

DOI: 10.5846/stxb201406051158

杨长刚,柴守玺,常磊.半干旱雨养区不同覆膜方式对冬小麦土壤水分利用及产量的影响.生态学报,2015,35(8):2676-2685.

Yang C G, Chai S X, Chang L. Influences of different plastic film mulches on soil water use and yield of winter wheat in semiarid rain-fed region. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2676-2685.

半干旱雨养区不同覆膜方式对冬小麦土壤水分利用及产量的影响

杨长刚,柴守玺*,常磊

甘肃农业大学农学院, 甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室, 兰州 730070

摘要:在黄土高原半干旱雨养条件下,于 2008—2009、2009—2010 两个年度,以露地种植为对照(CK),研究了不同覆膜方式(全膜覆土穴播,全膜穴播,垄膜沟播)对旱地冬小麦产量和水分利用的影响。结果表明:两年度覆膜平均较 CK 产量分别显著提高 49.4%和 53.2%,水分利用效率提高 11.8%和 14.3%。覆膜的高产建立在高生长量、高耗水基础上,产量与生育期耗水量显著正相关($r=0.952^*—0.958^*$),两年度覆膜分别平均较 CK 多耗水 33.5%和 34.1%。覆膜处理中以全膜穴播较 CK 的增产幅度和 WUE 提高幅度最大,耗水量也最大。由于覆膜耗水量大,覆膜各处理收获期 0—200 cm 土壤贮水量均显著低于 CK,但通过全年连续覆膜和夏闲期降水补充,在下茬秋播时,覆膜各处理 0—200 cm 土壤贮水量均超过 CK,夏闲期覆膜的水分休闲效率两年度分别平均高出 CK 41.8 和 86.4 个百分点,覆膜有利于土壤水分恢复和下茬作物的可持续生产。覆膜方式中,以全膜覆土穴播种植效益最高,两个年度纯收益平均达 5531.6 元/hm²,较 CK 增收 2542.2 元/hm²。综合考虑,全膜覆土穴播是一种高产高效兼顾、操作简单、适宜于半干旱雨养区推广应用的冬小麦覆膜种植方式。

关键词:冬小麦;地膜覆盖;土壤水分;产量;雨养农业区

Influences of different plastic film mulches on soil water use and yield of winter wheat in semiarid rain-fed region

YANG Changgang, CHAI Shouxi*, CHANG Lei

College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Sciences, Lanzhou 730070, China

Abstract: Plastic film mulching has been shown to increase crop yields in many crop species, but little has been reported how this technology can be applied to winter wheat in rainfed areas. This study determined the effects of different plastic mulching modes on water use and grain yield of winter wheat in a semiarid rain-fed region of Loess Plateau, Northwest China during 2008—2009 and 2009—2010 growing seasons. The experiment was carried out in a randomized complete block design with three replicates, including four treatments: (i) whole field plastic mulching with soil covering on the top of the plastic mulch and bunch-seeding, (ii) whole field plastic mulching without soil cover on the top of the plastic mulch and bunch-seeding, (iii) ridges mulched with plastic film and row-seeding in the furrow, and (iv) un-mulched with row-seeding as control (CK). Results showed that compared to the CK, the mean plastic film mulching increased the grain yield of winter wheat by 49.4% in the 2008—2009 season and 53.2% in the 2009—2010 season, and water use efficiency (WUE) was increased by 11.8% and 14.3% in the two seasons, respectively. The increased grain yield with plastic film mulching was largely attributable to improved plant growth and high water consumption. The grain yield of winter wheat was significantly and positively correlated ($r = 0.952^*—0.958^*$) with water consumption during the growth period. Winter

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(CARS-3-2-49);公益性行业(农业)科研专项(201303104)

收稿日期:2013-06-05; 修订日期:2014-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sxchai@126.com

wheat with plastic film mulching used 33.5% and 34.1% more water than the CK in the two years, respectively. Of the mulching methods evaluated in the study, the whole field plastic mulching without soil cover and bunch-seeding achieved the highest grain yield and WUE, and also highest water consumption. Due to the large amount of water consumption with plastic film mulching, the water storage in the 0—200 cm soil layer at harvest was significantly lower in the fields with plastic film mulching compared to the CK. However, due to the year-round continuous plastic mulching coupled with the recharge of soil water during the summer fallow period after winter wheat harvest, the water storage in the 0—200 cm depth in the fields with plastic film mulching exceeded that in the CK field by 41.8 to 86.4 percentage points by the autumn sowing date the following year. Plastic film mulching and soil moisture conservation during summer fallow period is beneficial to the rehabilitation of soil moisture and sustainable production of the crops the following year. Among the plastic film mulching methods, the whole field plastic mulching with soil covering on the top of the mulch and bunch-seeding gained the highest economic benefit, and reached up to 5531 Chinese Yuan/hm⁻², which was 2542 Yuan more than the CK. Additionally, the whole field plastic mulching with soil cover on the top of the mulch and bunch-seeding allows the plastic film to be reused for the crops grown in the following year, helping save film cost, and improving economic benefits. Therefore, we recommend that whole field plastic mulching with soil cover on the top of the mulch and bunch-seeding is suitable to be popularized in the semiarid rain-fed areas.

Key Words: winter wheat; plastic film mulching; soil moisture; yield; rain-fed agricultural region

地膜覆盖是西北旱作农业的主要技术^[1-5],大量实践证明其在年降水量 200—650 mm 的地区可使小麦等作物增产 30%左右^[1-3,6-7]。保墒通常被认为是旱作区地膜覆盖能大幅度增产的最直接原因^[2-3]。研究认为^[8],地膜覆盖由于抑制了土壤水分的蒸发损失,较露地栽培可增加土壤贮水量 30%、降低蒸散量 50%、减少水分亏缺 15%以上。

但随着研究的深入,发现覆膜除保墒作用外,还具有集雨提墒、提高土壤深层用水比例等效应^[9-15]。廖允成等研究表明^[16],在夏闲期采用地膜和秸秆两元覆盖技术,可将夏闲期降水的 73.2%蓄积于土壤之中,0—200 cm 土层较传统耕法多蓄水 108.4 mm。其后采用垄膜沟播技术种植小麦,可最大限度地截留生育期降水,明显改善旱地小麦的水分状况^[11,16-17]。覆膜首先会明显提高耕层土壤含水量^[18-19]。许多研究认为^[8,10,15,20-21],覆膜通过抑制裸间蒸发,改变了耗水结构,提高了蒸腾/蒸发比,使得有限水分主要用于蒸腾性生产,利于产量形成。李儒等^[11]和王红丽等^[22]研究发现,覆膜前期降低蒸发、后期增加蒸腾,有利于干物质积累,促进水分消耗由物理过程向生理过程转化,从而提高水分利用效率。另有研究表明,覆膜在提高产量和水分利用效率同时,对土壤水分的消耗也同步增加。覆膜后不但作物全生育期 0—200 cm 土层总耗水量明显高于露地^[18,20,23-24],而且促进了对土壤深层水分的调用^[18,20,23]。Ramakrishna 等^[21]和 GAO 等^[18]研究发现覆膜促进根系下扎,作物对 140 cm 以下土层水分的调用明显加强。有研究发现^[10,25-26],覆膜前期的旺盛生长会导致后期供水不足,引起脱水脱肥,导致早衰甚至减产。在玉米上研究发现^[22,27-28],随地膜覆盖种植年限的增加,地膜玉米的耗水深度下移,连续覆膜种植会因耗水过度、土壤水分短时难以补充平衡而形成干化层,影响持续生产。

地膜覆盖在 20 世纪 80 年代开始应用于小麦,发展到目前已形成了多种覆膜种植方式。覆膜对土壤水分的影响因覆膜方式、覆膜时期、作物种类、当地气候条件和作物生长季节等的不同而有很大差异。覆膜引起的土壤水分变化是否有利作物生长或高产、或对作物持续生产有无影响,也要视具体情况而定,不能一概而论。西北黄土高原半干旱雨养农业区不仅水温条件较差、而且大陆性气候强烈,大气和土壤下垫面的水温交换剧烈,气候生态条件特殊,因此不同覆膜种植技术的水温效应、以及对小麦生长和产量形成的影响可能与其它旱作区有较大差异。但目前西北黄土高原半干旱雨养生态生产条件下,冬小麦不同覆膜种植方式间关于水分利用比较方面的研究报道较少,现有的地膜小麦研究大多针对个别生育时期、个别土层,缺乏土壤耗水特征、

休闲期土壤水分补充、耗水与生长和产量形成的相关、对下茬土壤供水和可持续生产影响方面的研究。因此,本研究采用 3 种旱地小麦生产上应用面积较大、有代表性的覆膜种植方式,以传统无覆盖露地种植为对照,开展了对土壤水分利用、生长与产量、耗水与土壤水分恢复等方面的比较研究,研究结果将为揭示覆膜增产机理、改进技术、筛选适宜的覆膜种植方式、指导生产应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2008—2010 年在甘肃农业大学定西旱农生态综合试验站实施。该区海拔 1970 m,年日照时数 2476.6 h,年均温 6.4℃,≥10℃积温 2239.1℃,年降水量 390.9 mm(表 1),年蒸发量 1531 mm,为黄土高原西部典型的半干旱雨养农业区。试区土壤为典型的黄绵土,土层深厚,土壤质地较均匀,0—200 cm 土层平均容重为 1.25 g/cm³。

1970—2010 年 40a 全年平均降水为 390.9 mm,其中冬小麦生育期降水为 181.4 mm,占全年降水的 46.4%,休闲期降水为 209.5 mm;2008—2009 年总降水 384.8 mm,冬小麦生育期和休闲期降水分别为 191.1 mm 和 193.4 mm,5 mm 以上有效降水分别为 143.6 mm 和 180.3 mm;2009—2010 年总降水 323.6 mm,冬小麦生育期和休闲期降水分别为 243.2 mm 和 80.4 mm,有效降水分别为 211.9 mm 和 60.7 mm。2008—2009 生长季,冬小麦返青前降水趋于多年均值,但 3—6 月降水较常年同期偏少 40.6%,冬小麦生长后期受旱较重。2009—2010 生长季,冬小麦播种至返青阶段降水只有 50.2 mm,比上一年度同期降水偏少 53.9%,造成冬小麦返青前受旱较重。

表 1 2008—2010 年冬小麦生育期及休闲期降水量(mm)

Table 1 Precipitation during winter wheat growing stage and summer fallow from 2008 to 2010

时间 Time	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.	12 月 Dec.	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	4 月 Apr.
总降水量 Total precipitation								
2008—2009	53.8	39.3	4.3	0	2.1	9.5	11.9	18
2009—2010	0	38.2	7.1	3.4	0	1.5	20.1	36
1970—2010	0	28.5	5.3	1.6	3.3	4.6	12.1	28
≥5 mm 有效降水量 Precipitation ≥ 5 mm								
2008—2009	53.8	33.8	0	0	0	7.4	0	10.4
2009—2010	0	32.5	0	0	0	0	16.7	36
时间 Time	5 月 May.	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	生育期 Growth period	休闲期 Fallow period	总计 Sum
总降水量 Total precipitation								
2008—2009	29.9	22.3	85.3	97.4	10.7	191.1	193.4	384.5
2009—2010	74.4	44.9	27.2	40.2	30.6	243.2	80.4	323.6
1970—2010	44.6	53.4	77.4	82.6	49.5	181.4	209.5	390.9
≥5 mm 有效降水量 Precipitation ≥ 5 mm								
2008—2009	20	18.2	85.3	95	0	143.6	180.3	323.9
2009—2010	65.9	44.9	22.3	33.4	27.2	211.9	67	278.9

2008—2009 年度冬小麦生育期为 2008 年 9 月 20 日至 2009 年 7 月 14 日,休闲期为 2009 年 7 月 15 日至 9 月 22 日;2009—2010 年度冬小麦生育期为 2009 年 9 月 22 日至 2010 年 7 月 1 日,休闲期为 2009 年 7 月 2 日至 9 月 20 日

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理,其中地膜覆盖处理 3 个(PSB、PB、RPR),以无覆盖露地条播为对照(CK)。小区面积 24 m²(3 m×8 m),5 次重复,随机区组排列。

全膜覆土穴播种植(PSB):全地面平作覆膜,膜面覆土 1 cm,穴播,行距 20 cm,穴距 15 cm,每穴 8 粒种

子,每小区种 15 行。

全膜穴播种植(PB):全地面平作覆膜,膜上不覆土,种植行距、穴距、穴播量等同 PSB。

垄膜沟播种植(RPR):秋播前起垄,垄底宽 30 cm,垄高 5—10 cm,两垄底间距 30 cm,垄面覆膜,每垄沟条播 2 行,2 行间距 24 cm,各行距离垄底 3 cm,每小区种 12 行,行播量 37.5 g。

露地条播种植(CK):露地(不覆膜)平作,开沟条播,行距 20 cm,每小区种 15 行,行播量 30 g。第 1 生长季在 2008 年 9 月 18 日覆膜,9 月 20 日播种,2009 年 7 月 1 日收获;第 2 生长季 PSB 继续保留覆膜,PB 和 RPR 处理则在 2009 年 9 月 21 日揭掉上茬残膜,然后耕作整地、重新覆膜,于 2009 年 9 月 23 日播种,2010 年 7 月 14 日收获。

各小区播种和施肥量相同,冬小麦供试品种为陇中 1 号,播种量均为 187.5 kg/hm²。第 1 生长季各处理播前将充分腐熟的牛粪 4500 kg/hm²、纯氮 105 kg/hm²,磷(P₂O₅) 105 kg/hm² 等所有肥料在播前整地时做基肥一次性深翻施入。第 2 生长季各处理均不再施肥。两个生长季均在灌浆前期进行 1 次“一喷三防”作业。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分测定

(1) 在小麦播种期、开花期、完熟期及休闲期,各小区分 0—20、20—40、40—60、60—90、90—120、120—150、150—180 和 180—200 cm 共 8 个土层分别取土样,各处理取样位置均位于种植行间,用烘干法测定土壤含水量:

$$\text{土壤含水量}(\%) = (\text{土壤鲜质量} - \text{土壤干质量}) / \text{土壤干质量} \times 100\%$$

(2) 土壤贮水量、作物耗水量及水分利用效率计算

土壤贮水量计算公式为^[11]:

$$W = h \times \rho \times \omega\% \times 10$$

式中, W 为土壤贮水量(mm); h 土层深度(cm); ρ 为土壤容重(g/cm³),本试验各土层 ρ 平均为 1.25 g/cm³; $\omega\%$ 为土壤含水量。

农田耗水量计算公式为^[11]:

$$ET = \Delta W + P + I - D + W_g - R, \Delta W = W_1 - W_2。$$

式中, ET 为小麦生育期农田总耗水量(mm), ΔW 为生育期土壤贮水量变化量(mm); P 为 ≥ 5 mm 有效降雨量; I 为灌溉量(mm); D 为灌溉后土壤水向下层流动量(mm); W_g 为深层地下水利用量(mm); R 为地表径流(mm); W_1 、 W_2 分别为播前和收获时的土壤贮水量(mm)。本试验无灌溉条件,地下水位在 10 m 以下,冬小麦生育期无地表径流,故 I 、 D 、 W_g 和 R 可忽略不计。

(3) 水分利用效率及休闲效率计算

$$WUE = Y / ET$$

式中^[11], WUE 为水分利用效率(kg hm⁻² mm⁻¹), Y 为籽粒产量(kg/hm²), ET 为小麦生育期总耗水量(mm)。

休闲效率(%) = (休闲期结束时土壤贮水量 - 上季收获时土壤贮水量) / 休闲期降水量 $\times 100\%$ 。

1.3.2 植株含水量、干物质积累及产量测定

在开花期和收获期采集植物样品,每小区随机选取 3 个采样点,每点取 20 株,沿根茎结合处剪去根系后,同一小区 3 个样点混合,作为一个分析样品,现场称取鲜重。称取鲜重后,在 120℃ 下杀青 30 min,80℃ 烘干至恒重,称量干重。冬小麦产量数据采用全区收获法确定,现场称鲜重,取样测定含水量后计算烘干重。小麦开花期的生物量,收获期的生物量和产量均采用烘干重表示。植株含水量(%) = (植株鲜重 - 植株干重) / 植株鲜重 $\times 100\%$ 。

1.3.3 经济效益计算

$$\text{产量收入(元/hm}^2\text{)} = \text{籽粒产量} \times \text{市场价格}$$

$$\text{产量纯收益(元/hm}^2\text{)} = \text{产量收入} - \text{总投入}$$

总投入包括化学肥料投入、种子、农药、地膜、人工投入,还有播种、耕作处理的机械投入。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 软件处理、SPSS 20.0 软件进行统计分析,采用 LSD 法进行差异显著性检验,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 产量和主要农艺指标

从表 2 可见,地膜覆盖较无覆盖(CK)显著提高了冬小麦籽粒产量和生物产量,但收获指数却低于 CK,处理间上述指标存在显著差异。以 PB 的籽粒产量和生物产量最高,但收获指数最低。

覆膜首先影响营养生长,覆膜较 CK 生物产量提高幅度远大于籽粒产量提高幅度。2008—2009 年覆膜平均较 CK 籽粒单产提高 49.4%(39.3%—64.4%),生物产量提高 63.2%(50.7%—86.5%),收获指数降低 8.2%(4.1%—11.9%)。2009—2010 年度趋势与 2008—2009 年度相似,覆膜平均较 CK 增产 53.2%(37.0%—79.1%),生物产量提高 72.1%(52.8%—108.3%),收获指数降低 10.6%(6.1%—14.0%)。

两年度单位面积穗数、穗粒数、千粒重的处理间变异系数依次为:28.3%—28.9%、13.7%—15.3%、1.7%—3.9%,表明处理间产量差异主要由穗数差异引起,其次为穗粒数,而千粒重处理间差异较小或较稳定。

两年相关分析表明,籽粒产量与生物产量呈极显著正相关($r=0.992^{**}$ — 0.995^{**}),收获指数与产量($r=-0.943^{*}$ — -0.946^{*})、生物产量($r=-0.959^{*}$ — -0.963^{*})均呈显著负相关。表明籽粒高产建立在高生长量基础上,但随着生物产量提高,收获指数下降,生长冗余相应提高。以 PB 生长量最大、但生长冗余最多,以 CK 生长量最小,但收获指数最高、生长冗余最小,表明露地在土壤更加干旱时,反而会促进干物质向籽粒的转移。RPR 生物产量虽然高于 PSB,但籽粒产量、收获指数均低于 PSB,是一种籽粒生产效率较低的覆膜种植方式。

表 2 冬小麦产量及农艺指标

Table 2 Yield and agronomic traits of winter wheat

处理 Treatments	籽粒产量 Yield/(kg/hm ²)	收获期生物量 Biomass/(kg/hm ²)	收获指数 HI/%	穗数 SN/ $\times 10^4$ hm ⁻²	穗粒数 GNS	千粒重 GW/g
2008—2009						
PSB	3789.5b	8084.7b	46.9b	532.4a	23.8b	32.9a
PB	4312.5a	10005.8a	43.1c	522.5a	27.5b	33.0a
RPR	3655.5c	8177.9b	44.7c	428.3b	27.6b	34.0a
CK	2623.5d	5365.0c	48.9a	265.5c	33.1a	32.8a
2009—2010						
PSB	3103.5b	7017.4b	44.2b	281.6a	30.2b	36.4ab
PB	3874.5a	9566.7a	40.5c	352.2a	29.8b	37.9a
RPR	2964.0c	7125.2b	41.6c	328.8a	27.1b	35.4bc
CK	2163.5d	4593.4c	47.1a	168.2b	38.2a	34.6c

PSB:全膜覆土穴播 Whole field plastic mulching with soil covering on the top of the plastic mulch and bunch-seeding; PB:全膜穴播 Whole field plastic mulching without soil cover on the top of the plastic mulch and bunch-seeding; RPR:垄膜沟播 Ridges mulched with plastic film and row-seeding in the furrow; CK:露地条播 Un-mulched with row-seeding as control; HI: Harvesting index; SN: Spike numbers; GNS: Grain numbers per spike; GW: 1000-grain weight; 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

2.2 耗水量与产量、生长量的相关

覆膜的高产和高生长量建立在高耗水基础上。两年度覆膜处理的单位面积籽粒产量、收获期生物产量不仅显著高于 CK(表 2),而且生育期耗水量、水分利用效率(WUE)也显著高于 CK(表 3)。由于覆膜耗水较多,因此开花期和收获期的土壤贮水量各覆膜处理都显著低于 CK。两年相关分析表明,产量与耗水量($r=0.952^{*}$ — 0.958^{*})、WUE($r=0.930^{*}$ — 0.935^{*})显著正相关,收获期生物产量也与耗水量($r=0.957^{*}$ —

0.973^{*})、WUE($r=0.900^*—0.926^*$)显著正相关,而耗水量与 WUE($r=0.650—0.798$)相关未达到显著水平。

两年度籽粒产量、收获期生物产量、耗水量的变异系数分别为 19.7%—23.2%、24.2%—28.7%、13.4%—15.0%,表明旱地小麦对水分敏感,耗水量较小的差异就可引起产量和生长量的较大差异。

开花期是营养器官生长量达到最大的时期,也是气温最高、耗水强度最大的时期。从表 3 可见,开花期干物质积累量、植株含水量覆膜明显高于 CK,但由于高生长伴随着高耗水,开花期土壤贮水量明显低于 CK。2008—2009 年,覆膜处理平均较 CK 开花期干物质积累量提高 69.9% (57.0%—89.9%),植株含水量提高 8.0% (5.8%—11.4%),但 0—200 cm 土壤贮水量降低 14.9% (9.8%—19.0%)。2009—2010 年度的差异趋势与上年度相同,覆膜处理平均较 CK 开花期干物质积累量提高 151.6% (132.8%—184.4%),植株含水量提高 10.1% (7.0%—14.4%),土壤贮水量降低 9.6% (4.1%—19.6%)。3 种覆膜方式间比较,两年度虽然 PB 开花期生长量均最大、但由于生长耗水过度、开花期土壤水分状况最差,而 PSB 的植株和土壤水分状况均好于其它两种覆膜方式。

覆膜与 CK 间耗水量的差异远大于覆膜处理间的差异,同时,覆膜较 CK 耗水量提高幅度远高于 WUE 提高幅度。2008—2009 年耗水量覆膜平均较 CK 高 33.5% (32.7%—34.6%),而覆膜处理间高低相差只有 1.4%;2009—2010 年耗水量覆膜平均较 CK 高 34.1% (25.3%—44.9%),而覆膜处理间高低相差只有 15.6%。水分利用效率覆膜处理两年度则分别平均比 CK 提高 11.8% (8.8%—22.1%) 和 14.3% (4.2%—24.0%)。

开花前的旺盛生长阶段的耗水量占生育期总耗水量的大部分,相应的有效降水也占全生育期总有效降水的大部分,耗水与降水比例基本吻合。2008—2009 年开花前的耗水量和有效降水量分别为 170.0、125.4 mm,耗水比例和有效降水比例分别为 70.3%、87.3%。2009—2010 年开花前耗水量和有效降水量分别为 195.6、150.9 mm,耗水比例和有效降水比例分别为 69.4%、71.2%。

表 3 耗水量与土壤贮水量变化

Table 3 Changes of total water consumption and soil water storage

处理 Treatments	开花期			全生育期		播种至开花期		开花至成熟期		水分利 用效率 WUE/ ($\text{kg hm}^{-2} \text{mm}^{-1}$)
	Flowering stage			The whole stages		Sowing to flowering		Flowering to maturity		
	土壤 贮水量 WS/mm	干物质 积累量 DMW/ (kg/hm^2)	植株 含水量 WP/%	有效 降水量 Rainfall $\geq 5 \text{ mm}$	耗水量 WCA/ mm	耗水量 WCA/ mm	耗水比例 Ratio/%	耗水量 WCA/ mm	耗水比例 Ratio/%	
2008—2009										
PSB	296.1b	7619.6b	71.4a	143.6	256.3a	168.2b	65.6c	88.3a	34.4a	14.8b
PB	265.8c	8886.2a	67.8b	143.6	260.0a	187.4a	72.0a	72.7b	28.0b	16.6a
RPR	276.3c	7346.3c	68.5b	143.6	257.3a	188.1a	73.0a	69.4b	27.0b	14.2bc
CK	328.3a	4679.8d	64.1c	143.6	193.2b	136.1c	70.4b	57.2c	29.6b	13.6c
2009—2010										
PSB	322.0b	6631.4b	66.6a	211.9	282.4b	186.7c	66.1c	95.6b	33.9a	11.0a
PB	269.8c	7938.1a	62.3b	211.9	326.4a	210.0b	64.3d	116.4a	35.7a	11.9a
RPR	319.0b	6495.8b	63.4b	211.9	297.5b	222.6a	74.8a	74.8c	25.2b	10.0b
CK	335.7a	2790.8c	58.2c	211.9	225.3c	162.9d	72.3b	62.4d	27.7b	9.6b

WS: Soil water storage; WP: Water content of plant; DMA: Dry matter accumulation amount; WCA: Water consumption amount; WUE: Water use efficiency

2.3 土壤水分恢复状况

覆膜的高耗水是否会造成下茬作物墒情的恶化、进而影响生产的可持续性,主要看下茬播前覆膜土壤水分是否能达到 CK 水平。从表 4 可见,由于覆膜耗水较多,收获期 0—200 cm 土壤贮水量覆膜显著低于 CK,2008—2009 和 2009—2010 年覆膜平均分别比 CK 低 64.7 mm (63.1—66.8 mm)、47.0 mm (36.2—60.4 mm)。但通过 7—9 月夏闲期土壤水分的补充恢复,2009 和 2010 年秋播时 0—200 cm 土壤贮水量覆膜均超过 CK,分别比 CK 高 29.8 mm (20.9—40.7 mm)、22.8 mm (18.5—26.7 mm),表明连续覆膜种植不会造成下茬墒情的

恶化。

休闲效率是衡量夏闲期降水转化为土壤贮水的指标,休闲效率的高低主要与土壤蓄水保墒能力有关。从表 4 可见,覆膜的休闲效率显著高于 CK,2009 年和 2010 年夏闲期覆膜的休闲效率分别较 CK 平均高出 41.8 和 86.4 个百分点,两年休闲效率均以 PB 最高。覆膜的休闲效率显著高于 CK,显然与覆膜的保墒功能有直接关系。

比较上茬和下茬播种期土壤贮水,可以看出水分的周年平衡状况。上、下茬播种期土壤墒情的差异大小,不仅与各处理的生长季耗水量、蓄水保墒能力有关,也与年度间降水量差异有关。比较播种期 0—200 cm 土壤贮水量(表 4),覆膜处理第二茬(2009 年)平均高出第一茬(2008 年)24.7 mm(15.8—35.6 mm),而 CK 由于夏闲期土壤贮水补充量小,低于第一茬播种期 5.1 mm,可见覆膜通过有效的蓄水保墒,更有利于维持年度间的水分平衡和可持续生产。

进一步比较 2008 年和 2009 年播种期不同土层水分差异(表 5),虽然覆膜处理 2009 年播种期 0—200 cm 土壤贮水明显高于 2008 年,但主要是增加了 0—150 cm 的土壤贮水,而 150—200 cm 的土壤深层仍低于 2008 年,表明上茬和下茬间土壤水分的恢复平衡主要靠降水入渗补充。

表 4 土壤贮水量和休闲效率的变化

Table 4 Changes of soil water storage and summer fallow efficiency

处理 Treatments	播种期土壤贮水量 WSS/mm	收获期土壤贮水量 WSH/mm	土壤贮水变化量 CWS/mm	夏闲期土壤 贮水补充量 IWS/mm	休闲效率 Fallow efficiency/%	夏闲期结束时 土壤贮水量 WSAS/mm
2008—2009						
PSB	338.9	226.2b	112.7c	128.5b	66.4b	354.7b
PB	338.9	222.5b	116.4b	152.0a	78.6a	374.5a
RPR	338.9	225.2b	113.7bc	136.3b	70.4b	361.5b
CK	338.9	289.3a	49.6a	44.5c	23.0c	333.8c
2009—2010						
PSB	354.7b	284.2b	70.5b	7.9b	10.0b	292.1a
PB	374.5a	260.0d	114.5d	28.4a	35.3a	288.4b
RPR	361.5b	275.9c	85.6c	8.0b	10.0b	283.9b
CK	333.8c	320.4a	13.4a	-55.0c	-68.4c	265.4c

WSS; Soil water storage at winter wheat sowing; WSH; Soil water storage at harvest; CWS; Changes of soil water storage; IWS; Increase of soil water storage after summer fallow; WSAS; Soil water storage after summer fallow

表 5 2009 与 2008 冬小麦播种期 0—200 cm 土层水分变化

Table 5 Change of water storage in 0—200 cm soil layers at winter wheat sowing in 2009 compared to that in 2008

处理 Treatments	土层 Soil layers/cm								贮水变化总量 TCWS/mm
	0—20	20—40	40—60	60—90	90—120	120—150	150—180	180—200	
PSB	4.0	5.3	5.5	7.3	1.1	8.6	-8.6	-7.5	15.7b
PB	7.8	13.3	15.2	34.7	1.8	-5.3	-19.5	-12.5	35.5a
RPR	0.5	-0.7	18.5	19.0	8.6	-2.3	-13.1	-8.0	22.5b
CK	-4.0	-5.7	-1.6	0.6	1.8	10.1	-4.5	-2.0	-5.3c

差值 = 2009 年播种期土壤贮水(mm) - 2008 年播种期土壤水分(mm); TCWS; Total change of soil water storage

2.4 种植效益比较

覆膜栽培的种植效益远高于 CK(表 6)。2008—2009 年, PB、PSB 和 RPR 的纯收益分别较 CK 高 2208.6、1553.4 和 1471.8 元/hm²。2009—2010 年, PB、PSB 和 RPR 的纯收益分别较 CK 高 2262.4、3531.0 和 916.2 元/hm²。第二茬 PSB 纯收益高于 PB, 主要是 PSB 可一次覆膜、两茬使用, 因此成本大幅降低; 两个生长季平均纯收益, 以 PSB 最高、PB 次之、RPR 最低。

表 6 冬小麦生产成本和经济效益

Table 6 Cost and return of winter wheat production

处理 Treatments	肥料投入 Fertilizer cost/ (元/hm ²)	地膜投入 Plastic film cost/ (元/hm ²)	机械投入 Mechanical costs/ (元/hm ²)	其它投入 Other costs/ (元/hm ²)	总投入 Total cost/ (元/hm ²)	产量收入 Yield income/ (元/hm ²)	纯收益 Return/ (元/hm ²)
2008—2009							
PSB	935.0	1470.0	1050.0	675.0	4130.0	9094.8	4964.8
PB	935.0	1470.0	1050.0	1275.0	4730.0	10350.0	5620.0
RPR	935.0	630.0	1050.0	1275.0	3890.0	8773.2	4883.2
CK	935.0	0	675.0	1275.0	2885.0	6296.4	3411.4
2009—2010							
PSB	0	0	675.0	675.0	1350.0	7448.4	6098.4
PB	0	1470.0	1725.0	1275.0	4470.0	9298.8	4828.8
RPR	0	630.0	1725.0	1275.0	3630.0	7113.6	3483.6
CK	0	0	1350.0	1275.0	2625.0	5192.4	2567.4

机械投入费用包括:机械覆膜、机械耕地等投入费用;其它投入包括:农药、种子等材料投入费用;机械覆膜:375 元/hm²,机械耕地:675 元/hm²;肥料价格:磷酸二铵 2.5 元/kg,尿素 1.6 元/kg,小麦的市场价格为 2.4 元/kg

3 讨论

两个试验年度相比,虽然第一年度生育期有效降水降水量(143.6 mm)低于第二年度(211.9 mm),但第一年度的产量、收获期生物产量和 WUE 平均分别明显高于第二年度 18.8%、11.8%和 39.3%。这主要有两个方面原因:第一,第二年度各处理均未施肥,可能影响了生长和产量;第二,与两年度降水和干旱发生的时段有关。第一年度播种-抽穗期有效降水量(105.4 mm)明显高于第二年度(85.2 mm),因此第一年度前期供水状况较好,营养生长量较大,抽穗后干旱才开始凸显。而第二年度孕穗前受旱较重,虽然抽穗后降水较多,但前期干旱已经严重抑制了营养生长和分蘖成穗,导致穗数不足而减产。由此可见,旱地小麦前期干旱减产损失更大;从表 1 可见,第二年各处理单位面积穗数较第一年度分别平均下降 35.3%,而由于后期降水较多,穗粒数、千粒重反而分别平均提高 11.9%和 8.7%。

植株生长量和冠层蒸腾面积虽然第二年度小于第一年度,但各处理生育期耗水量均明显一致高于第一年度。生育期总耗水量第二年度平均高出第一年度 17.0%(41.0 mm),其中开花前平均多耗水 25.6 mm,开花后多耗水 15.4 mm,这与第二年度气温总体偏高、导致地温相应推高、加剧了植株蒸腾有关。第二年度返青-成熟期 0—25 mm 土壤温度平均高出第一年度 3.0℃,其中返青-抽穗期平均高出 3.8℃,开花-成熟期平均高出 2.2℃。

国内外相关研究认为^[2,11,17,25],覆膜的高产建立在高耗水基础之上,本研究结论与之相符。但单纯的比较耗水量的意义有限,覆膜的真正作用在于其改变了土壤耗水结构,使得耗水主要用于蒸腾性生产^[15,21]。全地面覆盖的 PB 和 PSB 的耗水几乎 100%属于植株蒸腾耗水,考虑到 PB 和 PSB 穴孔和地膜破损,PB 和 PSB 的植株蒸腾耗水比例估计可达 95%。按照收获期生物产量估算 WUE,第一和第二年度 PB 生物产量 WUE 最高,分别为 40.5 kg hm⁻² mm⁻¹和 30.9 kg hm⁻² mm⁻¹。若露地 CK 和半覆盖 RPR 的生物产量 WUE 与 PB 相同,则可推算出 CK 第一和第二年度的棵间蒸发(即土壤蒸发)耗水比例分别为 31.4%和 34.0%,推算结果与前人普遍研究结果接近(30%—40%)^[29],同样可推算出半覆盖 RPR 两年度土壤蒸发耗水比例分别为 21.5%和 22.5%。RPR 无覆膜种植带棵间蒸发耗水比例低于 CK,可能与 RPR 种植带局部密植、冠层郁闭程度高于 CK 有关。冠层大小影响太阳辐射和气流交换,进而可能会降低影响土壤温度、减少土壤蒸发耗水。无论如何,以上推算仅仅是建立在简单假设基础上,不同种植方式间的耗水差异和影响因素的可能比想象的更复杂,例如水温互作、穴孔水分散失的边缘效应等因素对耗水量和耗水结构的影响如何,尚未可知。

本研究发现,覆膜在籽粒高产伴随高生物产量同时,生长冗余也增加,这和人研究结果一致^[30-33]。若

覆膜处理达到 CK 的收获指数,可推算出两年度覆膜分别平均有 362.6 kg/hm^2 和 408.4 kg/hm^2 的生物产量可转化为籽粒产量,相应的,覆膜处理籽粒产量可在原基础上分别提高 9.1% 和 12.0%,可见通过栽培和育种途径,削减覆膜生长冗余、实现增产的潜力较大。

比较 3 种覆膜方式的种植效益和农事操作难度,PSB 可实现一次覆膜、多茬使用,节省购膜成本,操作简单,经济效益较高;PB 容易造成苗与膜孔错位,掏苗费工费时,且地膜只能用 1a,用膜成本高;RPR 播种方便,但播种面积只占土地总面积一半,提高单位面积穗数较困难,同时植株局部拥挤,增产幅度较小,效益较低。综合考虑,PSB 是一种高产高效、农事操作简单、适宜推广应用的覆膜种植方式。

参考文献 (References):

- [1] Zhang S L, Sadras V, Chen X P, Zhang F S. Water use efficiency of dryland wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management. *Field Crops Research*, 2013, 151: 9-18.
- [2] Gan Y T, Siddique K H M, Turner N C, Li X G, Niu J Y, Yang C, Liu L P, Chai Q. Chapter Seven-Ridge-furrow mulching systems—an innovative technique for boosting crop productivity in semiarid rain-fed environments. *Advances in Agronomy*, 2013: 118: 429-476.
- [3] Wang F H, He Z H, Sayre K, Li S D, Si J S, Feng B, Kong L G. Wheat cropping systems and technologies in China. *Field Crops Research*, 2009, 111(3): 181-188.
- [4] 张德奇, 廖允成, 贾志宽. 旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(1): 208-213.
- [5] 李凤民, 王静, 赵松岭. 半干旱黄土高原集水高效旱地农业的发展. *生态学报*, 1999, 19(2): 259-264.
- [6] Han J, Jia Z K, Wu W, Li C S, Han Q F, Zhang J. Modeling impacts of film mulching on rainfed crop yield in Northern China with DNDC. *Field Crops Research*, 2014, 155: 202-212.
- [7] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响. *生态学报*, 2011, 31(5): 1295-1302.
- [8] 张永涛, 汤天明, 李增印, 王开增. 地膜覆盖的水分生理生态效应. *水土保持研究*, 2001, 8(3): 45-47.
- [9] 孙惠民, 程满金, 郑大玮, 张建新. 北方半干旱集雨补灌旱作区节水农业发展模式. *应用生态学报*, 2005, 16(6): 1072-1076.
- [10] 王俊, 李凤民, 宋秋华, 李世清. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 205-210.
- [11] 李儒, 崔荣美, 贾志宽, 韩清芳, 路文涛, 侯贤清. 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. *中国农业科学*, 2011, 44(16): 3312-3322.
- [12] 张淑芳, 柴守玺, 蔺艳春, 常磊, 杨长刚. 干旱年份地膜覆盖模式对春小麦土壤水分和产量的影响. *中国农业气象*, 2011, 32(3): 368-374.
- [13] 陈辉林, 田霄鸿, 王晓峰, 曹玉贤, 吴玉红, 王朝辉. 不同栽培模式对渭北旱塬区冬小麦生长期间土壤水分、温度及产量的影响. *生态学报*, 2010, 30(9): 2424-2433.
- [14] 王琦, 张恩和, 李凤民. 半干旱地区膜垄和土垄的集雨效率和不同集雨时期土壤水分比较. *生态学报*, 2004, 24(8): 1820-1823.
- [15] 李廷亮, 谢英荷, 任苗苗, 邓树元, 单杰, 雷震宇, 洪坚平, 王朝辉. 施肥和覆膜垄沟种植对旱地小麦产量及水氮利用的影响. *生态学报*, 2011, 31(1): 212-220.
- [16] 廖允成, 温晓霞, 韩思明, 贾志宽. 黄土台原旱地小麦覆盖保水技术效果研究. *中国农业科学*, 2003, 36(5): 548-552.
- [17] 薛澄, 王朝辉, 李富翠, 赵护兵, 周玲, 李小涵. 渭北旱塬不同施肥与覆盖栽培对冬小麦产量形成及土壤水分利用的影响. *中国农业科学*, 2011, 44(21): 4395-4405.
- [18] Gao Y H, Xie Y P, Jiang H Y, Wu B, Niu J Y. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching. *Field Crops Research*, 2014, 156: 40-47.
- [19] 王喜庆, 李生秀, 高亚军. 地膜覆盖对旱地春玉米生理生态和产量的影响. *作物学报*, 1998, 24(3): 348-353.
- [20] Qin S H, Zhang J L, Dai H L, Wang D, Li D M. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area. *Agricultural Water Management*, 2014, 131: 87-94.
- [21] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, Long T D. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam. *Field Crops Research*, 2006, 95(2/3): 115-125.
- [22] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 马一凡, 于显枫, 柳燕兰. 旱地全膜双垄沟播玉米的土壤水热效应及其对产量的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2609-2614.
- [23] Liu C A, Zhou L M, Jia J J, Wang L J, Si J T, Li X, Pan C C, Siddique K H M, Li F M. Maize yield and water balance is affected by nitrogen application in a film-mulching ridge-furrow system in a semiarid region of China. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52(Part B): 103-111.
- [24] 李巧珍, 李玉中, 郭家选, 刘晓英, 徐春英. 覆膜集雨与限量补灌对土壤水分及冬小麦产量的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 25-30.

- [25] Li F M, Wang J, Xu J Z. Plastic film mulch effect on spring wheat in a semiarid region. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2005, 25(4): 5-17.
- [26] 李凤民, 鄢珣, 王俊, 李世清, 王同朝. 地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理. *中国农业科学*, 2001, 34(3): 330-333.
- [27] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 马一凡, 于显枫. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种对玉米季节性耗水和产量的调节机制. *中国农业科学*, 2013, 46(5): 917-926.
- [28] 王红丽, 张绪成, 宋尚有. 半干旱区旱地不同覆盖种植方式玉米田的土壤水分和产量效应. *植物生态学报*, 2011, 35(8): 825-833.
- [29] 于振文. 作物栽培学各论(北方本). 北京: 中国农业出版社, 2013: 54-55.
- [30] 龚月桦, 杨俊峰, 王俊儒, 李生秀, 刘普灵. 覆膜对小麦¹⁴C-储备物在灌浆期转运分配的影响. *中国农业科学*, 2007, 40(02): 258-263.
- [31] Du Y J, Li Z Z, Li W L. Effect of different water supply regimes on growth and size hierarchy in spring wheat populations under mulched with clear plastic film. *Agricultural Water Management*, 2006, 79(3): 265-279.
- [32] 杨长刚, 柴守玺, 陈恒洪, 常磊, 岳云. 不同覆膜种植方式对旱地冬小麦干物质积累与分配的影响. *甘肃农业大学学报*, 2012, 47(6): 49-56.
- [33] 潘晓云, 王永芳, 王根轩, 曹琴东, 王静. 覆膜栽培下春小麦种群的生长冗余与个体大小不整齐性的关系. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 177-184.