



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(03):36-49.

HU Kexin, MI Junzhen, LIU Jinghui, ZHAO BaoPing, WANG ying, ZHANG Lanying, CUI Xuemei. Effects of fully biodegradable water permeable mulch on soil hydrothermal and the yield of dry-crop foxtail millet on the Loess Plateau[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(03):36-49.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.03.04

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

胡可欣^{1,2} 米俊珍^{1*} 刘景辉^{2*} 赵宝平¹ 王莹¹ 张兰英¹ 崔雪梅¹

(1. 内蒙古农业大学 杂粮产业协同创新中心/全国农业科研杰出人才及其创新团队/燕麦全产业链科技创新团队, 呼和浩特 010019;

2. 内蒙古高校燕麦工程研究中心 内蒙古自治区燕麦工程实验室, 呼和浩特 010019)

摘要 为探明黄土高原旱作丘陵区全生物降解渗水地膜覆盖对土壤水热状况和谷子产量的影响, 于2021—2022年进行大田试验, 设置渗水地膜(T_1)、普通地膜(T_2)、全生物降解渗水地膜(T_3)3种不同类型地膜覆盖, 以不覆膜(CK)为对照, 测定不同类型地膜覆盖处理的谷子干物质积累量、产量及土壤含水率、土壤温度等指标, 并对全生物降解渗水地膜降解情况和经济效益进行分析。结果表明: 全生物降解渗水地膜(T_3)30 d后开始出现降解, 到150 d地膜出现网状裂纹, 大部分地膜破碎成小块, 单位面积降解率平均为54.3%。覆膜处理下谷子全生育时期的土壤温度日变化均表现为先增高后降低的趋势, 16:00时土温达到最高, 10 cm土层处3种地膜处理较不覆膜处理升高0.5~8.0℃, 20 cm土层处升高0.3~6.5℃, 在气温较高时, T_3 处理的土壤温度较 T_2 处理降低0.5~3.5℃。与不覆膜(CK)相比, 各覆膜处理均可使耕层0—40 cm土层土壤含水率升高7.8%~38.1%。地膜覆盖能显著提升谷子拔节期、抽穗期、灌浆期地上部干物质积累量, T_1 、 T_2 和 T_3 处理相对于CK平均增幅分别为37.7%~91.2%、37.2%~92.1%和15.4%~56.6%。在产量方面, 全生物降解渗水地膜处理(T_3)2年籽粒产量、生物产量分别较CK增加35.4%~37.5%、30.8%~44.1%, 净收入平均增加9 861.71元/hm²。从谷子生长、产量和水热动态及经济效益、生态效益等方面综合考虑, 全生物降解渗水地膜可替代普通地膜应用到黄土高原旱作谷子生产中, 且能有效缓解普通地膜造成的土壤环境污染问题。

关键词 土壤水分; 土壤温度; 产量; 全生物降解渗水地膜; 降解速率; 经济效益

中图分类号 S515

文章编号 1007-4333(2024)03-0036-14

文献标志码 A

Effects of fully biodegradable water permeable mulch on soil hydrothermal and the yield of dry-crop foxtail millet on the Loess Plateau

HU Kexin^{1,2}, MI Junzhen^{1*}, LIU Jinghui^{2*}, ZHAO Baoping¹, WANG Ying¹, ZHANG Lanying¹, CUI Xuemei¹

(1. Oat Engineering Research Center/National Outstanding Talents in Agricultural Research and Its Innovation Team/Oat Whole Industry Chain Science and Technology Innovation Team, Inner Mongolia University, Hohhot 010019, China;

2. Inner Mongolia University Oat Engineering Research Center, Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Laboratory of Oat, Hohhot 010019, China)

收稿日期: 2023-11-02

基金项目: 内蒙古科技计划项目(2022YFXZ0025); 国家燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS-07); 国家重点研发计划国际合作重点专项(2018YFE0107900); 内蒙古重大专项(2021ZD0002); 内蒙古自治区燕麦工程实验室能力建设项目(BR221023)

第一作者: 胡可欣(ORCID:0009-0009-6704-1134), 硕士研究生, E-mail: 1194081597@qq.com

通讯作者: 米俊珍(ORCID:0000-0003-0983-2367), 副教授, 主要从事农牧交错区农作制度与农业生态研究, E-mail: mijunling1206@126.com

刘景辉(ORCID:0000-0002-8199-7468), 教授, 主要从事农牧交错区农作制度与农业生态研究, E-mail: cauljh@163.com

Abstract In order to investigate the application effect of fully biodegradable water permeable plastic film mulch on soil hydrothermal and the yield of dry-crop foxtail millet in the dry-farming hilly area of the Loess Plateau, a field experiment was conducted from 2021 to 2022. A total of three different types of mulch cover, water permeable plastic film mulch (T_1), plastic film mulch (T_2) and fully biodegradable water permeable plastic film mulch (T_3) were selected and no mulch (CK) is used as the control. The effect of the different types of mulch treatment on dry matter accumulation and yield of foxtail millet, soil water content and soil temperature and to analyzed the degradation performance and economic benefits of fully biodegradable water permeable plastic film mulch were compared and analyzed. The results showed that: The degradation of fully biodegradable water permeable plastic film mulch (T_3) began to occur at 30 d, and the reticulated cracks appeared in 150 d time. The most of the mulch was broken into small pieces, with an average degradation rate of 54.3% per unit area; The daily change of soil temperature in each fertility period of foxtail millet under mulching treatment showed a trend of increasing and then decreasing, and the soil temperature reached the highest at 16:00, and the temperature of three mulch treatments increased 0.5 to 8.0 °C at 10 cm soil layer, and 0.3 to 6.5 °C at 20 cm soil layer compared with the non-mulching treatment (CK). At higher temperatures, soil temperatures in the T_3 treatment was reduced by 0.5 to 3.5 °C compared to the T_2 treatment; Compared with CK, all mulching treatments increased soil water content in the 0 to 40 cm soil layer of the tillage layer by 7.8% to 38.1%; Mulching significantly increased the aboveground dry matter accumulation of cereals at the jointing stage, heading stage, and filling stage, with average increases of 37.7% to 91.2%, 37.2% to 92.1%, and 15.4% to 56.6% for the T_1 , T_2 , and T_3 treatments, respectively. In terms of yield, the 2-year seed yield and biomass yield of the fully biodegradable water permeable plastic film mulch treatment (T_3) compared with CK were significantly increased by 35.4% to 37.5% and 30.8% to 44.1%, respectively, and the net income was increased by an average of 9 861.71 yuan/hm². From the perspective of comprehensive consideration of foxtail millet growth, yield and soil moisture content and temperature and economic benefits, the fully biodegradable water permeable plastic film mulch can be applied to the production of dry-crop foxtail millet in the Loess Plateau instead of plastic film mulch, and it can effectively alleviate the soil environmental pollution caused by ordinary membranes.

Keywords soil moisture; soil temperature; yield; fully biodegradable water permeable plastic film; degradation rate; economic benefits

黄土高原旱作区地处我国内陆,降水少且蒸发量大,严重限制了该区域农业生产,因此,如何充分利用有限的自然降水,降低土壤水分蒸发,提高作物对水分的利用效率,发展以水资源高效利用为前提的节水型农业尤为重要^[1]。已有研究表明,地膜覆盖具有调温保墒^[2-4]、促进作物生长发育^[5-6],提高作物产量^[7-9]等作用,是干旱、半干旱地区促进农业可持续发展的一项重要节水增产技术,但普通地膜的连年使用会造成“白色污染”,在少量降雨时其不透水性阻隔了雨水的下渗,且在高温天气地膜的保温作用使得土表温度增加,影响植物根系的生长,最终导致减产^[10]。全生物降解渗水地膜具有可生物降解、渗水、调温、微通气等多种功能,能够使地膜表面接收到的降水通过渗水孔下渗,提高土壤含水率,且在气温较高时其微透气性使得地膜表面的

温度降低,保护植物根系不受高温伤害^[11]。全生物可降解地膜能够减少土壤残膜污染,普通地膜与生物可降解地膜对土壤水分、温度及作物生长和产量的影响差异不显著^[12-14]。姚建民等^[15]研究发现全生物降解渗水地膜可以显著提高大豆—玉米带状复合种植模式下的产量,较普通渗水地膜覆盖增产29.6%,且在覆盖130 d后,全生物降解渗水地膜的降解率达到85.1%,有效地缓解了农田白色污染;杨振兴等^[16]对山西旱作区谷子研究发现普通地膜、PLA/PBAT复合型降解膜和PBAT全生物降解膜覆盖对山西旱地谷子产量较不覆盖处理均有显著的增产作用,且各覆膜处理间产量差异不显著, PBAT全生物降解地膜在确保谷子产量的同时具有良好的降解效果;冯浩等^[17]研究表明地膜覆盖处理可显著增加土壤贮水量,生物降解地膜的增温效果

与普通地膜相似,表现为在谷子整个生育期均能提高土壤温度,但是随时间的延长,提升幅度降低。因此,应用全生物降解地膜替代普通地膜对于干旱半干旱地区的农业生产具有重要意义。

谷子是北方干旱半干旱地区重要的杂粮作物之一,在旱作农业生产中占有重要地位。内蒙古自治区是谷子主产区之一,谷子种植面积稳定在20万 hm^2 以上,被列为内蒙古自治区“十四五”农牧业优势特色产业集群之一。实践证明,覆膜种植技术是干旱地区谷子增产增效的栽培措施之一^[18]。2022年,内蒙古地膜覆盖总面积超186万 hm^2 ,且2022—2023年内蒙古全生物降解地膜预计推广8.6万 hm^2 。降解地膜的应用效果与环境因素(温度、降水等)和栽培管理方法密切相关。在不同地区,受环境因素影响,降解程度和降解周期也不尽相同。黄土高原旱作丘陵地区存在昼夜温差较大、降水量低(年降水量 $<200\text{ mm}$)和强烈的太阳辐射等问题^[19]。目前关于全生物降解渗水地膜与普通地膜对土壤水热、产量构成的影响以及田间生产应用可行性的相关研究十分有限,于谷子上应用的田间试验研究尚未见报道,本研究选用PPC基PBAT全生物降解渗水地膜,测定其在黄土高原地区对谷子生长、产量的影响以及其降解情况,旨在明确全生物降解渗水地膜对谷子生长、产量和土壤水热等的影响以及田间降解情况,以期缓解黄土高原旱作区及相似生态区地膜污染及作物增产增收提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在内蒙古自治区呼和浩特市清水河县宏河镇一间房村($39^{\circ}57'\text{ N}$, $111^{\circ}39'\text{ E}$)进行。清水河县位于内蒙古呼和浩特市南部,平均海拔1374 m,年均日照时数为2914 h,无霜期140 d左右,年均降雨340 mm,且多集中在7—9月份,年潜在蒸发量2577 mm,属典型的中温带半干旱大陆性季风气候。试验区土壤质地是黄绵土,土壤有机质含量为6.45 g/kg,全氮0.48 g/kg,碱解氮41.80 mg/kg,速效磷7.20 mg/kg,速效钾93.24 mg/kg, pH 8.22。试验期间降雨量及气温数据见图1。

1.2 试验设计

本试验设覆盖全生物降解渗水地膜(T_3)、普通地膜(T_2)、渗水地膜(T_1)、不覆膜(CK)共4个处理。

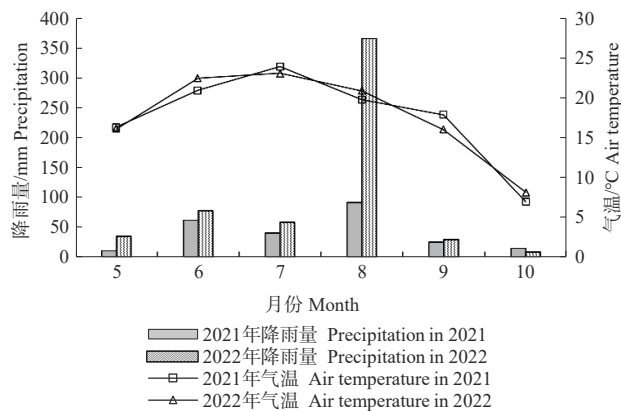


Fig. 1 Changes in precipitation and temperature during the test period of 2021 to 2022

图1 2021—2022年试验期间降水量与气温变化

考虑到机械覆膜作业方便,采用大区设计,每个处理面积128 m^2 ,样品采集时将处理小区等分为4个小区作为重复。各试验处理基施磷酸二铵175 kg/hm^2 ,尿素75 kg/hm^2 ,旋耕镇压后覆膜穴播,每穴8~10粒种子,一膜三行,行距40 cm,穴距15 cm,2021年谷子品种为‘长杂谷2922’,播种时间为5月13日,收获时间为10月2日。为适应生产需求,2022年谷子品种为‘张杂谷5号’,播种时间为5月6日,收获时间为10月10日。灌水、中耕除草、病虫害等田间管理措施参照当地的栽培模式进行。

1.3 试验材料

试验使用的全生物降解渗水地膜的参数为:50 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,紫外光降解速率 $\geq 0.5\text{ g}/(10\text{ g}\cdot 60\text{ h})$;23 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,碱降解速率 $\geq 8\text{ g}/(10\text{ g}\cdot 48\text{ h})$;标准大气压、23 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,渗水速率 $\geq 7\text{ g}/\text{h}$;透气性为40~280 s;标准大气压、40 $^{\circ}\text{C}$ 条件下蒸发速率 $\leq 0.4\text{ g}/\text{h}$ 。渗水地膜参数为:标准大气压、23 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,渗水速率 $\geq 7\text{ g}/\text{h}$;透气性为40~280 s;100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,保水性能为40%/300 min。地膜的规格和生产厂家,见表1。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 地上部干物质积累量

分别于谷子拔节期、抽穗期、灌浆期,在各试验小区随机选取5株生长一致的谷子植株,带回实验室于105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中杀青30 min,后放置在80 $^{\circ}\text{C}$ 恒温精密鼓风干燥箱中烘干至恒重,并用精度为0.01 g的电子天平称重。

1.4.2 土壤温度日变化

土壤温度利用地温计(中国上海发泰仪器有限

表 1 不同类型地膜生产厂家及规格

Table 1 Manufacturers and specifications of different kinds of plastic film

地膜种类 Plastic film species	厚度/mm Thickness	幅宽/mm Width	生产厂家 Manufacturer
PPC 基全生物降解渗水地膜 PPC-based PBAT fully biodegradable water permeable plastic film	0.007	1 300	山西微通渗水膜生物科技 有限公司
PE 渗水地膜 PE Water permeable plastic film	0.010	1 300	山西微通渗水膜生物科技 有限公司
PE 普通地膜 PE plastic film	0.010	1 200	山东莘县利民塑料有限公司

公司,型号:L93-4)测得,探头分别埋入每个试验小区的谷子株间位置,深度分别为 10 和 20 cm,测定时间为 6:00—22:00,每隔 2 h 记录 1 次,从覆膜当天开始连续测定直至成熟期。以各时期内各时间点的地温平均值作为该生育时期的土壤温度日变化。

1.4.3 土壤含水率

在谷子苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期内选择晴天(取土样前连续 3 d 无降雨、无灌溉)用土钻采取新鲜土样(0—10、>10—20、>20—40、>40—60、>60—80、>80—100 cm 土层),采用烘干称重法测量土壤含水率,准确至 0.01 g。计算公式如下:

$$SWC=(M_1-M_2)/M_2\times 100\%$$
 (1)

式中:SWC 为土壤含水率; M_1 为烘干前土壤重量, M_2 为烘干后土壤重量。

1.4.4 产量构成因素和经济效益

谷子成熟后,每个小区选取具有代表性的植株 10 株,测定谷子穗长、穗重和千粒重等。每个小区收获 1 m² 的谷子穗,记录单位面积有效穗数,并进行脱粒、称重,计算产量。

普通地膜、渗水地膜、全生物降解渗水地膜的费用分别为 1 000、1 100、2 500 元/hm²,2021 年种子费用为 540 元/hm²,2022 年种子费用为 1 080 元/hm²,机耕费为 900 元/hm²,肥料费用为 1 500 元/hm²,渗水地膜、普通地膜处理回收费用为 1 800 元/hm²,不覆膜处理人工除草用工费为 2 100 元/hm²,谷子籽粒收购价格为 4.6 元/kg,谷子秸秆收购价格为 1 元/kg。

1.4.5 地膜降解进程

在谷子整个生育期,通过目测观察记录全生物降解渗水地膜的田间降解破裂程度,播种后在覆膜处理小区内随机选取 3 个降解观测点(共 9 个),以

木框圈定标记,框内面积为 130 cm×100 cm。覆膜后每隔 15 d 观察 1 次,60 d 以后每 30 d 观察 1 次。降解地膜降解分级参照杨惠娣^[20]的方法,降解过程中根据地膜出现自然裂缝和孔洞大小、残片面积可以分为 0 级:未出现裂纹;1 级:开始出现 0~10 cm 裂纹;2 级:地膜出现 ≥10~50 cm 裂纹;3 级:出现 ≥50 cm 裂纹;4 级:出现网状裂纹,无大块地膜存在。

分别于全生物降解渗水地膜覆盖 1 和 2 年后(即每年谷子收获后)的田间取残留的地膜,选取 3 处 100 cm×130 cm 的样方,在均匀地块选取样方,避免边行以及残膜差别较大的地块,用平铲和毛刷清理干净膜上泥土和杂物;按照标记分类精细铲取地面膜和土壤中膜,装入不同取样袋中;分类风干后过筛(2 mm×2 mm)取出筛中膜;再次精细清理取出膜中的杂质和泥土,风干或 40 ℃ 以下烘干,轻柔拍打,去除尘土;用清水冲洗同时可以用力揉搓过筛(2 mm×2 mm)后,再次在 40 ℃ 以下烘干后用万分之一天平称重。

1.4.6 地膜降解相关指标

土壤中膜宽度=膜初始宽度—地面裸膜宽度
地面裸膜降解率=100%—(地面裸膜残留质量/地面裸膜初始质量×100%)

土壤中膜降解率=100%—(土壤中膜残留质量/土壤中膜初始质量×100%)

单位面积降解率=100%—((地面裸膜残留质量+土壤中膜残留质量)/取样面积膜初始质量×100%)

地面裸膜单位面积降解率=100%—(地面裸膜单位面积残留质量/地面裸膜单位面积初始质量×100%)

土壤中膜单位面积降解率=100%—(土壤中膜单位面积残留质量/土壤中膜单位面积初始质

量 $\times 100\%$)。

1.5 数据处理

采用 Excel 2019 进行数据处理和图表制作,采用 SPSS 25.0 软件进行数据方差分析和多重比较。

2 结果与分析

2.1 地膜覆盖对谷子地上部干物质积累量的影响

由表 2 可知,2021 和 2022 年拔节期各覆膜处理干物质积累量均显著高于 CK($P<0.05$);与 CK 相比,2 年全生物降解渗水地膜处理(T_3)分别升高 88.0%、24.8%;抽穗期,2021 年渗水地膜处理(T_1)和 T_3 谷子地上部干物质积累量较 CK 分别增加 65.0%、34.0%, T_3 较普通地膜处理(T_2)降低 20.3%;2022 年, T_1 、 T_2 分别较 CK 增加 42.0%、57.1%;灌浆期,2021 年 T_1 、 T_2 和 T_3 分别较 CK 增加 41.3%、48.7% 和 21.4%;2022 年 T_1 、 T_2 分别较 CK 增加 34.1%、25.7%, T_3 较 T_2 降低 12.9%。总体来说,3 种覆膜处理下的谷子地上部干物质均显著高于 CK。

表 2 不同处理下谷子地上部干物质积累量				
Table 2 Aboveground dry matter accumulation of foxtail millet under different treatments g/株				
年份 Year	处理 Treatment	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage
2021	CK	1.00 $\pm$ 0.07 b	5.56 $\pm$ 0.61 c	10.58 $\pm$ 1.14 c
	T_1	2.48 $\pm$ 0.53 a	9.17 $\pm$ 1.15 ab	14.94 $\pm$ 0.70 a
	T_2	2.55 $\pm$ 0.28 a	9.35 $\pm$ 0.90 a	15.72 $\pm$ 0.55 a
	T_3	1.88 $\pm$ 0.09 a	7.45 $\pm$ 0.99 b	12.84 $\pm$ 0.32 b
2022	CK	6.34 $\pm$ 0.91 b	18.28 $\pm$ 1.91 c	25.48 $\pm$ 1.23 b
	T_1	8.54 $\pm$ 0.44 a	25.96 $\pm$ 2.96 ab	34.18 $\pm$ 1.54 a
	T_2	8.20 $\pm$ 1.26 a	28.72 $\pm$ 2.88 a	32.03 $\pm$ 1.73 a
	T_3	7.92 $\pm$ 0.51 ab	21.63 $\pm$ 1.06 bc	27.89 $\pm$ 1.79 b

注:CK,不覆膜; T_1 ,渗水地膜; T_2 ,普通地膜; T_3 ,全生物降解渗水地膜。同列数据不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: CK, no mulch; T_1 , water permeable plastic film mulch; T_2 , plastic film mulch; T_3 , fully biodegradable water permeable plastic film mulch. Within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

2.2 地膜覆盖对土壤温度日均变化的影响

由图 2 可知,2 年各处理 10 和 20 cm 土壤温度随土层加深而降低,各处理不同土层间的温度差异均表现为表层(10 cm) $>$ 下层(20 cm)。总体来看,各处理 10 和 20 cm 土层土壤温度的日变化均表现为先增高后降低的趋势,从 8:00 开始,气温逐渐升高,土壤温度随之升高,到 16:00 时,土壤温度达到最大值,随后开始下降,其中 T_1 、 T_3 处理在气温较高的 14:00—16:00 土温均低于 T_2 处理。苗期是谷子根系生长的关键时期,在气温较低的 6:00—8:00 时覆膜处理 10 和 20 cm 土层土壤温度均高于 CK 处理,2021 年(2022 年,下同)苗期 10 cm 土层, T_1 、 T_2 和 T_3 较 CK 升高 1.4(1.6)、1.6(1.6) 和 1.4(0.9) $^{\circ}\text{C}$, 10:00 之后,覆膜处理 10 cm 土层处土壤温度增温明显。在气温最高的 16:00 时,覆膜处理中 T_2 的土壤温度最高, T_1 、 T_3 次之, T_1 、 T_2 和 T_3 较 CK 升高 6.5(4.0)、7.4(4.5) 和 5.2(3.9) $^{\circ}\text{C}$, T_1 、 T_3 分别较 T_2 降低 2.0(0.5)、1.7(0.6) $^{\circ}\text{C}$ 。由于深层土壤温度受太阳辐射影响的滞后性,20 cm 土层处土壤温度明显增温出现在 12:00。生育中期(拔节期—抽穗期)是谷子生长发育的关键时期,此时正值 7—8 月,外界气温较高。 T_2 在气温最高的 14:00—16:00,膜下土温最高可达 35.5 $^{\circ}\text{C}$,不利于谷子根系生长, T_1 、 T_3 膜下地温可较 T_2 低 0.9~3.6 $^{\circ}\text{C}$ 。在拔节期 10 cm 土层,

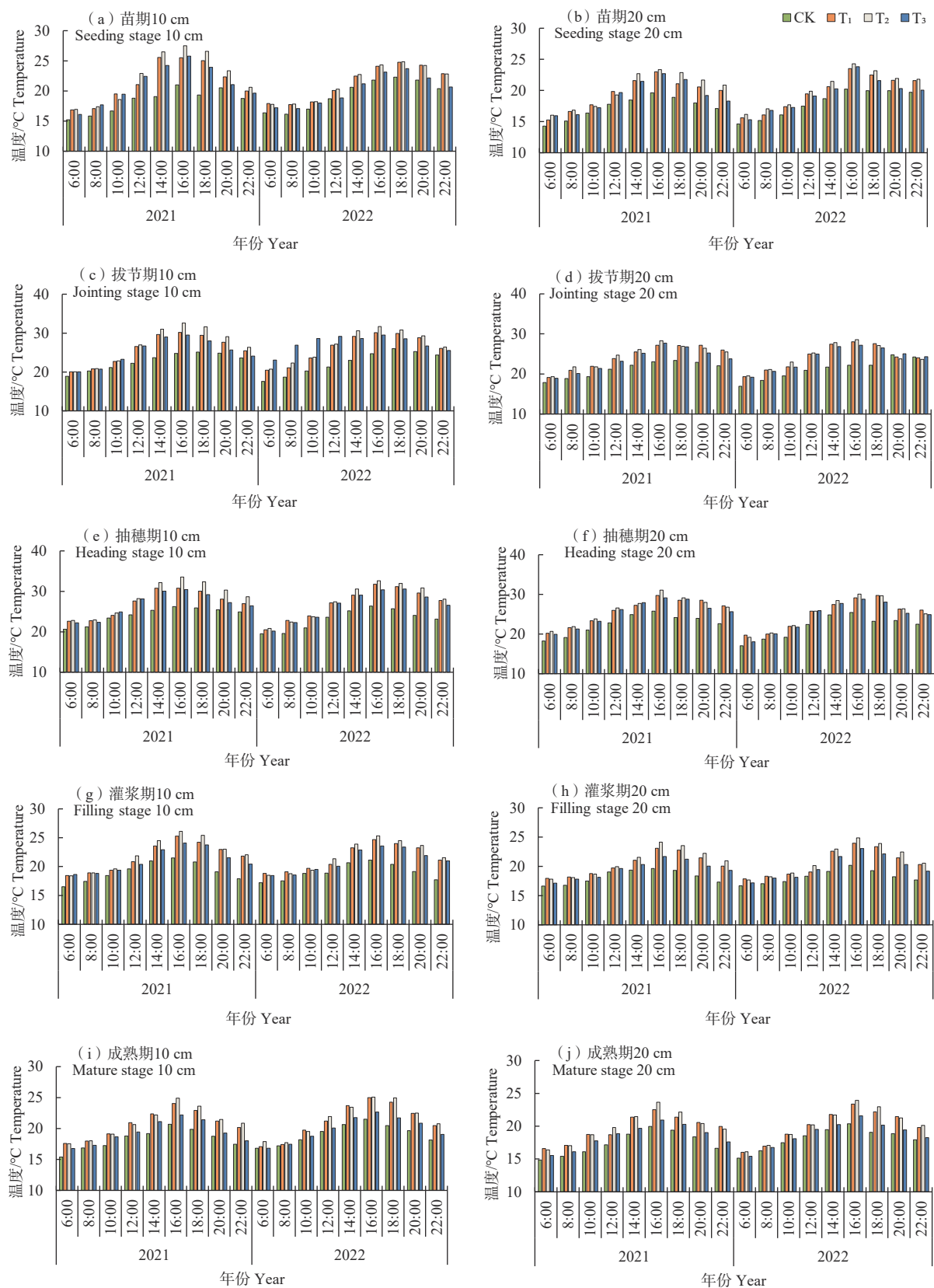


图2 不同处理下各生育时期土壤温度日均变化

Fig. 2 Daily variation of soil temperature at various fertility periods under different treatments

10:00后土壤温度升高,不同地膜处理间地温差异较小,16:00温度达最大值,各处理地温由高到低均表现为: $T_2 > T_1 > T_3 > CK$,2021年(2022年) T_1 、 T_2 和 T_3 分别较CK增加5.5(6.4)、7.8(8.0)和4.7(5.5)℃, T_1 、 T_3 的土壤温度较 T_2 分别降低2.4(1.6)、3.1(2.5)℃,18:00时,土壤温度较16:00有下降趋势。在20 cm土层处土壤温度最高的16:00时,2021年(2022年) T_1 、 T_2 和 T_3 分别较CK增加4.2(5.9)、5.3(6.4)和4.7(5.0)℃,在相同的时间下,20 cm土层的土壤温度较10 cm变化小。生育后期(灌浆期-成熟期),此时气温开始降低,土壤温度也随之降低,此时全生物降解渗水地膜降解成大碎片,基本不具保温效果, T_3 与CK的温度变化基本一致。灌浆期10 cm土层处,在气温较低的6:00—8:00时 T_1 、 T_2 和 T_3 分别较CK升高1.7、1.7和1.8℃,在气温较高的14:00时 T_1 、 T_2 和 T_3 分别较CK升高2.7、3.6和2.0℃。成熟期10 cm土层处,在土壤温度最高的16:00时,2021年(2022年) T_1 、 T_2 和 T_3 分别较CK增加3.4(3.7)、4.2(4.5)和1.5

(1.2)℃, T_3 较 T_1 、 T_2 的增幅小。

2.3 地膜覆盖对土壤含水率的影响

由图3可知,各生育时期的0—100 cm土层土壤含水率随土层深度的增加呈上升趋势,2年0—100 cm土层土壤含水率变化存在差异。各覆膜处理均能提高不同生育时期土壤含水率,各处理平均含水率由高到低均表现为 $T_2 \geq T_1 > T_3 > CK$ 。2年全生育时期0—10 cm土层各处理土壤含水率在1.7%~10.0%, T_1 、 T_2 和 T_3 土壤含水率分别比CK升高12.8%~87.4%、11.9%~118.8%和6.0%~38.0%。2021年,在各生育时期,0—10、>10—20、>20—40 cm土层各覆膜处理土壤含水率均高于CK, T_1 、 T_2 和 T_3 分别较CK升高1.2%~49.9%、0.9%~48.9%和1.7%~24.9%;2022年在各生育时期 T_1 、 T_2 和 T_3 分别较CK的增加4.1%~87.4%、10.4%~118.8%和0.4%~38.0%。在>40—60 cm土层深度,2021年除苗期外各覆膜处理土壤含水率均高于CK,以 T_1 增幅最大;2022年在苗期、抽穗期各处理土壤含水率由高到低均表现为 $T_1 > T_2$

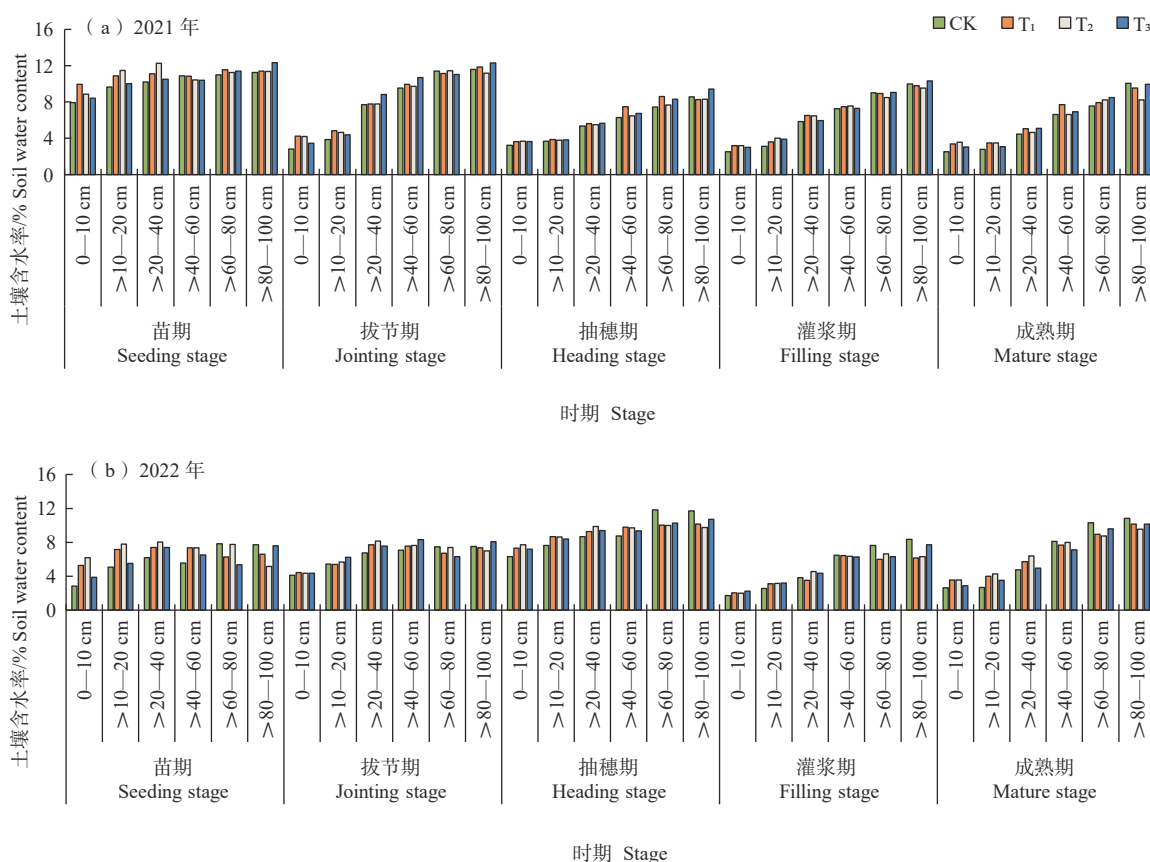


图3 不同处理下各生育时期0—100 cm土层土壤平均含水率

Fig. 3 Soil water content in the 0 to 100 cm soil layer at each fertility period under different treatments

$T_3 > CK$, T_3 较 CK 升高 19.7%、8.5%; 拔节期各处理表现为 $T_3 > T_2 > T_1 > CK$, T_3 较 CK 升高 17.6%。在 $>60-80$ cm 土层处, 2021 年各处理间无显著差异, 除拔节期外, T_3 含水率较 CK 增幅为 0.2%~12.4%; 2022 年各生育时期 T_3 处理均较 CK 降低, 降幅为 13.4%~31.7%。在 $>80-100$ cm 土层深度, 2021 年除成熟期外, T_3 处理土壤含水率最高, 苗期、拔节期、抽穗期、灌浆期分别较 CK 升高 9.9%、6.3%、10.3%、3.4%; 2022 年除拔节期外, CK 处理土壤含水率最高。就 0—100 cm 土层土壤含水率而言, T_1 、 T_2 和 T_3 表层土壤含水率均高于 CK , 覆膜处理可提高对深层土壤水分的利用, 有效缓解了中上层土壤水分的消耗。

2.4 全生物降解渗水地膜降解情况

由表 3 可知, 全生物降解渗水地膜在谷子生育时期内的降解过程表现为覆膜后 30 d 开始出现裂纹。2021 年在覆膜后的第 30 天就已出现 10~50 cm 裂纹。在覆膜后的第 45 天降解等级达到 3 级, 即出现 ≥ 50 cm 裂纹; 2022 年在第 45 天出现 10~50 cm 裂纹。在覆膜后的第 60—90 天, 此时谷子正处于拔节-抽穗期, 营养生长的关键时期, 此时全生物降解渗水地膜降解等级 2 年均达到 3 级。到 150 d 地膜

出现网状裂纹, 大部分地膜破碎成小块, 地膜基本无韧性, 而膜边埋土部分仍然具有一定韧性, 破孔较小, 但地膜已经变薄、变脆。

表 3 全生物降解渗水地膜生育期内降解情况
Table 3 Degradation of fully biodegradable water permeable plastic film mulch during the reproductive period

年份 Year	覆膜后时间/d Time after mulching						
	15	30	45	60	90	120	150
2021	0	2	3	3	3	4	4
2022	0	1	2	3	3	4	4

注: 0~4 表示地膜降解分级指标, 数值越大, 地膜降解程度越高。
Note: 0 to 4 represent the degradation classification indexes of films, and the higher the value, the higher the degradation degree of film is.

由表 4 可知, 2 年全生物降解渗水地膜的单位面积降解率在 31.6%~44.9%, 2021 年的降解率略低于 2022 年。2021 年地面裸膜的降解率为 37.1%, 土壤中膜的降解率为 27.3%; 2022 年地面裸膜的降解率为 55.6%, 土壤中膜的降解率为 35.7%。由此可见, 土壤中的地膜降解速度滞后于地表面。

表 4 全生物降解渗水地膜降解率
Table 4 Fully biodegradable water permeable plastic film mulch degradation rate

年份 Year	地面裸膜质量/g Ground bare membrane quality	地面裸膜残留 质量/g Residual quality of bare film on the ground	地膜裸膜 降解率/% Bare film degradation rate of mulch	土壤中膜质量/g Membrane quality in soil	土壤中膜残留 质量/g Quality of residual film in soil	土壤中膜 降解率/% Degradation rate of membranes in soil	单位面积 降解率/% Degradation rate per unit area
2021	5.551 8	3.492 4	37.09	6.414 1	4.662 0	27.32	31.85
2022	5.551 8	2.463 1	55.63	6.414 1	4.127 5	35.65	44.92

2.5 地膜覆盖对谷子产量及经济效益的影响

由表 5 可知, 除穗长、穗粒重指标以外各覆膜处理均与 CK 存在显著差异。2021 年, T_1 、 T_2 和 T_3 的穗重较 CK 增加 35.2%~41.4%, 千粒重增加 20.6%~25.6%, 籽粒产量 35.4%~38.4%, 均以 T_1 为最高。生物产量 T_1 、 T_2 和 T_3 分别较 CK 增加 36.8%、44.4% 和 36.8%。2022 年, 各产量构成因素指标及产量在 3 个覆膜处理之间差异不显著 ($P > 0.05$)。穗长、穗粒重与籽粒产量均表现为 $T_1 > T_3 >$

$T_2 > CK$, T_1 、 T_2 和 T_3 均与 CK 达显著差异, 其中 T_1 较 CK 增加 22.4%、40.1%、43.8%。穗重和千粒重均表现为 $T_3 > T_1 > T_2 > CK$, 其中 T_3 较 CK 增加 32.5%、39.2%。 T_2 的生物产量最高, 较 CK 增加 46.3%。2 年的试验数据均表明 T_1 、 T_2 、 T_3 差距较小, 全生物降解渗水地膜与普通地膜之间无显著差异。

比较 2 年谷子经济效益可知, CK 处理比覆膜处理的材料投入少, 但增加了除草的人工投入 (表 6)。2021 年的经济效益表现为 $T_2 > T_1 > T_3 > CK$, T_1 、 T_2

表5 谷子产量及构成因素
Table 5 Foxtail millet yield and component factors

年份 Year	处理 Treatment	穗长/cm Ear length	穗重/g Ear weight	穗粒重/g Ear grain weight	千粒重/g 1 000-grain weight	籽粒产量/ (kg/hm ²) Yield	生物产量/ (kg/hm ²) Biomass
2021	CK	7.37 b	11.70 b	5.68 b	2.38 b	3 844.06 b	9 535.80 b
	T ₁	8.89 a	16.54 a	7.25 a	2.99 a	5 321.12 a	13 046.76 a
	T ₂	8.09 ab	15.82 a	6.57 ab	2.87 a	5 232.70 a	13 766.22 a
	T ₃	7.70 ab	15.97 a	6.20 ab	2.98 a	5 205.57 a	12 648.07 a
2022	CK	15.63 b	15.48 b	12.46 b	2.70 b	4 030.46 b	10 216.81 b
	T ₁	19.13 a	20.02 a	17.46 a	3.13 a	5 796.44 a	14 914.72 a
	T ₂	19.00 a	19.17 a	17.12 a	3.10 a	5 575.55 a	14 945.73 a
	T ₃	19.07 a	20.51 a	17.34 a	3.16 a	5 541.41 a	14 453.98 a

表6 经济效益
Table 6 Economic benefits

元/hm²

年份 Year	处理 Treatment	地膜投入 Mulch inputs	地膜回收 Mulch recycling	其他成本 Other costs	产值 Output	净收益 Net income
2021	CK	0	0	6 340	21 067.98	14 727.98
	T ₁	1 125	1 800	2 740	29 010.12	23 345.12
	T ₂	750	1 800	2 740	29 464.32	24 174.32
	T ₃	2 625	0	2 740	28 264.80	22 899.80
2022	CK	0	0	7 780	24 726.47	16 946.47
	T ₁	1 125	1 800	3 280	35 781.90	29 576.90
	T ₂	750	1 800	3 280	35 017.71	29 187.71
	T ₃	2 625	0	3 280	34 403.07	28 498.07

和 T₃ 的净收益分别较 CK 增加 8 617.15、9 446.34 和 8 171.82 元/hm²。2022 年表现为 T₁>T₂>T₃>CK, T₁、T₂ 和 T₃ 较 CK 净收益分别增加 12 630.43、12 241.24 和 11 551.60 元/hm²。

3 讨论

3.1 地膜覆盖对作物干物质积累量、产量及经济效益的影响

地膜覆盖有利于促进作物前期生长发育和干物质的累积,为作物高产奠定基础。罗世武等^[21]研究发现,在谷子生育时期内,与露地处理相比渗水

地膜、生物降解地膜覆盖处理干物质积累量均显著增加。魏鹏程等^[22]在不同覆盖材料对西北地区青贮玉米生长性状及产量的影响研究中发现普通白色地膜的花后干物质积累量显著高于生物可降解膜。另张丽华等^[23]研究表明与不覆盖相比普通地膜和降解地膜均可增加玉米干物质积累量,且地膜覆盖较秸秆覆盖加速了玉米各生育阶段干物质积累速率。本研究中由 2 年谷子干物质积累量分析得出,与不覆膜处理(CK)相比,渗水地膜(T₁)、普通地膜(T₂)和全生物降解渗水地膜(T₃)处理均可显著提高谷子关键生育期内的干物质积累量。

已有研究结果显示,与无覆盖处理相比较,地膜覆盖对作物的增产效果明显,大部分的粮食作物能够增产30%左右^[24-26]。Yang等^[27]研究发现普通地膜和生物降解地膜可分别提高玉米产量4 600~6 400和2 300~2 800 kg/hm²,净收入增加8 425和2 688元/hm²,虽然普通地膜处理产量更高,可带来更高的经济效益,但覆盖普通地膜从长远看会造成环境问题,相比之下,生物可降解地膜会降解成CO₂和水,对土壤环境产生的影响较小,同时减少了地膜回收的劳动力支出。本研究结果表明地膜覆盖均可以提高谷子的产量及经济效益,且全生物降解渗水地膜对谷子产量的提升效果与普通地膜间无显著差异,但不同年份间提升效果不同,覆膜处理间的提升效果也不同,试验结果的不同可能与生育期降雨量和气温不同有关^[28]。全生物降解渗水地膜覆盖在保持生态功能和保护环境的同时,促进了当地农业的可持续发展,在黄土高原旱作区应用推广是可行的。

3.2 地膜覆盖对土壤水热的影响

已有研究表明,地膜覆盖栽培可以蓄水保墒,促进作物对土壤水分的有效利用^[29-31]。王文杰等^[32]在西北半干旱雨养条件下通过比较秸秆带状覆盖、白膜和黑膜全覆盖研究发现,与露地对照相比,地膜覆盖处理能提高春小麦播种期至成熟期0—200 cm土壤平均含水率。白雪等^[33]通过探究普通地膜、渗水地膜、生物降解地膜、光降解地膜覆盖下玉米农田土壤含水率发现覆膜之后0—300 cm各土层的含水率均较不覆膜增加,且覆膜处理间无显著差异。在本研究中,与不覆膜相比,渗水地膜、普通地膜和全生物降解渗水地膜处理均有较好的蓄水保墒效应,覆膜处理0—40 cm土壤含水率均较不覆膜增加,全生物降解渗水地膜在各生育时期土壤含水率均高于不覆盖处理,尤其在谷子根系集中分布的0—40 cm土层^[34]。地膜覆盖可以有效调控土壤水分时空再分配,促进土壤-作物水分的良性循环,满足生育期间的水分需求^[35],深层60—100 cm土层土壤含水率差异不显著,但地膜覆盖处理低于不覆膜处理,尤其在降雨少表层土壤含水率低的地区,这是由于地膜覆盖后使土壤深层水分逐渐向上层移动^[36]。全生物降解渗水地膜在谷子苗期到抽穗期与普通地膜的保水效果基本相同,到抽穗期以后全生物降解渗水地膜开始降解,保水效果开始下

降^[37],这与汪敏等^[38]研究结果一致。

地膜覆盖抑制了土壤与大气的水热交换,改善了膜下水热循环,减少了土壤蒸发,能有效提高土壤温度^[39-41]。赵彩霞等^[42]研究表明应用降解速率较快的生物降解膜较普通地膜土壤温度平均下降2~3℃。马晓楠等^[43]研究发现普通地膜、生物降解型地膜、全生物降解型地膜3种类型地膜覆盖均能有效提高土壤温度,普通地膜覆盖下,呈现持续增温的效果,生育后期生物降解型地膜、全生物降解型地膜增温效果降低,但仍具有一定的增温效果。本研究与姚建民等^[44]研究结果基本一致,在生育前期全生物降解渗水地膜与普通地膜以及渗水地膜间增温效果基本一致,随生育时期的推进全生物降解渗水地膜的增温效果减小,这与降解地膜的降解程度密切相关。本研究发现在大气温度较高的14:00—16:00时,全生物降解渗水地膜、渗水地膜处理土壤耕层温度均较普通地膜低,可减少高温对作物根系的伤害。这是由于全生物降解渗水地膜和渗水地膜的微孔结构在气温较低时,孔径会缩小,会减少土壤热量散失,具有保温效果;当气温过高时,膜下形成较高的蒸汽压,使之孔径变大,利于散热和内外气体交换^[45]。

3.3 生物降解地膜田间降解情况

随着普通聚乙烯地膜使用量的不断增加,残膜累积对内蒙古自治区的土壤和生态环境的负面影响也不断显现^[46]。生物降解地膜与普通聚乙烯地膜的保墒和保温效果相近,同时具有能够自然降解的特点^[47-49],应用全生物降解地膜成为解决农田残膜污染和保障作物产量的重要途径之一^[50]。生物降解地膜由于材料、厚度等因素不同导致地膜降解时期和降解速率略有不同^[51]。本试验发现,由于降雨量及作物生育期原因,全生物降解渗水地膜在2年的降解时间表现不一致但降解趋势整体相差不大,在覆膜后30 d开始降解,60 d出现大裂缝,之后快速裂解成为大碎片,全生物降解渗水地膜性能稳定。从2年全生物降解渗水地膜降解率来看,地面裸膜的降解率明显高于土壤中膜的降解率,单位面积降解率平均为54.3%,全生物降解渗水地膜至试验结束有少量残留,但剩余的地膜不会缠绕于作物根部以及作业机械,且已有研究显示剩余的生物降解地膜可被土壤微生物分解,2年内可完全分解^[52-54]。本试验中全生物降解渗水地膜在谷子苗期

未降解,能够保持其完整性,有利于土壤温度积累及正常水分供应,确保谷子正常生长,但若作物生育后期降雨量较小,由于全生物降解渗水地膜生育后期的保水效果不如普通地膜,作物生长期土壤含水率会低于普通地膜,对作物生产的促进作用有限。全生物降解渗水地膜受环境因素影响较大,其降解性能的稳定性和应用效果还需要进一步试验研究。

4 结 论

与不覆膜(CK)相比,各覆膜处理总体上均可显著增加谷子地上部干物质积累量以及产量,全生物降解渗水地膜(T_3)与普通地膜(T_2)无显著差异,全生物降解渗水地膜覆盖下谷子籽粒产量平均增加36.5%,经济效益平均增加10.5%。与CK相比,地膜覆盖均可使谷子全生育期土壤平均含水率和土壤温度升高。全生物降解渗水地膜在谷子生长前期保持良好的完整性,覆膜后30 d开始发生裂解,至150 d全生物降解渗水地膜出现网状裂纹,大部分地膜破碎成小块。综上,全生物降解渗水地膜对谷子生长、产量及土壤水热效应的影响与普通地膜相近,且全生物降解渗水地膜降解性能良好,因此,在黄土高原旱作丘陵区谷子生产中使用全生物降解渗水地膜替代普通地膜是可行的。

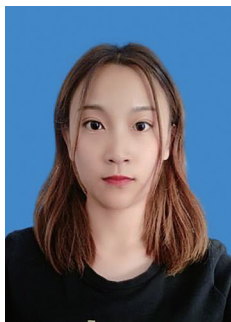
参考文献 References

- [1] 张蓉,陈晓文,路平,尤艳蓉,周德录,李德明. 不同覆盖模式对旱地马铃薯土壤水热变化和产量的影响[J]. 作物杂志, 2023(5):145-150
Zhang R, Chen X W, Lu P, You Y R, Zhou D L, Li D M. Effects of different mulching modes on soil moisture and temperature and yield of potato in dry land[J]. *Crops*, 2023(5):145-150 (in Chinese)
- [2] 陈志君,张琳琳,姜浩,孙仕军. 东北雨养区黑色地膜和种植密度对玉米田间地温和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8):2169-2176
Chen Z J, Zhang L L, Jiang H, Sun S J. Effects of plastic film mulching and planting density on soil temperature and maize yield in rain-fed area of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(8):2169-2176 (in Chinese)
- [3] Jiang L J, Imed D, Douglas D. Effects of mulching on soil temperature, scion rooting, and soil moisture of mounded grapevines[J]. *International Journal of Fruit Science*, 2016, 16(2): 182-190
- [4] Abbas E. R, Wang W, Tang Z J, Lei T W, David N. W, Zhao J. Straw mulch can induce greater soil losses from loess slopes than no mulch under extreme rainfall conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232:141-151
- [5] 侯爽,祁俊锋,王铁臣,王帅,李云飞,赵鹤,郭芳,徐进. 不同材质生物降解地膜的性能及其对番茄生长的影响[J]. 蔬菜, 2022(1):13-16
Hou S, Qi J F, Wang T C, Wang S, Li Y F, Zhao H, Guo F, Xu J. The performance of biodegradable mulching film of different materials and its effect on the growth of tomato [J]. *Vegetables*, 2022 (1): 13-16 (in Chinese)
- [6] 王晓航,耿艳秋,金峰,郭丽颖,党昆,邵玺文. 秸秆还田和地膜覆盖对土壤环境和水稻生长的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(5):1-7
Wang X H, Geng Y Q, Jin F, Guo L Y, Dang K, Shao X W. Effects of straw returning and plastic film mulching on soil environment and rice growth [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2018, 39 (5):1-7 (in Chinese)
- [7] Gu X B, Li Y N, Du Y D. Biodegradable film mulching improves soil temperature, moisture and seed yield of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 171: 42-50
- [8] Chen Y L, Liu T, Tian X H, Wang X F, Li M, Wang S X, Wang Z H. Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau [J]. *Field Crops Research*, 2015, 172: 53-58
- [9] 梅丽,董雯怡,周继华,刘勤,宋慧欣,王俊英. 生物降解地膜的性能及在北京鲜食玉米和甘薯生产上的应用[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 54-65
Mei L, Dong W Y, Zhou J H, Liu Q, Song H X, Wang J Y. Performance of biodegradable films and their application on fresh corn and sweet potato production in Beijing[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(10):54-65 (in Chinese)
- [10] 高宗昌,郭沂林. 可降解地膜覆盖对膜下滴灌棉田土壤水分和温度及棉花产量的影响[J]. 石河子大学学报:自然科学版, 2023, 41(4):449-454
Gao Z C, Guo Y L. Degradation characteristics of biodegradable mulch and its effects on soil moisture and temperature and cotton yield under drip irrigation [J]. *Journal of Shihezi University: Natural Science*, 2023, 41(4):449-454 (in Chinese)
- [11] 姚建民,毕昕媛,李瑞珍,杨瑞平,刘钊. 全生物降解渗水地膜覆盖对冬播谷子生长发育的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(11):1295-1300
Yao J M, Bi X Y, Li R Z, Yang R P, Liu Z. Effects of biodegradable permeable plastic film mulching on growth and development of millet in winter[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, 49(11):1295-1300 (in Chinese)
- [12] 赵沛义,康暄,妥德宝,何文清,魏富所,贾有余,安昊,刘建平. 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, He W Q, Wei F S, Jia Y Y, An H, Liu J P. Research of soil environment and sunflower growth in dry land mulching degradable plastic film [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(6):84-89 (in Chinese)
- [13] 杨雅,李涛,朱建强,范先鹏,张志毅,夏颖,唐芷馨. 生物降解地膜降解特性及其应用对辣椒生长发育的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(7): 79-92
Yang Y, Li T, Zhu J Q, Fan X P, Zhang Z Y, Xia Y, Tang Z X. Degradation characteristics of biodegradable mulch and its effects on the growth and development of pepper [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(7):79-92 (in Chinese)
- [14] Sun T, Li G, Ning T Y, Zhang Z M, Mi Q H, Rattan L. Suitability of mulching with biodegradable film to moderate soil temperature and moisture and to increase photosynthesis and yield in peanut [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 214-223
- [15] 姚建民,马俊奎,王忠祥,毕昕媛,李瑞珍,杨瑞平,刘钊,郭丰辉. 全生物降解渗水地膜在大豆-玉米带状复合种植中的应用效果研究[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(9):178-185

- Yao J M, Ma J K, Wang Z X, Bi X Y, Li R Z, Yang R P, Liu Z, Guo F H. Application effect of full biodegradable water permeable plastic film in soybean-maize belt composite planting [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(9):178-185 (in Chinese)
- [16] 杨振兴,周怀平,解文艳,刘志平,何文清,刘琪,王悦. 山西旱作区不同类型地膜对谷子产量影响及降解性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6):1307-1315
- Yang Z X, Zhou H P, Xie W Y, Liu Z P, He W Q, Liu Q, Wang Y. Effects of different types of mulching film on millet yield and their degradation properties in dry farming area of Shanxi Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6):1307-1315 (in Chinese)
- [17] 冯浩,刘厘,余坤,丁莫元,张浩杰,褚晓升. 不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12):192-202
- Feng H, Liu X, Yu K, Ding D Y, Zhang H J, Chu X S. Effects of different mulching patterns on soil moisture, soil temperature and summer maize growth [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12):192-202 (in Chinese)
- [18] 王东明,宋喜娥,郭平毅,原向阳,董淑琦,张海颖,郭大辛. 不同地膜覆盖对地温和杂交谷生长发育的影响[J]. 山西农业大学学报:自然科学版, 2017, 37(10):690-694, 706
- Wang D M, Song X E, Guo P Y, Yuan X Y, Dong S Q, Zhang H Y, Guo D X. Effects of different plastic mulching on soil temperature and growing development on hybrid millet[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2017, 37(10):690-694, 706 (in Chinese)
- [19] Deng L, Yu Y, Zhang H Y, Wang Q, Yu R D. The effects of biodegradable mulch film on the growth, yield, and water use efficiency of cotton and maize in an arid region[J/OL]. *Sustainability*, (2019-12-09). DOI: 10.3390/su11247039
- [20] 杨惠娣,唐赛珍. 降解塑料试验评价方法探讨[J]. 塑料, 1996, 25(2):16-22
- Yang H D, Tang S Z. Evaluation method for testing of degradable plastics [J]. *Plastics*, 1996, 25(2):16-22 (in Chinese)
- [21] 罗世武,李凯,来幸樑,程炳文. 不同种类地膜覆盖对土壤水温、谷子生长及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2022, 51(7):42-50
- Luo S W, Li K, Lai X L, Cheng B W. Effects of different kinds of plastic film mulching on soil moisture, temperature, foxtail millet growth and yield[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(7):42-50 (in Chinese)
- [22] 魏鹏程,张芮,王建旺,高彦婷,张权宏,焦兆祥,李鸿雁. 不同覆盖材料对西北地区青贮玉米生长性状及产量的影响[J]. 饲料研究, 2023, 46(11):106-109
- Wei P C, Zhang R, Wang J W, Gao Y T, Zhang Q H, Jiao Z X, Li H Y. Effect of different mulching materials on growth characters and yield of silage maize in Northwest China[J]. *Feed Research*, 2023, 46(11):106-109 (in Chinese)
- [23] 张丽华,徐晨,闫伟平,孙宁,谭国波,于江,赵洪祥,李斐,孟祥盟,边少锋. 半干旱区地表覆盖方式对土壤水温效应及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2):179-192
- Zhang L H, Xu C, Yan W P, Sun N, Tan G B, Yu J, Zhao H X, Li F, Meng X M, Bian S F. Effects of surface mulching on soil water and temperature efficiency and maize yield in semi-arid area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(2):179-192 (in Chinese)
- [24] Wang J, Rajan G, Fu X, Upendra M S, Liu W Z. Straw mulching increases precipitation storage rather than water use efficiency and dryland winter wheat yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 206:95-101
- [25] 何翠翠,王华,周斌,张文,刘立生,吴景森,耿金锴. 地膜覆盖对热带地区南瓜产量及土壤碳氮的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(5):225-230
- He C C, Wang H, Zhou B, Zhang W, Liu L S, Wu J S, Geng J K. Effects of plastic film mulching on pumpkin yield and characteristics of soil carbon and nitrogen nutrients in tropical areas[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(5):225-230 (in Chinese)
- [26] 尉亚因,薄其飞,唐安,高嘉瑞,马田,尉熊熊,张方方,周祥利,岳善超,李世清. 长期覆膜和施用有机肥对黄土高原春玉米产量和品质的效应[J]. 中国农业科学, 2023, 56(9):1708-1717
- Wei Y N, Bo Q F, Tang A, Gao J R, Ma T, Wei X X, Zhang F F, Zhou X L, Yue S C, Li S Q. Effects of long-term film mulching and application of organic fertilizer on yield and quality of spring maize on the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(9):1708-1717 (in Chinese)
- [27] Wu Y, Huang F Y, Zhang C, Jia Z K. Effects of different mulching patterns on soil moisture, temperature, and maize yield in a semi-arid region of the Loess Plateau, China [J]. *ARID Land Research and Management*, 2016, 30(4):490-504
- [28] 周磊,王璐,米俊珍,王凤梧,焦伟红,刘景辉,赵宝平. 不同播期下水热因子对燕麦生长、产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(10):1281-1290
- Zhou L, Wang L, Mi J Z, Wang F W, Jiao W H, Liu J H, Zhao B P. Effect of hydrothermal factors on growth, yield and quality of oat at under different sowing dates [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(10):1281-1290 (in Chinese)
- [29] 刘青,马建涛,韩凡香,杨成存,黄彩霞,程宏波,柴守玺,常磊. 不同覆盖材料对旱地马铃薯土壤水分和耗水的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6):197-205
- Liu Q, Ma J T, Han F X, Yang C C, Huang C X, Cheng H B, Chai S X, Chang L. Effects of different mulching materials on soil moisture and water consumption of potato in dryland[J]. *Research of soil and water Conservation*, 2023, 30(6):197-205 (in Chinese)
- [30] 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. Effect of degradable film mulching on soil hydrothermal variation and of maize under drip irrigated [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(2):192-202 (in Chinese)
- [31] Wang Y J, Jia X F, Ibraheem O O, Feng Q, Wang L, Lu L, Xu, Sun M T, Yu, X C, Han D G, He C X, Li Y S, Yan Y. Effects of biodegradable films on melon quality and substrate environment in solar greenhouse [J/OL]. *Science of the Total Environment*, (2022-03-18). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154527
- [32] 王文杰,马建涛,柴雨葳,吴炳权,常磊,柴守玺,程宏波. 不同覆盖方式对旱地春小麦土壤水热及生长的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(9):1206-1214
- Wang W J, Ma J T, Chai Y W, Wu B Q, Chang L, Chai S X, Cheng H B. Effects of different mulching methods on soil moisture, temperature, and growth of dryland spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(9):1206-1214 (in Chinese)
- [33] 白雪,周怀平,解文艳,杨振兴,程曼,杜艳玲. 不同类型地膜覆盖对玉米农田水热状况及产量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2):414-420
- Bai X, Zhou H P, Xie W Y, Yang Z X, Cheng M, Du Y L. Effects of different plastic film mulching on soil moistures, temperatures and maize

- yields[J]. *Soils*, 2018, 50(2):414-420 (in Chinese)
- [34] 杨丽雯,张永清. 4种旱作谷类作物根系发育规律的研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(11):2244-2251
- Yang L W, Zhang Y Q. Developing pattern of root systems of four cereal crops planted in dry land areas[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(11):2244-2251 (in Chinese)
- [35] 王红丽,张绪成,宋尚有,马一凡,于显枫. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种植对玉米季节性耗水和产量的调节机制[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5):917-926
- Wang H L, Zhang X C, Song S Y, Ma Y F, Yu X F. Regulation of whole field surface plastic mulching and double ridge-furrow planting on seasonal soil water loss and maize yield in rain-fed area of the Northwest Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(5):917-926 (in Chinese)
- [36] 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 film on soil moisture, temperature growth of maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(1):200-206 (in Chinese)
- [37] 毛金超. 海藻酸钠基可降解地膜的制备及性能研究[D]. 青岛:青岛科技大学, 2023
- Mao J C. Study on the Preparation and performance of sodium alginate based biodegradable mulch[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2023 (in Chinese)
- [38] 汪敏,严施娜,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, Xu L. Degradation performance of PBAT/PLA fully biodegradable mulching film and its effect on cotton growth in Shihezi reclamation areas in Xinjiang of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(S1):273-282 (in Chinese)
- [39] Dong B D, Liu M Y, Jiang J W, Shi C H, Wang X M, Qiao Y Z, Liu Y Y, Zhao Z H, Li D X, Si F Y. Growth, grain yield, and water use efficiency of rain-fed spring hybrid millet (*Setaria italica*) in plastic-mulched and unmulched fields [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143: 93-101
- [40] Liao Y, Cao H X, Liu X, Li H T, Hu Q Y, Xue W K. By increasing infiltration and reducing evaporation, mulching can improve the soil water environment and apple yield of orchards in semiarid areas [J/OL]. *Agricultural Water Management*, (2021-04-29). DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106936
- [41] 樊俊,谭军,邓建强,彭五星,赵秀武,郑海洲,朱宗第. 不同地膜的降解性能及对烟株生长和土壤环境的影响[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(4):22-28,36
- Fan J, Tan J, Deng J Q, Peng W X, Zhao X Y, Zheng H Z, Zhu Z D. Degradation property of degradable films and their effects on flue-cured tobacco development and soil ecological environment [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2019, 40(4):22-28,36 (in Chinese)
- [42] 赵彩霞,何文清,刘爽,严昌荣,曹肆林. 新疆地区全生物降解膜降解特征及其对棉花产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8):1616-1621
- Zhao C X, He W Q, Liu S, Yan C R, Cao S L. Degradation of biodegradable plastic mulch film and its effect on the yield of cotton in Xinjiang region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8):1616-1621 (in Chinese)
- [43] 马晓楠,杨振兴,周怀平,解文艳,刘志平,胡雪纯. 不同地膜覆盖对谷子土壤水热动态及酶活性的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(6):836-845
- Ma X N, Yang Z X, Zhou H P, Xie W Y, Liu Z P, Hu X C. Effects of different plastic film mulching on soil hydrothermal dynamics and enzyme activity of millet[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(6):836-845 (in Chinese)
- [44] 姚建民,毕昕媛,尚武平,李文婷,李瑞珍. 生物降解渗水地膜覆盖旱地谷子试验[J]. 山西农业科学, 2020, 48(2):198-202,259
- Yao J M, Bi X Y, Shang W P, Li W T, Li R Z. Experiments of millet in dry land covered with biodegradable permeable plastic mulch[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, 48(2):198-202,259 (in Chinese)
- [45] 单智超,冯良山,田建全,徐明阳,董振起,冯定超,俞广江. 渗水地膜对玉米水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3):194-197
- Shan Z C, Feng L S, Tian J Q, Xu M Y, Dong Z Q, Feng D C, Yu G J. Effect of soil surface covered by water permeability film on water use efficiency of corn [J]. *Research of Soil and water conservation*, 2017, 24(3):194-197 (in Chinese)
- [46] 郑晓东,成如,吴淑琴,郭海杰,吴鸣远,刘波,李佳富. 内蒙古马铃薯生产全程机械化发展浅析[J]. 南方农机, 2023, 54(13):20-22
- Zheng X D, Cheng R, Wu S Q, Guo H J, Wu M Y, Liu B, Li J F. Analysis of the development of mechanization of potato production in Inner Mongolia [J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2023, 54(13):20-22 (in Chinese)
- [47] 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. Yield-increasing mechanism of biodegradable mulch cover potato [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(17):140-144 (in Chinese)
- [48] Mu X G, Gao H, Li H J, Gao F C, Zhang Y, Ye L. Effect of different mulch types on soil environment, water and fertilizer use efficiency, and yield of cabbage [J/OL]. *Applied Sciences*, (2023-04-06). DOI: 10.3390/app13074622
- [49] 吴凤全,林涛,祖米来提·吐尔干,邓方宁,尔晨,何文清,汤秋香. 降解地膜对南疆棉田土壤水热及棉花产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12):2793-2801
- Wu F Q, Lin T, Tuergan Z, Deng F N, Er C, He W Q, Tang Q X. Effects of degradable plastic mulching film on soil moisture, temperature, and yield in cotton fields in Southern Xinjiang, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12):2793-2801 (in Chinese)
- [50] 苏海英,宝哲,刘勤,董道瑞,严昌荣,雷海,薛颖昊,徐志宇. 新疆加工番茄应用PBAT全生物降解地膜可行性[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4):615-622
- Su H Y, Bao Z, Liu Q, Dong D R, Yan C R, Lei H, Xue Y H, Xu Z Y. Degradation of biodegradable mulch film and its effect on the yield of processing tomatoes in the Xinjiang region [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4):615-622 (in Chinese)
- [51] 王龙,贺小伟,胡灿,王旭峰,刘勤,严昌荣,丁建萍. 生物降解地膜降解性能对南疆土壤温湿度及棉花产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4):64-70,79
- Wang L, He X W, Hu C, Wang X F, Liu Q, Yan C R, Ding J P. Effects of degradation properties of biodegradable plastic mulches on soil temperature, humidity and cotton yield in Southern Xinjiang [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(4):64-70,79 (in Chinese)
- [52] 顾海蓉,沈根祥,黄丽华,石建福,赵庆节, Giovanni Minuto. 热塑淀粉 Mater-Bi可生物降解地膜的适用性与降解性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):539-543

- Gu H R, Shen G X, Huang L H, Shi J F, Zhao Q J, Minuto G. Biodegradability and applicability of thermoplastic starch biodegradable mulching film[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 539-543 (in Chinese)
- [53] 吴思. PBAT生物降解地膜对土壤养分及微生物学性质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2020
- Wu S. Effects of PBAT biodegradable plastic film on soil nutrients and microbiological properties [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [54] 袁海涛, 余学科, 董灵艳, 贾立洪, 李根源. 氧化-生物双降解地膜在棉田示范效果[J]. 中国棉花, 2017, 44(4):21-23
- Yuan H T, Yu X K, Dong L Y, Jia L H, Li G Y. Study on demonstration effect of oxo-biodegradable film in cotton field[J]. *China Cotton*, 2017, 44(4):21-23 (in Chinese)
- 责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 胡可欣, 现为内蒙古农业大学农学院硕士研究生。参与内蒙古科技计划项目(2022YFXZ0025); 国家燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS-07); 国家重点研发计划国际合作重点专项(2018YFE0107900); 内蒙古重大专项(2021ZD0002); 内蒙古自治区燕麦工程实验室能力建设项目(BR221023)。2021—2022、2022—2023年2次获得内蒙古自治区学业奖学金, 在《麦类作物学报》发表1篇论文。



通讯作者简介: 米俊珍, 中共党员, 博士, 副教授, 内蒙古农业大学农学院教师。主要从事旱作农业可持续发展、杂粮作物高产优质栽培与耕作、黑土地有机质提升、耕作制度与农业生态方面研究。近5年共承担国家级项目3项, 省级项目5项, 发表论文10篇(以第一作者身份发表SCI论文3篇), 参编著作3部, 授权专利5项。



通讯作者简介: 刘景辉, 内蒙古农业大学农学院二级教授、作物栽培学与耕作学博士生导师。国务院政府特殊津贴专家、全国农业科研杰出人才、全国优秀科技工作者、内蒙古自治区杰出人才、国家燕麦荞麦产业技术体系岗位科学家等。主要研究领域: 燕麦育种、栽培及抗逆生理生态、农牧交错区耕作制度与农业生态系统、农业可持续发展理论与实践、退化生态系统恢复与重建等。先后获省部级以上科研奖励19项, 第一完成人8项。主持国家重点研发计划、国家自然科学基金等国家级、省部级项目多项。以第一或通讯作者发表论文215篇, 其中SCI 23篇、EI 12篇。获国家发明、实用新型专利12项。认定燕麦新品种8个。制定地方标准40项。参编著作、教材20部, 主编8部。