



娄义晟, 白伟, 孙占祥, 张哲. 辽西半干旱区不同覆膜处理对春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(12): 149-162.
LOU Yisheng, BAI Wei, SUN Zhanxiang, ZHANG Zhe. Effects of different mulching treatments on spring maize yield and water use efficiency in the semi-arid region of Western Liaoning[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 149-162.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.13

辽西半干旱区不同覆膜处理对春玉米产量和水分利用效率的影响

娄义晟^{1,2} 白伟^{1,2} 孙占祥^{1,2} 张哲^{1,2*}

(1. 辽宁省农业科学院 耕作栽培研究所, 沈阳 110161;

2. 农业农村部东北节水农业重点实验室, 沈阳 110161)

摘要 为探究秸秆还田对持续秋覆膜农田春玉米稳产性和水分利用效率的影响,为秋覆膜技术应用的可持续性提供理论依据,基于2013年在辽西半干旱区布设的不同覆膜方式定位试验,于2018—2022年,设置不覆膜(NM)、春覆膜(传统生育期覆膜,SM)、秋覆膜(秋季收获后覆膜,AM)和秋覆膜结合秸秆还田(秋季收获后秸秆粉碎还田后覆膜,AMS)共4个处理,对春玉米产量、产量构成因素、产量的稳产性、土壤含水量和水分利用效率等指标进行了分析。结果表明:1)2018—2022年,AMS处理显著提升了玉米产量($P<0.05$)。相较于NM处理,分别提升了106.39%、25.87%、54.77%、19.64%和20.98%;相较于SM处理,分别提升了48.22%、9.33%、30.66%、9.92%和9.34%;相较于AM处理,分别提升了11.78%、7.71%、12.86%、4.77%和4.43%,但收获指数之间差异不显著($P>0.05$)。2)AMS处理在5年内产量的变异系数为23.54%,相较于其他处理有较好的稳定性。3)在大部分年份中AMS处理均能显著提升土壤蓄水量和降水利用效率($P<0.05$),在2018—2022年播种期,每公顷0—100 cm的土层内均可提升约750 m³的蓄水量。相较于NM处理,降水利用效率可提升9.33%~48.22%,作物耗水量也显著提升($P<0.05$),为玉米提供了更多可利用水分。4)AMS处理在大多数年份中经济产量水分利用效率和生物产量水分利用效率也有显著提升($P<0.05$)。2018—2022年,AMS处理相较于NM处理经济产量水分利用效率分别提升109.60%、6.62%、47.82%、15.80%和11.10%,生物产量水分利用效率分别提升81.33%、3.14%、55.49%、16.57%、16.14%。因此,在不同降水年份下,秋覆膜结合秸秆还田技术是辽西半干旱区实现春玉米稳产增产和提高水分利用效率的一项有效技术措施。

关键词 秸秆还田; 秋覆膜; 春玉米; 稳产性; 水分利用效率

中图分类号 S343.1

文章编号 1007-4333(2025)12-0149-14

文献标志码 A

Effects of different mulching treatments on spring maize yield and water use efficiency in the semi-arid region of Western Liaoning

LOU Yisheng^{1,2}, BAI Wei^{1,2}, SUN Zhanxiang^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2*}

(1. Institute of Crop Cultivation and Farming System, Liaoning Academy of Agricultural Science, Shenyang 110161, China;

2. Key Laboratory of Water Saving Agriculture of Northeast of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110161, China)

收稿日期: 2025-04-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32472248); 兴辽英才计划项目(XLYC2203119, XLYC2401002); 辽宁省农业科学院学科建设项目(2025XKJS8519); 辽宁省农业科学院基础性、长期性、公益性科技工作专项(2025JCX1007); 农业基础性长期性科技工作国家农业环境数据中心观测监测任务(NAES034AE02)

第一作者: 娄义晟(ORCID:0009-0007-2612-4668), 助理研究员, 主要从事旱地农业科学研究, E-mail: louys666@163.com

通讯作者: 张哲(ORCID:0009-0008-8536-4618), 研究员, 主要从事旱地耕作制度理论与技术研究, E-mail: chick409@126.com

Abstract To explore the impact of straw application on the stable yield and water utilization efficiency of spring maize in continuous fall mulching farmland, and provide a theoretical basis for the sustainability of fall mulching technology application, based on a positioning experiment with different mulching methods set up in the semi-arid area of Western Liaoning in 2013, four treatments were set up from 2018 to 2022, including no mulching (NM), spring mulching (traditional growth period mulching, SM), autumn mulching (mulching after autumn harvest, AM), and autumn mulching combined with straw application (straw is crushed and applied after autumn harvest, AMS). The yields of spring corn, yield components, stable yield performance, soil moisture content, and water utilization efficiency were analyzed. The results showed that: 1) From 2018 to 2022, the AMS treatment significantly increased corn yield ($P<0.05$). Compared with the NM treatment, it increased by 106.39%, 25.87%, 54.77%, 19.64%, and 20.98% respectively. Compared with the SM treatment, it increased by 48.22%, 9.33%, 30.66%, 9.92%, and 9.34% respectively. Compared with the AM treatment, it increased by 11.78%, 7.71%, 12.86%, 4.77%, and 4.43% respectively. However, there was no significant difference in harvest index among the treatments ($P>0.05$). 2) The yield variation coefficient of AMS treatment in five years was 23.54%, which had better stability compared with other treatments. 3) In most years, the AMS treatment significantly increased soil water storage capacity and precipitation utilization rate ($P<0.05$). During the sowing period from 2018 to 2022, there was about 750 m³ of water storage capacity increase in the 0-100 cm soil layer per hectare. Compared with the NM treatment, the precipitation utilization rate was increased by 9.33% to 48.22%, and the water consumption of crops was also significantly increased ($P<0.05$), providing more available water for corn. 4) In most years, the AMS treatment also significantly improved the water utilization efficiency of both economic and biological yield ($P<0.05$). From 2018 to 2022, compared with the NM treatment, the AMS treatment increased the water utilization efficiency of economic yield by 109.60%, 6.62%, 47.82%, 15.80%, and 11.10%, respectively, and the water utilization efficiency of biological yield by 81.33%, 3.14%, 55.49%, 16.57%, and 16.14%, respectively. Therefore, under different precipitation years, the autumn mulching combined with straw application technology is an effective technical measure for achieving stable and increased yield and improving water utilization efficiency of spring corn in the semi-arid area of Western Liaoning.

Keywords straw returning to field; autumn plastic film mulching; spring maize; yield stability; water use efficiency

辽宁省是中国13个粮食主产区之一,春玉米种植面积每年稳定在 2×10^6 hm²以上,其中辽西北地区占2/3以上,产量占辽宁省总产量的75%以上,因此该地区的玉米生产是辽宁省粮食安全的重要保障^[1]。阜新市地处辽宁省西北部,是典型旱作农业区,该区降水变率较大,旱灾频繁,“十年九旱”是其基本气候特征^[2],导致该地区玉米产量不稳,年均单产变率大。旱地秋覆膜以“秋雨春用,春墒秋保”为目标,通过秋季作物收获后立即整地覆膜,覆盖秋、冬、春三季农田休闲期,减少土壤水分蒸发损失,实现水资源的跨季节调控^[2-3],较为适合阜新市的气候条件,可以较好地解决阜新地区春季旱灾频发的问题。但同时有研究指出长期地膜覆盖也存在一些负面影响。首先,地膜覆盖会加速土壤有机质矿化和硝化作用,导致土壤养分快速分解和流失^[4-5];其次,地膜覆盖可能阻碍根系对深层土壤水分和养分的吸收,造成作物后期脱水脱肥现象,进而影响作物产量和品质^[6];此外,地膜残留物难以降

解,可能堵塞土壤孔隙,降低土壤通透性,进一步加剧土壤养分流失^[7-8]。因此,为保证阜新地区农业可持续发展,探寻一种更为合理的覆膜方式,如地膜与秸秆还田相结合,是缓解长时间地膜覆盖负面影响的有效策略。玉米秸秆富含有机质,其还田后在土壤微生物的作用下逐渐分解,释放出养分并改善土壤结构。王喜艳等^[9]研究表明,秸秆还田3年后,0—20 cm土层的有机质含量可增加1.8%~8.38%。同时,玉米秸秆中含有丰富的氮、磷、钾等营养元素,在还田后可被土壤微生物分解,为后续作物提供养分^[10]。且二者均是行之有效的蓄水保墒手段,均可在一定程度上缓解年际降水不均导致的旱灾问题,若能有效结合,可为区域粮食产能提升和农业可持续发展提供重要科技支撑。

目前已有较多有关覆膜与秸秆还田相结合对春玉米产量和水分利用效率提升的机理研究。牛婷婷等^[11]提出覆膜保水与秸秆养分释放结合,促进玉米根系发育和干物质积累,地膜覆盖结合秸秆还

田处理较单一措施增产12%~17%,同时覆膜+秸秆还田组合使水分利用效率(Water use efficiency, WUE)提升13.8%~19.2%。张哲等^[12]则提出地膜覆盖可以提升地温,加速秸秆腐解,从而缓解还田初期水分竞争问题,同时地膜覆盖结合秸秆还田可使土壤贮水量提高23%,缓解干旱胁迫对产量的影响。王闪闪等^[13]提出,地膜覆盖结合秸秆还田可显著提高土壤微生物生物量氮含量,提高土壤脲酶和羟胺还原酶活性,显著增加土壤矿质态氮含量以及土壤脲酶和硝酸还原酶活性,从而提高了肥料利用效率。通过前人的研究可以明确地膜覆盖结合秸秆还田对于提高作物产量和提高水分利用效率有着积极影响,但是连续实施多年后该技术的是否可以维持稳产增产和提高水分利用效率尚缺乏相关报道。为此,本研究依托2013年布设的长期定位试验,以2018—2022年连续5年的不同地膜覆盖处理为研究对象,探究秋覆膜结合秸秆还田对土壤水分时空变化、玉米生长发育、产量、产量构成因素、稳产性和水分利用效率等方面的影响,探讨不同农田管理措施耦合集成在春玉米生产中的应用,以期明确秋覆膜种植方式下较合理的节水技术措施,旨在为解决辽西半干旱区水分利用效率较低、产量水平不高等问题提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长期定位试验于2013年在国家农业环境阜新观测实验站内(42°11' N, 121°70' E, 海拔213 m)建立,实验站地处辽宁省西北部阜新蒙古族自治县阜新镇,属半干旱季风性大陆气候,是典型的风沙半干旱区。1965—2017年,年平均温度为8.1℃,4—9月的日照时数为1 438.9 h,≥10℃的积温3 382℃,无霜期为183 d,平均蒸发量1 043.9 mm,平均降水量300~500 mm。试验区地势平坦,试验田土壤为石灰性褐土(砂粒60.6%、粉粒20.5%、黏粒18.9%),土壤基本理化性状为:土壤容重1.35 g/cm³,有机质含量15.36 g/kg,全氮0.90 g/kg,全磷0.76 g/kg,全钾28.46 g/kg,速效氮101.12 mg/kg,速效磷106.13 mg/kg,速效钾105.47 mg/kg。本研究于2018—2022年开展,试验期间各年份春玉米生育期降水量分别为296.1、561.4、458.4、548.5和893.8 mm,其中2018年降水量低于历年平均水平,

2022年降水量则为1951年有气象记录以来最高。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验采用完全随机区组设计,共设4个处理组,分别为:不覆膜(NM)、春覆膜(传统生育期覆膜,SM)、秋覆膜(秋季收获后覆膜,AM)和秋覆膜结合秸秆还田(秋季收获后秸秆粉碎还田后覆膜,AMS),每个处理3次重复,每个小区面积为50 m²(长×宽为5 m×10 m)。各处理施肥水平一致,按照磷肥(P₂O₅)150 kg/hm²,钾肥(K₂O)75 kg/hm²,氮肥(N)240 kg/hm²的标准施入。具体操作为:秋收后利用小型旋耕机灭茬统一整地,旋耕深度20 cm;NM处理在春季播种前,肥料一次性施入,不覆膜,播种后喷施乙草胺;SM处理在春季播种前,肥料一次性施入,并在喷施乙草胺后进行覆膜;AM处理在秋季整地后,肥料一次性施入,并在喷施乙草胺后进行覆膜;AMS处理在秋季整地时,使用小型旋耕机将两垄除去籽粒部分的秸秆全量打碎一同旋进两垄之间,之后肥料一次性施入,并在喷施乙草胺后进行覆膜。地膜覆盖处理每床地膜两侧有10 cm被埋入,每小区有80%地面覆盖,采用玉米平作种植方式为“一膜双行”,种植密度为60 000株/hm²,膜下玉米行距0.5 m,株距0.33 m,不覆膜处理与地膜覆盖处理距离一致。2018—2022年的播种期分别为5月3日、5月6日、5月18日、5月18日和4月30日;收获期分别为9月28日、10月14日、9月23日、9月24日和9月26日。所有处理均不进行灌溉。

1.2.2 供试材料

供试玉米品种为‘京科968’。供试地膜为阜新塑料彩印二厂生产的普通聚乙烯(PE)黑色地膜,厚度0.008 mm,宽度1 m。

1.3 测定指标

1.3.1 产量及其构成因素

玉米收获时每个小区去除边行,挑选长势一致的10 m²样区进行产量测定,并从中随机挑选10穗果穗进行考种,测定穗长、穗粗、穗行数、行粒数和百粒重。经济产量由每个小区所收取的果穗籽粒计算,烘干称重,最后再按14%含水量折算为作物经济产量。生物产量由每个小区所收取的地上部分生物量计算,烘干称重,最后再按14%含水量折算为作物生物产量。

1.3.2 作物收获指数

作物收获指数(HI)计算公式如下:

$$HI = GY / BY \quad (1)$$

式中:GY为作物经济产量,kg/hm²;BY为作物生物产量,kg/hm²。下同。

1.3.3 土壤含水率

采用土钻取样烘干法,分别于苗期(2018-04-24、2019-04-28、2020-05-24、2021-05-31、2022-04-30),拔节期(2018-06-26、2019-07-07、2020-07-23、2021-07-27、2022-05-27),灌浆期(2018-08-03、2019-08-17、2020-08-26、2021-08-27、2022-08-27),收获期(2018-10-01、2019-10-17、2020-09-23、2021-09-24、2022-09-24)测定0—100 cm土层土壤含水率,每10 cm一个层次,进行3次重复。

土壤蓄水量计算方法如下:

$$M = 10 \times r \times v \times h \quad (2)$$

式中:M为土壤蓄水量,mm;10为换算系数(cm换算为mm);r为土壤容重,g/cm³;v为土壤含水率,%;h为土层深度,cm。

1.3.4 生育期降水利用效率

生育期降水利用效率^[14]计算方法如下:

$$PUE = GY / R \quad (3)$$

式中:PUE为作物生育期降水利用效率,kg/(hm²·mm);R为作物生育期降水量,mm,由试验区内雨量器连续定位观测记录。

1.3.5 水分利用效率

作物耗水量^[15]计算方法如下:

$$ET = \Delta M + P + U - Q - F \quad (4)$$

式中:ET为作物耗水量,mm; ΔM 为播前土壤蓄水量减收获时土壤蓄水量,mm;P为作物生育期降水量,mm;U为地下水补给量,mm;Q为径流量,mm;F为土壤水分渗漏量,mm。其中土壤蓄水量以每米土层含水率计算。本试验每个小区50 m²均由聚丙烯板分隔,且高出地表约10 cm,因此地表径流可忽略不计,由于在半干旱的雨养农业中,深层渗漏现象并不常见,且每次高强度降水次数极少且地下水位较深,因此,这些因素在计算水平衡时通常会被忽略^[16-17]。据此,式(4)可简化为:

$$ET = \Delta M + P \quad (5)$$

水分利用效率^[18]计算方法如下:

$$WUE_{GY} = GY / ET \quad (6)$$

$$WUE_{BY} = BY / ET \quad (7)$$

式中:WUE_{GY}为籽粒经济产量水分利用效率,kg/(hm²·mm);WUE_{BY}为生物产量水分利用效率,kg/(hm²·mm)。

1.3.6 气候变化对玉米稳产性影响

采用变异系数(CV)来评价未来气候变化背景下玉米产量的稳定性,变异系数越小,稳定性越好;相反,变异系数越大,则稳定性越差。CV计算方法如下^[19]:

$$CV = \sigma / \mu \quad (8)$$

式中: σ 为同一处理在不同年份产量的标准差; μ 为同一处理在不同年份产量的平均值。

1.4 数据处理及分析

试验数据使用Excel 2023软件进行整理分析,使用Excel 2023和Origin 2022软件作图,使用SPSS22.0软件进行统计分析,采用Duncan法进行方差分析多重比较。

2 结果与分析

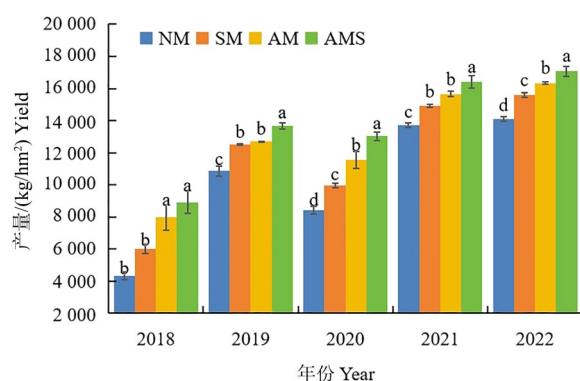
2.1 秋覆膜结合秸秆还田对春玉米产量及产量构成的影响

2.1.1 不同处理对春玉米产量的影响

各处理2018—2022年的产量变化如图1所示。年际间春玉米平均产量为4 322.0~17 063.2 kg/hm²,年度差异较大。2018—2022年产量表现为2022>2021>2019>2020>2018年。不同处理中,各年份产量均表现为AMS>AM>SM>NM,其中2019—2022年,AMS处理产量均显著高于其他处理($P<0.05$),NM处理产量均显著低于其他处理($P<0.05$)。2018—2022年,AMS处理产量相比NM处理分别增加106.39%、25.87%、54.77%、19.64%和20.98%,相比SM处理分别增加48.22%、9.33%、30.66%、9.92%和9.34%,相比AM处理分别增加11.78%、7.71%、12.86%、4.77%和4.43%。

2.1.2 不同处理对春玉米产量稳定性的影响

各处理2018—2022年春玉米产量变异系数如图2所示。综合分析5年内产量变异系数可以看出,NM处理的变异系数为39.49%,显著高于其他处理($P<0.05$),表现出较高的不稳定性;SM处理的变异系数为33.26%,显著高于AM(26.53%)和AMS处理(23.54%, $P<0.05$);AMS处理变异系数最低,说明5年内其产量稳定性较高。

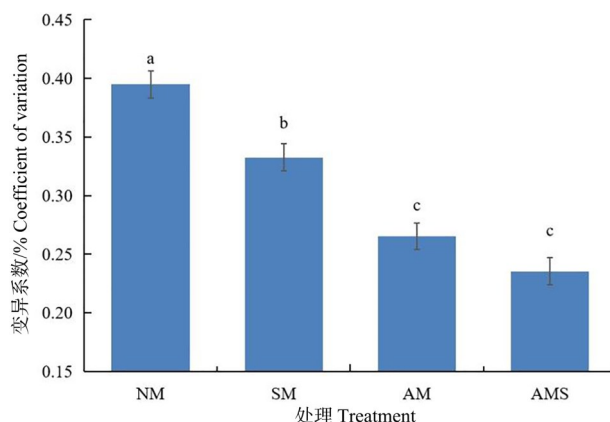


NM: 不覆膜; SM: 春季覆膜; AM: 秋季覆膜; AMS: 秋覆膜结合秸秆还田。不同字母表示在同一年不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

NM: No film application. SM: Film application in spring. AM: Film application in autumn. AMS: Autumn mulching combined with straw return to the field. Different letters indicate significant differences between treatments within the same year ($P < 0.05$). The same as below.

图 1 不同处理各年份春玉米产量变化

Fig. 1 Changes in spring maize yield under different treatments in different years



不同字母表示不同处理在 2018—2022 年间的变异系数差异显著 ($P < 0.05$)。

Different letters indicate significant differences in the coefficient of variation between different treatments from 2018 to 2022 ($P < 0.05$).

图 2 不同处理各年份春玉米产量的变异系数

Fig. 2 Coefficient of variation of spring maize yield in different years under different treatments

2.1.3 不同处理对农艺性状及产量构成因素的影响

各处理 2018—2022 年对春玉米的农艺性状及产量构成因素的影响如表 1 所示,不同处理与年份变化的交互分析如表 2 所示。由表 1 可知,2018—2022 年,不同处理间穗长存在显著差异 ($P < 0.05$),除 2019 年外,AMS 处理的穗长均显著大于 SM 处理 ($P < 0.05$)。在穗粗方面,各处理间差异较小,AMS、AM 和 SM 处理间均无显著差异 ($P > 0.05$),其中,2018 年 AMS 和 AM 处理的穗粗均显著大于 NM 处理 ($P < 0.05$)。以上结果表明,在干旱年份,相较于单一秋覆膜处理,秸秆还田对促进穗粗增加并无显著效果,各年度穗粗与穗长变化规律基本一致。在穗行数方面,

仅 2018 年(降水量偏少年份)AMS 和 AM 处理显著高于 NM 处理 ($P < 0.05$);2022 年仅 AMS 表现出了较高值,表明较高降水量反而不利于增加穗行数。在行粒数方面,2021 年各处理间无显著差异 ($P > 0.05$),其他年份 AMS、AM 和 SM 处理间均差异不显著 ($P > 0.05$),但三者均显著高于 NM 处理 ($P < 0.05$)。在百粒重方面,2018 年 AMS 与 AM 处理显著高于 SM 与 NM 处理 ($P < 0.05$);2019 年,AMS 处理表现最佳,显著高于 AM 和 SM 处理,三者均显著高于 NM 处理 ($P < 0.05$)。表明 AMS 处理在降水量较高和较低的年份均可显著增加百粒重 ($P < 0.05$)。然而,2020、2021 和 2022 年各处理间无显著差异 ($P > 0.05$),说明在降水量适中和过大时,对百粒重的影响较小。

表1 不同处理对春玉米农艺性状及产量构成因素的影响

Table 1 Effects of different treatments on agronomic traits and yield components of spring maize						
年份 Year	处理 Treatment	穗长/cm Cob length	穗粗/mm Cob thickness	穗行数 Grain row number per cob	行粒数 Number of grains per row	百粒重/g Weight of 100-kernel
2018	NM	11.43±0.50 c	31.71±2.58 b	13.60±0.35 b	23.80±1.33 b	24.53±1.34 b
	SM	13.93±0.33 b	42.76±0.41 ab	14.80±0.38 ab	31.80±0.93 a	24.78±0.49 b
	AM	14.60±0.51 ab	43.69±0.82 a	14.93±0.33 a	31.53±1.31 a	30.46±2.43 a
	AMS	15.67±0.39 a	37.90±2.40 a	15.07±0.43 a	34.73±1.09 a	34.30±1.14 a
2019	NM	16.30±0.41 b	50.10±0.40 b	14.27±0.33 a	36.07±1.28 b	35.22±0.66 c
	SM	17.90±0.32 a	49.95±0.44 ab	14.13±0.36 a	39.67±1.04 ab	37.81±0.38 b
	AM	17.70±0.28 a	51.57±0.54 ab	14.80±0.26 a	39.13±0.68 ab	37.60±0.99 b
	AMS	18.00±0.22 a	51.18±0.39 a	14.80±0.33 a	39.20±0.74 a	40.80±0.70 a
2020	NM	15.57±0.54 b	45.36±1.35 b	14.80±0.51 a	29.20±1.52 b	35.96±0.34 a
	SM	15.53±0.74 b	47.10±0.60 ab	15.47±0.41 a	31.47±1.71 ab	35.53±0.85 a
	AM	17.33±0.36 ab	47.60±2.58 ab	15.73±0.27 a	34.60±1.42 ab	35.39±1.15 a
	AMS	17.60±0.41 a	49.81±0.74 a	15.73±0.27 a	33.67±1.30 a	37.11±1.99 a
2021	NM	17.57±0.36 c	53.84±0.52 b	16.40±0.56 a	35.80±0.83 a	40.31±0.38 a
	SM	18.03±0.26 bc	54.82±0.41 ab	16.53±0.31 a	36.87±0.73 a	46.25±3.33 a
	AM	19.30±0.20 ab	55.99±0.36 ab	17.33±0.37 a	37.47±1.08 a	43.43±0.37 a
	AMS	19.60±0.34 a	55.29±0.35 a	17.07±0.38 a	38.53±1.15 a	43.75±1.31 a
2022	NM	18.20±0.41 c	53.41±0.48 a	16.40±0.29 ab	38.47±0.99 b	40.64±0.79 a
	SM	19.30±0.26 b	53.77±0.43 a	15.33±0.37 b	41.53±0.95 a	41.18±0.40 a
	AM	19.73±0.28 ab	53.52±0.55 a	15.47±0.53 b	43.60±0.59 a	41.78±0.10 a
	AMS	20.33±0.35 a	53.70±0.80 a	17.07±0.43 a	43.07±0.56 a	41.02±0.18 a

注:数据为平均值±标准误。
Note: Data is mean±SE.

表2 农艺性状及产量构成因素在不同处理与年份变化的交互分析

Table 2 Interaction analysis of the changes in agronomic traits and yield components across different treatments and years					
指标 Index	穗长 Cob length	穗粗 Cob thickness	穗行数 Grain row number per cob	行粒数 Number of grains per row	百粒重 Weight of 100- kernel
T	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Y	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
T×Y	0.017	<0.01	0.118	0.019	0.005

注:T为处理,Y为年份,T×Y为处理与年份的交互分析。下同。
Note: T represents the treatment, Y represents the year, T×Y represents the interaction analysis between the processing method and the year. The same below.

2.1.4 不同处理对群体生物产量及收获指数间的
影响

各处理 2018—2022 年的春玉米生物产量如图 3 所示。在不同年份中 AMS 与 AM 处理间差异均不显著($P>0.05$);SM 处理在 2018 和 2020 年均显著低于

AMS 和 AM 处理($P<0.05$);NM 处理在 2018、2019 和 2021 年与 SM 处理,以及 2019 年与 AM 处理均无显著差异外($P>0.05$),其余年份均显著低于其他处理($P<0.05$);5 年中 AMS 处理较 NM 处理分别增产 106.39%、25.87%、54.77%、19.64% 和 26.4%。

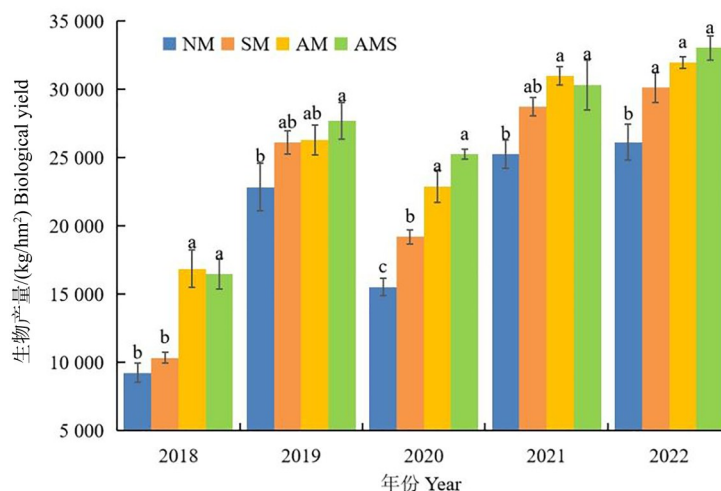


图 3 不同处理各年份春玉米生物产量变化

Fig. 3 Changes in spring maize biological yield under different treatments in each years

2.1.5 不同处理对群体生物产量及收获指数间的影响

各处理 2018—2022 年春玉米收获指数如图 4 所示。所有处理的收获指数在 5 年中均无显著差异 ($P>0.05$), 变化幅度较小。各年份各处理收获指数均维持在 0.44~0.58, 且降水量越大各处理收获指数相差越小。

2.2 不同处理对土壤含水率的影响

2018—2022 年各处理土壤含水率测定结果如图 5 所示。土壤含水率可反映土壤持水能力和供水能力。从总体来看, 苗期时, 各土层均为覆膜处理含水率更高, 且各处理平均含水率基本表现为 $AMS>AM>SM>NM$, AMS 处理和 AM 处理在

苗期显著提高了土壤的含水率 ($P<0.05$), 说明秋覆膜处理在休闲期较好抑制了水分蒸发。同时相对于 AM 处理, 在土层较浅时 AMS 含水率均较高, 说明添加秸秆疏松了土壤, 相比普通覆膜处理在一定程度上增加了雨水的入渗能力, 从而更好地提升了土壤的蓄水能力。除 2021 和 2022 年外, 苗期变化幅度较小, 5 年变化幅度分别为 31.76%~73.18%、33.46%~52.83%、15.6%~70.25%、32.33%~71.42% 和 56.85%~84.41%; 成熟期随着植株需水量减少, 各处理间差异不明显, 变化幅度分别为 41.27%~70.94%、104.57%~126.44%、21.02%~152.94%、43.15%~93.39% 和 18.11%~81.78%。

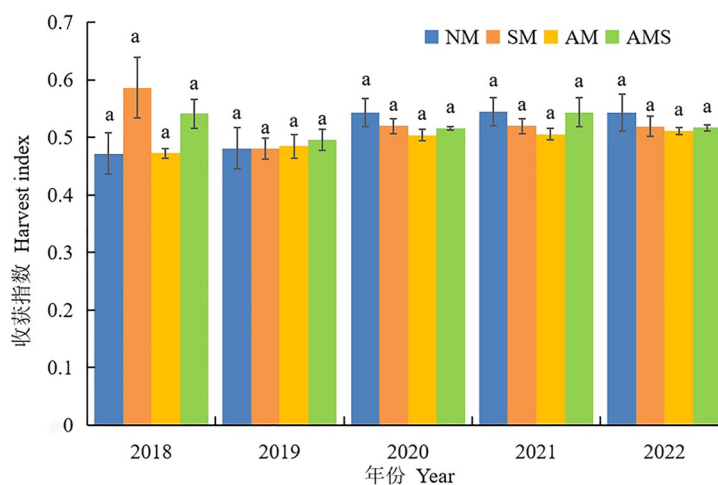


图 4 不同处理春玉米收获指数变化

Fig. 4 Changes in spring maize harvest index under different treatments

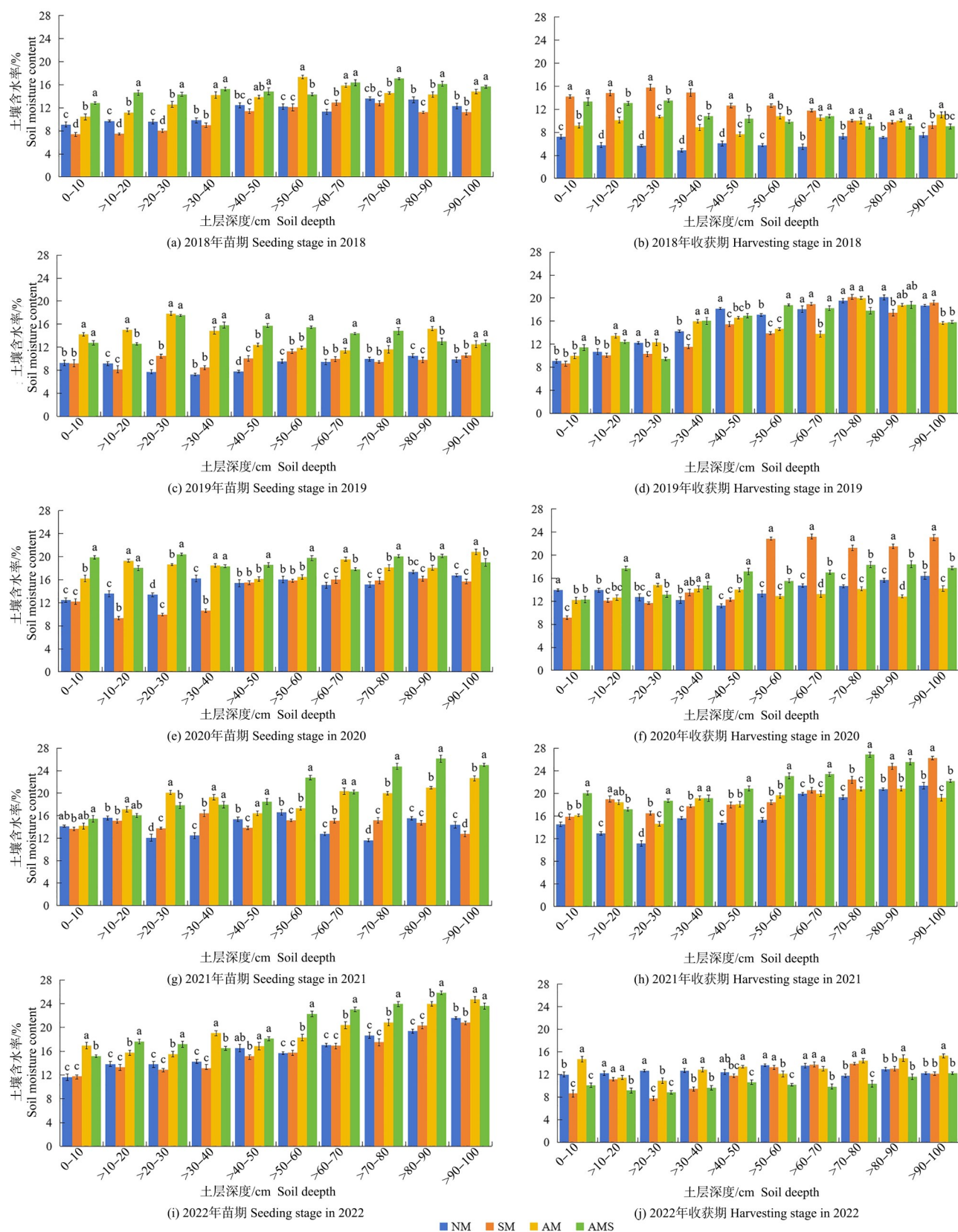


图5 不同处理春玉米各生育时期0—100 cm土层土壤含水率的动态变化

Fig. 5 Dynamic changes in soil moisture content at different depths of 0-100 cm during the growth stages of spring corn under different treatments

2.3 不同处理对水分利用的影响

2.3.1 不同处理对降水利用效率的影响

各处理 2018—2022 年生育期降水利用效率如图 6 所示。各年份间均表现为 AMS>AM>SM>NM。2018 年,AMS 处理生育期平均降水利用效率为 5 年中最高值,达 30.12 kg/(hm²·mm),NM 处理降水利用效率最低,仅为 14.60 kg/(hm²·mm)。同年,SM 处理也仅为 20.32 kg/(hm²·mm),与 NM 处理差异不显著($P>0.05$),说明在极为干旱的年份春季地膜覆盖已经较难满足苗期植株生长所需水分,从而影响全年的降水利用效率。

2.3.2 不同处理对作物水分利用效率的影响

2018—2022 年各处理春玉米耗水量及水分利用效率如表 3 所示,不同处理与年份变化的交互分析见表 4。由表 3 可知,在不同降水年份中秋覆膜结合秸秆还田对作物耗水量和作物水分利用效率的影响不同。在作物耗水量方面,2018 年各处理间表现为 NM>AMS>AM>SM,最高的 NM 处理相比 SM 处理高 37.43%;2019 年各处理间表现为 AMS>

AM>SM>NM,最高的 AMS 处理相比 NM 处理高 17.81%;2020 和 2021 年各处理间均表现为 AM>AMS>NM>SM,最高的 AM 处理相比 SM 处理分别高 26.96% 和 15.23%;2022 年则表现为 AMS>AM>SM>NM,其中 AMS 显著高于其他处理($P<0.05$)。在生物产量水分利用效率方面,各年份各处理间均表现为 NM 处理利用效率最低,AMS 和 AM 处理分别在 2018 和 2020 年利用效率最高,SM 处理则在 2019 和 2021 年利用效率均最高,5 年内各年份中利用效率最高的处理较 5 年内利用效率均最低的 NM 处理分别提高了 110.77%、8.57%、55.49%、22.35% 和 18.8%。在经济产量水分利用效率方面,5 年内 AMS 处理与 SM 处理均有较好表现,AM 处理在 2020 年显著低于 AMS 处理和 SM 处理($P<0.05$),而 NM 处理仅在 2019 年与其他处理并未表现出显著差异($P>0.05$),其余年份均显著低于其余处理($P<0.05$);5 年内各年份中利用效率最高的处理相比最低的处理分别提高了 113.98%、7.96%、47.82%、17.04% 和 12.45%。

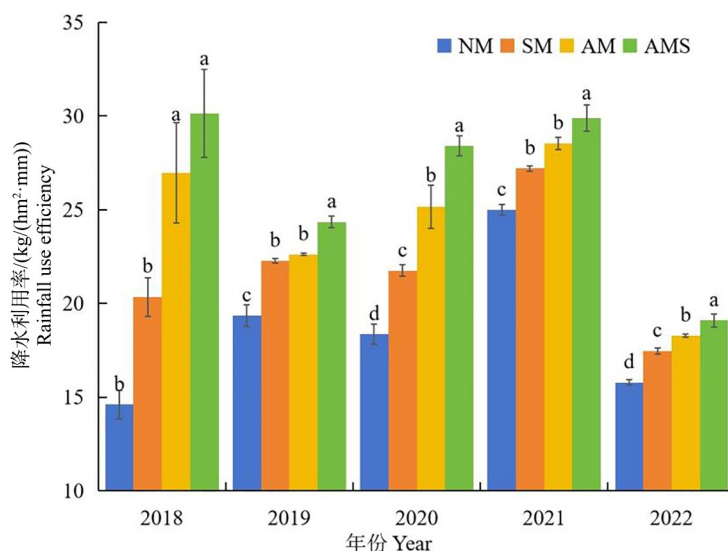


图 6 不同处理生育期内降水利用效率变化

Fig. 6 Changes in precipitation use efficiency during the growth period under different treatments

3 讨论

3.1 不同处理对作物产量、产量构成及稳定性的影响

作物产量和总生物量的增加是检验农田管理措施好坏的重要指标,不同还田年限玉米经济产量

差异显著,反映出秸秆还田措施能够促进玉米经济产量的提高,且与还田年限呈正相关^[20]。Wang 等^[21]研究表明,在中国西北半干旱地区,连续使用秋覆膜相比不覆膜,玉米经济产量提高了 30%~107%,生物产量增加了 37%~69%。本研究结果表明,连续秋覆膜结合秸秆还田对春玉米产量有显

表3 不同处理对春玉米耗水量及水分利用效率的影响

Table 3 Effects of different treatments on water consumption and water use efficiency of spring maize

年份 Year	处理 Treatment	生育期降水量/mm Rainfall in growth period	作物耗水量/mm Crop water consumption	生物产量水分利用效率/ (kg/(hm ² ·mm)) Biological yield water use efficiency	经济产量水分利用效率/ (kg/(hm ² ·mm)) Economic yield water use efficiency
2018	NM	296.1	364.26±12.47 a	25.53±2.74 b	11.93±1.02 b
	SM		265.05±10.42 b	39.03±0.07 ab	22.86±2.03 a
	AM		323.40±28.70 a	53.81±9.37 a	25.54±4.93 a
	AMS		358.87±12.10 a	46.29±4.77 a	25.02±2.65 a
2019	NM	561.4	466.61±14.81 b	48.96±3.65 a	23.35±1.34 a
	SM		497.36±11.58 b	52.50±1.10 a	25.17±0.71 a
	AM		544.71±9.49 a	48.36±2.66 a	23.32±0.47 a
	AMS		549.74±11.26 a	500.50±3.42 a	24.90±0.83 a
2020	NM	458.4	474.75±9.78 b	32.73±1.44 b	17.75±0.86 c
	SM		411.82±9.05 c	46.70±1.87 a	24.23±0.87 ab
	AM		522.85±10.24 a	43.95±3.15 a	22.12±1.45 b
	AMS		496.84±9.39 ab	50.89±1.63 a	26.24±0.97 a
2021	NM	548.5	514.02±13.12 ab	49.19±1.76 b	26.71±0.97 b
	SM		477.82±11.24 b	60.18±1.64 a	31.26±0.92 a
	AM		550.59±9.48 a	56.38±2.04 ab	28.46±0.8 ab
	AMS		531.17±12.19 a	57.34±4.70 ab	30.93±1.41 a
2022	NM	893.8	947.32±13.66 b	27.61±1.39 b	14.90±0.33 b
	SM		956.92±14.22 b	31.51±1.26 ab	16.32±0.40 a
	AM		975.92±14.29 b	32.80±0.85 a	16.75±0.31 a
	AMS		1 031.71±12.95 a	32.06±1.25 a	16.55±0.51 a

表4 不同处理与不同年份对玉米耗水量及水分利用效率的交互分析

Table 4 Interactive analysis of water use and water use efficiency of spring maize in different treatments and years

指标 Index	作物耗水量 Crop water consumption	生物产量水分利用效率 Biological yield water use efficiency	经济产量水分利用效率 Economic yield water use efficiency
T	<0.01	<0.01	<0.01
Y	<0.01	<0.01	<0.01
T×Y	<0.01	<0.01	<0.01

著提升,在不同年份中,相同的处理表现出一定差异,但大部分年份中秋覆膜结合秸秆还田处理均可一定程度提高玉米穗长、穗粗等性状,同时可显著提高产量。谭凯敏等^[22]研究表明,在秸秆还田加覆膜条件下相较于对照处理增产 69.36%;刘文国等^[23]研究表明,在覆膜条件下,秸秆还田相比不还田能够显著提升玉米产量;韩云良等^[24]研究表明,秋覆膜玉米产量高于春覆膜春玉米产量。以上研究与本研究结果相似,但前人研究大部分为单年产量分析,或未结合秸秆还田与秋覆膜处理,且多年连续秋覆膜结合秸秆还田处理在前人的研究鲜有报道。本研究中,各年份 AM 处理相比 SM 处理产量分别增加了 32.60%、1.50%、15.77%、4.92% 和 2.64%,由此可以看出,在干旱年份 AM 处理相比于 SM 处理产量有显著提升,这充分说明秋覆膜可以较好起到秋水春用的效果,较大程度上平衡了年际降水不均的问题,而在降水量较大的年份对产量也有一定的提升作用。AMS 处理相对于 AM 处理产量分别提升了 11.78%、7.71%、12.86%、4.77% 和 4.43%,说明在不同年份中,AMS 处理相对于 AM 处理均能提升产量,尤其是干旱年份中,秋覆膜结合秸秆还田处理是更为适合提升当地春玉米产量的种植方式。同时本研究不同年份中收获指数变化趋势有一定差别,NM 处理和 SM 处理的收获指数在 2018—2022 年整体呈现上升趋势,AM 处理和 AMS 处理则整体呈现略微下降趋势,说明不同覆膜方式对不同年份收获指数的影响有一定的变化,这可能与不同年份的降水年型有关,还需进一步验证。在较为干旱的年份(2018 年)中,AM 处理的生物产量较高,但收获指数较低,说明在干旱年份中秋覆膜处理可增加春玉米生物产量,但并未促进经济产量的增加;而 AMS 处理的收获指数较为稳定,说明秋覆膜结合秸秆还田处理可以更好地协调植物生长,从而达到增产效果。本研究 5 年内不同降水年型的产量稳定性表明,在部分降水量较大的年份中,秋覆膜处理与春覆膜处理差距较小,说明充沛的降水可以在一定程度上弥补春季水分不足带来的影响,同时可以明显看出秋覆膜结合秸秆还田相较于其他处理在各降水年型情况下,对春玉米的稳产性均有显著提升。目前在大多数文献中仅研究了覆膜与秸秆还田相结合对产量的提升,少见有关稳产性的研究,本研究自 2013 年开始定位研究,

在连续多年试验条件下,不仅提升了春玉米产量,同时在不同降水年型下产量稳定性更高,更能适应辽西半干旱区环境,达到增产稳产的目的。

3.2 不同处理对土壤水分及水分利用效率的影响

大量研究表明秸秆还田可以提高土壤的蓄水保水能力,保证作物蓄水关键期的供水,缓解旱地作物水分供需矛盾,提高作物产量和水分利用效率^[1,25-26]。本研究表明,秋覆膜结合秸秆还田可以充分利用周年自然降水,提高作物的降水利用效率。结合 5 年数据来看,在降水量相对较少的 2018 和 2020 年,AMS 处理和 AM 处理的降水利用效率相比 SM 处理和 NM 处理差异更为显著,说明不同降水年型对水分利用效率的影响较大,干旱条件下苗期保水促苗可明显提高全年植株水分利用效率,在干旱年份也能更好保证植株稳产。在降水较为充沛的 2019、2021 和 2022 年,秋覆膜结合秸秆还田对降水利用效率的提高依然有显著影响,而秋覆膜和春覆膜之间差异相对较小。在不同处理作物耗水量方面,春季覆膜可在一定程度上降低作物耗水量,秋季覆膜可在一定程度上增加作物耗水量,这是由于秋季覆膜在作物休闲期储蓄了土壤中更多的水分,以提供给作物生育期利用。钱锐等^[27]研究表明,覆膜种植与秸秆还田增加耗水量,覆膜秸秆还田处理相较于传统耕作耗水量增加了 5.72%,秸秆还田加覆膜较普通覆膜处理耗水量增加 2.54%。本研究中,除较为干旱的 2018 年,AMS 相较于 SM 和 NM 均显著提升了作物耗水量,而在 2018 年,AMS 与 AM 处理相较于 NM 处理耗水量差异不显著,这可能是由于传统耕作无覆盖在干旱年份蒸发消耗了更多的土壤水分。王永亮等^[28]研究表明,秸秆还田会降低植株耗水量,这与本研究有所不同,其可能与不同降水年型、不同土壤质地或不同农艺技术措施有关。在作物水分利用效率方面,在降水量相对较多的年份,AMS 处理对生物产量水分利用效率和经济产量水分利用效率提升较小,而在相对生育期降水较少的年份(2018 和 2020 年)则提升显著,这可能是由于干旱年份作物产量提高的同时,相较于不覆膜作物耗水量差异不显著,进而提高了作物水分利用效率。

3.3 不同年份降水、土壤水分与产量的关系

阜新地区作为典型的辽西半干旱地区,水资源相对匮乏,植物生长所需水分大部分依靠自然降

水。土壤含水量和作物产量测定结果表明,土壤内水分含量随全年降水情况波动较大。降水量较小的年份,土壤含水量普遍偏低;降水量较大的年份,土壤含水量有明显提升。同时,产量也随降水量波动影响较大。通过分析产量与水分利用效率之间的关系可以看出,阜新地区2018—2022年春玉米产量随着水分利用效率的提升而增加,在2018和2020年表现尤为明显,这说明在越干旱的年份,产量与水分利用效率之间的关系越紧密。同时也表明,目前阜新地区提高水分利用效率仍然是提高产量的重要手段。但本研究只对连续6~10年降水量为296.1~893.8 mm的产量和水分利用效率进行分析,所述的年型代表了枯水年、平水年和丰水年等不同年型,对不同年型的判定标准是用2018—2022年降水量与阜新平均降水量的相对比值进行判定, <300 mL为枯水年,300~500 mL为平水年, >500 mL为丰水年,在降水量更大或更小的情况下是否符合本研究所述规律,以及该试验是否影响深层次干燥化、土壤养分含量等指标则有待进一步研究。

4 结 论

本研究基于辽西半干旱区布设的不同覆膜方式定位试验,对2018—2022年的降雨量、土壤含水量、春玉米产量、水分利用率等指标进行分析,主要得出如下结论:1)连续多年在不同年份中秋覆膜结合秸秆还田处理较传统覆膜方式可显著提高春玉米产量,显著提高降水利用效率,增加作物耗水量,显著提升水分利用效率;2)秋覆膜结合秸秆还田处理,春玉米产量稳定性较高,收获指数较为稳定,表明连续多年的秋覆膜结合秸秆还田处理可较好地协调植物生长,从而更好地达到增产稳产的效果;3)在相对干旱的年份,秋覆膜结合秸秆还田处理,可明显提升产量等各项指标,表明该模式更适宜在全年降水量较少、年际降水分布不均的地区进行推广。

参考文献 References

- [1] 白伟,孙占祥,张立祯,郑家明,冯良山,蔡倩,向午燕,冯晨,张哲. 耕层土壤虚实结构优化春玉米根系形态提高水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 88-97

Bai W, Sun Z X, Zhang L Z, Zheng J M, Feng L S, Cai Q, Xiang W Y, Feng

- C, Zhang Z. Furrow loose and ridge compaction plough layer structure optimizing root morphology of spring maize and improving its water use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(21): 88-97 (in Chinese)
- [2] 张哲,张旭,冯良山,张燕卿,刘恩科,孙占祥. 秋覆膜对辽西春玉米水肥利用效率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 150-158
- Zhang Z, Zhang X, Feng L S, Zhang Y Q, Liu E K, Sun Z X. Effects of autumn mulching on water and fertilizer use efficiency and yield of spring maize in Western Liaoning Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15): 150-158 (in Chinese)
- [3] 张哲,孙占祥,张燕卿,郑家明,郝卫平,司鹏飞. 覆膜对半干旱区春玉米生长及产量构成的影响[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2016, 42(3): 231-237
- Zhang Z, Sun Z X, Zhang Y Q, Zheng J M, Hao W P, Si P F. Effects of plastic mulch on growth and yield components of spring maize in semi-arid areas[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2016, 42(3): 231-237 (in Chinese)
- [4] 尹晓宁,董铁,孙文泰,牛军强,刘兴禄,马明. 陇东旱地苹果园不同地面覆盖模式的水分与养分效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 117-126
- Yin X N, Dong T, Sun W T, Niu J Q, Liu X L, Ma M. Effects of different soil surface mulching patterns on soil moisture and nutrient in dryland apple orchard in east Gansu Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(20): 117-126 (in Chinese)
- [5] 王真,孙军,杜娅丹,孙丹,甘海成,牛文全. 覆盖措施对土壤碳氮及夏玉米产量和水氮利用的影响[J]. 中国生态农业学报:中英文, 2022, 30(6): 913-923
- Wang Z, Sun J, Du Y D, Sun D, Gan H C, Niu W Q. Effects of mulching practices on soil carbon, nitrogen contents, and grain yield, water and nitrogen use efficiencies of summer maize [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(6): 913-923 (in Chinese)
- [6] 周立峰,杨宇翔,杨荣. 覆膜砂质农田土壤水分和CO₂分布特征及玉米根叶衰老响应[J]. 中国生态农业学报:中英文, 2024, 32(1): 83-94
- Zhou L F, Yang Y X, Yang R. Root and leaf senescence of maize subject to spatial differentiation of soil water and CO₂ in sandy fields with plastic film mulching[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(1): 83-94 (in Chinese)
- [7] 林涛,汤秋香,郝卫平,吴凤全,雷蕾,严昌荣,何文清,梅旭荣. 地膜残留量对棉田土壤水分分布及棉花根系构型的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 117-125
- Lin T, Tang Q X, Hao W P, Wu F Q, Lei L, Yan C R, He W Q, Mei X R. Effects of plastic film residue rate on root zone water environment and root distribution of cotton under drip irrigation condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(19): 117-125 (in Chinese)
- [8] Sun D B, Li H G, Wang E L, He W Q, Hao W P, Yan C R, Li Y Z, Mei X R, Zhang Y Q, Sun Z X, Jia Z K, Zhou H P, Fan T L, Zhang X C, Liu Q, Wang F J, Zhang C C, Shen J B, Wang Q S, Zhang F S. 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(10): 1523-1526
- [9] 王喜艳,张亚文,冯燕,周兴本,刘洋,周剑,黄毅. 玉米秸秆深层还田技术对土壤肥力和玉米产量的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 103-107

- Wang X Y, Zhang Y W, Feng Y, Zhou X B, Liu Y, Zhou J, Huang Y. Effects of deep maize straw returning on soil fertility and maize yields[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(6): 103-107 (in Chinese)
- [10] 杨楠, 高勇, 刘伟光. 玉米秸秆还田方式及对土壤环境的影响[J]. 农业工程, 2023, 13(6): 31-36
- Yang N, Gao Y, Liu W G. Method of returning corn straw to field and its impact on soil environment[J]. *Agricultural Engineering*, 2023, 13(6): 31-36 (in Chinese)
- [11] 牛婷婷, 马明生, 张军高. 秸秆还田和覆膜对旱作雨养农田土壤理化性质及春玉米产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(8): 1896-1906
- Niu T T, Ma M S, Zhang J G. Effects of straw returning and plastic film mulching on soil physical and chemical properties and spring maize yield in rain-fed upland farmland[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2024, 61(8): 1896-1906 (in Chinese)
- [12] 张哲, 孙占祥, 张燕卿, 郑家明, 郝卫平, 冯晨, 司鹏飞. 秸秆还田结合秋覆膜对半干旱区春玉米的影响[J]. 中国农业气象, 2016, 37(6): 654-665
- Zhang Z, Sun Z X, Zhang Y Q, Zheng J M, Hao W P, Feng C, Si P F. Effects of straw-incorporation combined with plastic mulching in autumn on spring maize in semi-arid areas[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(6): 654-665 (in Chinese)
- [13] 王闪闪, 李惠通, 柳瑞, 杨泽宇. 覆膜及秸秆还田对黄土高原旱地麦田根区土壤不稳定氮库、酶及氮挥发的影响[J/OL]. 中国生态农业学报: 中英文, 2025: 1-11. [2025-04-20]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGTN20250314001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- Wang S S, Li H T, Liu R, Yang Z Y. Effects of film mulching and straw retention on soil labile nitrogen pool, enzymes and ammonia volatilization in the root zone of winter wheat[J/OL]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025: 1-11. [2025-04-20]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGTN20250314001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ> (in Chinese)
- [14] López-Fando C, Pardo M T. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 278-284
- [15] 杨兰芳, 曾巧, 李海波, 闫静静. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 207-210
- Yang L F, Zeng Q, Li H B, Yan J J. Measurement of catalase activity in soil by ultraviolet spectrophotometry[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1): 207-210 (in Chinese)
- [16] Moiwo J P, Tao F L. Contributions of precipitation, irrigation and soil water to evapotranspiration in (semi)-arid regions[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(6): 1079-1089
- [17] Zhang Z, Zhang Y Q, Sun Z X, Zheng J M, Liu E K, Feng L S, Feng C, Si P F, Bai W, Cai Q, Yang N, van der Werf W, Zhang L Z. Plastic film cover during the fallow season preceding sowing increases yield and water use efficiency of rain-fed spring maize in a semi-arid climate[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 203-210
- [18] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987
- Zhou L K. *Soil Enzymology*[M]. Beijing: Science Press, 1987 (in Chinese)
- [19] 巩敬锦, 刘志娟, 祝光欣, 史登宇, 张镇涛, 付真真, 鲁潇蒙, 曲辉辉, 杨晓光. 基于 APSIM 模型的 2015—2100 年气候变化对中国玉米生产力影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 167-178
- Gong J J, Liu Z J, Zhu G X, Shi D Y, Zhang Z T, Fu Z Z, Lu X M, Qu H H, Yang X G. Effects of climate change on maize productivity in China during 2015 to 2100 based on APSIM model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(8): 167-178 (in Chinese)
- [20] 慕平. 黄土高原农田综合地力及碳汇特征对连续多年玉米秸秆全量还田的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012
- Mu P. Response of integrated soil fertility and carbon sequestration to continuous entire maize stalk returning into field in loess plateau [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2012 (in Chinese)
- [21] Wang Y P, Li X G, Zhu J, Fan C Y, Kong X J, Turner N C, Siddique K H, Li F M. Multi-site assessment of the effects of plastic-film mulch on dryland maize productivity in semiarid areas in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 220: 160-169
- [22] 谭凯敏, 杨长刚, 柴守玺, 常磊, 程宏波, 黄彩霞, 王燕培. 秸秆还田后覆膜镇压对旱地冬小麦土壤温度和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 159-164
- Tan K M, Yang C G, Chai S X, Chang L, Cheng H B, Huang C X, Wang Y P. Effect of mulching film after straw returning on soil temperature and grain yield of dryland winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(1): 159-164 (in Chinese)
- [23] 刘文国, 赵强, 杨艳美. 不同覆膜模式下秸秆还田及腐熟剂对土壤理化性状和玉米产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(24): 93-96
- Liu W G, Zhao Q, Yang Y M. Effects of straw returning and decomposing agent on soil physical and chemical properties and maize yield under different mulching modes[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(24): 93-96 (in Chinese)
- [24] 韩云良, 胡迎春, 张宁宁, 李雨泽, 廖允成, 秦晓梁, 温晓霞. 覆膜时期和方式对黄土高原春玉米耗水特性和产量的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(3): 362-371
- Han Y L, Hu Y C, Zhang N N, Li Y Z, Liao Y C, Qin X L, Wen X X. Effects of film mulching period and modes on water consumption characteristics and yield of spring maize in the Loess Plateau [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(3): 362-371 (in Chinese)
- [25] 梁鸡保, 贺晓, 张霞, 冯佰利. 陕北旱作区不同覆盖方式对春玉米土壤水分及产量的影响[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(8): 1-3
- Liang J B, He X, Zhang X, Feng B L. Effects of different mulching methods on soil moisture and yield of spring maize in dry farming area of northern Shaanxi[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 60(8): 1-3 (in Chinese)
- [26] 张建军, 党翼, 赵刚, 王磊, 樊廷录, 李尚中. 覆膜时期和施氮量对陇东旱塬玉米产量和水氮利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(3): 479-490
- Zhang J J, Dang Y, Zhao G, Wang L, Fan T L, Li S Z. Influences of mulching periods and nitrogen application rates on maize yield as well as water and nitrogen use efficiencies in Loess Plateau of eastern Gansu Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(3): 479-490 (in Chinese)
- [27] 钱锐, 刘洋, 郭茹, 杨玲, 梁霞, 张鹏, 任小龙, 贾志宽. 覆膜秸秆还田对旱作农田土壤水温及春玉米产量的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(4): 532-544
- Qian R, Liu Y, Guo R, Yang L, Liang X, Zhang P, Ren X L, Jia Z K. Effects of straw returning to field and plastic film mulching on soil water,

temperature and maize yield in upland fields[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(4): 532-544 (in Chinese)

- [28] 王永亮, 胥子航, 李申, 梁哲铭, 薛晓蓉, 白炬, 杨治平. 秸秆还田与花后灌溉提高春玉米产量及水氮利用效率[J]. 中国农业科学, 2023, 56(18): 3599-3614

Wang Y L, Xu Z H, Li S, Liang Z M, Xue X R, Bai J, Yang Z P. Straw returning and postsilking irrigating improve the grain yield and utilization of water and nitrogen of spring maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(18): 3599-3614 (in Chinese)

责任编辑: 申青苗



第一作者简介: 娄义晟, 硕士, 辽宁省农业科学院耕作栽培研究所助理研究员。主要从事旱地农业科学研究和技术推广工作, 现为国家创新人才推进计划重点领域创新团队——“北方旱地耕作制度创新团队”成员。先后参与国家重点研发计划课题、国家自然科学基金面上项目、辽宁省科技厅科技重大专项课题等省部级以上科研项目8项。作为主要完成人先后获得科技成果奖励2项, 其中辽宁省科学技术进步奖一等奖1项, 辽宁省农业科学院科技创新奖青年科技类奖励1项。获国家授权专利3项, 软件著作权3件。



通讯作者简介: 张哲, 博士, 研究员, 辽宁省农业科学院耕作栽培研究所副所长。主要从事旱地农业科学研究和技术推广工作, 现为国家创新人才推进计划重点领域创新团队——“北方旱地耕作制度创新团队”核心成员。兼任中国农学会耕作制度分会副秘书长、国家农业环境阜新观测实验站常务副站长。先后主持国家重点研发计划课题、国家自然科学基金面上项目、辽宁省科技厅科技重大专项课题等省部级以上科研项目18项。在 *Agricultural Water Management*、《农业工程学报》等国内外重要刊物发表论文52篇。作为主要完成人先后获得科技成果奖励13项, 其中辽宁省科学技术进步奖一等奖1项, 农业农村部神农中华农业科技奖优秀创新团队奖1项, 中国农业节水科技奖一等奖1项, 梁希林业科学技术奖二等奖1项; 获市(厅)级一等奖8项, 二等奖1项; 获国家授权专利12项, 软件著作权3件; 制定辽宁省地方标准9项。入选国家神农英才计划青年英才、辽宁省“兴辽英才”计划青年拔尖人才, 获辽宁青年科技奖“十大英才”荣誉称号。