间叶面积指数差异很小,降解膜处理和普通地膜处理之间无显著差异。

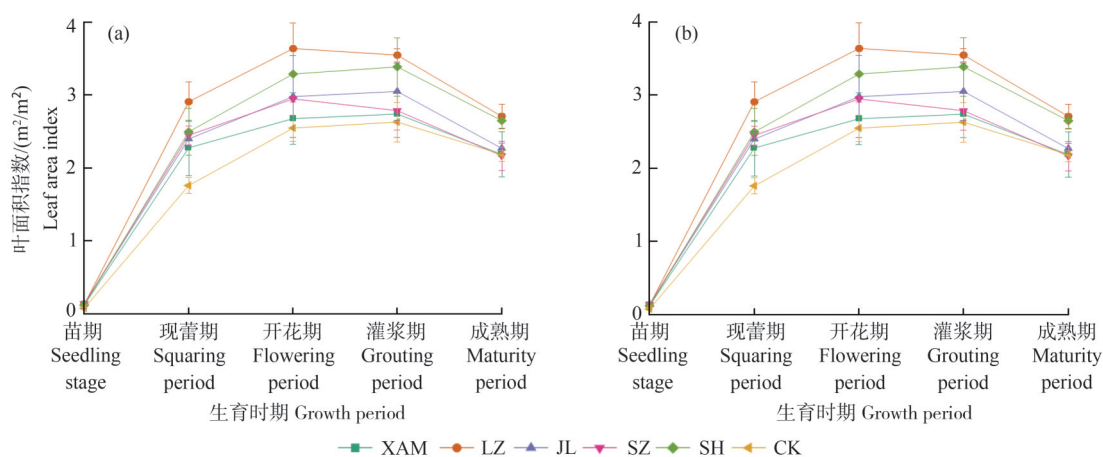


图4 2022年(a)与2023年(b)不同降解膜覆盖下向日葵叶面积指数变化

Fig. 4 Changes of the leaf area index of sunflower on 2022 (a) and 2023 (b) under different degradable films mulching

2.3 不同降解膜覆盖对植株干物质积累的影响

不同降解地膜覆盖对向日葵各生育时期植株

干物质积累的影响见图5。通过图5可见:2022—2023年不同地膜覆盖处理下的向日葵,其干物质质量

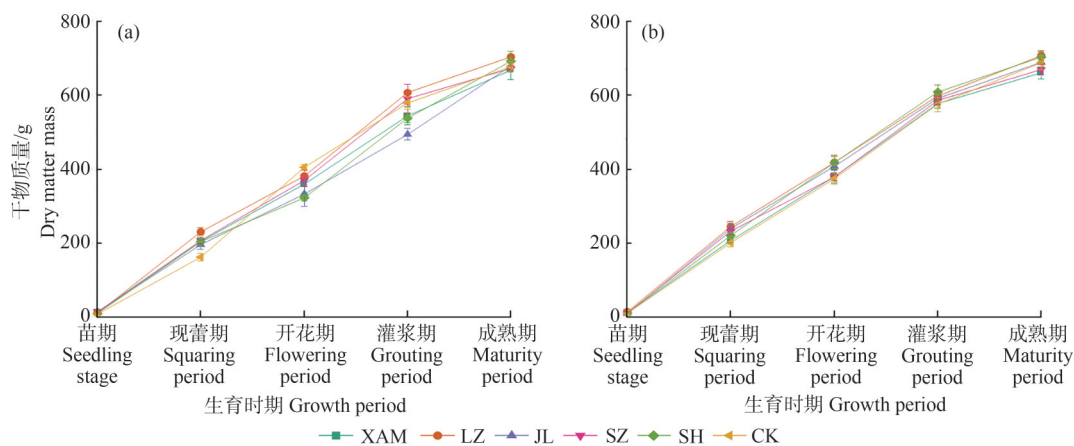


图5 2022(a)和2023年(b)不同降解膜覆盖下向日葵干物质变化

Fig. 5 Changes of dry matter of sunflower on 2022 (a) and 2023 (b) under different degradable films mulching

在生育期前期呈现出线性增长的趋势,中后期增长缓慢,并在成熟期达到最大值。如图 5(a)所示:在现蕾期和开花期,各处理之间差异较小;在成熟期,LZ 处理的干物质质量最高,显著高于其余处理,较 CK 处理干物质质量高出 26.18 g,XAM 处理的干物质质量最低,仅为 668.25 g。由图 5(b)可知:2023 年各处理总体趋势与 2022 年类似,在向日葵生育前期,各处理间的干物质积累量差异不显著,各处理在开花期开始出现显著差异;开花期,CK 和 XAM 处理的干物质质量显著低于各降解膜处理($P<0.05$),CK 与 SH 处理的差值达到了 42.47 g,而其他各降解膜处理间的干物质质量无显著差异;在成熟期,LZ 处理的干物质质量最高,达到了 708.30g,略高于 SH 处理,显著高于其余降解膜和 CK 处理($P<0.05$)。

不同降解地膜覆盖对向日葵成熟期植株干物

质积累的影响见表 1。根据表 1 可知:2022 年成熟期总干物质质量大小顺序依次为 LZ>SH>SZ>CK>JL>XAM;其中,LZ 处理的干物质量与 XAM 和 JL 处理干物质质量的差值达到 36.57 g 和 34.67 g,LZ 处理干物质质量差异显著高于 XAM 和 JL 处理($P<0.05$),其余处理之间并未有显著性差异。2023 年成熟期总干物质质量大小顺序依次为 LZ>SH>JL>CK>SZ>XAM,LZ 和 SH 处理总干物质质量显著大于其他处理,花盘质量由大到小依次为 LZ>JL>SH>CK>SZ>XAM,LZ 和 JL 处理显著高于其他处理($P<0.05$),LZ 处理比 XAM 高出 11.99%;总体来看,LZ 处理的各个器官干物质质量均高于其余处理,而 SZ 处理的干物质质量较低,其余降解膜处理包括 CK 处理之间均无显著性差异。

表 1 2022 与 2023 年不同降解膜覆盖下向日葵成熟期干物质质量比较

Table 1 Sunflower mature dry matter quality comparison on 2022 and 2023 under different degradation film coverings g/株

处理 Treatment	茎干重		叶干重		柄干重		花盘干重		总干物质	
	Stem dry weight		Leaf dry weight		Petiole dry weight		Flower disc dry weight		Total dry matter	
	2022 年	2023 年	2022 年	2023 年	2022 年	2023 年	2022 年	2023 年	2022 年	2023 年
XAM	206.43 ab	206.05 b	95.50 ab	84.61 b	33.00 a	36.46 a	333.32 a	334.42 c	668.25 c	661.53 c
LZ	220.35 a	212.94 b	107.87 a	89.73 ab	35.71 a	31.41 ab	340.88 a	374.22 a	704.82 a	708.30 a
JL	220.28 a	212.32 b	88.38 b	76.80 c	30.58 a	36.07 a	340.92 a	364.29 ab	680.15 bc	689.48 b
SZ	209.95 ab	212.93 b	93.89 ab	89.23 ab	36.29 a	31.11 ab	333.13 a	336.63 c	673.26 c	669.90 c
SH	219.23 a	225.61 a	89.99 b	89.90 a	35.51 a	28.38 b	348.12 a	360.07 b	692.85 b	703.95 a
CK	201.97 b	226.42 a	98.09 ab	87.04 ab	39.04 a	34.14 ab	339.02 a	341.15 c	679.71 bc	688.75 b

注:不同小写字母代表处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平。下同。

Note: Different lowercase letters represent the difference between treatments at $P<0.05$ significant level. The same below.

对不同降解膜覆盖向日葵干物质积累量进行 Logistic 方程拟合,各参数见表 2。由表 2 可知:2022 年不同降解膜覆盖向日葵积累最大速率表现为 SH>LZ>XAM>SZ>JL>CK,SH 和 LZ 处理显著高于 CK;2023 年 SH 处理显著高于其他处理($P<0.05$)。2022 年 SZ 干物质积累最大速率出现时间最早,JL 处理最晚,SZ 和 XAM 处理显著早于其余处理,2023 年 SZ 处理干物质积累最大速率出现时间最早,CK 出现最晚,显著晚于其他降解膜处理,SZ 处理比 CK 早 2.79 d。

2.4 不同降解膜覆盖对向日葵产量和水分利用效率的影响

不同降解地膜对向日葵田出苗率、耗水量、产

量以及水分利用效率的影响结果见表 3。由表 3 可知:2022 年,除 XAM 处理,采用降解膜处理的出苗率均高于 CK 处理,其中,SH 处理的出苗率最高,达到了 90.30%,显著优于 CK 和 XAM 处理($P<0.05$);2023 年,整体出苗率较 2022 年有所降低,SH 处理的出苗率下降了 3.22%,而 XAM 处理下降幅度最小,仅为 1.4%,但各降解膜处理的趋势并未发生改变;SH 处理显著高于 XAM 和 CK 处理($P<0.05$)。2022 年各降解地膜与普通塑料膜处理的向日葵产量大小顺序为 SH>LZ>SZ>JL>XAM>CK,SH 处理产量为 4 259.29 kg/km²,较 CK 处理平均增产 13.93%,其余处理也有不同程度的增产,增产幅度为 1.58%~13.93%。降解地膜覆盖处理

表 2 2022 与 2023 年不同类型降解膜覆盖下向日葵干物质积累过程 Logistic 方程及其特征值
Table 2 Logistic equation and characteristic value of sunflower dry matter accumulation process
under different degradable films mulching on 2022 and 2023

年份 Year	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	R^2	最大生长速率/d Maximum growth rate	干物质积累最大速率 出现时间/d The appearance time of maximum rate of dry matter accumulation
2022	XAM	$y=668.25(1+48.94e^{-0.0928r})$	0.950 4	15.50 ab	41.92 ab
	LZ	$y=704.82(1+52.83e^{-0.0892r})$	0.925 9	15.71 a	44.50 c
	JL	$y=680.15(1+56.07e^{-0.0903r})$	0.940 6	15.35 ab	44.60 c
	SZ	$y=673.26(1+45.25e^{-0.0914r})$	0.952 7	15.39 ab	41.67 a
	SH	$y=692.85(1+55.01e^{-0.0915r})$	0.943 5	15.85 a	43.76 b
	CK	$y=678.12(1+50.69e^{-0.0881r})$	0.950 5	14.93 b	44.54 c
2023	XAM	$y=661.53(1+57.20e^{-0.0949r})$	0.938 3	15.75 c	42.46 ab
	LZ	$y=708.30(1+50.78e^{-0.0903r})$	0.930 0	16.00 bc	43.45 b
	JL	$y=689.48(1+61.33e^{-0.0952r})$	0.934 0	16.41 b	43.21 ab
	SZ	$y=669.90(1+53.61e^{-0.0946r})$	0.942 6	15.85 bc	42.00 a
	SH	$y=703.95(1+60.13e^{-0.0959r})$	0.945 1	16.88 a	42.67 ab
	CK	$y=688.75(1+62.13e^{-0.0920r})$	0.927 5	15.85 bc	44.79 c

表 3 2022—2023 年不同类型降解膜覆盖处理对向日葵产量、耗水量以及水分利用效率的影响
Table 3 Effects of different degradation film mulching treatments on yield, water consumption and water use efficiency of
sunflower from 2022 to 2023

处理 Treatment	出苗率/% Emergence rate		耗水量/mm Water consumption		水分利用效率/kg/(hm ² ·mm) Water use efficiency		产量/(kg/hm ²) Yield	
	2022 年	2023 年	2022 年	2023 年	2022 年	2023 年	2022 年	2023 年
XAM	78.48% b	77.08% b	398.69 a	312.57 b	9.52 c	11.65 b	3 797.49 d	3 640.64 d
LZ	81.82% ab	78.33% ab	390.57 a	341.80 a	10.41 bc	12.10 b	4 064.40 b	4 107.02 bc
JL	81.21% b	83.33% a	351.64 b	274.62 cd	11.35 ab	15.61 a	3 986.22 c	4 281.96 b
SZ	81.52% ab	79.17% ab	350.90 b	282.37 cd	11.49 ab	13.54 b	4 028.82 b	3 820.78 cd
SH	90.30% a	87.08% a	335.48 b	294.07 c	12.70 a	15.29 a	4 259.29 a	4 493.85 a
CK	78.18% b	76.67% b	350.06 b	261.81 d	10.69 bc	14.73 b	3 738.36 d	3 970.00 c

略。在 2023 年,各处理的产量大小顺序为 SH>JL>LZ>CK>SZ>XAM;其中,SH 处理较 CK 处理增产 13.20%,CK 较 XAM 和 SZ 处理分别增产 9.05% 和 3.91%。2022 年耗水量平均比 2023 年多

68.82 mm,在试验期间,向日葵耗水量均表现为 XAM、LZ 处理显著大于其余处理($P<0.05$),而其他处理之间差异并未达到显著水平。在水分利用效率方面,2023 年水分利用效率整体高于 2022 年,

2022 年不同类型地膜水分利用效率由高到低为 SH>SZ>JL>CK>LZ>XAM, XAM 处理水分利用效率最低仅为 $9.52 \text{ kg}/(\text{mm}\cdot\text{hm}^2)$, SH 处理显著高于其他处理, CK 处理分别较 XAM 和 LZ 处理水分利用效率提高了 2.69% 和 10.99%。2023 年不同类型地膜水分利用效率由高到低 JL>SH>SZ>CK>LZ>XAM, JL、SH 处理的水分利用效率显著高于其他处理 ($P<0.05$), CK 处理分别较 XAM 和 LZ 处理水分利用效率提高了 17.85% 和 20.89%。

3 讨 论

现有研究已表明, 地膜覆盖栽培技术能够有效地保持土壤湿度并减少水分蒸发, 从而促进作物对土壤水分的高效利用^[15]。总体上, 2023 年各土层平均含水率低于 2022 年, 这与 22 年降水过多有直接关系; 同时各处理土壤含水量随土层深度增加而增高, 这也与陈宣伊等^[16]研究结果相一致。本研究表明, 各降解地膜处理在向日葵生育时期前中期保水效果与普通地膜一致, 但在开花期后, 随着降解地膜的逐渐降解, 保水性能下降^[17], 各处理间差异逐渐显现, 特别是在灌浆期和收获期, 普通地膜处理土壤含水量显著高于降解地膜处理, 随着土壤深度的增加, 各处理之间的差异逐渐减小, 胡敏^[18]等也有类似的结果。LZ 处理和 XAM 处理的降解地膜土壤含水量在多个时期均显著低于 SH、JL 和 SZ 处理降解膜。

本研究显示, 普通地膜处理的向日葵株高在所有处理中是最低的, SH 处理在所有降解膜处理中最高, 而 XAM 和 LZ 处理在降解膜处理处于较低水平。2022 年从开花期开始, LZ 处理的向日葵叶面积指数在所有处理中最高, 并且与 CK 处理的叶面积指数存在明显差异, 其他降解地膜处理的叶面积指数均高于 CK 处理, 但各处理之间无显著性差异, 这与赵爱琴等^[19]的研究结果一致。原因可能是 2022 年降水过多, 降解膜在向日葵开花期后逐渐裂解, 增加了土壤透气性, 有利于土壤中与空气进行水分交换, 促进向日葵根系的营养吸收, 促进向日葵植株的生长发育, 普通塑料地膜覆盖下的土壤含水量过高, 透气性差, 反而对向日葵的生长产生不利影响。

干物质积累量常用于衡量作物有机物质的积累量^[20], 是衡量作物生长发育的重要指标, 2 年不

同类型地膜覆盖向日葵积累最大速率均以 SH 处理最高, 出苗后干物质积累最大速率出现时间存在一定差异, 2022 年为出苗后 41.67~44.60 d, 2021 年为出苗后 42.00~44.79 d, 均对应于向日葵生育期中的现蕾期。本研究中 2023 年 SH 处理向日葵干物质积累最大增长速率出现时间显著晚于 CK, 侯云鹏等^[21]研究证明, 作物干物质积累最大增长速率增加, 干物质最大增长速率出现天数推迟, 可以延缓叶片衰老, 使植株生长后期仍然保持较高的光合作用, 增强光合效率及光合物质的生产能力, 进而提高向日葵干物质积累量, 有利于作物高产。

采用降解地膜覆盖的作物的产量, 有的试验结果低于普通地膜处理, 而有的则高于普通地膜处理^[22], 有的研究表明无明显差异^[23], 作物种类、植株高度、耕作方式、降解膜材质等影响着作物产量与对照的差异。地膜种类对耗水量具有显著影响, 普通地膜处理的耗水量低于降解膜覆盖处理, 原因是降解膜在向日葵开花期后会逐渐裂解, 造成土壤水分蒸发量大于普通地膜, Chen 等^[24]对新疆棉花试验研究也表明这一观点。降解膜覆盖的产量普遍高于普通塑料膜覆盖, 这与高旭华^[25]和 Gu 等^[26]的研究结果一致, 大部分降解膜处理与普通塑料膜处理的产量差异十分明显, 这是因为降解膜后期裂解速度高于普通塑料膜, 增加了土壤透气性, 有利于根系吸收养分来供给花盘的发育。2022 年 7 月和 8 月降水过多, 集中在向日葵授粉和灌浆的关键时期, 造成花盘授粉不充分, 籽粒发育不完整, 导致某些处理 2022 年产量低于 2023, 同时地膜种植向日葵在机械播种时可能存在操作不规范或点播不到位等问题, 普通地膜相比降解膜韧性更强, 致使幼苗难以钻出地膜, 保苗率降低, 从而导致普通地膜产量较低。根据已有的研究, 地膜覆盖对作物产量和水分利用效率具有显著的促进作用^[27]。两年间的试验结果显示, 随着降雨量的增加, 各处理的 WUE 均呈现明显下降趋势。这一观察结果与刘胜尧等^[28]的研究发现相一致。研究指出, 地膜覆盖在降水少时能有效提升作物的 WUE。然而, 当土壤湿度较高时, 地膜覆盖会阻碍大气和土壤之间的气体交换, 土壤的水分蒸发也会受到抑制, 最终导致 WUE 的降低。

4 结 论

本研究以向日葵为主要研究对象,探究内蒙古自治区沿黄流域南岸灌区多个不同降解地膜和普通塑料地膜覆盖对土壤水分动态变化规律和向日葵生长发育和产量的影响,主要结论如下:

1)降解地膜在向日葵生长前中期保水效果与普通地膜相当,但后期随降解性能下降。LZ和XAM处理的降解地膜保水效果在多个时期低于SH、JL和SZ处理;

2)普通地膜处理的向日葵株高和叶面积指数最低,而SH处理在降解膜处理中株高最高,LZ处理的叶面积指数最高,SH处理的干物质积累速率最高,且干物质积累最大速率出现时间晚于CK,有助于延缓叶片衰老,提高光合效率,增加产量;

3)SH处理和JL处理平均产量较CK处理提高了11.94%和6.77,平均水分利用效率较CK提高了5.69%和9.17%,因此,SH处理和JL处理的降解地膜替代塑料地膜具有很强的可行性。

参考文献 References

- [1] 侯慧芝,吕军峰,郭天文,张国平,董博,张绪成. 旱地全膜覆土穴播对春小麦耗水、产量和土壤水分平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4392-4404
Hou H Z, Lv J F, Guo T W, Zhang G P, Dong B, Zhang X C. Effects of whole film mulching and bunch planting on water consumption, yield and soil water balance of spring wheat in dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(22): 4392-4404 (in Chinese)
- [2] 尹少媛,赵宝平,米俊珍,刘宏金,郭晓宇,武岩,包茵,杨帆,武俊英,刘景辉. 内蒙古农田耕层土壤地膜残留现状及发展趋势[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9): 1985-1992
Yin S Y, Zhao B P, Mi J Z, Liu H J, Guo X Y, Wu Y, Bao H, Yang F, Wu J Y, Liu J H. The current situation and development trend of plastic film residue in farmland topsoil in Inner Mongolia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9): 1985-1992 (in Chinese)
- [3] Li S X, Wang Z H, Li S Q, Gao Y J. Effect of nitrogen fertilization under plastic mulched and non-plastic mulched conditions on water use by maize plants in dry land areas of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 162: 15-32
- [4] Dahiya R, Ingwersen J, Streck T. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1): 52-63
- [5] Zou X Y, Niu W Q, Liu J J, Li Y, Liang B H, Guan Y H. Effects of residual mulch film on the growth and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill)[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2017, 228(2): 71
- [6] 胡灿,王旭峰,陈学庚,汤修映,赵岩,严昌荣. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 223-234
Hu C, Wang X F, Chen X G, Tang X Y, Zhao Y, Yan C R. Current situation and prevention and control strategies of residual film pollution in farmland in Xinjiang [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24): 223-234 (in Chinese)
- [7] Ren A T, Li J Y, Zhao L, Zhou R, Ye J S, Wang Y B, Zhang X C, Wesly K, Ma M S, Xiong Y C. Reduced plastic film mulching under zero tillage boosts water use efficiency and soil health in semiarid rainfed maize field[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 190: 106851
- [8] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴, 2023[M]. 北京: 中国统计出版社
The Rural Social and Economic Survey Department of the National Bureau of Statistics. *China Rural Statistical Yearbook*, 2023 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House (in Chinese)
- [9] 康虎,敖李龙,秦丽珍,苏海佳. 生物可降解地膜的田间降解过程及其对玉米生长的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(6): 54-58
Kang H, Ao L L, Qin L Z, Su H J. Field degradation process of biodegradable mulch film and its effect on maize growth [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(6): 54-58 (in Chinese)
- [10] 薛源清,张俊丽,杨圆圆,刘王涛,刘晓花,景小丽,薛菁. 可降解地膜覆盖对渭北旱塬土壤水热及玉米产量[J]. 西北农业学报, 2017, 26(3): 363-368
Xue Y Q, Zhang J L, Yang Y Y, Liu W T, Liu X H, Jing X L, Xue J. Effects of degradable plastic film mulching on soil water and heat and maize yield in Weibei dryland[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(3): 363-368. (in Chinese)
- [11] 谷晓博,李援农,银敏华,杜娅丹,周昌明. 降解膜覆盖对油菜根系、产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 184-193
Gu X B, Li Y N, Yin M H, Du Y D, Zhou C M. Effects of degradable film mulching on root, yield and water use efficiency of rape [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 184-193 (in Chinese)
- [12] 李强,王琦,张恩和,刘青林. 生物可降解地膜覆盖对干旱灌区玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(9): 155-159
Li Q, Wang Q, Zhang E H, Liu Q L. Effects of biodegradable plastic film mulching on maize yield and water use efficiency in arid irrigation areas [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(9): 155-159 (in Chinese)
- [13] 郭强,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 PBAT biodegradable film mulching on soil water and heat and yield of cotton under drip irrigation in oasis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16): 135-143 (in Chinese)
- [14] 杨海迪,海江波,贾志宽,韩清芳,张保军,任世春. 不同地膜周年覆盖对冬小麦土壤水分及利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 27-34
Yang H D, Hai J B, Jia Z K, Han Q F, Zhang B J, Ren S C. Effects of different plastic film mulching on soil moisture and use efficiency of winter wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(2): 27-34 (in Chinese)
- [15] 胡可欣,米俊珍,刘景辉,赵宝平,王莹,张兰英,崔雪梅. 全生物降解渗水地

- 膜覆盖对黄土高原旱作谷子土壤水热及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(3): 36-49
- Hu K X, Mi J Z, Liu J H, Zhao B P, Wang Y, Zhang L Y, Cui X M. Effects of fully biodegradable permeable plastic film mulching on soil water, heat and yield of dryland millet in the Loess Plateau[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(3): 36-49 (in Chinese)
- [16] 陈宣伊, 师晶晶, 张向前, 杜香玉, 步恒通, 白东星, 路战远, 孟天天, 王满秀, 陈丽荣. 滴灌水量对土壤水分变化特征和玉米水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(9): 38-48
- Chen X Y, Shi J J, Zhang X Q, Du X Y, Bu H T, Bai D X, Lu Z Y, Meng T T, Wang M Y, Chen L R. Effects of drip irrigation amount on soil water change characteristics and water use efficiency of maize [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28 (9) : 38-48 (in Chinese)
- [17] 汪敏, 严旌娜, 蒋希芝, 陈昱, 梁荣庆, 陈叶凡, 张晓美, 徐磊. PBAT/PLA 全生物降解地膜的降解性能及对石河子垦区棉花生长的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(S1): 273-282
- Wang M, Yan N N, Jiang X Z, Chen G, Liang R Q, Chen Y F, Zhang X M, and Xu L. The degradation performance of PBAT/PLA fully biodegradable mulch film and its impact on cotton growth in the Shi He Zi Reclamation Area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(S1): 273-282 (in Chinese)
- [18] 胡敏, 苗庆丰, 史海滨, 于庆峰. 不同类型地膜覆盖对土壤水热及春玉米产量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 628-632
- Hu M, Miao Q F, Shi H B, Yu Q F. Effects of different types of plastic film mulching on soil water and heat and spring maize yield [J]. *Soils*, 2018, 50(3): 628-632 (in Chinese)
- [19] 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(2): 74-78
- Zhao A Q, Li Z Z, Gong Y S. Effects of biodegradable plastic film on maize growth and its field degradation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005(2): 74-78 (in Chinese)
- [20] 王艳丽, 张富仓, 李菊, 许新宇, 王海东, 郭金金, 陆军胜, 范军亮, 向友珍. 灌溉和施磷对河西地区春玉米生长、产量和磷素利用的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(9): 1309-1320.
- Wang Y L, Zhang F C, Li J, Xu X Y, Wang H D, Guo J J, Lu J S, Fan J L, Xiang Y Z. Effects of irrigation and phosphorus application on growth, yield and phosphorus utilization of spring maize in Hexi area[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(9): 1309-1320 (in Chinese)
- [21] 侯云鹏, 孔丽丽, 蔡红光, 刘慧涛, 高玉山, 王永军, 王立春. 东北半干旱区滴灌施肥条件下高产玉米干物质与养分的积累分配特性[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20): 3559-3572
- Hou Y P, Kong L L, Cai H G, Liu H T, Gao Y S, Wang Y J, Wang L C. Characteristics of dry matter and nutrient accumulation and distribution of high-yield maize under drip fertigation in semi-arid area of Northeast China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (20) : 3559-3572 (in Chinese)
- [22] 关新元, 尹飞虎, 刘齐锋, 李军, 张生甫, 张涛. 降解地膜在棉花上应用效果初探[J]. 新疆农垦科技, 2001(4): 37-38
- Guan X Y, Yin F H, Liu Q F, Li J, Zhang S F, Zhang T. Preliminary study on the application effect of degradable film on cotton [J]. *Xinjiang Agricultural Reclamation Science and Technology*, 2001 (4) : 37-38 (in Chinese)
- [23] 唐文雪, 马忠明. 可降解地膜对玉米生长发育及水分利用效率的影响[J]. 中国农村水利水电, 2019. 54-58, 63
- Tang W X, Ma Z M. Effects of degradable plastic film on growth and water use efficiency of maize [J]. *China Rural Water Conservancy and Hydropower*, 2019. 54-58, 63 (in Chinese)
- [24] Chen N, Li X, Šimůnek J, Shi H, Ding Z, Peng Z. Evaluating the effects of biodegradable film mulching on soil water dynamics in a drip-irrigated field[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 226: 105788
- [25] 高旭华, 陈明周, 黄瑶珠, 谢东. 生物降解膜覆盖马铃薯增产机理研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(17): 140-144
- Gao X H, Chen M Z, Huang Y Z, Xie D. Study on the mechanism of yield increase of potato covered with biodegradable film [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(17): 140-144 (in Chinese)
- [26] Gu X, Cai H, Fang H, Li Y, Chen P, Li Y. Effects of degradable film mulching on crop yield and water use efficiency in China: A meta-analysis [J]. *Soil Tillage Research*, 2020. 202: 104676
- [27] Sun D, Li H, Wang E, He W, Hao W, Yan C, Li Y, Mei X, Zhang Y, Sun Z, Jia Z. An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency [J]. *National Science Review*, 2020. 7: 1523-1526
- [28] 刘胜尧, 张立峰, 贾建明, 范凤翠, 石玉芳, 李志宏. 华北旱地覆膜对春甘薯田土壤温度和水分效应[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(3): 287-292
- Liu S Y, Zhang L F, Jia J M, Fan F C, Shi Y F, Li Z H. Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture in spring sweet potato fields in North China [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43(3): 287-292 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 步恒通, 硕士研究生, 现就读于内蒙古大学生命科学学院生物与医药专业。本科毕业于德州学院, 研究生期间在 2022 年度“建行杯”第八届中国国际“互联网+”大学生创新创业大赛中获得内蒙古大学校级金奖、内蒙古自治区金奖、国家级铜奖。目前参与撰写专利 3 项, 软件著作权 2 项; 参与鄂尔多斯市“揭榜挂帅”项目(JBGS-2021-001)以及中央引导地方科技发展资金(2022ZY0216)等多个省部级项目。



通讯作者简介: 张德健,博士,博士生导师,长期从事作物栽培与耕作学的科研教学工作。先后获国家百千万人才工程人选、国家突出贡献中青年专家、国务院政府特殊津贴专家、全国优秀科技工作者、自治区“草原英才”人选、内蒙古自治区深入生产第一线做出突出贡献科技人员、自治区新世纪“321人才工程”一层次人选、内蒙古自治区优秀科技工作者、自治区农业“百千工程”先进工作者、内蒙古自治区优秀教师等多项称号。承担国家和自治区科技项目40余项,获得科技奖励23项;授权专利102件;出版专著26部;发表论文100余篇;制定标准39项;获得计算机软件著作权18个;获得主要农作物审定品种2个。



通讯作者简介: 张向前,博士,硕士生导师,内蒙古自治区农牧业科学院研究员,中国农业工程学会山区分会理事,中国农学会耕作制度分会委员,国家盐碱地创新联盟理事。主要从事土壤耕作、农业生态、农田污染治理等方面的研究工作。主持参加国家科技支撑、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。获内蒙古科技进步一等奖1项,中华农业科技一等奖3项,全国农牧渔业丰收一等奖1项,内蒙古自治区国家进步二等奖一次,农牧业丰收一等奖2项,内蒙古自治区职工科技成果一等奖1项,获草原英才、“321”工程人才、内蒙古自治区青年创新人才等荣誉称号。授权专利104件,登记软件著作权39项,制定地方标准40余项;发表论文90余篇,参编著作10部;研发科技成果10项;审认定品种6个。