

# 黄土高原休闲期深松后覆盖播种对旱地小麦产量的影响

杨清山, 孙敏, 高志强, 张慧芋, 张娟, 梁艳妃, 李念念

(山西农业大学农学院, 山西 太谷 030801)

**摘要:**为明确旱地麦田休闲期深松、生育期覆盖对土壤水分的影响及其与产量构成因素的关系,探索旱地小麦增产增效的最佳蓄水保墒土壤管理技术,于2014–2016年在山西省闻喜县旱地麦田进行大田裂区试验,以休闲期深松和当地传统耕作(对照)为主区,以全膜覆土穴播、膜际条播、常规条播三种播种方式为副区,研究休闲期深松、生育期覆盖播种对土壤水分和产量及其构成因素的影响。结果表明:两试验年度休闲期深松耕作显著提高了播种期土壤蓄水量,0~300 cm土层较传统耕作多蓄水达24~33 mm;越冬–成熟期土壤蓄水量提高了12%~16%,休闲期土壤蓄水效率显著提高了18%~24%,降水生产效率提高了6%~11%,水分利用效率显著提高了15%~23%。2 a休闲期深松较对照小麦产量分别提高了12%~16%、18%~24%。休闲期深松条件下两种覆盖播种模式较常规条播产量显著提高了9%~13%、8%~21%;对照条件下,产量分别提高了6%~13%、12%~19%。2 a膜际条播较全膜覆土穴播产量分别提高了3%~7%、6%~12%,降水生产利用效率和水分利用效率均以膜际条播最高。年份对产量和穗数有极显著影响,休闲期深松效果大于播种方式效果。此外,本试验条件下,穗数的形成与越冬期上层土壤水分、拔节期中层土壤水分、孕穗期深层土壤水分相关性极显著。产量的形成与越冬期上层、拔节期上层和中层、孕穗期和开花期深层水分相关性极显著。休闲期深松可实现蓄水增产,土壤蓄墒每增加1 mm,2 a休闲期增墒增产分别达26 kg·hm<sup>-2</sup>、46 kg·hm<sup>-2</sup>,且结合膜际条播蓄水对产量的贡献最高。总之,休闲期采用深松、生育期采用覆盖,均有利于提高花前土壤水分,增产主要通过提高穗数来实现,且降水少的年份增产效果明显。因此,休闲期深松结合生育期膜际条播处理是兼顾高产蓄水高效的耕作栽培方式。

**关键词:**旱地小麦; 休闲期深松; 覆盖播种; 土壤水分; 产量

**中图分类号:**S512.1;S35 **文献标志码:**A

## Effect of sowing-mulching following subsoiling in fallow period on wheat yield in arid area on the Loess Plateau

YANG Qing-shan, SUN Min, GAO Zhi-qiang, ZHANG Hui-yu, ZHANG Juan, LIANG Yan-fei, LI Nian-nian  
(College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

**Abstract:** In order to better understand the effect of subsoiling in fallow period and sowing-mulching in growth stage on soil water in wheat field and its relationship with the yield components, we studied the soil management technology of retaining water and soil moisture for improving yield and water efficiency on dry land wheat. In 2014–2016, a split field experiment was carried out in Wenxi County in Shanxi Province. The subsoiling in fallow period and traditional farming (contrast) were used, and other treatments included film-covering soil hole sowing (FSH), film-mulch sowing (FM) and drilling sowing (DS). The results showed that in the two experimental years, the subsoiling in fallow period significantly improved the soil moisture at the sowing stage. The moisture in the 0~300 cm soil layer was between 24~33 mm more than that in the traditional farming; the water storage during the over-wintering-maturity period was increased by 12%~16%. In fallow period, soil water storage efficiency was significantly improved by 18%~24%, and the precipitation production efficiency was significantly increased by 6%~11%, and

收稿日期:2018-06-28

修回日期:2019-02-27

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项经费(CARS-03-01-24);作物生态与旱作栽培生理山西省重点实验室课题(201705D111007)

作者简介:杨清山(1992–),男,山西祁县人,硕士,研究方向为旱作栽培与作物生态。E-mail:15035639710@163.com

通信作者:高志强(1964–),男,山西中阳人,教授,博士生导师,主要从事小麦栽培高产优质形成机理与生产技术研究。E-mail:gaozhiqiang1964@126.com

water use efficiency was significantly increased by 15%~23%. Compared with CK, the yields of subsoiling treatment during fallow period in the two experimental years were increased by 12%~16%, 18%~24%, respectively. Compared with DS, under the subsoiling conditions, yields of two coverage sowing modes significantly increased by 9%~13% and 8%~21%. Under the CK condition, the yield increased by 6%~13%, 12%~19%. During those two experimental years, the wheat yield of FM was higher than FSH, and increased by 3%~7%, 6%~12%, respectively. The precipitation production efficiency and water use efficiency were the highest among FM. Moreover, the year had a significant effect on yield and spike number, and the tillage of subsoiling effect during the fallow period was greater than the sowing mode effect. In addition, under the conditions of this experiment, the formation of number of ears was significantly correlated to the soil moisture at the upper layer of soil in winter, the middle layer of soil at jointing stage, and the deep layer of soil at booting stage. The formation of yield was significantly correlated to the soil moisture in upper layer of soil in winter, upper and middle layer of soil at jointing stage, deep layer of soil at booting stage and anthesis stage. In the fallow period, the tillage of subsoiling increased water storage and production, for every 1 mm increased in soil water storage, the increase in moisture and yield during two years was 26 kg·hm<sup>-2</sup> and 46 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively, and the combination of FM contributed the highest yield. In short, subsoiling during fallow period and coverage at growth stage were conducive to improve soil moisture before flowering mainly by increasing number of spikes to achieve higher yield. Its effect in increasing yield in years with less precipitation was more significant. Therefore, subsoiling in fallow period combined with FM during growth period is a better technique in obtaining high-yield, water-storage and high-efficiency cultivation.

**Keywords:** dryland wheat; subsoiling during fallow period; sowing-mulching; soil moisture; yield

山西省黄土高原半干旱地区自然降雨大约60%集中在小麦夏闲期(7-9月),如何运用合理的耕作与覆盖措施,充分接纳与利用有限水资源来解决本省小麦因水分亏缺而低产的问题,是本省农业生产一直关注的主要课题<sup>[1-2]</sup>。前人关于旱地小麦耕作蓄水与覆盖保水的理论研究与技术研发两方面均已取得了较大进展。休闲期深松可改善土壤结构,增加土壤对降水的蓄积能力,提高冬小麦播前土壤含水量<sup>[3-4]</sup>。周兴祥等<sup>[5]</sup>与杨永辉等<sup>[6]</sup>研究均表明,休闲期深松有利于加快土壤水分入渗速度,改善土壤水分状况,影响冬小麦的生育特性,优化产量构成,提高产量。黄明等<sup>[7]</sup>研究表明,休闲期深松较传统耕作分别提高开花期、灌浆期0~40 cm土层土壤水分含量6%和9%,均提高产量9%。赵亚丽等<sup>[8]</sup>对黄淮海地区土壤耕作方式的研究表明,深松较传统耕作提高冬小麦产量10%、水分利用效率7%。可见,旱地麦田采用深松有较好的蓄水增产效果。自从中国引入地膜覆盖栽培技术后,其蓄水保墒及增产作用显著,已被生产认可并应用<sup>[9-11]</sup>。陈梦楠等<sup>[12]</sup>研究表明,应用地膜覆盖栽培技术有利于土壤有效含水量的增加,实现增产。李儒等<sup>[13]</sup>研究表明,黄土高原旱作区地膜覆盖较不覆盖能提高降水生产效率,协调土壤孔隙中水分和空气的占比关系,提高了产量和水分利用效率。白丽

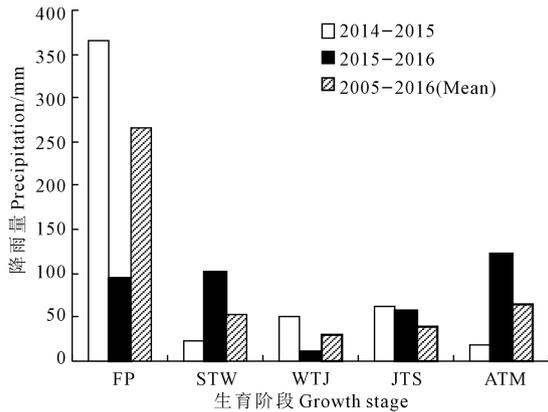
婷等<sup>[14]</sup>针对渭北旱塬区地膜栽培技术研究表明,地膜覆盖较不覆盖显著增加了冬小麦的成穗数,穗粒数也有一定的增加,进而提高小麦产量8%~22%,提高水分利用效率13%~14%,且干旱年份覆膜优势较明显。刘晓伟等<sup>[15]</sup>针对甘肃旱作农业区研究表明,全膜覆土穴播较常规条播能提高0~60 cm土壤含水量,有较明显的保墒效果,提高产量、水分利用效率分别达33%、22%。但李凤民等<sup>[16]</sup>研究表明,地膜覆盖技术的应用尤其在干旱年份,会造成穗数不足,导致小麦减产。休闲期耕作蓄水和播种覆盖保墒为旱地水分调控的两类主要技术,深松耕作可有效提高底墒,并加深耕层,促进根系深扎,避免地膜覆盖播种造成的弊端。前人研究多注重于单方面耕作蓄水或覆盖的蓄水保墒与增产技术,二者结合的研究较少。为此,本研究分析了休闲期深松蓄水提高底墒结合覆盖播种对土壤水分、产量和水分利用效率的影响,旨在探索最佳蓄水保墒方式,从而改进旱地小麦的高产高效栽培技术模式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

田间试验于2014-2016年在山西省闻喜县邱家岭村旱地小麦试验田进行,该地为丘陵旱地,位于35°20'N,111°17'E,无灌溉条件,一年一熟,夏季

休闲,是典型的暖温带大陆气候,年均气温 12.5℃,无霜期 190 d。2014 年 6 月 10 日测定土壤养分(0~20 cm):有机质 10.55 g·kg<sup>-1</sup>、全氮 0.68 g·kg<sup>-1</sup>、水解氮 37.65 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 17.64 mg·kg<sup>-1</sup>;2015 年 6 月 10 日测定土壤养分(0~20 cm):有机质 11.16 g·kg<sup>-1</sup>、水解氮 39.44 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 15.67 mg·kg<sup>-1</sup>。2014-2016 年度试验田年降雨情况由闻喜县气象站提供,如图 1 所示。



注:FP: 休闲期; STW: 播种-越冬期; WTJ: 越冬-拔节期; JTA: 拔节-开花期; ATM: 开花-成熟期。

Notes: FP: Fallow period; STW: Sowing to wintering stage; WTJ: Wintering to jointing stage; JTA: Jointing to Anthesis stage; ATM: Anthesis to maturity stage.

图 1 闻喜试验基地降雨量

Fig.1 Precipitation at the experimental site in Wenxi

## 1.2 试验设计

试验小麦品种“运旱 20410”由山西省闻喜县农委提供。试验采用二因素裂区设计,以休闲期耕作为主区,设深松(深度 30~40 cm, Subsoiling, SS)、当地传统耕作对照(CK)两个水平;以播种方式为副区,设全膜覆土穴播(Film covering soil hole sowing, FSH)、膜际条播(Film mulch sowing, FM)、常规条播(Drilling sowing, DS)三个水平,共 6 个处理,小区面积 50 m×3 m=150 m<sup>2</sup>,重复 3 次。全膜覆土穴播:即秋播前地面覆膜,膜面覆土 1 cm,穴播,行距 20 cm,穴距 15 cm,每小区种植 10 行。膜际条播:即地膜覆盖播种,起垄(垄底宽 40 cm,垄高 10 cm)、覆膜、播种一次完成,60 cm 为一带,地膜覆盖垄上,地膜两侧覆土,垄膜侧沟内种植 2 行小麦(地膜采用普通地膜)。常规条播:传统种植方式,逢雨浅旋,平整土地播种,行距 20 cm。2014 年 7 月 15 日土地进行深松,8 月 25 日浅旋土地一次、耙耱、镇压平整土地,10 月 4 日播种,基施纯 N 150 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 150 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 150 kg·hm<sup>-2</sup>,播量 90 kg·

hm<sup>-2</sup>,三叶期定苗,基本苗 225×10<sup>4</sup>株·hm<sup>-2</sup>。同生产上人工揭膜,膜际条播处理揭膜时间为小麦开花后 10 d 左右,2015 年 6 月 10 日收获。全膜覆土穴播处理于小麦收获后(次年 6 月上旬)回收地膜。

## 1.3 测定项目与方法

在试验田范围内选取具有代表性小区,深挖一个 3 m 的剖面坑,采用环刀法从上到下每隔 20 cm 土层取样,3 次重复,测定土壤容重<sup>[12]</sup>。

分别于播种期、越冬期、拔节期、孕穗期、开花期、成熟期,采用土钻法,每 20 cm 分层取 0~300 cm 土层土样,装入铝盒称取鲜重,105℃烘干至恒重称取干重,测定土壤含水量并计算土壤蓄水量<sup>[12]</sup>。土壤蓄水量  $W_i = h_i \times \rho_i \times \omega_i \times 10$ 。式中,  $W$  为土壤蓄水量(mm);  $i$  为土层;  $h$  为土层厚度(cm);  $\omega$  为土壤质量含水量(%);  $\rho$  为土壤容重(g·cm<sup>-3</sup>); 10 为换算单位。

蜡熟期测定单位面积穗数、穗粒数及千粒重,每处理小区取 50 株进行考种,收割 20 m<sup>2</sup>计算经济产量。

其他具体计算方法如下,参照陈梦楠等<sup>[12]</sup>。

休闲期耗水量(mm) = 播种期土壤蓄水量 - 休闲期土壤蓄水量 + 休闲期降水量。

生育期耗水量(mm) = 成熟期土壤蓄水量 - 播种期土壤蓄水量 + 生育期降水量。

休闲期土壤蓄水效率(%) = (播种期土壤蓄水量 - 休闲期土壤蓄水量) / 休闲期降水量。

降水生产效率(kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>) = 籽粒产量 / 全年降水量。

水分利用效率(kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>) = 籽粒产量 / 生育期耗水量。

单位蓄水量的增产量(kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>) = (休闲期深松籽粒产量 - 对照籽粒产量) / (休闲期深松播种期土壤蓄水量 - 对照播种期土壤蓄水量)。

## 1.4 数据处理与分析

试验采用 Microsoft Excel 2003 进行数据绘图,利用 DPS 7.05 和 SAS 9.0 软件统计分析数据, LSD 法进行显著性差异分析,显著水平设为 0.05。因为 2 a 试验结果趋势基本一致,部分图表数据分析只以 2014-2015 年为主。

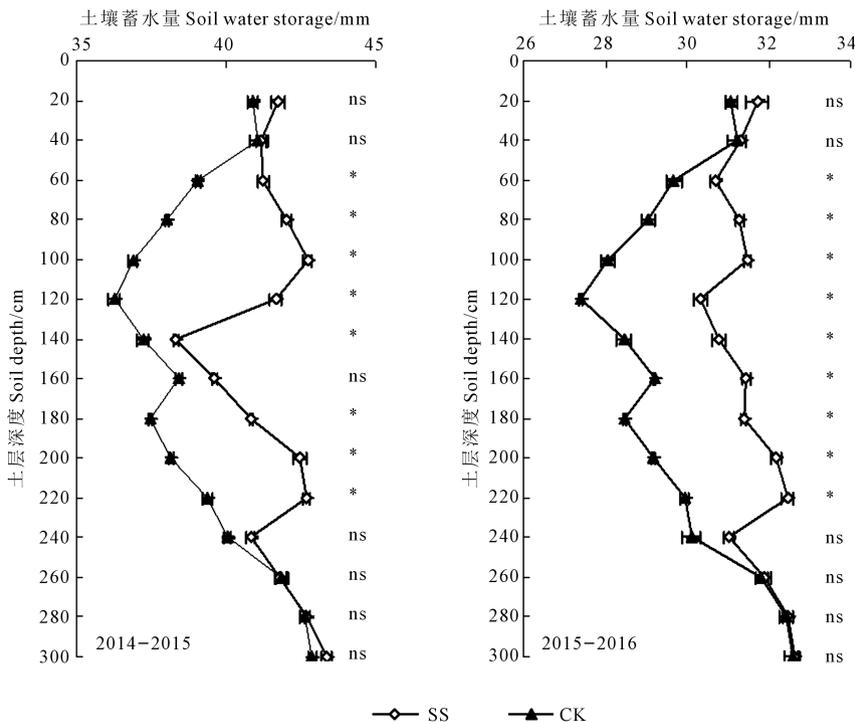
## 2 结果与分析

### 2.1 休闲期深松和覆盖播种对冬小麦播种期和各生育时期土壤水分的影响

如图 2 所示,与对照相比,休闲期深松耕作显著提高了播种期土壤蓄水量,2 a 间 0~300 cm 土层较传统耕作蓄水多达 24~33 mm,尤其 2014-2015 年的 60~120 cm、160~220 cm 土层; 2015-2016 年的

60~220 cm 土层土壤蓄水量显著提高。2 a 间休闲期深松耕作显著提高了越冬-成熟期土壤蓄水量,但开花期差异不显著。与常规条播相比,两种覆盖播种模式提高了越冬-开花期土壤蓄水量,而成熟期降低。2014-2015 年,无论深松与否,各生育时期土壤蓄水量均有所提高,且拔节-孕穗期差异显著。2015-2016 年深松条件下,各生育时期土壤蓄水量均提高,且拔节-孕穗期差异显著;对照处理只在孕

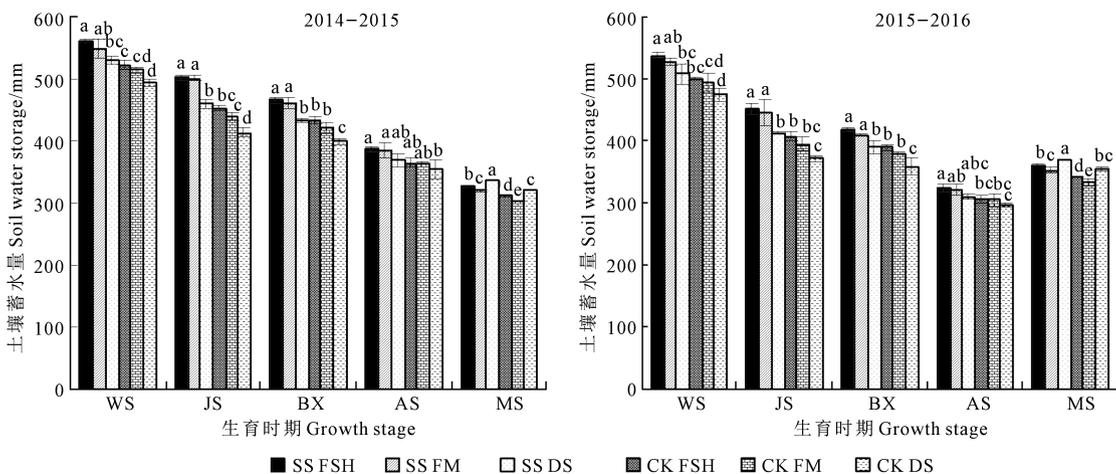
穗-开花期差异显著(图 3)。2 a 间全膜覆土穴播较膜际条播越冬-开花期土壤蓄水量提高,而膜际条播较全膜覆土穴播成熟期蓄水量显著降低。可见,休闲期深松有利于增强土壤蓄保水能力,且降水少的年份蓄墒效果好(2015-2016 年),并能有效提高各生育时期土壤蓄水量;覆盖播种有利于提高生育前期和中期土壤水分,且两种覆盖播种模式的保水效果差异不明显。



注:ns:差异不显著; \*:差异显著。Note: ns: No significant difference; \*: Significant difference.

图 2 休闲期深松(SS)和对照(CK)对小麦播种期 0~300 cm 各土层土壤蓄水量的影响

Fig.2 Impact of subsoiling and CK on soil water storage in 0~300 cm depth during sowing stage of winter wheat



注:WS:越冬期; JS: 拔节期; BS: 孕穗期; AS: 开花期; MS: 成熟期。图中不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: WS: Wintering stage; JS: Jointing stage; BS: Booting stage; AS: Anthesis stage; MS: Maturity stage. Different lowercase letters in the figure showed significant differences between treatments ( $P < 0.05$ ).

图 3 播种方式对小麦各生育时期 0~300 cm 土壤蓄水量的影响

Fig.3. Impact of sowing modes on soil water storage in 0~300 cm depth under different growth stages of wheat

## 2.2 休闲期深松和覆盖播种对冬小麦产量及其构成因素的影响

与对照相比,休闲期深松模式下小麦产量及其构成因素提高(表 1),2014-2015 年穗数提高 7%~10%,穗粒数提高 3%~6%,千粒重提高 2%~3%,产量提高 12%~16%;2015-2016 年穗数提高 9%~14%,穗粒数提高 2%~7%,千粒重提高 1%~2%,产量提高 18%~24%。休闲期深松模式下,2014-2015 年两种覆盖播种模式较常规条播穗数和产量显著提高,穗数提高 4%~9%,产量提高 9%~13%,膜际条播与常规条播穗粒数差异显著,千粒重无显著变化。膜际条播较全膜覆土穴播产量及其构成因素均提高,且穗数显著提高 4%,产量提高 3%;2015-2016 年两种覆盖播种模式较常规条播穗数、穗粒数和产量显著提高,穗数提高 13%~17%,穗粒数提高 7%~11%,产量提高 8%~21%,千粒重无显著变化。膜际条播较全膜覆土穴播产量及其构成因素均提高,且穗数显著提高 4%,产量显著提高 12%。对照条件下,2014-2015 年两种覆盖播种模式较常规条播穗数和产量显著提高,分别提高 2%~6%、6%~13%,膜际条播与常规条播穗粒数差异显著,千粒重无显著变化。膜际条播较全膜覆土穴播产量及其构成因素均提高,且穗数显著提高 4%,产量显著提高 7%;2015-2016 年两种覆盖播种模式较常规条播

穗数和产量显著提高,穗数提高 8%~13%,产量提高 12%~19%,穗粒数和千粒重无显著变化。膜际条播较全膜覆土穴播产量及其构成因素均提高,且穗数显著提高 4%,产量显著提高 6%。可见,休闲期深松和覆盖播种主要通过增加穗数来提高产量,对穗粒数和千粒重影响不明显,且降水少的年份深松下覆膜播种增幅效果大,尤其膜际条播增产效果明显。

另外,年份、耕作、播种方式、耕作×播种方式、年份×耕作×播种方式对产量均有显著或极显著影响(表 1),年份的影响最大,其次是耕作,最后是播种方式。而且年份、耕作和播种方式对穗数、穗粒数和千粒重有极显著影响,年份×耕作、年份×播种方式和耕作×播种方式对穗数均有极显著影响,耕作×播种方式对千粒重有显著影响。

## 2.3 不同生育时期土壤蓄水量与冬小麦产量及其构成因素的关系

### 2.3.1 与产量构成因素的关系

表 2 可见,休闲期深松结合覆盖播种条件下,越冬期、拔节期、孕穗期 0~300 cm 土层土壤蓄水量与穗数,拔节期 40~160 cm、孕穗期 40~80 cm、200~300 cm,开花期 180~300 cm 土层土壤蓄水量与穗粒数呈显著或极显著相关关系,且越冬期 20~100 cm、拔节期 40~160 cm、孕穗期 200~300 cm 土层土壤蓄水量与穗数关

表 1 休闲期深松和覆盖播种对小麦产量及其构成因素的影响

Table 1 Impact of subsoiling during fallow period and sowing-mulching on wheat yield and its component factors

年份 Year	耕作 Tillage	播种方式 Sowing mode	穗数/(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) Number of ear	穗粒数 Grains number	千粒重/g 1000-grain weight	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Yield
2014-2015	SS	FSH	477.02b	32.24ab	42.16ab	5524.05a
		FM	497.44a	34.57a	42.58a	5684.83a
		DS	456.90c	31.04bc	42.63a	5051.73b
	CK	FSH	436.09d	31.16bc	41.08b	4761.41c
		FM	454.27c	32.58ab	41.65ab	5074.65b
		DS	428.62e	29.71c	41.76ab	4498.67d
2015-2016	SS	FSH	443.85b	30.45ab	40.58ab	3932.43b
		FM	461.24a	31.48a	40.73ab	4390.86a
		DS	392.71d	28.34c	41.85a	3629.77d
	CK	FSH	389.42d	28.57c	39.67b	3340.69d
		FM	406.64c	29.48bc	40.14b	3550.98c
		DS	361.32e	27.72c	41.04ab	2990.22e
F 值 F Values						
年份 Year			2628.68 **	145.53 **	88.74 **	6841.41 **
耕作 Tillage			1928.40 **	49.52 **	38.77 **	1424.22 **
播种方式 Sowing mode			742.09 **	59.83 **	15.62 **	429.61 **
年份×耕作 Year×Tillage			23.75 **	0.01	0.47	1.88
年份×播种方式 Year×Sowing mode			74.76 **	1.75	4.19	2.56
耕作×播种方式 Tillage×Sowing mode			41.22 **	1.95	0.24 *	4.53 *
年份×耕作×播种方式 Year×Tillage×Sowing mode			2.74	1.07	0.09	11.02 **

注:表中同列不同小写字母代表在  $P=0.05$  水平差异显著。\* 和 \*\* 分别代表在  $P=0.05$  和  $P=0.01$  水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference level at  $P=0.05$ . \* and \*\* show significant level at  $P=0.05$  and  $P=0.01$ , respectively. The same below.

系较密切,尤其是拔节期。可见,本试验条件下,穗数的形成与越冬期上层土壤水分、拔节期中层土壤水分、孕穗期深层土壤水分关系密切。

2.3.2 土壤蓄水量与产量的关系 表 3 可见,休闲期深松配套覆盖播种条件下,越冬期-孕穗期 0~300 cm,开花期 40~140 cm、180~300 cm 土层土壤蓄水量与产量呈显著或极显著正相关,且越冬期 0~40 cm,拔节期 40~200 cm,孕穗期和开花期 220~300 cm 土层土壤蓄水量与产量关系更密切。可见,本试验条件下,产量的形成与越冬期上层、拔节期上层和中层、孕穗期和开花期深层水分关系密切。开花前各生育时期土壤蓄水量为小麦后期奠定基

础,充足的底墒水有利于小麦产量的提高。

#### 2.4 休闲期深松和覆盖播种对土壤水分利用效率的影响

相较于对照,2 a 休闲期深松可实现蓄水增产(表 4)。2014-2015 年土壤蓄墒每增加 1 mm,休闲期增墒增产量达 14~26 kg·hm<sup>-2</sup>,且结合膜际条播蓄水对产量的贡献最高,与常规条播差异显著,而两种覆盖播种处理间差异不显著;2015-2016 年土壤蓄墒每增加 1 mm,休闲期增墒增产量达 22~46 kg·hm<sup>-2</sup>,且结合膜际条播蓄水对产量的贡献最高,并与其他处理差异显著。休闲期深松较对照,2 a 土壤蓄水效率显著提高,降水生产效率显著提高,达

表 2 小麦关键生育时期 0~300 cm 各土层土壤蓄水量与产量构成因素的相关性

Table 2 Correlation coefficients between soil water storage of 0~300 cm soil layers and yield component factors at key growth stages of wheat

土层深度/cm Soil depth	穗数 Number of ear			穗粒数 Grains number			千粒重 1000-grain weight
	越冬期 Wintering stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Anthesis stage	
0~20	0.8063 *	0.8440 *	0.8011 *	0.6050	0.7423	0.4856	0.5041
20~40	0.8510 **	0.8138 *	0.7736 *	0.5712	0.7108	0.4148	0.3551
40~60	0.8750 **	0.9369 **	0.8460 *	0.7623 *	0.8163 *	0.4775	0.5295
60~80	0.8923 **	0.9254 **	0.7877 *	0.7871 *	0.7812 *	0.7066	0.2710
80~100	0.9182 **	0.9477 **	0.8329 *	0.8014 *	0.7421	0.7163	0.5115
100~120	0.8100 *	0.9177 **	0.8009 *	0.7935 *	0.6236	0.6851	0.3539
120~140	0.8223 *	0.9324 **	0.8463 *	0.8265 *	0.5683	0.6565	0.6688
140~160	0.7943 *	0.9275 **	0.7551 *	0.8085 *	0.5501	0.3587	0.1315
160~180	0.8017 *	0.7970 *	0.8165 *	0.6726	0.5645	0.4124	0.3156
180~200	0.7954 *	0.8011 *	0.8004 *	0.6644	0.7126	0.8184 *	0.6644
200~220	0.8662 **	0.8129 *	0.8915 **	0.6308	0.8222 *	0.7587 *	0.5813
220~240	0.8227 *	0.8030 *	0.8432 *	0.6508	0.8076 *	0.8373 *	0.6935
240~260	0.8702 **	0.8591 **	0.8776 **	0.7144	0.8148 *	0.7767 *	0.7261
260~280	0.8179 *	0.8054 *	0.8925 **	0.7114	0.7591 *	0.7827 *	0.7168
280~300	0.8095 *	0.7776 *	0.9082 **	0.7094	0.8027 *	0.8220 *	0.5822

表 3 小麦各生育时期 0~300 cm 各土层土壤蓄水量与产量的相关性

Table 3 Correlation coefficients between soil water storage of 0~300 cm soil layers and yield at different growth stages of wheat

土层深度/cm Soil depth	越冬期 Wintering stage	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	开花期 Anthesis stage	成熟期 Maturity stage
0~20	0.8870 **	0.8676 **	0.8707 **	0.7337	-0.0384
20~40	0.9103 **	0.8475 *	0.8282 *	0.6755	-0.1953
40~60	0.9186 **	0.9351 **	0.9143 **	0.7794 *	0.1105
60~80	0.9352 **	0.9421 **	0.8250 *	0.8032 *	0.0721
80~100	0.9499 **	0.9525 **	0.8907 **	0.9248 **	-0.2561
100~120	0.8660 **	0.9414 **	0.8632 **	0.8152 *	0.1413
120~140	0.8981 **	0.9318 **	0.8556 **	0.9284 **	0.1174
140~160	0.8535 **	0.9552 **	0.8199 *	0.6394	-0.1128
160~180	0.8562 **	0.8768 **	0.8672 **	0.5699	-0.2528
180~200	0.8708 **	0.8718 **	0.8537 **	0.9373 **	-0.0766
200~220	0.8884 **	0.8456 *	0.9256 **	0.8365 *	-0.0184
220~240	0.8696 **	0.8629 **	0.8949 **	0.9908 **	0.5002
240~260	0.9306 **	0.9161 **	0.9284 **	0.9419 **	0.5972
260~280	0.8669 **	0.8650 **	0.9315 **	0.9380 **	0.4832
280~300	0.8504 **	0.8408 *	0.9426 **	0.9476 **	0.3551

表 4 休闲期深松和覆盖播种土壤水分积累对产量贡献及水分利用效率的影响

Table 4 Impact of soil water accumulation on yield and water use efficiency of subsoiling during fallow period and sowing-mulching

年份 Year	耕作 Tillage	播种方式 Sowing mode	产量 Yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	$\Delta W/mm$	$\Delta Y$ /(kg·hm <sup>-2</sup> )	$\Delta Y/\Delta W$ /(kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	土壤蓄水效率 Water storage efficiency /%	降水生产效率 Rainfall production efficiency /(kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	水分利用效率 Water use efficiency /(kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )
2014–2015	SS	FSH	5524.05a	35.25	762.64	21.64ab	55.27	10.69a	12.28a
		FM	5684.83a	24.15	610.18	25.63a		11.00a	12.65b
		DS	5051.73b	39.68	553.06	13.95b		9.78b	11.44c
2015–2016	CK	FSH	4761.41c	—	—	—	46.24	9.22c	11.07d
		FM	5074.65b	—	—	—		9.82b	11.46c
		DS	4498.67d	—	—	—		8.71d	10.83e
2015–2016	SS	FSH	3932.43b	26.79	591.74	22.48b	52.90	10.17b	9.65b
		FM	4390.86a	18.35	839.88	46.06a		11.35a	10.66a
		DS	3629.77d	30.16	639.55	21.53b		9.38 c	9.11c
2015–2016	CK	FSH	3340.69d	—	—	—	26.39	8.64d	8.39d
		FM	3550.98c	—	—	—		9.18c	8.64d
		DS	2990.22e	—	—	—		7.73e	7.80e

注: $\Delta W$ :蓄墒增量; $\Delta Y$ :蓄墒增产量; $\Delta Y/\Delta W$ :休闲期增墒增产效率。

Note:  $\Delta W$ : Storage increase;  $\Delta Y$ : Storage capacity increase;  $\Delta Y/\Delta W$ : Increase storage and production efficiency during fallow period.

12%~16%、18%~24%，水分利用效率显著提高，达6%~11%、15%~23%。2 a 间两种覆盖播种模式较常规条播降水生产效率和水分利用效率显著提高。2014–2015 年膜际条播较全膜覆土穴播降水生产利用效率和水分利用效率提高，深松下两者降水生产效率差异不显著；2015–2016 年膜际条播较全膜覆土穴播降水生产利用效率和水分利用效率提高，且对照下水分利用效率差异不显著。可见，深松蓄水覆盖保水能提高土壤水分对产量的贡献，且休闲期深松结合膜际条播有利于充分利用降水，提高产量和水分利用效率。

### 3 讨论

刘爽等<sup>[17]</sup>研究表明休闲期深松处理较传统耕作方式，可以提高土壤含水率，从而增强土壤的保墒效果。贺立恒等<sup>[18]</sup>研究表明，休闲期深松处理可增加土壤水分有效性，使旱地小麦各生育期土壤蓄水量显著提高。本研究发现，2 a 间 0~300 cm 土层较传统耕作多蓄水达 24~33 mm，休闲期土壤蓄水效率显著提高，越冬–成熟期土壤蓄水量提高，且越冬期、拔节期、孕穗期、成熟期差异显著，这与李俊红等<sup>[19]</sup>，付国占等<sup>[20]</sup>研究结果一致，这是因为休闲期深松可以打破犁底层，能够增加土壤水分入渗，耕作时减少土壤水分损失，提高了深层土壤蓄水量，促进作物中后期对深层土壤水分的吸收。Borghesi 等<sup>[21]</sup>研究表明，深松处理能加深耕层，增加土壤的通透性，有利于作物生长发育，提高作物产

量。熊淑萍等<sup>[22]</sup>研究表明，与传统耕作相比，休闲期深松耕作提高小麦穗数 5%、产量 12%。本研究发现，休闲期深松较对照，小麦产量及其构成因素提高，2014–2015 年提高穗数 7%~10%、产量 12%~16%，2015–2016 年提高穗数 9%~14%、产量 18%~24%。休闲期深松较对照，2 a 降水生产效率分别显著提高达 12%~16%、18%~24%，水分利用效率显著提高分别达 6%~11%、15%~23%，这与前人研究结果一致。因此表明休闲期深松可有效蓄积降雨，尤其降水少的年份蓄水效果最佳，且满足各生育期对水分的需求，提高降水生产效率和水分利用效率，并主要通过穗数的增加，达到小麦增产的目的。

刘金海等<sup>[23]</sup>研究表明，受播种方式影响，土壤含水量随土层深度增加而升高。在小麦生育中后期，土壤水分由于地膜覆盖影响而降低。赵虹等<sup>[24]</sup>，王法宏等<sup>[25]</sup>研究表明，地膜覆盖减少生育期地表水分蒸发损失，增强保水效果，增加了穗数和穗粒数，促进小麦产量提高。本研究结果表明，休闲期深松下，2 a 间两种覆盖播种模式较常规条播穗数和产量显著提高，其中穗数分别提高 4%~9%和 9%~13%，产量分别提高 13%~17%和 8%~21%；膜际条播较全膜覆土穴播产量提高了 3%~12%。对照条件下，2 a 间两种覆盖播种模式较常规条播穗数显著提高，其中穗数分别提高 2%~6%和 6%~13%，产量分别提高 8%~13%和 12%~19%；膜际条播较全膜覆土穴播产量提高了 6%~7%。2 a 间两种覆盖播种模式较常规条播降水生产效率和水分利用

效率显著提高。杜守宇等<sup>[26]</sup>研究表明,膜际条播较常规条播增产达42%,主要通过延长幼穗分化天数增加穗粒数和延长灌浆期提高千粒重。也有前人针对西北黄土高原丘陵沟壑区小麦不同覆膜的研究表明<sup>[27]</sup>,年降水量531.8 mm条件下,全膜覆土穴播产量较膜侧条播产量高。本研究结果表明:2 a全膜覆土穴播较膜际条播提高了越冬-开花期土壤蓄水量,而膜际条播较全膜覆土穴播成熟期蓄水量显著降低。膜际条播较全膜覆土穴播产量及其构成因素均提高,且产量显著提高3%~7%、6%~12%。膜际条播较全膜覆土穴播水分利用效率提高。这与董琦等<sup>[28]</sup>、杨长刚等<sup>[29]</sup>研究结果一致,因为深松蓄水与覆盖增温,加大小麦耗水,促进前期的生长发育,增加孕穗期成穗数,从而提高产量。上述试验结果与前人结果不尽一致之处,可能是受不同生态区生育期降雨量和区域土壤性质等原因影响,导致耕作的增产效应有所差异,有待进一步对比研究。另外,年份、耕作、播种方式、耕作×播种方式、年份×耕作×播种方式对产量均有显著或极显著影响,尤其年份的影响最大。耕作对穗数和产量的影响大于播种方式,这与增产效果结果一致。可见,休闲期深松结合生育期覆盖播种,提高了穗数、穗粒数和产量,且主要通过提高穗数来提高产量,对穗粒数和千粒重影响不明显,采用膜际条播增产效果较好。

本研究还表明,休闲期深松结合覆盖播种条件下,穗数的形成与越冬期上层土壤水分、拔节期中层土壤水分、孕穗期深层土壤水分关系密切。产量的形成与越冬期上层、拔节期上层和孕穗期和开花期深层水分关系密切。因此,决定穗数的关键时期是小麦越冬—孕穗期,随着生育期的推移,土壤水分与穗数和产量的相关性由浅层转向深层,且各个生育期蓄水量的提高为小麦高产奠定基础。

谢英荷等<sup>[30]</sup>、刘庚山等<sup>[31]</sup>研究表明,冬前充足的土壤墒情可促进小麦形成深根系,提高水分利用效率,有利于旱地小麦实现节水高产。孟晓瑜等<sup>[32]</sup>研究表明,每增加1 mm的播前底墒,旱地小麦可增产10.6~11.4 kg·hm<sup>-2</sup>。本研究表明,与对照相比,2 a休闲期深松可实现蓄水增产。2014-2015年土壤蓄墒每增加1 mm,休闲期增墒增产量达14~26 kg·hm<sup>-2</sup>,且结合膜际条播蓄水对产量的贡献最高,与常规条播差异显著;2015-2016年土壤蓄墒每增加1 mm,休闲期增墒增产量达22~46 kg·hm<sup>-2</sup>,且

结合膜际条播蓄水对产量的贡献最高,并与其他处理差异显著。因此,深松蓄水覆盖保水能提高土壤水分对产量的贡献。播前底墒的高低,决定着小麦产量的高低<sup>[33]</sup>。深松措施作为保护性耕作技术之一,可降低土壤容重,增强深层土壤蓄水能力,有利于小麦花后对深层水分的吸收利用,提高籽粒产量,避免地膜覆盖引起的弊端<sup>[34]</sup>。有研究认为,休闲期深松处理可有效提高各生育时期的土壤蓄水量,避免因地膜覆盖引起后期深层水分不足的弊端,减弱地膜覆盖的负效应,有利于小麦增产<sup>[35]</sup>。本研究表明,休闲期深松结合生育期覆盖播种,通过休闲期深松蓄积水分和覆盖高效保墒,达到小麦增产的目的,以膜际条播效果最好,且降水少的年份效果明显。因此,休闲期深松结合生育期膜际条播处理是兼顾高产蓄水高效的耕作栽培方式。

## 4 结 论

1)旱地小麦休闲期深松结合生育期覆盖播种的栽培措施,显著提高了播种期和各生育时期0~300 cm土壤蓄水量。两种覆盖处理间,膜际条播较全膜覆土穴播水分利用效率显著提高,尤其降水少的年份降水生产效率提高显著。因此,深松蓄水覆盖保墒能高效利用土壤水分,实现小麦的增产。

2)休闲期深松条件下,膜际条播较全膜覆土穴播提高了产量及其构成因素,且降水少的年份产量在两种覆盖处理间差异显著。因此,休闲期深松结合膜际条播具有最大增产潜力。

3)休闲期深松结合覆盖播种条件下,产量的形成与越冬期上层、拔节期上层和孕穗期和开花期深层水分关系密切,尤其是小麦后期深层土壤水分影响较大。

4)休闲期深松可实现蓄水、增产,2 a土壤蓄墒每增加1 mm,休闲期土壤增墒增产量分别达26 kg·hm<sup>-2</sup>和46 kg·hm<sup>-2</sup>,且结合膜际条播蓄水对产量的贡献最高。

### 参 考 文 献:

- [1] 张丽花,延军平,刘栋杉.山西气候变化特征与旱涝灾害趋势判断[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):120-125.
- [2] 崔欢虎.山西旱地小麦栽培发展战略[J].山西农业(致富科技版),2001,(11):21-22.
- [3] 尹宝重,甄文超,郭丽果.海河低平原不同耕作方式下麦田土壤生态环境特征[J].水土保持学报,2015,29(1):186-194.
- [4] 侯贤清,韩清芳,贾志宽,等.半干旱区夏闲期不同耕作方式对土壤水分及小麦水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研

- 究,2009,27(5):52-58.
- [5] 周兴祥,高焕文,刘晓峰.华北平原一年两熟保护性耕作体系试验研究[J].农业工程学报,2001,17(6):81-84.
- [6] 杨永辉,武继承,张玉亭.耕作与保墒措施对小麦不同生育阶段水分利用及产量的影响[J].华北农学报,2016,31(3):184-190.
- [7] 黄明,吴金芝,李友军,等.不同耕作方式对旱作冬小麦旗叶衰老和籽粒产量的影响[J].应用生态学报,2009,20(6):1355-1361.
- [8] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2014,47(17):3359-3371.
- [9] 武继承,管秀娟,杨永辉,等.地面覆盖和保水剂对冬小麦生长和降水利用的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):86-92.
- [10] Dai J, Dong H. Intensive cotton farming technologies in China: Achievements, challenges and countermeasures[J]. Field Crops Research,2014,155:99-110.
- [11] Qin S, Zhang J, Dai H, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area [J]. Agricultural Water Management,2014,131(1):87-94.
- [12] 陈梦楠,孙敏,高志强,等.旱地麦田休闲期覆盖对土壤水分积耗的影响及与产量的关系[J].中国农业科学,2016,49(13):2572-2582.
- [13] 李儒,崔荣美,贾志宽,等.不同沟垄覆盖方式对冬小麦土壤水分及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2011,44(16):3312-3322.
- [14] 白丽婷,海江波,韩清芳,等.不同地膜覆盖对渭北旱塬冬小麦生长及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):135-139,162.
- [15] 刘晓伟,何宝林,康恩祥,等.播种方式对旱区冬小麦产量及土壤水分、土壤温度的影响[J].作物杂志,2011,(5):77-81.
- [16] 李凤民,鄢王旬,王俊,等.地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理[J].中国农业科学,2001,34(3):330-333.
- [17] 刘爽,武雪萍,吴会军,等.休闲期不同耕作方式对洛阳冬小麦农田土壤水分的影响[J].中国农业气象,2007,28(3):292-295.
- [18] 贺立恒,高志强,孙敏,等.旱地小麦休闲期不同耕作措施对土壤水分蓄纳利用与产量形成的影响[J].中国农学通报,2012,28(15):106-111.
- [19] 李俊红,姚宇卿,吕军杰,等.双深松覆盖对丘陵旱区土壤水分和作物产量的影响[J].河南农业科学,2013,42(11):17-20.
- [20] 付国占,李潮海,王俊忠,等.残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2005,21(1):52-56.
- [21] Borghei A M, Taghinejad J, Minaei S, et al. Effect of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance, and cotton yield in northwest of Iran[J]. International Journal of Agriculture & Biology,2008,10(1):120-123.
- [22] 熊淑萍,王静,王小纯,等.耕作方式及施氮量对砂姜黑土区小麦氮代谢及籽粒产量和蛋白质含量的影响[J].植物生态学报,2014,38(7):767-775.
- [23] 刘金海,党占平,曹卫贤,等.不同覆盖和播种方式对渭北旱地小麦产量及土壤水分的影响[J].麦类作物学报,2005,(4):91-94.
- [24] 赵虹,杨兆生,阎素红,等.不同种植方式下小麦主要性状与产量的关系[J].麦类作物学报,2001,21(1):60-64.
- [25] 王法宏,任德昌,王旭清,等.施肥对小麦根系活性、延缓旗叶衰老及产量的效应[J].麦类作物学报,2001,21(3):51-54.
- [26] 杜守宇,田恩平,温敏,等.春小麦垄盖膜际条播栽培研究[J].宁夏农林科技,1999,(3):1-6.
- [27] 岳维云,宋建荣,赵尚文,等.不同覆膜方式对地温及冬小麦地上干物质累积规律的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):133-139.
- [28] 董琦,冯变娥,乔俊芳,等.不同种植方式对丘陵地小麦田土壤水分、产量及水分利用效率的影响[J].激光生物学报,2015,24(6):573-579.
- [29] 杨长刚,柴守玺,常磊,等.不同覆膜方式对旱作冬小麦耗水特性及籽粒产量的影响[J].中国农业科学,2015,48(4):661-671.
- [30] 谢英荷,李廷亮,洪坚平,等.施氮和垄膜沟播种植对晋南旱地冬小麦水分利用的影响[J].应用生态学报,2011,22(8):2038-2044.
- [31] 刘庚山,安顺清,吕厚荃,等.华北地区不同底墒对冬小麦生长发育及产量影响的研究[J].应用气象学报,2000,6(11):164-169.
- [32] 孟晓瑜,王朝辉,李富翠,等.底墒和施氮量对渭北旱塬冬小麦产量与水分利用的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):369-375.
- [33] 程宪国,汪德水,张美荣,等.不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响[J].中国农业科学,1996,29(4):67-74.
- [34] Izumi Y, Yoshida T, Iijima M. Effects of subsoiling to the non-tilled field of wheat-soybean rotation on the root system development, water uptake, and yield[J]. Plant Production Science, 2009,12(3):327-335.
- [35] 雷妙妙,孙敏,高志强,等.休闲期深松蓄水适期播种对旱地小麦产量的影响[J].中国农业科学,2017,50(15):2904-2915.