

# 不同覆盖措施对旱区春小麦产量及碳效率的影响

王小燕<sup>1,2,3</sup>, 逢蕾<sup>1,2,3</sup>, 路建龙<sup>1,4</sup>, 胡南南<sup>1,2,3</sup>, 杨锦<sup>1,2,3</sup>,  
肖歆玥<sup>1,2,3</sup>, 张正伟<sup>1,2,3</sup>, 任磊<sup>1,2,3</sup>

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学植物生产类实验教学中心, 甘肃 兰州 730070;  
4. 甘肃农业大学水利水电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为实现旱区春小麦种植生产环境效益和经济效益双赢, 依托大田试验, 研究不同覆盖措施秸秆带状覆盖、地膜覆盖、秸秆碎秆覆盖和对照露地平作对旱区春小麦产量及碳效率的影响, 并对经济效益进行了评价。结果表明, 与露地平作相比, 地膜覆盖显著提高了生育期春小麦干物质积累量, 增幅为 37.58%; 秸秆带状覆盖提高了小麦开花期和收获期干物质积累量, 增幅分别为 32.65% 和 9.83%。秸秆碎秆覆盖、地膜覆盖千粒重较露地平作分别提高了 15.55%、21.91%。地膜覆盖碳投入总量增幅最大, 较露地平作增加 1 223.07 kg C/hm<sup>2</sup>。秸秆碎秆覆盖较露地平作籽粒碳和植株碳产出量分别提高了 38.41% 和 23.34%。秸秆带状覆盖提高了碳生产效率、碳经济效率、碳生态效率, 增幅分别为 0.58%、0.45%、0.24%。秸秆碎秆覆盖经济效益为 3 882.69 元, 较露地平作增加 22.7%。综合表明, 各覆盖措施均能提高春小麦产量和经济效益, 其中秸秆带状覆盖显著提高了碳生产效率、碳经济效率和碳生态效率。

**关键词:** 秸秆带状覆盖; 地膜覆盖; 秸秆碎秆覆盖; 产量; 碳效率

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2024)06-0515-07

doi:10.3969/j.issn.2097-2172.2024.06.005

## Effects of Different Mulching Measures on the Yield and Carbon Efficiency of Spring Wheat in Arid Area

WANG Xiaoyan<sup>1,2,3</sup>, PANG Lei<sup>1,2,3</sup>, LU Jianlong<sup>1,4</sup>, HU Nannan<sup>1,2,3</sup>, YANG Jin<sup>1,2,3</sup>, XIAO Xinyue<sup>1,2,3</sup>,  
ZHANG Zhengwei<sup>1,2,3</sup>, REN Lei<sup>1,2,3</sup>

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Habitat Crops, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. College of Agriculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China; 3. Plant Production Experimental Teaching Centre of Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China; 4. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China)

**Abstract:** In order to achieve both environmental benefits and economic benefits of spring wheat planting in arid areas, based on field experiments, effects of different mulching measures, such as straw strip mulching, plastic film mulching, crushed straw mulching and open field flat planting, on the yield and carbon efficiency of spring wheat in arid areas were studied, and the economic benefits were evaluated. Results showed that compared with open field flat planting, plastic film mulching significantly increased the dry matter accumulation of spring wheat during the whole growth period with an increase of 37.58%. Straw strip mulching increased the dry matter accumulation at wheat flowering and harvesting stages by 32.65% and 9.83%, respectively. The 1000-grain weight of crushed straw mulching and plastic film mulching were increased by 15.55% and 21.91%, respectively, compared with open field flat planting. Plastic film mulching had the largest increase in total carbon input, which was 1 223.07 kg C/ha higher than that of open field flat planting. Compared with open field flat planting, crushed straw mulching increased grain carbon and plant carbon yield by 38.41% and 23.34%, respectively. Straw strip mulching improved carbon production efficiency, carbon economic efficiency and carbon ecological efficiency by 0.58%, 0.45% and 0.24%, respectively. In addition, the economic benefit of

收稿日期: 2024-04-16; 修订日期: 2024-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160525); 甘肃省自然科学基金(20JR5RA034); 甘肃农业大学大学生创新创业训练计划项目(202401057、202401058)。

作者简介: 王小燕(1994—), 女, 甘肃定西人, 硕士研究生, 研究方向为土壤养分。Email: 2943098544@qq.com。

通信作者: 逢蕾(1979—), 女, 山东诸城人, 副教授, 硕导, 研究领域为作物栽培与生态生理。Email: 125530457@qq.com。

crushed straw mulching was 3 882.69 Yuan, which was 22.7% higher than that of open field flat planting. Therefore, each mulching measure could improve the yield and economic benefits of spring wheat, and the straw strip mulching could significantly increase the carbon production efficiency, carbon economic efficiency and carbon ecological efficiency.

**Key words:** Straw strip mulching; Plastic film mulching; Crushed straw mulching; Yield; Carbon efficiency

小麦作为我国重要的粮食作物之一，主要分布于旱区，是西北半干旱雨养农业区最主要的粮食作物<sup>[1]</sup>。水资源是制约春小麦产量的主要因素<sup>[2]</sup>。干旱是影响作物生长发育、全球粮食安全并阻碍农业可持续发展的主要因素<sup>[3]</sup>，对农业生产造成了极大影响<sup>[4]</sup>。覆盖技术是一种促进作物增产的管理措施，具有保墒、改善土壤结构、提高土壤养分含量的作用<sup>[5]</sup>。常用的覆盖方式有地膜和秸秆两种，其中地膜覆盖是用塑料薄膜覆盖地表的一种栽培技术，它可以改变土壤水分和温度条件，进而促进增产<sup>[6]</sup>；秸秆带状覆盖是旱作农业的重要技术，分覆盖带和种植带，两带相间分布，可用于旱地小麦的栽培<sup>[7]</sup>。碎秆覆盖是指将粉碎的秸秆覆盖于作物之上，有利于秸秆腐解，提高土壤肥力。碎秆覆盖也能减少水分蒸散，缓和作物耗水和土壤供水间矛盾。覆盖可保温、保湿，改善土壤结构，从而增加产量<sup>[8]</sup>；覆盖还可调控春小麦土壤水热条件，促进作物光合作用，影响春小麦干物质积累<sup>[9]</sup>，覆盖下株高、穗长等产量构成要素均显著增加<sup>[7]</sup>。地膜覆盖、碎秆覆盖和秸秆覆盖有利于增温保墒，而增温可促进马铃薯根系的生长发育和干物质积累。地膜覆盖还能减少土壤蒸发，保持水分，进而提高产量<sup>[10-11]</sup>，秸秆带状覆盖可显著提高作物干物质积累量和产量<sup>[12]</sup>，适宜的覆盖措施还能提高小麦碳效率和经济效益。地膜覆盖对环境的调节和增产幅度优于秸秆覆盖，但地膜覆盖造成的白色污染对环境影响较大，使其使用备受争议<sup>[13]</sup>；秸秆覆盖可使秸秆风化入土，循环往复能促进秸秆资源高效利用。

碳作为农业生产系统中的一种重要资源，是作物生长发育和产量形成的物质基础和作物重要的能量来源，可直接影响其产量和品质<sup>[14]</sup>；其利用效率是指排放单位数量碳所产出的经济产量和经济价值等有效价值量，提高碳效率是促进农业固碳减排的关键途径。Dubey 等<sup>[15]</sup>通过对美国农业碳效率的测算，进而评价了其农业生产可持续性；刘利平等<sup>[16]</sup>通过测算我国农业碳效率，认为碳效

率有利于我国农业可持续发展；Burney 等<sup>[17]</sup>研究发现，农业碳效率可推动其碳汇能力的提高。作物系统有突出固碳减排提高生态效益的潜力，碳效率提高有利于农业节能减排<sup>[18]</sup>。我们通过大田试验，分析了秸秆带状覆盖、秸秆碎秆覆盖和地膜覆盖对旱区春小麦产量的影响，并结合农田投入、碳效率和经济效益进行了可持续性评价，以期为旱区作物增产、提高经济效益和可持续生产提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验设在甘肃省定西市安定区团结镇唐家堡村甘肃省农业科学院旱作农业试验基地(104° 36' E, 35° 35' N)。该地区海拔 1 970 m，年均气温 6.2 °C，年辐射总量 5 898 MJ/m<sup>2</sup>，年日照时数 2 500 h，≥ 10 °C 积温 2 075.1 °C，无霜期 140 d，属于中温带半干旱气候。该区域为典型旱地雨养农业区，年降水量 415 mm，6—9 月降水量占全年的 68%，降水相对变率 24%，400 mm 降水保证率为 48%。春小麦生育期有效降水量 117.6 mm (≥ 5 mm)，平均温度 16.39 °C (图 1)。试验地土壤速效氮、速效磷和速效钾含量分别为 5.60、7.89、128.25 mg/kg，前茬玉米。

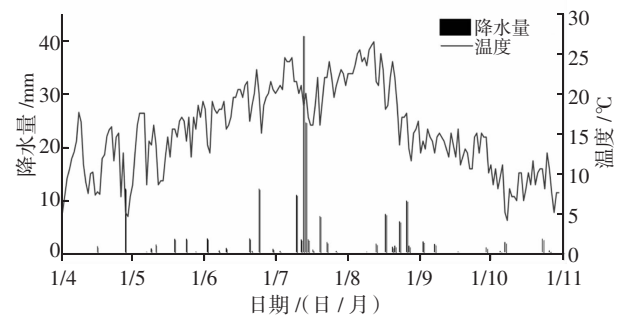


图 1 2022 年春小麦全生育期降水量与温度分布

### 1.2 供试品种

指示春小麦品种为陇春 35 号，由甘肃省农业科学院小麦研究所提供。

### 1.3 试验设计

试验共设 4 个处理，分别为秸秆带状覆盖 (T<sub>SM</sub>) 处理：将玉米秸秆整秆呈条带状覆盖于土壤表

面, 其中秸秆覆盖带宽 50 cm, 种植带宽 50 cm, 两带相间排列, 秸秆(风干基)覆盖量为 9 000 kg/hm<sup>2</sup>; 秸秆碎秆覆盖(T<sub>SR</sub>)处理: 玉米秸秆铡成 5 cm 左右的碎秆, 春季整地时翻入土中还田, 碎秆(风干基)覆盖量为 9 000 kg/hm<sup>2</sup>; 地膜覆盖(T<sub>PM</sub>)处理: 黑色地膜全膜覆盖; 露地平作(T<sub>CK</sub>)处理, 传统露地平作。试验随机区组排列, 重复 3 次, 小区面积 35 m<sup>2</sup>(7 m × 5 m)。采用穴播种植, T<sub>CK</sub>、T<sub>PM</sub>和 T<sub>SR</sub> 处理行距均为 55 cm、株距均为 30 cm。T<sub>SM</sub> 处理在距离秸秆覆盖带边缘 10 cm 处按“品”字形播种, 行距和株距均为 30 cm。所有处理结合旋耕整地一次性施入基肥 N 200 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 250 kg/hm<sup>2</sup>, 生育期内不再追肥。

#### 1.4 样品采集及测定

1.4.1 干物质 选具有代表性 3 个生育时期(拔节期、开花期和收获期), 每小区分别取春小麦全株 20 株, 烘干后测定干物质质量<sup>[19]</sup>。

1.4.2 产量 春小麦收获期去边行, 按小区单打单收, 测实产<sup>[20]</sup>。

1.4.3 产量构成要素 春小麦收获期, 各小区随机选取 20 株春小麦全株, 测定株高、穗长、穗重、穗粒数和千粒重<sup>[19]</sup>。

#### 1.5 计算指标及方法

$$CI = \sum_{i=0}^n Ci = \sum_{i=0}^n (m\beta)_i$$

式中,  $CI$  为作物的碳投入总量,  $n$  表示该作物从播种到收获整个过程消耗了  $n$  种能源,  $C_i$  表示第  $i$  种能源或农资的碳排放量,  $m$  为消耗第  $i$  种能源或农资的量,  $\beta$  为第  $i$  种能源或农资的碳排放参数, 碳投入量统一用碳当量来表示单位是 kg C<sup>[21]</sup>。

$$EP = \frac{CG}{CI}$$

式中,  $EP$  为碳生产效率,  $CG$  为作物籽粒含碳量,  $CI$  为碳投入量, 籽粒含碳量通过籽粒产量和籽粒含碳量估算, 籽粒含碳率为 47%<sup>[21]</sup>。

$$Ee = \frac{Cc}{CI}$$

式中,  $Ee$  为碳生态效率,  $CI$  指碳投入量,  $Cc$  指植株含碳量<sup>[21]</sup>。

$$CE = (CG \times P) / CI$$

式中,  $CE$  为碳经济效率,  $P$  为经济产量的销售价格,  $CG$  为作物籽粒含碳量,  $CI$  为碳投入量<sup>[22]</sup>。

$$CG = M \times (1-w) \times 0.45$$

式中,  $M$  为经济产量,  $w$  为经济产量的含水量, 0.45 为生物量与含 C 量的转化系数<sup>[22]</sup>。

$$Cc = CG / H - CG$$

式中,  $Cc$  为植株含 C 量,  $H$  为经济系数,  $CG$  为籽粒的含 C 量<sup>[22]</sup>。

经济效益 = 经济产量 × 市场价格 - 生产成本<sup>[23]</sup>。

#### 1.6 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理, 采用 SPSS 21.0 软件分析数据。用新复极差法(Duncan 法)进行多重比较, 显著性水平设置为  $P < 0.05$ 。用 Origin 2021 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同覆盖措施对春小麦干物质积累的影响

随生育时期的推进, 春小麦干物质积累量增加。覆盖处理均可以提高春小麦干物质积累量, 地膜覆盖增长幅度最大, 秸秆带状覆盖干物质积累量小于秸秆碎秆覆盖。由图 2 可知, 干物质积累量拔节期 T<sub>PM</sub> 处理比 T<sub>CK</sub> 处理提高 32.30% ( $P < 0.05$ ), 开花期 T<sub>PM</sub>、T<sub>SR</sub>、T<sub>SM</sub> 处理较 T<sub>CK</sub> 处理分别提高 60.00%、40.82%、32.65% ( $P < 0.05$ ), 收获期 T<sub>PM</sub>、T<sub>SM</sub> 处理较 T<sub>CK</sub> 处理分别提高 20.44%、9.83% ( $P < 0.05$ )。T<sub>PM</sub> 处理能显著提高生育期春小麦物质积累量, 较 T<sub>CK</sub> 处理提高 37.58%。

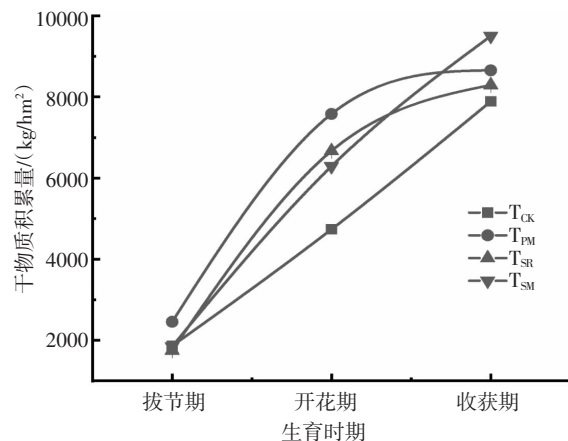


图 2 不同覆盖措施对春小麦不同生育时期干物质积累的影响

### 2.2 不同覆盖措施对春小麦产量及其构成要素的影响

由表 1 可知, T<sub>SM</sub>、T<sub>PM</sub>、T<sub>SR</sub> 处理均可提高春小麦株高、穗长、穗重、穗粒数及千粒重。其中株高、穗长、穗重、千粒重均以 T<sub>PM</sub> 处理最高, 分别

较  $T_{CK}$  增加 9.77%、15.37%、23.37%、21.91%；其次是  $T_{SR}$  处理，分别较  $T_{CK}$  增加 6.26%、6.09%、16.84%、15.55%。穗粒数以  $T_{PM}$  处理最高，较  $T_{CK}$  增加 12.20%；其次是  $T_{SM}$  和  $T_{SR}$  处理，均较  $T_{CK}$  增加 4.88%。

表 1 不同覆盖措施对春小麦产量及其构成要素的影响

处理	株高 /cm	穗长 /m	穗重 /g	穗粒数 /粒	千粒重 /g
$T_{CK}$	59.95 bc	10.02 a	2.91 ab	41 ab	37.48 d
$T_{PM}$	65.81 a	11.56 a	3.59 a	46 a	45.69 a
$T_{SR}$	63.70 ab	10.63 a	3.40 a	43 ab	43.31 b
$T_{SM}$	62.11 c	10.23 a	3.23 b	43 b	39.61 c

2.3 不同覆盖措施下农田碳效率评估

用投入量及对应的碳排放系数，将种子、肥

料、人工和地膜折算成碳投入量(表 2)。由图 3 可知， $T_{SR}$ 、 $T_{SM}$ 、 $T_{PM}$  处理的碳投入量较  $T_{CK}$  分别增加 442.36、110.68、1 223.07 (kg·C)/hm<sup>2</sup>，不同农田管理措施均能引起碳投入总量变化。与  $T_{CK}$  相比， $T_{SR}$ 、 $T_{SM}$ 、 $T_{PM}$  籽粒碳产出量分别提高了 38.41%、10.87%、39.86%，植株碳产出量分别提高了 23.34%、11.15%、38.68%( $P<0.05$ )。

秸秆带状覆盖可提高碳生产效率、碳经济效率和碳生态效率。由图 4 可知，与  $T_{CK}$  相比， $T_{SM}$  碳生产效率、碳经济效率和碳生态效率提高 0.58%、0.45%和 0.24%。其他处理受碳投入总量的影响导致碳生产效率、碳经济效率和碳生态效率较低，表明秸秆带状覆盖可增强作物碳汇能力。

表 2 农田生产物资投入量和碳排放系数<sup>①</sup>

生产物资	$T_{CK}$ / (kg/hm <sup>2</sup> )	$T_{PM}$ / (kg/hm <sup>2</sup> )	$T_{SR}$ / (kg/hm <sup>2</sup> )	$T_{SM}$ / (kg/hm <sup>2</sup> )	碳排放系数 / [(kg·C)/kg]
种子	172.50	172.50	172.50	172.50	0.11
复合肥	250.00	250.00	250.00	250.00	0.90
尿素	200.00	200.00	200.00	200.00	1.74
人工	55.20	172.50	110.40	69.00	920.00
地膜		54.75			5.18

①数据来源于农田生产实际记录。

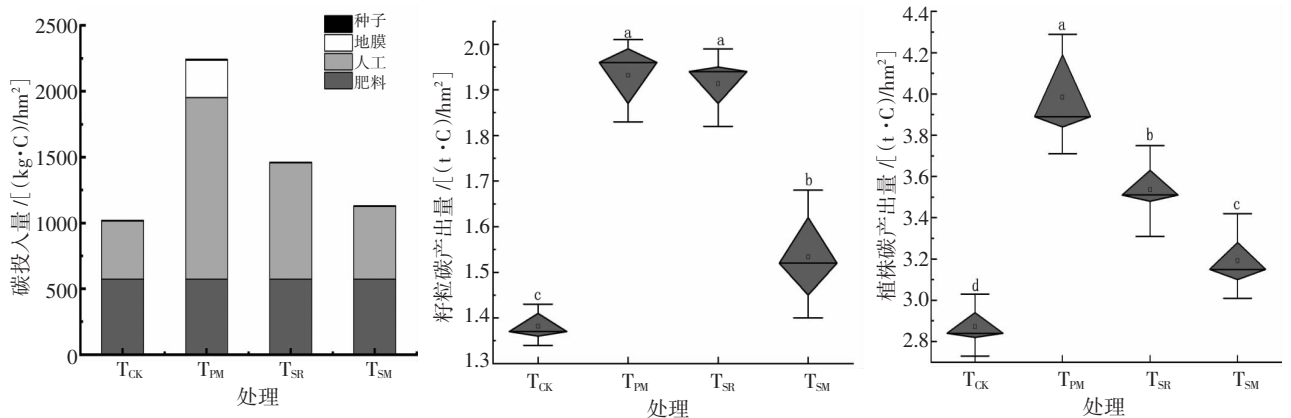


图 3 不同覆盖措施下农田碳投入量、籽粒和植株碳产出量

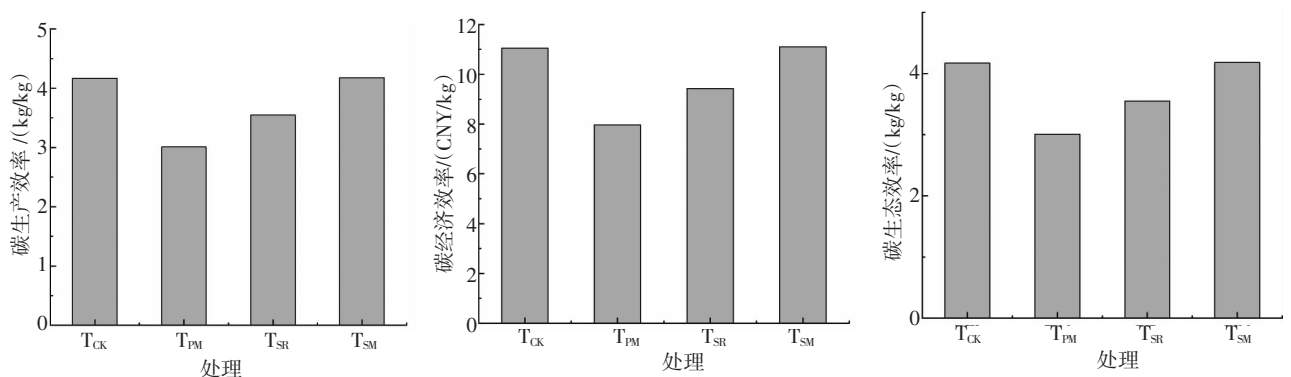


图 4 不同覆盖措施下农田碳生产效率、碳经济效率和碳生态效率

## 2.4 经济效益评价

由表3可以看出,与 $T_{CK}$ 相比,覆盖材料投入高出600~2400元/hm<sup>2</sup>。由于在播前覆膜和覆盖秸秆以及收获后残膜回收需人工投入,各处理用工投入800~2500元/hm<sup>2</sup>;其他投入相同,均为7300元/hm<sup>2</sup>。不同覆盖措施下的产值为11264.35~15621.54元/hm<sup>2</sup>,各处理从高到低依次为 $T_{PM}$ 、 $T_{SR}$ 、 $T_{SM}$ 、 $T_{CK}$ ;经济效益为3882.69~3164.35元/hm<sup>2</sup>,各处理从高到低依次为 $T_{SR}$ 、 $T_{SM}$ 、 $T_{PM}$ 、 $T_{CK}$ ,其中 $T_{SR}$ 、 $T_{SM}$ 、 $T_{PM}$ 处理比 $T_{CK}$ 分别增加22.7%、15.2%、8.13%。由此可知,秸秆带状覆盖和地膜覆盖均可提高经济效益,且以秸秆碎秆覆盖为最好。

## 3 讨论与结论

干物质积累是产量形成的基础,覆盖措施在改善土壤环境的同时,通过调节春小麦的生长影响春小麦的产量。地膜覆盖、秸秆碎秆覆盖和秸秆带状覆盖有利于增温保墒,而增温可促进春小麦根系的生长发育和干物质积累<sup>[24-25]</sup>。秸秆还田是一种农田培肥措施<sup>[26]</sup>,能提高土壤肥力,进而促进作物增产<sup>[27]</sup>。解文艳等<sup>[28]</sup>和谭德水等<sup>[29]</sup>认为,秸秆还田还能减少土壤肥力消耗,促进增产。秸秆和地膜覆盖可协调土壤水肥关系,有利于提高产量及其构成要素<sup>[30]</sup>。覆盖可作用于作物的生长发育,进而影响干物质积累量<sup>[31]</sup>。本研究表明,与露地平作处理相比,地膜覆盖显著提高了生育期春小麦干物质积累量,增幅为37.58%;秸秆带状覆盖处理提高了开花期和收获期干物质积累量,增幅分别为32.65%和20.44%。与常磊等<sup>[32]</sup>研究结论一致;秸秆带状覆盖处理处理下株高有所提高,与刘祖贵等<sup>[24]</sup>的研究结论吻合。地膜覆盖处理下株高提高9.77%,与李尚中等<sup>[33]</sup>地膜覆盖可提高株高的研究结果一致。杨佳佳等<sup>[34]</sup>研究发现,地膜覆盖可促进春小麦干物质积累量,与本研究结

果一致。可见秸秆覆盖能改善春小麦产量构成要素<sup>[35-36]</sup>,提高干物质积累量<sup>[37]</sup>,这与本研究结论一致,干物质积累是春小麦籽粒形成的关键,较多干物质积累量是作物籽粒产量增加的前提<sup>[38]</sup>。春小麦产量取决于穗数、穗粒数和千粒重,本试验中地膜覆盖处理、秸秆碎秆覆盖处理千粒重比对照露地平作分别提高了21.91%、15.55%,这与吕莹莹等<sup>[39]</sup>的研究结果一致,可能是因为试验年春小麦灌浆期温度低但降水多所致。

农田管理措施、耗资量、覆盖方式和产量的差别,导致碳效率(碳生产效率、碳经济效率和碳生态效率)产出不同。本研究发现,各处理均可增加籽粒碳产出量、植株碳产出量、碳效率、碳投入总量和纯收益,秸秆带状覆盖处理的碳效率高干于对照露地平作。由于增加了人工和地膜投入,地膜覆盖处理碳投入总量增幅最大,较露地平作增加1223.07kg C/hm<sup>2</sup>。秸秆碎秆覆盖处理较露地平作处理籽粒碳和植株碳产出量分别提高了38.41%和23.34%。秸秆带状覆盖处理提高了碳生产效率、碳经济效率和碳生态效率,增幅分别为0.58%、0.45%和0.24%。秸秆碎秆覆盖处理经济效益为3882.69元,较露地平作处理增加22.7%。秸秆带状覆盖处理的投入少但产出多,该处理的碳效率高干于其他处理是合理的,这与王良等<sup>[40]</sup>研究结论吻合。各处理间碳效率差异是由于投入量不同,这与史磊刚等<sup>[21]</sup>研究一致。地膜覆盖处理和秸秆碎秆覆盖处理在播种初期需人工覆膜和粉碎,地膜覆盖处理的经济投入也大于秸秆带状覆盖处理,因为地膜成本和人工投入比秸秆高。各处理的碳投入构成中,化肥和人工占比最大,表明农业生产中化肥浪费严重<sup>[41]</sup>。基于此,节约化肥、提高化肥利用效率是提高作物碳效率的重要举措。植株碳产出量明显高于籽粒碳产出量。针对我国

表3 不同覆盖措施生产成本和经济效益<sup>①</sup>

处理	部分投入			总投入	产值	经济效益
	覆盖材料	其他	用工投入			
$T_{CK}$		7 300	800	8 100	11 264.35	3 164.35
$T_{PM}$	2 400	7 300	2 500	12 200	15 621.54	3 421.54
$T_{SR}$	1 000	7 300	1 600	9 900	13 782.69	3 882.69
$T_{SM}$	600	7 300	1 000	8 900	12 545.44	3 645.44

<sup>①</sup>产值按2022年春小麦价格3.2元/kg计算,其他投入包括翻耕地、种子、肥料和设备。

目前存在秸秆利用效率低的现状<sup>[42]</sup>, 促进秸秆有效利用技术的推进是提高作物碳效率的关键, 应用适宜的覆盖方式对作物碳效率提高有举足轻重的作用。

本试验表明, 随生育时期的推进, 春小麦干物质积累量逐渐增加, 秸秆带状覆盖提高了春小麦开花期和收获期干物质积累量, 秸秆带状覆盖、秸秆碎秆覆盖和地膜覆盖均提高了春小麦千粒重, 地膜覆盖还提高了株高。由于人工投入和覆盖材料的差异, 地膜覆盖的碳投入量最多, 秸秆碎秆覆盖次之, 秸秆带状覆盖最少。秸秆带状覆盖、秸秆碎秆覆盖和地膜覆盖均提高了籽粒碳产出量和植株碳产出量。秸秆带状覆盖提高了碳生产效率、碳经济效率和碳生态效率。各覆盖处理均可提高经济效益。综上, 秸秆带状覆盖、秸秆碎秆覆盖和地膜覆盖可提高春小麦干物质积累量、千粒重和经济效益, 秸秆带状覆盖还提高了碳生产效率、碳经济效率和碳生态效率, 起到固碳减排的效应。

#### 参考文献:

- [1] 刘江, 赵福年, 杨红燕, 等. 半干旱雨养农业区春小麦水分利用效率变化及其年型划分[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(9): 822–830.
- [2] 鲁英超, 李娜, 姜颖. 干旱胁迫对小麦形态与生理指标及产量影响的研究进展[J]. 现代农业科技, 2023(16): 10–13.
- [3] WANG X Y, DENG Y S, GAO L Y, et al. Series-temporal transcriptome profiling of cotton reveals the response mechanism of phosphatidylinositol signaling system in the early stage of drought stress[J]. Elsevier Bv, 2022, 114(5): 110465.
- [4] 钱玉平, 田慧慧, 程宏波, 等. 秸秆覆盖及播种方式对马铃薯耗水特性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 826–834.
- [5] FAN M S, LU S H, JIANG R F, et al. Long-term non-flooded mulching cultivation influences rice productivity and soil organic carbon[J]. Soil Use and Management, 2012, 28(4): 544–550.
- [6] KADER M A, SENGE M, MOJID M A, et al. Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 168: 155–166.
- [7] 周彦莉, 吴海梅, 周彦栋, 等. 短期秸秆不同还田方式对土壤结构和水分影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 502–509.
- [8] 李尚中, 樊廷录, 赵刚, 等. 旱地玉米不同覆盖栽培模式的土壤水热特征及产量品质效应[J]. 草业学报, 2018, 27(4): 34–44.
- [9] 常磊, 韩凡香, 柴雨葳, 等. 秸秆带状覆盖对半干旱雨养区冬小麦耗水特征和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4150–4158.
- [10] ZHANG Y Q, WANG J D, GONG S H, et al. Effects of film mulching on evapotranspiration, yield and water use efficiency of a maize field with drip irrigation in northeastern China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 205: 90–99.
- [11] WANG L, LI X G, GUAN Z H, et al. The effects of plastic-film mulch on the grain yield and root biomass of maize vary with cultivar in a cold semiarid environment[J]. Field Crops Research, 2018, 216(18): 89–99.
- [12] ČERNÝ J, BALÍK J, KULHÁNEK M, et al. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments[J]. Plant, Soil and Environment. 2010, 56(1): 28–36.
- [13] 王淑英, 樊廷录, 李尚中, 等. 半干旱区青贮玉米生物降解地膜覆盖栽培技术规程[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(7): 674–678.
- [14] 温蕊, 陈茜午, 赵雅杰, 等. 西北黄土高原旱作区不同地膜覆盖种植模式谷田水温效应及水分利用效率研究[J]. 作物杂志, 2022(6): 111–117.
- [15] DUBEY A, LAL R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India and Ohio, USA[J]. Journal of Crop Improvement, 2009, 23(4): 332–350.
- [16] 刘利平, 丰华为, 杨阳, 等. 基于DEA的我国省际农业碳效率研究[J]. 中国集体经济, 2012(7): 92–93.
- [17] BURNEY J A, DAVIS S J, LOBELL D B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107: 12052–12057.
- [18] CANADELL J G, LE QUERE C, RAUPACH M R, et al. Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 18866–18870.
- [19] 杨梅, 李雪萌, 秦保平, 等. 水氮运筹对强筋小麦干物质转运与籽粒产量的影响[J/OL]. 麦类作物学报, 1–10.(2024-04-01)[2024-05-21]. <http://kns.cn->

- ki.net/kcms/detail/61.1359.S.202403271705.012.html.
- [20] 吕丽华, 吴立勇, 李 谦, 等. 播期对小麦产量形成及株型结构的影响[J/OL]. 华北农学报, 1-10. (2024-04-09)[2024-05-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1101.S.20240403.1504.004.html>.
- [21] 史磊刚, 范士超, 孔凡磊, 等. 华北平原主要作物生产的碳效率研究初报[J]. 作物学报, 2011, 37(8): 1485-1490.
- [22] 陈中督, 吴 尧, 遆晋松, 等. 湖南省双季稻生产系统碳效率[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 87-92.
- [23] 韩 笑, 张 晋, 石 吕, 等. 稻秸秆间集覆宽窄行播种技术下小麦经济效益和碳效率分析[J]. 大麦与谷类科学, 2023, 40(2): 62-67.
- [24] 刘祖贵, 肖俊夫, 孙景生, 等. 土壤水分与覆盖对夏玉米生长及水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(3): 86-91.
- [25] 李明松, 吕美琴, 吴 俐, 等. 覆膜栽培对春大豆生长发育及产量的影响[J]. 福建农业科技, 2017(10): 10-13.
- [26] 张立勤, 车宗贤, 张久东, 等. 小麦秸秆绿肥协同还田生产技术[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(12): 1166-1169.
- [27] 许咏梅, 刘 骅, 王西和. 长期施肥下新疆灰漠土有机碳及作物产量演变[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 154-162.
- [28] 解文艳, 周怀平, 杨振兴. 秸秆还田方式对褐土钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 936-942.
- [29] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 长期施钾与秸秆还田对华北潮土和褐土区作物产量及土壤钾素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 106-112.
- [30] 王文达, 霍轶珍, 韩翠莲. 不同覆盖方式对土壤水肥热状况及玉米产量的影响[J]. 节水灌溉, 2017(7): 38-41.
- [31] 殷 文, 陈桂平, 郭 瑶, 等. 春小麦秸秆还田对后茬玉米干物质积累及产量形成的调控效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8): 1210-1218.
- [32] 常 磊, 韩凡香, 柴雨葳, 等. 秸秆带状覆盖下冬小麦干物质积累及氮磷钾素的吸收利用[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(4): 487-494.
- [33] 李尚中, 樊廷录, 赵 晖, 等. 不同地膜覆盖栽培模式对玉米产量、水分利用效率和品质的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(10): 182-191.
- [34] 杨佳佳, 程宏波, 柴守玺, 等. 不同覆盖栽培方式对冬小麦干物质分配与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(6): 745-751.
- [35] 高 飞, 贾志宽, 路文涛, 等. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 777-783.
- [36] 朱瑞祥, 薛少平, 张秀琴, 等. 机械化玉米秸秆还田对土壤水肥状况的动态研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 39-42.
- [37] 屈会娟, 李金才, 沈学善, 等. 秸秆全量还田对冬小麦不同小穗位和粒位结实粒数和粒重的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(10): 2176-2183.
- [38] 傅晓艺, 王红光, 刘志连, 等. 不同水分处理对小麦氮素和干物质积累与分配的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(8): 955-963.
- [39] 吕莹莹, 马建涛, 李亚伟, 等. 不同覆盖方式对旱地玉米农田水分和产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(5): 80-88.
- [40] 王 良, 刘元元, 钱 欣, 等. 单季麦秸还田促进小麦-玉米周年碳效率和经济效益协同提高[J]. 中国农业科学, 2022, 55(2): 350-364.
- [41] 倪思洁. 化肥一边浪费矿源一边乏匮[J]. 农村·农业·农民(B版), 2014(4): 19-21.
- [42] 龙 欣, 廖超林. 湘西自治州秸秆资源综合利用状况分析[J]. 湖南农业科学, 2019(12): 42-44.