

周年覆盖对黄土旱塬冬小麦产量及降水利用率的影响

李廷亮^{1,2}, 谢英荷¹, 高志强³, 洪坚平^{1,2}, 马红梅¹, 贾俊香¹, 孟会生¹, 孟丽霞⁴

(1. 山西农业大学资源与环境学院, 山西 太谷 030801;

2. 山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心, 山西 太谷 030801;

3. 山西农业大学农学院, 山西 太谷 030801; 4. 山西省五台县气象局, 山西 五台 035502)

摘要: 针对黄土旱塬麦田降水资源少, 降水季节与冬小麦需求错位, 小麦产量低而不稳的问题, 为探究适合当地旱作冬小麦高产高效的栽培措施, 通过4年大田试验, 研究了无覆盖条播(USL)、垄膜沟播(RFSF)和全膜覆土穴播(WFFHS)种植方式下, 冬小麦夏休闲期残膜覆盖的蓄水保墒效果以及周年覆盖条件下冬小麦的产量效应和降水生产效率情况。结果表明: 夏休闲期残膜覆盖可以提高土壤蓄水保墒能力, 垄膜沟播和全膜覆土穴播处理2 m土壤休闲蓄水量分别较露地条播处理高12%~22% ($P < 0.05$) 和14%~30% ($P < 0.05$), 相应休闲效率在29%~42%, 亦显著高于无覆盖条播处理, 且差异性随夏休闲期降水量增加而增加。全膜覆土穴播周年覆盖具有显著的增产效应, 较传统无覆盖条播平均增产40%, 覆膜种植促进了冬小麦千粒重和穗数的增加, 籽粒产量与穗数呈极显著正相关($r=0.830^{**}$), 覆膜和合理构建群体是提高旱塬冬小麦产量的重要措施。不同处理间水分生产效率、休闲期降水生产效率和周年降水生产效率以全膜覆土穴播处理最高, 平均值分别为19.3, 9.3, 11.7 kg/(hm²·mm)。黄土旱塬冬小麦生育期耗水深度达2 m以下, 覆膜种植处理的耗水量高于无覆盖条播处理, 且覆膜加大对1 m以下深层土壤水分的消耗。从作物高产和降水高效利用角度考虑, 全膜覆土穴播周年覆盖是黄土旱塬冬小麦一种有效的栽培模式。

关键词: 黄土旱塬; 冬小麦; 周年覆盖; 降水生产效率

中图分类号: S152.7; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0332-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.052

Effects of Annual Mulching on Yield and Precipitation Use Efficiency of Winter Wheat in the Dry Highland of Loess Plateau

LI Tingliang^{1,2}, XIE Yinghe¹, GAO Zhiqiang³, HONG Jianping^{1,2},

MA Hongmei¹, JIA Junxiang¹, MENG Huisheng¹, MENG Lixia⁴

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801;

2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Agricultural Resources and Environment, Shanxi

Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 3. College of Agriculture, Shanxi Agricultural

University, Taigu, Shanxi 030801; 4. Meteorological Bureau of Wutai County, Wutai, Shanxi 035502)

Abstract: In order to solve the problems of low precipitation, inconsistency of rain season and water demand period for winter wheat, low and unstable yield in the dry highland of Loess Plateau, a 4-years field experiment was conducted to optimize the cultivation pattern of highyield and high efficiency in winter wheat production. In this study, the effects of residual plastic film mulching on rainfall reserving and soil moisture conservation in summer fallow period, and the effects of annual film mulching on yield and precipitation use efficiency of winter wheat were studied under three planting patterns, including uncovered and sowing in line (USL), ridge filming and sowing in furrow (RFSF) and whole field filming and hole sowing (WFFHS). The results showed that residual plastic film mulching in summer fallow period enhanced the capacity of rainfall reserving and soil moisture conservation. The water storage content in 2 m depth of soil during fallow period were 12% ~ 22% ($P < 0.05$) and 14% ~ 30% ($P < 0.05$) greater in RFSF and WFFHS treatments than that in USL treatment, respectively, and the fallow efficiencies in these two treatments ranged from 29% to 42%, which were significant greater than that in USL treatment, meanwhile, the difference increased with the increasing of precipitation in summer fallow period. Compared with the USL treatment, the average yield

收稿日期: 2017-08-29

资助项目: 山西农业大学博士后专项经费项目; 国家公益性行业(农业)科研专项项目(201303104, 201503124); 国家自然科学基金项目(31771727)

第一作者: 李廷亮(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤肥力与环境研究。E-mail: litingliang021@126.com

通信作者: 高志强(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事旱作栽培及生理研究。E-mail: gaozhiqiang1964@126.com

in WFFHS treatment increased by 40%. Plastic film mulching improved the thousand-kernel weight and spike number per hectare of winter wheat, and there existed a significant positive correlation between grain yield and spike number per hectare ($r = 0.830^{**}$), so plastic film mulching and reasonable population constructing were considered as the important measures to increase the yield of winter wheat in dry highland of Loess Plateau. The water production efficiency, precipitation production efficiency in fallow period and annual precipitation production efficiency of WFFHS treatment were the highest among all the treatments, which were 19.3, 9.3 and 11.7 kg/(hm² · mm), respectively. The water consumption depth was more than 2 m during growth period of winter wheat, the water consumption under film mulching condition was greater than that of USL treatment, and furthermore, film mulching promoted the water consumption in soil layer deeper than 1 m. In a comprehensive consideration of grain yield and precipitation use efficiency, the whole field filming and hole sowing pattern combined with annual film mulching was the recommendable cultivation mode for winter wheat in the dry highland of Loess Plateau.

Keywords: dry highland of Loess Plateau; winter wheat; annual mulching; precipitation productive efficiency

小麦是黄土高原地区主要粮食作物,仅山西、陕西、甘肃和宁夏地区小麦播种面积达 270 万 hm², 占我国小麦播种面积的 10% 以上。黄土高原地表和地下水资源贫乏,大部分地区年降水量仅 500 mm 左右,且年降水 60% 以上集中在 6—9 月,是我国典型雨养农业区^[1]。但黄土旱塬平均土层厚度在 100—200 m,具有巨大的蓄水和生产潜力,因此如何最大限度地利用降水资源一直是当地旱作农业研究重点。黄土旱塬冬小麦生产存在生长季耗水需求和降水季节分配错位,产量低而不稳等问题,前人研究^[2-4]表明秸秆覆盖能够增加土壤蓄水保墒能力,调节土壤温度,改善土壤物理性质,增加土壤有机质含量,促进地上部养分吸收,进而提高作物产量。同时长期秸秆覆盖也会对作物出苗、病虫害发生产生一定影响^[5]。地膜覆盖由于其显著的蓄水增产效果及易操作性在旱作农业区被大面积推广,目前我国旱作小麦地膜覆盖方式主要包括垄膜沟播、全膜穴播及全膜覆土穴播 3 种模式^[6]。为了实现降水周年调控,伏雨春用的水分跨季节利用,近年来有关冬小麦夏休闲期蓄水保墒技术成为了研究热点。Guo 等^[7]研究表明,黄土高原雨养区夏休闲期降水量与次年冬小麦产量呈显著相关水平。孙敏等^[8]研究表明,干旱年、平水年夏休闲期深翻处理下播前 3 m 土壤蓄水量可分别提高 27% 和 16%,丰水年,休闲期深松效果更佳,可提高 12%。张萌等^[9]研究表明,旱地麦田夏休闲期 400~460 mm 降水条件下,深翻结合渗水地膜全覆盖处理下 3 m 土壤蓄水量可增加 33~56 mm,进而提高氮素转运效率和小麦产量,且提早覆盖效果更佳。在地膜减量化使用和作物高产高效生产的前提下,本研究在传统生育期地膜覆盖种植基础上,提出旱地麦田夏休闲期继续残膜覆盖的一膜两用技术,具体通过 4 年大田试验,系统研究了不同覆膜方式下 2 m 土壤蓄水保墒效果,周年覆盖条件下小麦增产幅度、降水生产效率

和耗水特征,旨在为提高黄土高原雨养农业降水利用效率及高产环境友好型生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2013—2017 年在晋南黄土旱塬冬小麦种植区进行(36°22' N, 111°35' E, 海拔 648 m)。试验区年均气温 12.6 °C, ≥10 °C 活动积温 3 327 °C, 无霜期 180~210 d, 年均降水量约 500 mm, 约 70% 集中在 6—9 月。供试土壤为石灰性褐土,质地为中壤土, pH 7.8, 耕层土壤有机质平均含量 14.5 g/kg, 全氮 0.87 g/kg, 硝态氮 8.7 mg/kg, 速效磷 11.4 mg/kg, 速效钾 180.6 mg/kg。试验期间(2013 年 6 月至 2017 年 6 月)降水量分布见图 1。

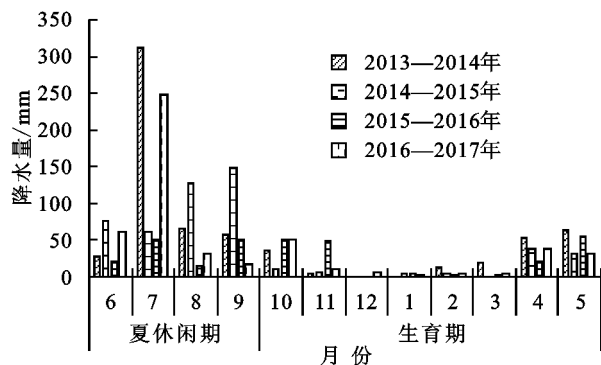


图 1 2013—2017 年试验田周年降水情况

1.2 试验设计

试验共设 3 个处理,研究无覆盖条播(USL)、垄膜沟播(RFSF)和全膜覆土穴播(WFFHS)3 种栽培方式下旱地冬小麦的产量和降水利用效果,种植技术具体实施方案见表 1。不同种植方式处理的 N、P₂O₅ 和 K₂O 养分供应量相同,具体施肥量采用“1 m 硝态氮监控施肥,0—40 cm 土层磷钾恒量施肥”技术^[10-11]。全部肥料在播种前一次性均匀撒入相应小区,翻入土壤耕层后耙平。全生育期除自然降水外不灌溉。冬小麦供试品种为长 8744,播量为 150 kg/

hm²,4 年播种时间在 9 月 30 日至 10 月 9 日,收获时间在 6 月 5—10 日,6 月中旬至 9 月下旬为夏休闲期。每个处理重复 4 次,采用随机区组排列,由于地块大小原因,小区面积为 210~520 m²。

表 1 黄土旱塬冬小麦不同种植技术实施方案

处理	管理方式	
	生育期	夏休闲期
USL	施肥整地后,不覆膜,直接播种,行距 20 cm	冬小麦收获后,留茬 30 cm,秸秆粉碎还田,伏天耕 1 次,播前旋 1 次
RFSF	施肥整地后,起垄覆膜、沟内膜侧播种,播种 2 行,行距 20 cm,垄宽 35 cm,垄高 10 cm,沟宽 30 cm	冬小麦收获后,继续保持垄上残膜覆盖、留茬 30 cm,沟内秸秆覆盖,播前除膜后,耕 1 次,旋 1 次
WFFHS	施肥整地后,采用 120 cm 宽幅膜平铺地面,膜上覆土 0.5~1 cm 左右,进行穴播种植,播种深度 3~5 cm,行距 15~16 cm,穴距 12 cm,每幅膜播 7~8 行	冬小麦收获后,继续保持全膜残膜覆盖、留茬 30 cm,膜上秸秆覆盖,播前除膜后,耕 1 次,旋 1 次

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量 分别于 2013—2017 年小麦收获期(6 月 7 日,6 月 5 日,6 月 8 日,6 月 9 日,6 月 10 日),2013—2016 年冬小麦播前(9 月 30 日,10 月 1 日,10 月 4 日,10 月 9 日)采集 2 m 深土壤样品,每 20 cm 为一层,垄膜沟播处理的土样采于垄沟播种行,采用烘干法测定土壤含水量。

1.3.2 产量及产量构成 在收获期于各小区中央收获 3 m×20 m 样方小麦,脱粒计产,并代表性选取 3 个 1 m 长的小麦样段,调查穗数、穗粒数及千粒重。

1.4 计算公式及统计方法

土壤贮水量(mm)=土壤质量含水量(%)×土壤容重(g/cm³)×土层厚度(cm)×10;

0—20,20—40,40—60,60—80 cm 土壤容重分别为 1.21,1.35,1.35,1.30 g/cm³,80 cm 以下土层按 1.36 g/cm³ 计算。

休闲效率(%)=夏休闲期 2 m 土壤贮水增加量(mm)/夏季休闲期降水量(mm)×100%;

耗水量(mm)=播前 2 m 土壤贮水量(mm)—收获后 2 m 土壤贮水量(mm)+生育期降水量(mm)

本研究参考以往有关黄土高原冬小麦耗水特征^[12-14],采用 2 m 土层贮水量变化来计算冬小麦生育期耗水量,可一定程度上反映黄土旱塬冬小麦生育期耗水情况。试验期间冬小麦生育期降水仅 96~187 mm,不存在渗漏现象,同时黄土旱塬地下水位比较深,不存在地下水补给现象。

水分生产效率(kg/(hm²·mm))=小麦籽粒产量(kg/hm²)/耗水量(mm)

周年降水生产效率(kg/(hm²·mm))=小麦籽粒产量(kg/hm²)/周年降水量(mm)

周年降水量(mm)=夏休闲期降水量(mm)+生育期降水量(mm)

试验数据用 Excel 软件整理作图,并用 SPSS 数据处理统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 黄土旱塬麦田夏休闲期不同处理 2 m 土壤蓄水状况

不同处理收获时 2 m 土壤贮水量为 161.6~231.4 mm,存在一定的年际差异性,覆膜处理较无覆盖条播处理平均低 6%,其中全膜覆土穴播处理在 2013 年、2015 年、2016 年度显著低于无覆盖条播处理(表 2),表明覆膜种植增加了旱地冬小麦生育期耗水。夏休闲期残膜覆盖可提高 2 m 土壤休闲期蓄水能力,除 2015 年,其他 3 个年度垄膜沟播和全膜覆土穴播处理的 2 m 土壤休闲蓄水量分别较无覆盖条播处理高 12%~22%(*P*<0.05)和 14%~30%(*P*<0.05),相应休闲效率在 29%~42%,亦显著高于无覆盖条播处理。杨长刚等^[15]研究也表明夏休闲期降水可以补充 2 m 土壤在冬小麦生长季的水分消耗,残膜覆盖蓄水效果显著高于无覆盖条播。原因可能是残膜覆盖在利用播种沟或茬穴蓄水的同时,减少了土面蒸发。

表 2 夏休闲期(6—9 月)残膜覆盖对黄土旱塬麦田 2 m 土壤蓄水状况的影响

年份	处理	收获时(6 月)播前(9 月)		休闲期	休闲期	休闲
		贮水/mm	贮水/mm	蓄水/mm	降水/mm	效率/%
2013	USL	231.4a	357.8b	126.4b	464.7	27.2b
	RFSF	225.2ab	379.3a	154.1a	464.7	33.2a
	WFFHS	212.1b	376.9a	164.8a	464.7	35.5a
2014	USL	214.7a	315.9b	101.2b	413.3	24.5b
	RFSF	212.6a	333.9a	121.3a	413.3	29.3a
	WFFHS	212.3a	342.4a	130.1a	413.3	31.5a
2015	USL	172.4a	241.3a	68.9a	140.3	49.1a
	RFSF	166.2ab	236.6a	70.4a	140.3	50.0a
	WFFHS	161.6b	231.9a	70.3a	140.3	50.1a
2016	USL	214.4a	344.9a	130.5b	357.6	36.5b
	RFSF	194.5b	340.2a	145.7a	357.6	40.7a
	WFFHS	186.5b	335.6a	149.1a	357.6	41.7a

注:同一列同一年份数据后面的不同字母表示差异显著(*P*<0.05)。下同。

由图 2 可知,3 种植方式下夏休闲期降水量和 2 m 土壤蓄水量及休闲效率均呈极显著的线性关系(*n*=16,*r*_{0.01}=0.623),因此一定程度上可以通过夏

休闲期降水来表征旱地麦田冬小麦生育期水分供应能力,进而预测产量。Cao 等^[16]也提出在黄土高原地区,可利用夏休闲期降水量确定冬小麦目标产量,进而定量计算氮磷钾肥施用量。本研究中不同处理下 2 m 土壤蓄水量随夏休闲期降水量的增加而增加,但休闲效率则随夏休闲期降水量增加而降低,表明随降水量增加,增加土壤雨水入渗量的同时,无效蒸发的

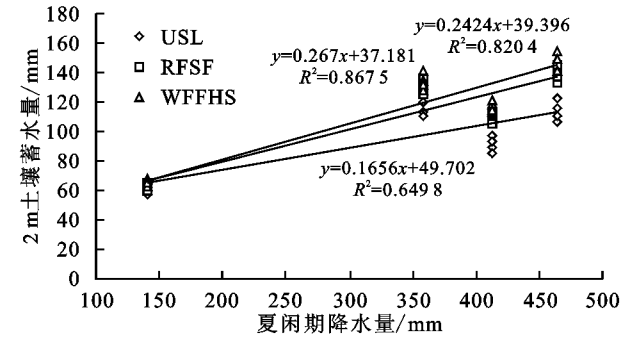
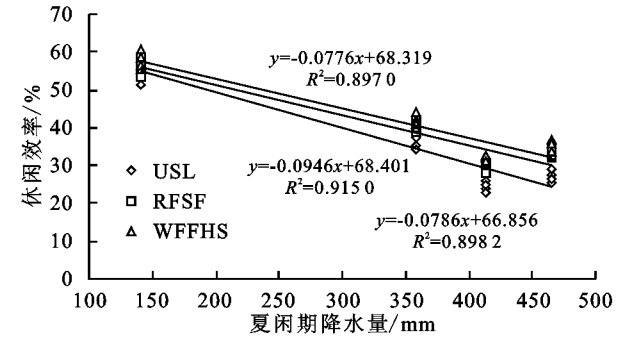


图 2 黄土旱塬麦区夏休闲期降水和 2 m 土壤蓄水量及休闲效率的关系

2.2 黄土旱塬冬小麦不同种植方式的产量效应

不同处理下冬小麦产量表现出一定的年际差异性,2015—2016 年度各处理下小麦籽粒产量和生物产量分别较其他 3 年减产 27%~36%和 31%~41%(表 3),原因与 2015—2016 年度夏休闲期降水量(140.3 mm)偏少有关。4 年无覆盖条播处理籽粒产量平均为 4 051 kg/hm²,略高于赵护兵等^[18]调研的西北典型区域旱地

比例也在逐渐增加。这与之前的研究结果^[17]不尽相同,究其原因,休闲效率的高低与土壤孔隙状况、降水强度、地面覆盖及其他环境因素均有关关系。同时本研究表明,当夏休闲期降水量低于 150 mm 时,残膜覆盖与裸地条件下的蓄水量和休闲效率无显著差异,当降水量在 350 mm 以上时,残膜覆盖处理的 2 m 土壤蓄水量和休闲效率显著高于裸地处理。



冬小麦产量 3 729 kg/hm²。垄膜沟播和全膜覆土穴播处理平均籽粒产量分别较无覆盖条播种植高 21.6%($P < 0.05$)和 40.0%($P < 0.05$),其中全膜覆土穴播处理籽粒产量亦显著高于垄膜沟播处理。侯慧芝等^[19]在西北黄土高原半干旱区春小麦上的试验也表明全膜覆土穴播具有 40%~220%的显著增产效果。不同处理间冬小麦地上部干物质积累量的差异性类同于籽粒产量。

表 3 不同处理对冬小麦产量及产量构成的影响

年份	处理	籽粒产量/ (kg · hm ⁻²)	生物产量/ (kg · hm ⁻²)	产量构成要素			收获 指数/%
				穗数/(10 ⁴ 个 · hm ⁻²)	穗粒数/粒	千粒重/g	
2013—2014	USL	4495c	10005c	480c	21a	48b	45a
	RFSF	5246b	12566b	534b	20a	52a	42a
	WFFHS	6277a	14232a	620a	21a	52a	44a
2014—2015	USL	4614c	10222c	589b	24a	41b	45a
	RFSF	5051b	11573b	641ab	25a	42ab	44a
	WFFHS	5662a	12823a	671a	26a	44a	44a
2015—2016	USL	2831c	5881c	347b	22a	42b	48a
	RFSF	3825b	8360b	487a	21a	44a	46b
	WFFHS	4426a	9435a	504a	22a	45a	47ab
2016—2017	USL	4262c	9724c	443b	22b	41a	44a
	RFSF	5583b	12244b	550a	25a	43a	46a
	WFFHS	6310a	14222a	600a	25a	43a	44a

从产量构成看,公顷穗数表现为全膜覆土穴播>垄膜沟播>无覆盖条播,且覆膜处理显著高于无覆盖条播处理。小麦穗粒数受品种遗传特性和环境因子的共同影响^[20-21],本试验条件下不同处理间穗粒数差异不显著,平均值为 22.8,表明覆膜引起的水热变化不会影响到小麦小花分化发育和最终结实。而本研究中千粒重总体表现为覆膜处理大于无覆盖条播,且在 2013—2016 年期间差异达显著水平,原因可能是覆膜的水分效应延长了小麦的灌浆速率和灌浆时间。

不同处理收获指数无显著差异,平均为 45%。

相关性分析表明,籽粒产量与穗数、穗粒数及千粒重的相关系数分别为 0.830^{**},0.386,0.376($n = 12, r_{0.01} = 0.708$)。可知,全膜覆土穴播高产的原因很大程度上取决于其播种行距减小,使冬小麦可以充分利用水分和光照资源,群体穗数增加,因此覆膜和合理构建群体是提高旱塬冬小麦产量的重要措施。另外通过回归经济产量(Y)与穗数(X_1)、穗粒数(X_2)和千粒重(X_3)之间的关系,有 $Y = 4.75X_1 + 264.15X_2 + 166.76X_3 - 11171.46$,本

试验条件下穗粒数和千粒重变化幅度不大,分别取其平均值22.8和44.8带入上式,可有表征当地经济产量与穗数的关系式 $Y=4.75X_1+2322.01$ 。

2.3 黄土旱塬冬小麦不同种植方式的降水生产效率

周年降水量(夏休闲期降水+生育期降水)可作为评价黄土旱塬一年一作区冬小麦潜在可利用水分的指标。由表4可知,除2015—2016年特殊干旱,其余周年降水量为500~650 mm。周年降水量用于冬小麦生产的生育期耗水比例占到51%~71%,覆膜处理耗水量显著高于无覆盖条播处理,表明旱塬小麦高产是建立在高耗水的基础上的。水分生产效率表示每1 mm耗水所生产的籽粒产量,其高低取决于光合产物的形成和水分蒸散两个过程。覆膜种植可提高冬小麦水分生产效率,其中全膜覆土穴播处理水分生产效率最高,平均达19.3 kg/(hm²·mm),较无覆盖条播处理高30.1%($P<0.05$),同时较我国小麦水分生产效率平均水平16.5 kg/(hm²·mm)^[22]和世界范围内平均水平10.9 kg/(hm²·mm)^[23]分别高17%和77%。Daryanto等^[24]研究认为覆膜种植比较高的水分生产效率是由于更大比例的水分消耗由土面蒸发转变为了作物蒸腾,促进水分消耗由物理过程向生理过程转化。

表4 不同处理对冬小麦水分生产效率、休闲期降水生产效率和年降水生产效率的影响

年份	处理	周年降水量/mm	生育期耗水量/mm	水分生产效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	休闲期降水生产效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	周年降水生产效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2013—2014	USL	651.3	329.7b	13.6b	7.0b	6.9c
	RFSF	651.3	353.3a	14.8b	6.8b	8.1b
	WFFHS	651.3	351.2a	17.9a	7.9a	9.6a
2014—2015	USL	509.2	239.4b	19.3b	9.2b	9.1c
	RFSF	509.2	263.6a	19.2b	8.8b	9.9b
	WFFHS	509.2	276.7a	20.5a	9.7a	11.1a
2015—2016	USL	324.1	210.7b	13.4c	9.0ab	8.7c
	RFSF	324.1	225.9a	16.9b	8.5b	11.8b
	WFFHS	324.1	229.2a	19.3a	9.5a	13.7a
2016—2017	USL	504.3	310.7b	13.7b	8.6b	8.5c
	RFSF	504.3	302.8b	18.4a	9.3ab	11.1b
	WFFHS	504.3	325.4a	19.4a	10.2a	12.5a

2.4 黄土旱塬冬小麦不同种植方式的耗水特性

由图3可知,2013—2017年4个年度冬小麦播前和收获后2 m土层贮水量的分布特征。可知,当夏休闲期降水量为360~460 mm,播前2 m土壤各土层贮水量可恢复到20~40 mm,各土层贮水量不同处理间差异不显著,蓄水主要集中在20—160 cm土层。当夏休闲期降水量在140 mm时,蓄水主要分布在0—40 cm土层。

生育期降水为86~187 mm,经过一个生育期的耗水,4个年度冬小麦收获后2 m土壤各土层贮水量

通过建立总产量(y)与休闲期降水量(x_1)和生育期降水量(x_2)的多元回归方程,可分割休闲期降水和生育期降水对产量的贡献率。对于无覆盖条播处理有: $y=8.133x_1+7.679x_2$,对于垄膜沟播处理有: $y=8.051x_1+13.473x_2$,对于全膜覆土穴播处理有: $y=9.042x_1+16.145x_2$ 。进而可利用休闲期降水所获得的那部分产量除以休闲期降水量计算休闲期降水生产效率。休闲期降水生产效率和周年降水生产效率用来评价旱地农田相应时期每1 mm降水可以转化的经济产量,不同处理间休闲期降水生产效率和周年降水生产效率均以全膜覆土穴播处理最高,分别达7.9~10.2,9.6~13.7 kg/(hm²·mm),显著高于其他处理。垄膜沟播种植的周年降水生产效率显著高于无覆盖条播处理,但二者之间休闲期降水生产效率无显著差异。另外通过分析表明,不同处理周年降水生产效率和周年降水的相关系数为(-0.6527**)~(-0.9046**)($n=16$, $r_{0.01}=0.623$),降水生产潜力随降水量的增加而显著降低,说明黄土旱塬随降水量的增加,其无效消耗比例也在增加,因此在正常年降水量500 mm左右的情况下,通过创新蓄水保墒技术,从水肥耦合角度出发,黄土旱塬小麦还具有很大的增产潜力。

基本稳定在10~30 mm,对应土壤质量含水量为4%~10%,总体表现为随土层加深而增加,部分土层含水量基本达到了有效水下限值。冬小麦生育期耗水深度达2 m以下,覆膜种植处理的耗水量要高于无覆盖条播处理,这与王彩绒等^[25]和杨长刚等^[26]的研究结果一致。覆膜种植相对于无覆盖条播种植加大了冬小麦对1 m以下深层水分的消耗,原因可能是覆膜促进根系下扎,对深层水分调用明显加强^[27],深层水分也会由于水分梯度差上移,造成深层耗水加大^[28]。

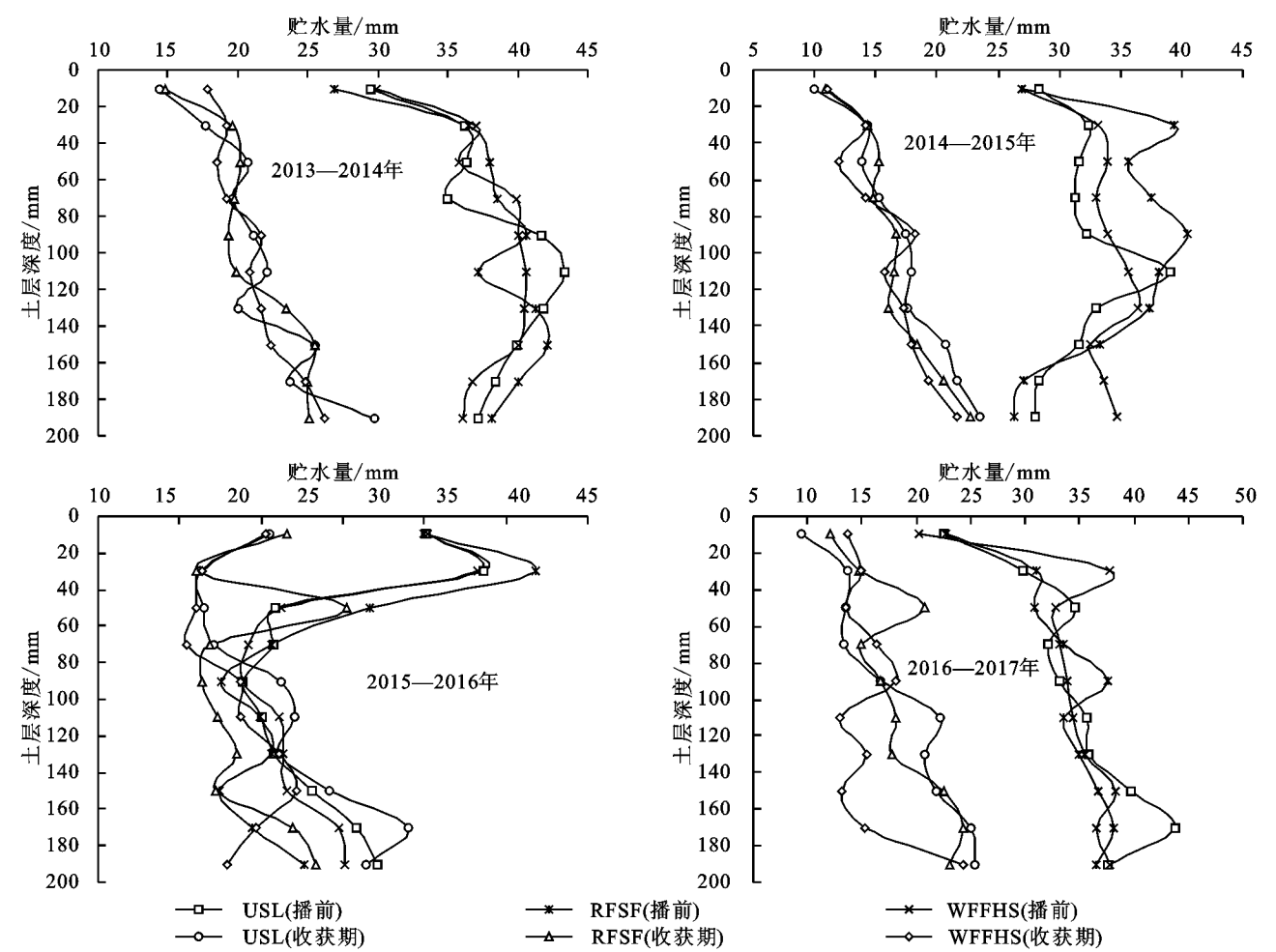


图 3 不同处理下旱塬麦田 2 m 土壤贮水量分布特征

3 结论

黄土旱塬夏休闲期降水可补充冬小麦生长季 2 m 土壤的水分消耗,蓄水主要集中在 20—160 cm 土层,夏休闲期降水量和 2 m 土壤蓄水量呈极显著正相关($r=0.806^{**} \sim 0.913^{**}$)。残膜覆盖可提高土壤蓄水保墒能力,垄膜沟播和全膜覆土穴播处理 2 m 土壤蓄水量分别较无覆盖条播处理高 12%~22% ($P<0.05$) 和 14%~30% ($P<0.05$),相应休闲效率在 29%~42%。当夏休闲期降水量低于 150 mm 时,残膜覆盖与裸地条件下的蓄水量和休闲效率均无显著差异,当降水量在 350 mm 以上时,残膜覆盖处理的 2 m 土壤蓄水量和休闲效率显著高于裸地处理。全膜覆土穴播周年覆盖具有显著的增产效应,较传统无覆盖条播平均增产 40%。相对于无覆盖条播种植,覆膜条件促进了冬小麦千粒重的增加,但不同处理间穗粒数无显著差异,籽粒产量与穗数呈极显著正相关($r=0.830^{**}$)。全膜覆土穴播通过减少播种行距,使得冬小麦能充分利用水分和光照资源,增加了群体穗数,因此覆膜和合理构建群体是提高旱塬冬小麦产量的重要措施。由于覆膜促进了土壤水分消耗由土面蒸发向作物蒸腾转化,全膜覆土穴播水分生产效率

和降水生产效率均显著高于无覆盖条播种植。黄土旱塬冬小麦生育期耗水深度达 2 m 以下,覆膜种植处理的耗水量高于无覆盖条播处理,并且覆膜加大对 1 m 以下深层土壤水分的消耗。

参考文献:

[1] 韩思明. 黄土高原旱作农田降水资源高效利用技术途径[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 1-9.

[2] 方文松, 朱自玺, 刘荣花, 等. 秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 123-128

[3] Blanco-Canqui H, Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 95: 240-254.

[4] Sun Y H, Xie Y X, Wang C Y, et al. Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rainfed dry-land regions of North China [J]. European Journal of Agronomy, 2016, 81: 37-45.

[5] 何刚. 夏休闲期不同地表覆盖对旱地冬小麦产量及水肥利用的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

[6] Kader M A, Senge M, Mojid M A, et al. Recent ad-

- vances in mulching materials and methods for modifying soil environment [J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 168: 155-166.
- [7] Guo S L, Zhu H H, Dang T H, et al. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China [J]. *Geoderma*, 2012, 189/190: 442-450.
- [8] 孙敏,白冬,高志强,等. 休闲期耕作对旱地麦田土壤水分与小麦植株氮素吸收、利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 203-208.
- [9] 张萌,孙敏,高志强,等. 旱地麦田休闲期覆盖保水与植株氮素转运及产量的关系[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 117-124.
- [10] 章孜亮,刘金山,王朝辉,等. 基于土壤氮素平衡的旱地冬小麦监控施氮[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1387-1396.
- [11] 曹寒冰,王朝辉,师源超,等. 渭北旱地冬小麦监控施氮技术的优化[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(19): 3826-3838.
- [12] 王玉玲,李军. 黄土旱塬区平衡施肥下不同土壤耕作模式的蓄水纳墒及作物增产增收效应研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 151-163.
- [13] 张建军,樊廷录,党翼,等. 黄土旱塬耕作方式和施肥对冬小麦产量和水分利用特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(6): 1016-1030.
- [14] 邓振镛,张强,王强,等. 黄土高原旱作区土壤贮水力和农田耗水量对冬小麦水分利用率的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(14): 3672-3678.
- [15] 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质量产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 661-671.
- [16] Cao H B, Wang Z H, He G, et al. Tailoring NPK fertilizer application to precipitation for dryland winter wheat in the Loess Plateau [J]. *Field Crops Research*, 2017, 209: 88-95.
- [17] 李廷亮,谢英荷,洪坚平,等. 晋南旱地麦田夏闲期土壤水分和养分变化特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1601-1608.
- [18] 赵护兵,王朝辉,高亚军,等. 西北典型区旱地冬小麦农户施肥调查分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 840-848.
- [19] 侯慧芝,吕军峰,郭天文,等. 西北黄土高原半干旱区全膜覆土穴播对土壤水热环境及小麦产量的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5503-5513.
- [20] Demotes-Mainard S, Jeuffroy M H, Robin S, et al. Spike dry matter and nitrogen accumulation before anthesis in wheat as affected by nitrogen fertilizer: Relationship to kernels per spike [J]. *Field Crops Research*, 1999, 64: 249-259.
- [21] Chen D, Zhang J P, Wang J S, et al. Inheritance and availability of high grain number per spike in two wheat germplasm lines [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(9): 1409-1416.
- [22] 王斌,孟祥龙,徐波,等. 基于文献数据估算中国主要粮食作物水分利用效率[J]. *水利发展研究*, 2017, 17(4): 24-29, 39.
- [23] 张喜英. 提高农田水分利用效率的调控机制[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 80-87.
- [24] Daryanto S, Wang L, Jacinthe P A. Can ridge-furrow plastic mulching replace irrigation in dryland wheat and maize cropping systems? [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 190: 1-5.
- [25] 王彩绒,田霄鸿,李生秀,等. 沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(2): 208-214.
- [26] 杨长刚,柴守玺,常磊,等. 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[J]. *生态学报*, 2015, 35(8): 2676-2685.
- [27] Gao Y H, Xie Y P, Jiang H Y, et al. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching [J]. *Field Crops Research*, 2014, 156: 40-47.
- [28] 黄明斌,党廷辉,李玉山,等. 黄土区旱塬农田生产力提高对土壤水分循环的影响[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 2676-2685.
- (上接第 331 页)
- [26] 樊俊,王瑞,胡红青,等. 不同价态外源硒对土壤硒形态及酶活性、微生物数量的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 137-141, 171.
- [27] 常琳琳,周守标,晁天彩,等. 土壤施硒量对鸭儿芹生长、生理特性及硒积累的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 157-163.
- [28] 周乾坤,周守标,孔娟娟,等. 施硒对紫云英硒积累和硒形态的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 304-309.
- [29] 刘群龙,宁婵娟,郝燕燕,等. 外源硒对梨树叶片衰老和光合同化物积累的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 314-318.
- [30] 高冬梅,赵宏伟,邹德堂,等. 不同灌溉方式对寒地粳稻农艺性状及产量的影响[J]. *作物杂志*, 2012(5): 145-149.
- [31] 张自常,徐云姬,褚光,等. 不同灌溉方式下的水稻群体质量[J]. *作物学报*, 2011, 37(11): 2011-2019.
- [32] 周超,胡玉荣,曾建明,等. 土壤因子对茶树硒吸收特性的影响[J]. *茶树科学*, 2015, 35(5): 429-436.