

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.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2025.05.03

不同区域覆膜对玉米产量和经济效益的影响

陈阔¹, 吴健龙¹, 韩浩然¹, 郭正宇², 官帅², 陈丽², 王浩宇², 高飞¹, 张中东²

(1. 山西农业大学农学院, 山西晋中 030801; 2. 山西农业大学玉米研究所, 山西忻州 034000)

摘要:为阐明不同覆膜方式对玉米生产的综合效应, 在山西省忻州(半湿润)、长治(湿润)及大同(干旱)3个典型生态区, 系统评价膜侧播种(FFS)、膜上播种(FPM)与不覆膜(CK)3种栽培模式对玉米生长发育、生理性状、产量形成及经济效益的影响。结果表明, 与CK相比, FFS和FPM处理改善了土壤水热条件, 促进了玉米营养生长, 缩短了总生育期, 增加了玉米营养生长阶段的株高、茎粗和叶片SPAD值; 其中, FFS处理在玉米生长后期还能有效维持中深层土壤含水率和叶片SPAD值。在产量方面, 覆膜处理在3个区域均显著增加玉米产量, 其中, FFS处理的增产效果最为突出, 在忻州、长治和大同地区分别较CK增产19.2%、17.7%和26.8%; FPM处理在3个区域的增产为5.2%~24.5%。FFS处理在3个区域经济效益均最高, 3个区域的净利润分别高达5 850.3、15 750.4、4 815.8元/hm²; FPM处理的净利润则分别为2 580.2、12 210.3、4 140.3元/hm²。综上, FFS处理在产量潜力、经济效益及环境适应性上的综合优势远超FPM处理, 是干旱半干旱地区更具推广价值的玉米高效栽培模式。

关键词:玉米; 覆膜方式; 经济效益; 产量; 利润

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2025)05-0021-09

Effects of Different Mulching Methods on Maize Yield and Economic Benefits across Diverse Regions

CHEN Kuo¹, WU Jianlong¹, HAN Haoran¹, GUO Zhengyu², GONG Shuai²,

CHEN Li², WANG Haoyu², GAO Fei¹, ZHANG Zhongdong²

(1. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

2. Institute of Maize, Shanxi Agricultural University, Xinzhou 034000, China)

Abstract: In order to explore comprehensive effect of different mulching methods on maize, in this study, the effects of film-side sowing (FFS), film-over sowing (FPM), and no mulching (CK) on growth and development, physiological traits, yield formation, and economic benefits of maize were systematically assessed across three typical agro-ecological zones in Shanxi province, namely Xinzhou (semi-humid), Changzhi (humid), and Datong (arid). The results showed that compared to CK, both FFS and FPM treatments improved soil hydrothermal conditions, promoted maize vegetative growth, shortened the total growth period, and increased plant height, stem diameter, and leaf SPAD values during the vegetative growth stage. Notably, FFS effectively maintained mid-to-deep soil water content and leaf SPAD values during the late growth stage. In terms of yield, both mulching treatments significantly increased maize yield across all three regions. FFS demonstrated the most prominent yield increase, boosting yields by 19.2% in Xinzhou, 17.7% in Changzhi, and 26.8% in Datong compared to CK. FPM treatments also resulted in yield increases ranging from 5.2% to 24.5% across the three regions. Economically, FFS consistently achieved the highest net profit in all regions, reaching 5 850.3, 15 750.4, and 4 815.8 yuan/ha in Xinzhou, Changzhi, and Datong, respectively. FPM also generated substantial net profits of 2 580.2, 12 210.3, and 4 140.3 yuan/ha in

收稿日期: 2025-07-08

基金项目: 山西省玉米产业技术体系(2024CYJSTX01); 国家自然科学基金(32301945); 中国博士后科学基金第七十五批面上项目(383057)

作者简介: 陈阔, 在读硕士, 研究方向: 玉米栽培生理生态栽培, E-mail: 20233171@stu.sxau.edu.cn

通信作者: 张中东, 研究员, 硕士生导师, 主要从事玉米抗逆高产技术与集成研究, E-mail: ymszzd@sxau.edu.cn

高飞, 副教授, 主要从事玉米栽培生理生态研究, E-mail: sxfeigao@sxau.edu.cn

the corresponding regions. In conclusion, FFS treatment exhibited comprehensive advantages in yield potential, economic benefits, and environmental adaptability, significantly surpassing FPM treatment. Therefore, FFS was a more valuable and recommended high-efficiency maize cultivation model for promotion, particularly in arid and semi-arid regions.

Keywords: maize; film mulching method; economic benefits; yield; profit

全球气候变化的日益加剧导致极端天气事件频发,特别是在干旱和半干旱区域,严重威胁全球农业生产。我国作为世界上最大的粮食生产与消费国,正面临着气温持续上升、降水格局不均等气候变化挑战。这些气候因子已对作物的生长发育进程及最终产量形成产生显著影响^[1-2]。许吟隆等^[3]进一步指出,气候的不断变化将扰动作物的生长周期及对水分和温度的需求,从而加剧主要粮食作物的产量波动。玉米作为全球第二大主粮作物,其产量稳定性直接关乎全球粮食安全。因此,深入探索并实践如何提升玉米在不断变化的极端气候条件下的产量与适应性,已成为保障国家粮食安全和促进农业可持续发展的关键核心。

近年来,气候变化对作物产量的影响已引起广泛关注,VAN DER WIEL 等^[4]的研究表明,降水格局变化和温度波动是导致玉米产量不稳定的关键驱动因素。在此背景下,地膜覆盖技术(Plastic film mulching, PFM)作为一项行之有效的农业管理策略,已在中国乃至全球的干旱和半干旱地区得到广泛应用。覆膜是农业中一种可持续的水土保持实践,通过保持土壤水分、减少杂草生长、调节地温和改善土壤健康来提高作物生产力和资源利用效率。DAI 等^[5]研究进一步证实,免耕结合覆膜能通过调节土壤温度、水分和硝态氮有效性来提高旱地玉米产量。ZHANG 等^[6]研究表明,PFM 可使玉米产量平均提高 33.9%,并保持长期稳定性。SAEED 等^[7]和 GU 等^[8]研究进一步证实,覆膜技术,包括膜侧覆盖(FFS)等创新模式,能显著改善土壤水热特性,提高水分利用效率,并有效提升作物产量和经济回报。这些成果充分彰显 PFM 在提升产量和增强农业抗逆性方面的巨大价值。

尽管 PFM 的应用价值已获得广泛认可,但是目前,多数研究主要集中于单一区域或单一覆膜模式的评估,对于如何在不同的气候和土壤条件下精准优化覆膜方式,以最大限度地提高水资源利用效率、降低能源消耗,依然是当前研究的薄弱环节和亟待解决的关键科学问题。GONG 等^[9]研究指出,覆膜技术普遍存在着应用局限性,这提示

我们对 PFM 的精细化应用仍需深入探索。具体而言,尽管 YU 等^[10]强调了基于水足迹和多目标优化模型进行农业种植结构调整对于宏观水资源利用效率的重要性,但其研究并未深入探讨微观尺度上覆膜技术在具体环境下的优化应用。NAOREM 等^[11]深入分析了干旱环境下土壤质地、有机质含量及盐渍化等土壤条件的限制,揭示了这些特性对农业生产和水资源管理的挑战,这直接指向了覆膜方式需根据不同土壤理化性质进行精准调控的必要性。WAQAS 等^[12]则探讨了玉米面临的热胁迫及其管理策略,提示了气候因素(特别是温度)对作物生长的影响,这进一步强调了覆膜技术在调节地温方面的策略选择应与区域热环境相匹配,以避免不当覆膜可能加剧热胁迫。ZOU 等^[13]研究明确指出,在半干旱环境下采用亏缺灌溉能有效提高玉米产量和水分利用效率,这为覆膜技术如何与精准灌溉策略协同,并最大化水分利用效率提供了思路,但缺乏覆膜本身在不同水资源供应情景下的精细化优化方案。

本研究在山西省忻州(半湿润)、长治(湿润)和大同(干旱)这 3 个典型生态区开展田间试验,系统评估了不同覆膜方式对玉米生长发育、产量形成及其经济效益的影响,深入揭示了不同覆膜技术在不同气候条件下的区域适应性规律,并阐明了其增产与提效机制,旨在为区域精准农业管理提供科学依据与实践支撑。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试玉米品种:中地 9988(在大同市阳高县种植)为北京中地良种玉米开发有限公司育成的杂交玉米品种;先玉 335(在忻州市檀村种植)为山东登海先锋种业有限公司育成的杂交玉米品种;晋单 73 号(在长治市种植)为山西省农业科学院作物科学研究所育成的杂交玉米品种。

膜上播种采用地膜由山西忻兴农业发展有限公司生产的透明塑料膜,规格为 800 mm×0.01 mm 宽聚乙烯地膜,开沟铺膜,膜上打孔种植;膜侧播

种采用规格为600 mm×0.01 mm宽聚乙烯地膜,形成微拱形条带,播种位置为地膜两侧;CK为不覆膜播种。

1.2 试验地概况

试验地分别位于山西省大同市阳高县北太平堡村(114°12'E,40°46'N)、忻州市檀村试验基地(112°71'E,38°49'N)和长治市谷子研究所(113°17'E,36°24'N),3个地方均属于典型的温带大陆性季风气候区,海拔高度分别为1 240.7、804.6、685.9 m,年平均气温分别为6.7、8.2、10.9℃,年日照时数分别为2 448.2、2 637.7、2 905.5 h,年降水量分别为297.4、329.7、342.8 mm,无霜期分别为140、160、180 d左右。长治试点土壤肥力水平较高,忻州试点土壤肥力水平中等,大同试点土壤肥力水平较低(表1和图1)。

表1 不同区域土壤基本理化性质

Tab.1 Basic physicochemical properties of soils in different regions

区域 Region	土层深度/cm Soil depth	有机质含量/(g/kg) Organic matter content	全氮含量/(g/kg) Total nitrogen content	全磷含量/(g/kg) Total phosphorus content	全钾含量/(g/kg) Total potassium content
长治 Changzhi	0~20	39.70	1.90	1.25	17.82
	20~40	37.01	1.82	1.11	17.91
	40~60	33.48	1.35	0.92	17.42
大同 Datong	0~20	26.60	1.72	1.01	17.94
	20~40	17.57	1.15	0.81	18.03
	40~60	7.53	0.54	0.55	17.26
忻州 Xinzhou	0~20	18.67	1.43	0.93	19.59
	20~40	13.64	0.91	0.70	18.36
	40~60	10.28	0.70	0.55	17.29

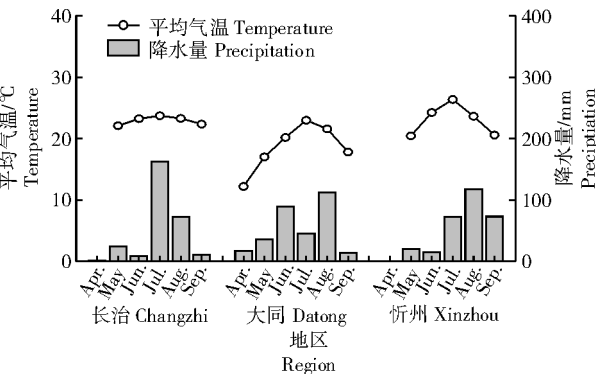


图1 2024年不同试验区域春玉米生长季日平均温度及降雨量

Fig.1 Daily average temperature and precipitation during the growth season of spring maize in different experimental regions in 2024

1.3 试验方法

试验采用单因素随机区组设计,在大同、长治、忻州3个地区分别设置玉米膜侧播种(FFS)、膜上播种(FPM)、露地播种(CK)3种处理方式(图2),每个处理3次重复,共27个小区,每个小区面积为540 m²,试验田四周设保护行。试验地施肥按照当地常规施肥方式进行。其余栽培管理措施与当地优质玉米生产栽培管理措施保持一致。

候区,海拔高度分别为1 240.7、804.6、685.9 m,年平均气温分别为6.7、8.2、10.9℃,年日照时数分别为2 448.2、2 637.7、2 905.5 h,年降水量分别为297.4、329.7、342.8 mm,无霜期分别为140、160、180 d左右。长治试点土壤肥力水平较高,忻州试点土壤肥力水平中等,大同试点土壤肥力水平较低(表1和图1)。

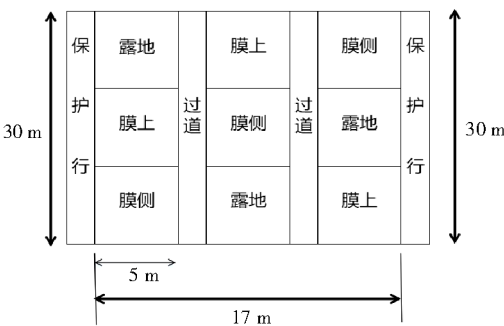


图2 不同覆膜方式的试验设计

Fig.2 Experimental design for different mulching methods

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤温湿度和土壤体积含水量测定 使用土壤温湿度记录仪L99-TWS-3(中国杭州路格科技有限公司)连续监测从播种到收获的0~10 cm土壤的温湿度值。在玉米于拔节期(V6)、抽雄期(VT)、乳熟期(R3)、生理成熟期(R6)期,利用手钻在各小区随机选取3点,分别对0~20、20~40、40~60 cm土层进行取样,采用烘干法测定土壤质量含水量,进而得到土壤剖面水分动态。

1.4.2 农艺性状的测定 分别在玉米拔节期、大喇叭口期、吐丝期和生理成熟期,随机选取小区内

连续的 10~20 株玉米测量茎粗(地上部第 3 节扁平面)和株高。

1.4.3 叶面积指数、SPAD 值、干物质量测定 玉米定苗后各小区随机选取 10 株挂牌标记,于 V6、VT、R3、R6 期量取叶片的叶长和叶宽,按照长宽系数法计算单个叶面积 LA,然后计算叶面积指数(LAI)。

$$LA=L \times W \times k \quad (1)$$

L 为叶片长度, W 为叶片最大宽度。对于未展开的叶片, k 值通常取 0.5; 对于完全展开的叶片, k 值通常取 0.75。

$$LAI=\text{单株总叶面积} \times \text{播种密度} / 10\,000 \quad (2)$$

在拔节期和大喇叭口期使用 SPAD 仪测定最新展开叶片,抽雄期及以后各时期取穗位叶的中部进行测定 SPAD 值。将所取植株的地上部分切碎,在 105 ℃ 下干燥 30 min,在 80 ℃ 下干燥 48 h。在达到恒定质量后,测定每株植物的干物质量。

1.4.4 产量测定 在测产小区中间 2 行收获全部玉米植株,记录实收穗数并称总鲜穗质量,按大、中、小穗分类统计比例,随机选取 10~20 穗代表性样本进行穗部性状测量(穗长、穗粗、秃尖长、穗数、穗粒数),脱粒后测定籽粒含水量及千粒质量,最终计算产量。

$$\text{产量}=\text{有效穗数} \times \text{穗粒数} \times \text{千粒质量} \times (1-\text{籽粒含水量}) / 10^6 \quad (3)$$

1.4.5 经济效益分析 玉米收获后,按照当地玉米销售价格计算,整理统计种子、化肥、机械、人工、农药等投入,计算总投入和总收益。

$$\text{净利润}=\text{总收入}-(\text{化肥}+\text{机械作业}+\text{地膜投入}+\text{人工成本}+\text{其他投入}) \quad (4)$$

1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2022 整理原始数据,采用 SPSS 23.0 进行数据分析,采用 Origin 2021 制图。

2 结果与分析

2.1 各区域不同覆膜类型对玉米生长特征和环境的影响

从表 2 可以看出,本研究在 3 个不同区域监测了玉米关键生育时期(V6、R6)0~10 cm 土层土壤温度动态。结果显示,在 V6 期,忻州、长治区域的覆膜处理均显著提高 0~10 cm 土壤温度($P<0.05$)。在忻州,FPM 和 FFS 处理的土温分别比 CK 高出 9.14、4.77 ℃。长治地区的 FFS 处理增温效果最显著($P<0.05$),比 CK 高 8.07 ℃。在 R6

期,3 个处理间的土壤温度差异不显著。表明覆膜的增温效应主要集中在生长前期。

表 2 不同覆膜方式对 0~10 cm 土层土壤温度的影响

Tab.2 Effect of different mulching methods on soil temperature(0~10 cm) ℃

区域 Region	覆膜方式 Mulching method	V6 期土壤温度 Soil temperature at V6	R6 期土壤温度 Soil temperature at R6
忻州 Xinzhou	FFS	30.00b	26.80a
	FPM	34.37a	27.90a
	CK	25.23c	26.67a
长治 Changzhi	FFS	32.60a	25.73a
	FPM	28.17b	22.43a
	CK	24.53c	23.50a
大同 Datong	FFS	25.07b	19.20a
	FPM	27.93a	19.03a
	CK	26.93ab	19.17a

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。表 3、4 同。

Note: Different lowercase letters indicated significant difference among different treatments($P<0.05$). The same as Tab.3-4.

从表 3 可以看出,不同覆膜处理下 0~10 cm 土层土壤湿度检测结果表明,在 V6 期,FPM 处理的保墒效果最为突出。在忻州、长治和大同 3 个地区,FPM 处理的土壤湿度分别为 23.27%、26.57%、20.17%,均显著高于 FFS 处理和 CK 的土壤湿度($P<0.05$)。在这 3 个区域的 FFS 处理与 CK 的土壤湿度差异均不显著。在 R6 期,FFS 和 FPM 处理均表现出优异的持水能力。在忻州和长治地区,FFS 和 FPM 处理的土壤湿度均显著高于 CK($P<0.05$);在大同地区,3 个处理间的土壤湿度无显著差异。

表 3 不同覆膜方式对 0~10 cm 土层土壤湿度的影响

Tab.3 Effect of different mulching methods on soil humidity(0~10 cm) %

区域 Region	覆膜方式 Mulching method	V6 期土壤湿度 Soil humidity at V6	R6 期土壤湿度 Soil humidity at R6
忻州 Xinzhou	FFS	14.73b	27.30a
	FPM	23.27a	24.37a
	CK	11.50b	18.87b
长治 Changzhi	FFS	16.10b	21.53a
	FPM	26.57a	20.33a
	CK	18.67b	16.27b
大同 Datong	FFS	13.73b	24.57a
	FPM	20.17a	26.43a
	CK	13.37b	26.30a

2.2 不同覆膜方式对玉米生育期的影响

不同覆膜方式对玉米生育期的影响结果如图3所示。

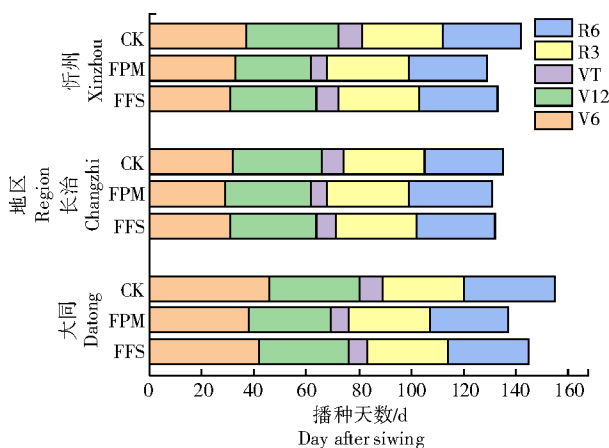


图3 不同覆膜方式对玉米生育期的影响

Fig.3 Effect of different mulching methods on maize growth period

由图3可知,覆膜处理改变了玉米的生育进程,主要表现为缩短了总生育期,且该效应主要体

现在营养生长阶段。与CK相比,FFS和FPM处理均缩短了玉米从播种到生理成熟(R6)的总天数。在大同,该效应最为明显,FPM和FFS处理的总生育期分别为137、145 d,较CK(155 d)分别缩短18、10 d。在长治地区,覆膜处理的总生育期比CK缩短1~2 d。在忻州地区覆膜处理的总生育期比CK缩短5~14 d。

2.3 不同覆膜方式对土壤含水率的影响

由图4可知,覆膜对土壤含水率的影响呈现明显的区域特异性和生育期依赖性。在V6期,长治地区FPM处理的0~20 cm土层含水率较CK提升55.50%。大同和忻州地区,FFS和FPM处理的0~20 cm土层含水率反而低于CK,其中,忻州FFS处理的表层含水率较CK降低53.73%。随着玉米生育期向生殖生长阶段推进,覆膜对土壤水分的保持作用普遍增强。在VT期,忻州FFS处理的20~40 cm土层含水率较CK提升84.28%。进入R3和R6期,覆膜处理在所有区域均维持了中深层土壤(20~60 cm)的较高含水率,与CK在关键生育期表现出的明显水分亏缺形成对比。

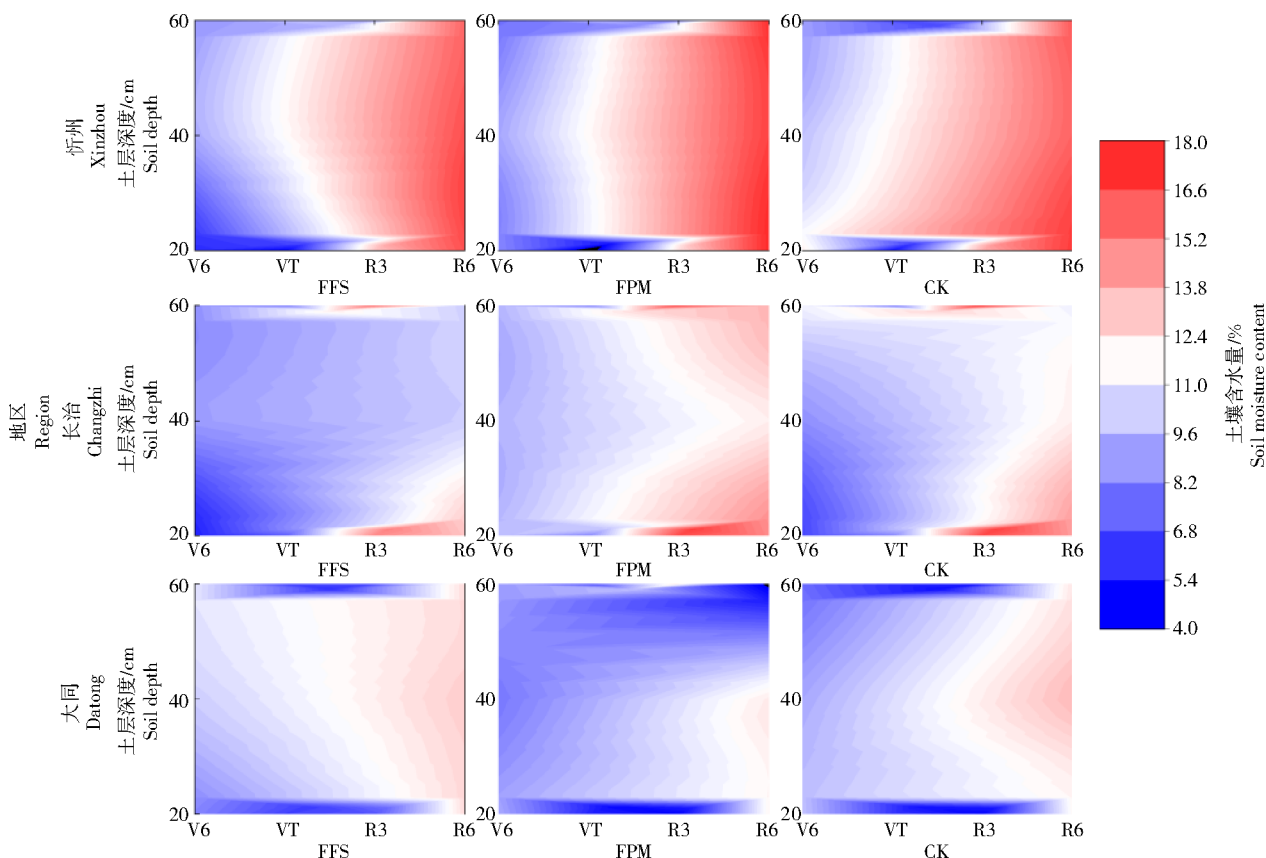
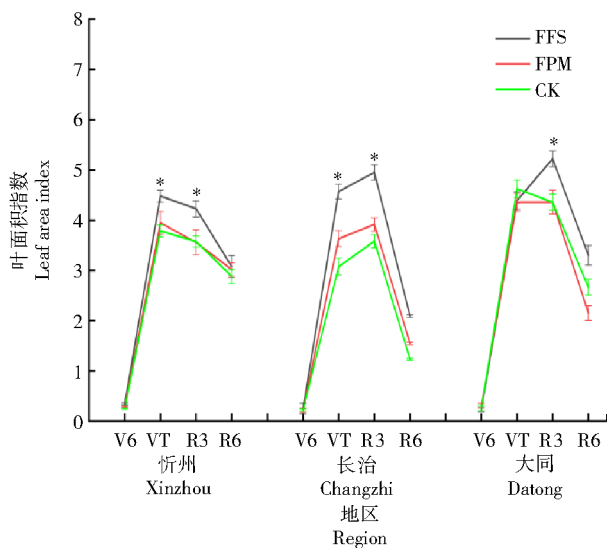


图4 不同覆膜方式对土壤含水率的影响

Fig.4 Effect of different mulching methods on soil moisture content

2.4 不同覆膜方式对玉米叶面积指数(LAI)的影响

由图5可知,3个地区的FFS处理的LAI在整个生育期内均高于其他处理。在忻州和长治地区,从VT到R3期,FFS处理的LAI均显著高于FPM处理和CK($P<0.05$)。在长治地区,FFS处理的LAI在R3期达到峰值,为4.95,分别比FPM处理和CK高出25.63%和36.00%。在大同地区,FFS处理的LAI在R3期为5.21,显著高于FPM和CK处理($P<0.05$)。在R6时期,3个地区的3个处理的LAI均呈下降趋势。



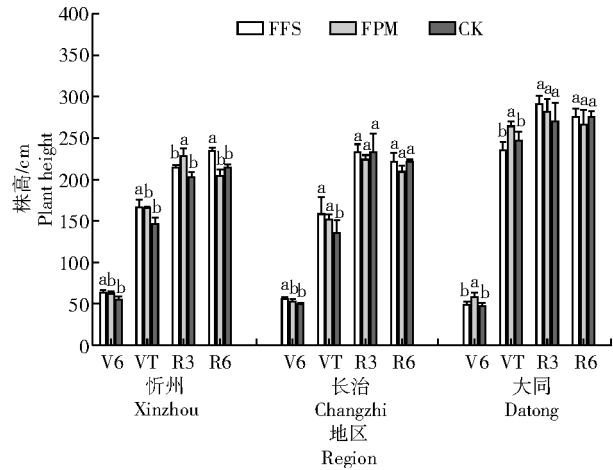
*,**分别表示不同处理间在0.05水平上差异显著和0.01水平上差异极显著

*,** indicated that the difference among different treatments was significant at the 0.05 level and the difference at the 0.01 level was extremely significant

图5 不同覆膜方式对玉米叶面积指数(LAI)的影响
Fig.5 Effect of different mulching Methods on maize leaf area index (LAI)

2.5 不同覆膜方式对玉米株高的影响

由图6可知,覆膜处理对营养生长阶段的玉米株高有明显的促进作用。在玉米营养生长阶段(V6和VT),所有区域的FFS和FPM处理均可以促进株高生长。V6和VT期,忻州和长治地区的FFS处理的株高均显著高于CK;大同地区的FPM处理的株高均显著高于FFS处理和CK。在忻州地区,R6期FFS处理株高仍较CK增加12.20%($P<0.05$)。在R3和R6期,长治和大同地区,FFS和FPM处理与CK处理无显著差异。



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicated significant difference among different treatments($P<0.05$). The same as below

图6 不同覆膜方式对玉米株高的影响

Fig.6 Effect of different mulching methods on maize plant height

2.6 不同覆膜方式对玉米茎粗的影响

由图7可知,在忻州和长治地区,覆膜处理对玉米早期的茎粗生长有促进作用。其中,忻州地区,FPM处理VT期的玉米茎粗粗于FPM处理和CK处理。长治地区FFS和FPM处理R3期的玉米茎粗分别为26.22、25.84 cm,分别比CK处理增加4.25%和2.74%。在大同地区,FFS和FPM处理R3期的玉米茎粗分别达到30.21、27.81 cm,分别比CK处理增加16.73%和7.46%。

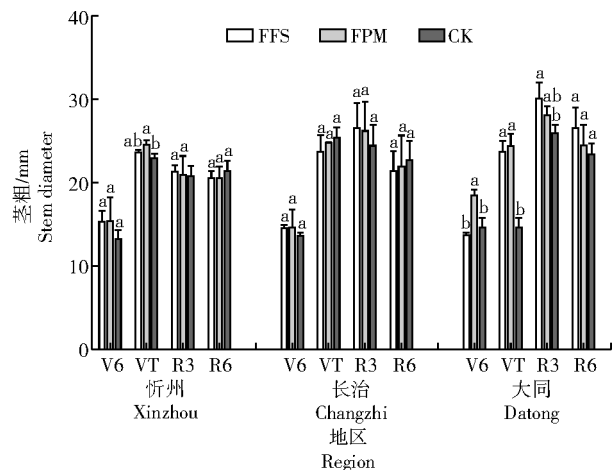


图7 不同覆膜方式对玉米茎粗的影响

Fig.7 Effect of different mulching methods on maize stem diameter

2.7 不同覆膜方式对玉米SPAD值的影响

不同覆膜方式对玉米叶片SPAD值的影响如

图8所示。

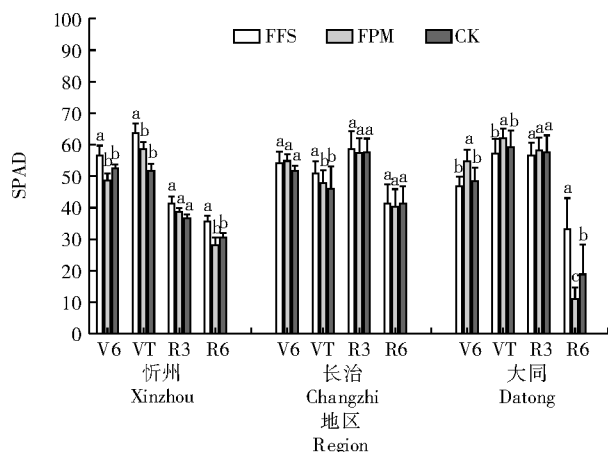


图8 不同覆膜方式对玉米叶片 SPAD 值的影响

Fig.8 Effect of different mulching methods on SPAD value of maize leaves

从图8可以看出,在V6和VT期,忻州地区的FFS处理SPAD值均显著高于FPM处理和CK($P<0.05$);大同地区的FPM处理的SPAD值均显

著高于FFS处理和CK($P<0.05$),表明FFS处理可以增加玉米SPAD值。在R3和R6期,忻州地区,玉米SPAD值随生育期进程逐渐降低;长治地区,覆膜处理与CK无显著差异;大同地区,R6期FFS处理SPAD值显著高于FPM处理和CK($P<0.05$),表明FFS处理可以延缓叶片衰老进程。

2.8 不同覆膜方式对玉米农艺性状和产量的影响

从表4可以看出,覆膜处理增加穗数和穗粒数。FFS处理在忻州和长治显著增加了穗数($P<0.05$),大同地区穗数无显著变化。穗粒数方面,FFS处理在忻州和大同均显著增加了穗粒数($P<0.05$),长治地区,FPM处理的穗粒数最高。覆膜处理显著缩短了大同地区的秃尖长。覆膜处理在所有区域均实现显著增产。忻州和长治均以FFS处理产量最高,分别较CK增产19.19%和17.67%($P<0.05$)。大同地区,FFS和FPM处理产量均显著高于CK($P<0.05$),分别增产26.79%和24.47%,且两者间无显著差异。这表明覆膜通过优化多项产量构成因素,有效促进了玉米增产。

表4 不同覆膜方式对玉米农艺性状和产量的影响

Tab.4 Effect of different mulching methods on agronomic traits and yield of maize

区域 Region	覆膜方式 Mulching method	穗长/cm Ear Length	穗粗/cm Ear diameter	秃尖长/cm Barren tip Length	穗数 Ear number	穗粒数 Grains per ear	千粒质量/g 1000-grain weight	产量/(kg/hm ²) Yield
忻州 Xinzhou	FFS	16.26a	4.65a	2.06b	5 535.63a	500.60a	360.56a	12 719.70a
	FPM	15.32a	4.64a	2.74a	5 222.48a	466.20b	362.00a	11 221.65a
	CK	15.21a	4.62a	2.16b	5 111.37b	460.32b	356.00a	10 671.30b
长治 Changzhi	FFS	18.70a	5.03a	1.08a	5 333.60a	662.93b	338.44a	15 239.10a
	FPM	19.61a	5.07a	1.39a	4 444.67b	712.22a	341.67a	13 780.95b
	CK	18.40a	5.13a	1.24a	4 444.67b	682.38b	334.89a	12 951.30c
大同 Datong	FFS	18.17a	4.04a	0.90b	5 333.60a	608.53a	299.56b	12 392.25a
	FPM	17.88a	4.77a	1.24b	5 333.60a	574.60b	336.33a	12 165.15a
	CK	17.86a	4.71a	2.81a	5 333.60a	481.50c	298.22b	9 773.50b

2.9 不同覆膜方式对玉米经济效益的影响

从图9可以看出,在忻州地区,FFS处理的净利润为5 850.31元/hm²,显著高于CK($P<0.05$),较CK增加102.06%;FPM处理由于地膜投入和人工成本投入较多,其净利润反而低于CK。在长治地区,FFS处理的净利润也最高,较CK提高34.10%;FPM处理的净利润也高于CK,但其增收效果远不及FFS处理。在大同地区,相比于CK的净亏损,FFS和FPM处理的净利润分别为4 815.77、4 140.28元/hm²,表明覆膜在干旱胁迫下可以保障并提升农业生产效益。

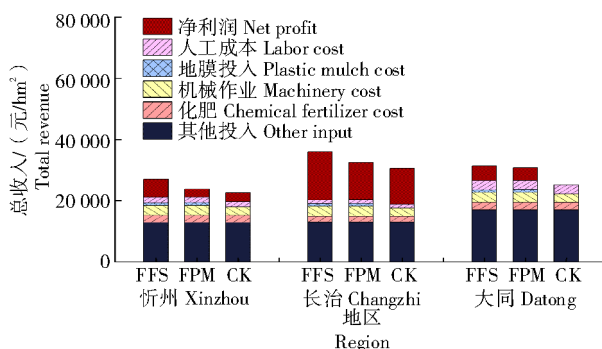


图9 不同覆膜方式对玉米经济效益的影响

Fig.9 Effect of different mulching methods on corn economic benefits

3 结论与讨论

3.1 覆膜对土壤水热微环境的调控及其对玉米生长发育的影响

本研究结果表明,地膜覆盖显著改善了 0~10 cm 土层的水分和温度条件,这对作物早期根系发育和整体生长至关重要。地膜作为物理屏障,能有效减少土壤表面水分的直接蒸发,并改变辐射平衡,从而增加热量的吸收和保持,这与 ZHANG 等^[14]、ZONG 等^[15]和 ZHENG 等^[16]的研究发现一致。然而,覆膜对土壤含水率的初期影响呈现区域差异性。在长治地区 V6 期,FPM 处理的 0~20 cm 土层含水率较 CK 显著提升。但在忻州和大同地区,V6 期 FFS 和 FPM 处理的 0~20 cm 土层含水率反而低于 CK。RAJPUT 等^[17]研究指出,这种早期含水率的下降可能由于地膜下作物早期生长加速导致的蒸腾耗水增加,或地膜对初期降雨入渗的拦截,这反映出地膜覆盖对水分管理的影响会因降雨情况和土壤条件的不同而变化。

随着玉米生育期进入 VT 期至 R6 期等生殖生长关键阶段,覆膜对土壤水分的保持优势再次凸显。此时,覆膜处理显著维持了中深层土壤(20~60 cm)的较高含水率,与 CK 处理在水分需用高峰期表现出明显水分亏缺形成鲜明对比。FFS 处理尤其展现出稳定的水分供应能力,这对于籽粒灌浆和最终产量的形成至关重要,这与 ZHOU 等^[18]和 TENG 等^[19]的研究结论一致。尽管大同地区在 R6 期各处理间的土壤含水率差异不显著,这可能暗示在极端干旱区域,即使有地膜,后期深层水分补给仍不足,提示可能需要结合补充灌溉以实现节水增产。

土壤水热条件的优化可以直接促进玉米生长发育。覆膜处理,特别是 FPM 处理,可以加速生育进程,缩短了总生育期,尤以营养生长阶段(V6、V12)的加速最为明显。生育期的提前有助于玉米更早进入关键生殖阶段,从而潜在地规避后期干旱或低温胁迫。此外,FFS 和 FPM 处理可以促进玉米的营养生长。FFS 处理的叶面积指数(LAI)在 3 个区域的整个生育期内普遍高于 CK,并在忻州、长治和大同的 VT 至 R3 期均表现出显著优势($P<0.05$)。这些生理形态指标的提升,结合更高的 SPAD 值,共同预示着更高的光能截获效率、

更强的光合能力和整体碳同化效率的提升。MUBARAK 等^[20]研究也证实,地膜覆盖可以提高作物的综合生理效应。这些发现与“源—库”理论相符,即优化早期生长环境构建强大的“源”,并在后期维持良好条件以确保“库”充分灌浆,最终实现高产。

3.2 区域适应性、产量与经济效益的协调提升策略

对土壤条件和生理性状的积极影响最终体现在产量的显著提升。本研究表明,FFS 处理在所有区域的产量表现均优于 FPM 处理和 CK。在忻州、长治和大同,FFS 使玉米产量分别提高 19.2%、17.7% 和 26.8%,这些增产主要归因于穗数和穗粒数等产量构成因素的显著改善,这与 ZHANG 等^[21]近年来地膜覆盖在干旱区玉米增产方面的研究相符。产量增加并不意味着利润的同步增长。本研究还发现,不同覆膜方式的效益在不同区域表现出显著差异,且其具体效果会因其作用原理和环境交互而呈现出不同的利弊权衡。忻州地区 FPM 处理的产量较 CK 提升 5.2%,但由于地膜投入和人工成本较高,其净利润反而低于 CK。在大同地区,FFS 处理的净利润显著高于 CK,即使 FFS 与 FPM 处理的产量表现相似,FFS 的净利润也更高。这与 LI 等^[22]和冯可为等^[23]研究所指出的,产量高低不应作为评估技术的唯一标准,还应综合考虑经济效益的结论相一致。

FFS 与 FPM 处理在水热调控机制上存在根本性区别,这决定了它们的区域适应性差异。FPM 处理通过全覆盖最大限度地减少蒸发,但在降雨事件中,其不透水性可能阻碍雨水入渗,增加地表径流,从而降低对突发性降雨的利用效率^[24]。此外,全膜覆盖在强光照下可能导致土壤过热,诱发热胁迫,抑制根系活性,这或许能解释为何在半湿润的忻州地区观察到 FPM 覆膜出现“增产不增收”的问题,即其有限的增产效益不足以抵消其较高的地膜成本和潜在的生理胁迫。

本研究证实,覆膜策略的选择并非“一刀切”,而需根据区域气候特征、土壤条件和经济成本进行精细化匹配。FFS 处理通过其独特的“保水—集水”协同机制,优化作物“源—库”关系,在产量潜力、经济效益及风险抵御能力上超越 FPM 处理,是干旱半干旱地区实现玉米可持续高产和高效生产的有效技术。

参考文献:

- [1] EL-BELTAGI H S, BASIT A, MOHAMED H I, et al. Mulching as a sustainable water and soil saving practice in agriculture: a review[J]. *Agronomy*, 2022, 12(8): 1881.
- [2] REZAEI E E, WEBBER H, ASSENG S, et al. Climate change impacts on crop yields[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(12): 831-846.
- [3] 许吟隆, 赵明月, 李阔, 等. 农业适应气候变化研究进展回顾与展望[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(8): 1155-1170.
XU Y L, ZHAO M Y, LI K, et al. Review on the research progress of agricultural adaptation to climate change and perspectives[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(8): 1155-1170
- [4] VAN DER WIEL K, BINTANJA R. Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2: 1.
- [5] DAI Z J, HU J S, FAN J, et al. No-tillage with mulching improves maize yield in dryland farming through regulating soil temperature, water and nitrate-N[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 309: 107288.
- [6] ZHANG W Q, DONG A H, LIU F L, et al. Effect of film mulching on crop yield and water use efficiency in drip irrigation systems: a meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 221: 105392.
- [7] SAEED M, MAQBOOL A, ASHRAF M A, et al. Competency of groundwater recharge of irrigated cotton field subjacent to sowing methods, plastic mulch, water productivity, and yield under climate change[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(12): 17757-17771.
- [8] GU X B, CAI H J, FANG H, et al. Soil hydro-thermal characteristics, maize yield and water use efficiency as affected by different biodegradable film mulching patterns in a rain-fed semi-arid area of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106560.
- [9] GONG W J, BAI L M, LIANG H. Membrane-based technologies for removing emerging contaminants in urban water systems: Limitations, successes, and future improvements[J]. *Desalination*, 2024, 590: 117974.
- [10] YU H, LIU K L, BAI Y Y, et al. The agricultural planting structure adjustment based on water footprint and multi-objective optimisation models in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 297: 126646.
- [11] NAOREM A, JAYARAMAN S, DANG Y P, et al. Soil constraints in an arid environment: challenges, prospects, and implications[J]. *Agronomy*, 2023, 13(1): 220.
- [12] WAQAS M A, WANG X K, ZAFAR S A, et al. Thermal stresses in maize: effects and management strategies[J]. *Plants*, 2021, 10(2): 293.
- [13] ZOU Y F, SADDIQUE Q, ALI A, et al. Deficit irrigation improves maize yield and water use efficiency in a semi-arid environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106483.
- [14] ZHANG Y Z, DENG F, SU X S, et al. Semi-permeable membrane-covered high-temperature aerobic composting: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 356: 120741.
- [15] ZONG R, WANG Z H, ZHANG J Z, et al. The response of photosynthetic capacity and yield of cotton to various mulching practices under drip irrigation in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 249: 106814.
- [16] ZHENG J, FAN J L, ZHOU M H, et al. Ridge-furrow plastic film mulching enhances grain yield and yield stability of rain-fed maize by improving resources capture and use efficiency in a semi-humid drought-prone region[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 269: 107654.
- [17] RAJPUT A, SINGH V, KUMAR S, et al. Sustainable farming practices: balancing productivity and environmental health [M]//A comprehensive exploration of soil, water, and air pollution in agriculture. Lucknow: BFC publications, 2024: 186.
- [18] ZHOU Q Y, HAN X, ZHANG B Z, et al. Modeling of summer maize transpiration considering morphogenesis[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 628: 130576.
- [19] TENG Z N, CHEN Y K, MENG S, et al. Environmental stimuli: a major challenge during grain filling in cereals[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(3): 2255.
- [20] MUBARAK A N M, MUFEETH MOHAMMATHU M M, KUMARA A D N T. Will future maize improvement programs leverage the canopy light-interception, photosynthetic, and biomass capacities of traditional accessions? [J]. *PeerJ*, 2023, 11: e15233.
- [21] ZHANG B C, HU H, GUO Z Y, et al. Plastic-film-side seeding, as an alternative to traditional film mulching, improves yield stability and income in maize production in semi-arid regions[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(4): 1021-1034.
- [22] LI S Y, ZHANG Y Q, LIU X J, et al. The economic, health, and environmental impacts of both visible and invisible maize losses in Jilin, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 476: 143770.
- [23] 冯可为, 毛晓敏, 郭同锐. 不同覆膜方式对西北旱区土壤水热盐及春玉米生长和产量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, 41(6): 1260-1271.
FENG K W, MAO X M, GUO T K. Effects of different mulching methods on soil water, heat and salt dynamics and spring corn growth and yield in the dry zone of northwest China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, 41(6): 1260-1271.
- [24] YIN W, LIU W, ZHANG G B, et al. Ridge-furrow mulching system improves soil water use and grain yield of dryland maize in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(5): 1277-1290.