

垄膜沟种不同沟垄比对春玉米水分利用和产量的影响

刘 志¹, 肖继兵¹, 崔丽华²

(1. 辽宁省水土保持研究所, 辽宁 朝阳 122000; 2. 朝阳师范高等专科学校, 辽宁 朝阳 122000)

摘 要:为进一步提高半干旱区春玉米水分利用效率和产量,设计3种垄膜沟种不同沟垄比带型,分别为60 cm : 60 cm, 60 cm : 45 cm 和 60 cm : 30 cm,以传统种植为对照,研究不同处理对土壤水分和玉米产量的影响。结果表明:在2008—2009年的两年试验中,垄膜沟种不同带型处理的平均土壤贮水量在玉米整个观测期基本上比对照不同程度有所增加。由于两年间降雨量不同且降雨分布不均,使2008—2009年度沟垄集雨种植玉米产量差异很大。但不同带型增产趋势基本一致,两年间不同带型垄膜沟种的产量比对照分别增加9.85%~14.52%和24.88%~27.20%,水分利用效率分别比对照增加12.57%~14.75%和7.42%~18.03%。通过回归分析得出在辽西半干旱地区玉米垄膜沟种比较适宜的沟垄比为60 cm : 40.5 cm,此条件下可使玉米理论产量达到最高。垄膜沟种技术是适合于半干旱地区能较好提高水分利用效率和产量的一种种植方式。

关键词:垄膜沟种; 沟垄比; 春玉米; 土壤水分; 产量

中图分类号:S513; S273.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)01-0038-06

Effects of Different Ratios of Furrow to Ridge Under Ridge Film Mulching and Furrow Seeding on Water Use and Yield of Spring Corn

LIU Zhi¹, XIAO Jibing¹, CUI Lihua²

(1. Institute of Soil and Water Conservation of Liaoning, Chaoyang, Liaoning 122000, China; 2. Chaoyang Teachers College, Chaoyang, Liaoning 122000, China)

Abstract: The purpose of this study was to make full use of the limited natural rainfall, improve water use efficiency in dry farming area and promote high and stable yield of spring corn. The experiment was designed as three strip shapes which were 60 cm : 60 cm, 60 cm : 45 cm and 60 cm : 30 cm, respectively, to study the impacts of different strip shapes on spring corn yield and soil water while conventional farming was set as CK during the period from 2008 to 2009. The results showed that soil water storage of different strip shapes increased compared separately to CK during growth period of corn. The output differences of spring corn were obvious because of the differences of rainfall and rainfall distribution during the period from 2008 to 2009. But the trend of increasing production of different strip shapes was same and the yield of different strip shapes increased by 9.85%~14.52% and 24.88%~27.20%, respectively, and water use efficiency increased by 12.57%~14.75% and 7.42%~18.03%, respectively, compared to CK through two years field experiments. By regression analysis, the optimum ratio of furrow to ridge for spring corn was about 60 cm : 40.5 cm, which made the theory corn production highest. This technology could improve water use efficiency and yield compared to CK in the semi-arid areas.

Keywords: ridge film mulching and furrow seeding; ratio of furrow to ridge; spring corn; soil water; yield

辽西地区是典型的半干旱雨养农业区,降水主要集中在夏季,春季降雨偏少,对春播保苗和幼苗生长极为不利,降水资源紧缺是限制本区农业生产的主要因素。旱作区农田产量的增加要从水分要素入手,通过集雨、蓄水等途径,利用有限降水提高作物水分利

用效率,这是该区农业发展的基本途径^[1-2]。垄沟种植有利于改善田间小气候,有效提高土壤温度,减小风速,拦截径流,减少土壤流失,增加土壤蓄水,达到集水、保墒、增温的效果。同时有利于作物通风透光,充分发挥边行优势。在垄背上覆盖地膜,不仅有增温

保墒和减轻风蚀的作用,而且使自然降雨特别是 <10 mm 的无效或微效降雨能很快形成径流贮存到膜侧作物根部,将有限的降水尽量保留和集中到沟内种植区,使降雨在农田内就地实现空间再分配^[3-4],集水功能明显提高,从而使降水入渗更深,蒸发损失越小^[2,5-6],使水分利用效率增加,从而达到提高降雨资源利用率和玉米产量的目的^[7-12]。田间沟垄微型集雨系统沟垄比及沟宽和垄宽的不同,会对集水效果、土壤水分及作物产量产生一定的影响。关于沟垄微型集水种植几何关系的确定前人分别做了关于马铃薯、紫花苜蓿、谷子、春小麦、冬小麦和燕麦等作物的试验研究,分别确定了该作物在当地沟垄微型集水种植中的最优沟垄比^[13-19],王俊鹏^[20]、Li^[21]等研究认为玉米沟垄微集水种植最优沟宽和垄宽均为 60 cm 效果较好。

玉米是辽西地区的主要作物,其整个生育期需水量较多。而辽西地区玉米生育期多年平均降雨量少且季节分布不均,难以满足玉米高产稳产所需。要提高该区玉米产量,关键就是提高玉米对自然降雨的利用率。垄膜沟种方式可有效提高自然降雨利用率,然而该区玉米垄膜沟种最优沟垄比的研究却鲜有报道。为了进一步明确辽西地区(朝阳)玉米垄膜沟种微集水种植最优沟垄比,本文研究 2008—2009 年垄膜沟种不同沟垄比条件下对土壤水分、玉米产量和水分利用效率的影响,以期为该区玉米垄膜沟种提供一定的理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2008—2009 年在辽宁省水土保持研究所示范基地(朝阳)进行,该区地处 $40^{\circ}35'—42^{\circ}20'N$, $118^{\circ}50'—121^{\circ}20'E$,属北温带大陆性季风气候区,四季分明,温差大,年平均气温约 $7.15^{\circ}C$,年平均日照时数约 2 800 h, $10^{\circ}C$ 以上积温平均为 $3\ 220^{\circ}C$ 左右,无霜期约 150 d,年平均降水量为 438.9 mm,降水年际变化大,季节分布不均,70%~74%的降水集中在 6—8 月份,常以暴雨落下,水土流失严重。该区春季降水少,春风多,蒸发量大,以旱作农业为主。供试土壤类型为褐土,土壤质地为砂壤土,旱作平地,耕层土壤容重 1.30 g/cm^3 , pH 为 7.82,有机质含量为 11.9 g/kg,全氮为 0.69 g/kg,速效氮为 58 mg/kg,速效磷为 19.2 mg/kg,速效钾为 126 mg/kg。

1.2 试验设计

该试验共设置 3 种沟垄比,沟宽 60 cm 为定值,垄宽分别设为 30,45,60 cm,垄高均为 15 cm 左右,以传统

种植为对照。用犁起垄辅以人工修建成相间分布的沟和垄,垄上覆盖地膜,地膜厚度 0.008 mm,播种时在沟内膜侧种植两行玉米。随机区组排列,3 次重复。每重复每处理 10 行区,行长 10 m。供试作物为春玉米,品种为铁研 24 号,各处理种植密度约为 52 500 株/hm²,传统种植行距 50 cm。每处理施肥量相同,种肥为磷酸二铵(375 kg/hm², N 18%, P₂O₅ 46%),拔节初期追施尿素(375 kg/hm², N 46%)。每年 4 月上中旬起垄覆膜,5 月初播种,9 月末收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量 用烘干法测定,由于旱地玉米根系入土深度一般约 1 m, 0—50 cm 的土层中根量约占总根量的 90% 左右,因此播前和收获后测 1 m 深土壤水分,计算玉米耗水量。在玉米主要生育期(苗期、拔节期、抽雄期和灌浆期)测 0—60 cm 深土壤水分,分 6 个层次,分别为 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60 cm。

1.3.2 土壤贮水量及水分利用效率

$$W = h \times p \times b\% \times 10 \quad (1)$$

式中: W ——土壤贮水量(mm); h ——土层深度(cm); p ——土壤容重(g/cm^3); $b\%$ ——土壤水分质量百分数。

$$ET = P + \Delta W \quad (2)$$

$$WUE = Y/ET \quad (3)$$

式中: ET ——作物耗水量(mm); WUE ——水分利用效率 [$\text{kg}/(\text{mm} \cdot \text{hm}^2)$]; P ——作物生育期间降雨量(mm); Y ——按沟垄总面积计算的玉米籽粒产量(kg/hm^2); ΔW ——作物播前和收获后测定的 1 m 土层土壤贮水量的变化(mm)。玉米生育期间未灌溉,试验区地势平坦,地下水埋藏很深,因此地表径流和地下水补给量忽略不计。

1.3.3 蓄墒增加率

$$\text{蓄墒增加率} = (\Delta W_{\text{处理}} - \Delta W_{\text{CK}}) / \Delta W_{\text{CK}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: ΔW ——降水前后农田某土层内蓄水量增量(mm)。

1.3.4 产量 在玉米籽粒成熟期取样测产,产量按籽粒含水量 18% 计。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据计算及绘图, DPS 8.5 软件进行新复极差测验。

2 结果与分析

2.1 试验区降雨特征分析

2008 年玉米生育期间降雨量为 461.1 mm, 2009

年试验区遭遇严重的夏旱和秋旱,玉米生育期间降雨量仅为 270.4 mm。该试验区同期近 20 年平均降雨量为 382 mm,同期近 10 年平均降雨量为 366 mm。由此可见,2008 年为丰水年,2009 年为严重干旱年。由图 1 可见,玉米生育期间降雨呈明显的单峰式分布。6—8 月份平均降雨占玉米生育期平均降雨总量的 88.45%,以 7 月份降雨最多,9 月份降雨最少。两年间玉米生育期总计降雨 70 次,<5 mm 的降雨次数占 48.57%,<10 mm 的降雨次数占 72.86%,75.43%的降雨量来源于>10 mm 的降雨,可见此区玉米生育期间降雨以小雨为主,降雨总量来源于次数不多的中到大雨。垄膜沟种微集雨种植可有效利用微小降雨,使有限的降雨集中使用,使降雨资源充分有效化,从降雨特征分析可以看出,此技术模式在该区具有广阔的应用前景。

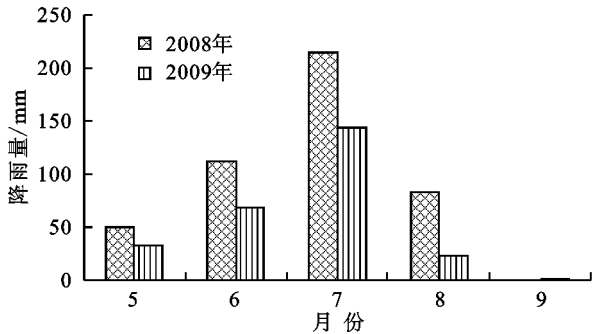


图 1 玉米生育期间月降雨分布

表 1 2009 年不同处理雨前和雨后土壤含水量

降雨前后	处理	土壤层次				平均值
		0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	(0—60 cm)
雨前土壤 水分/%	60 cm : 60 cm	6.85±1.12bA	9.20±2.59aA	12.61±0.89aA	9.71±3.27aA	10.11±0.71aA
	60 cm : 45 cm	7.85±0.77abA	11.04±1.03aA	11.17±1.73abA	12.46±4.71aA	11.03±0.86aA
	60 cm : 30 cm	9.09±1.49aA	12.34±3.52aA	10.18±1.16bA	8.68±4.12aA	9.86±0.69aA
	CK	7.36±0.59abA	9.49±2.53aA	11.23±0.73abA	9.39±3.50aA	9.68±1.06aA
雨后土壤 水分/%	60 cm : 60 cm	19.85±0.99aA	19.32±1.50aA	17.84±2.02aA	13.05±3.37abA	16.82±0.93aA
	60 cm : 45 cm	19.42±1.38aA	19.32±2.79aA	16.48±1.59aA	14.86±3.29aA	16.90±1.99aA
	60 cm : 30 cm	19.14±2.83aA	20.28±0.83aA	16.35±0.55aA	11.92±3.94abA	15.99±0.99aA
	CK	19.79±1.03aA	17.66±1.96aA	14.82±2.17aA	7.06±1.56bA	13.53±0.78bA
土壤水分 增量/%	60 cm : 60 cm	13.00	10.12	5.23	3.34	6.71
	60 cm : 45 cm	11.57	8.28	5.31	2.40	5.87
	60 cm : 30 cm	10.05	7.94	6.17	3.24	6.13
	CK	12.43	8.17	3.59	-2.33	3.85

注:表中小写字母为差异显著,大写字母为差异极显著,下表同。

2.3 不同带型垄膜沟种对玉米生育期间土壤水分的影响

图 2 中所测水分为种植区行间(沟间)和株间(膜侧)平均水分,不同处理土壤水分变化趋势基本一致。从 2008 年所测结果分析,各处理从苗期到抽雄期土壤水分都较高,各时期土壤水分变化不大,这主要是 2008 年玉米生育期间降雨较多的缘故。苗期 3 种带型

2.2 不同带型垄膜沟种集雨增墒效果

在玉米生长期雨季增墒期,对不同带型微集水种植降雨前后土壤水分进行了测定,比较不同带型垄膜沟种集雨增墒效果(表 1)。结果表明,各处理雨前(6 月 8 日)在长时间无有效降雨情况下,不同处理虽然在个别层次土壤水分存在一定的差异,但不同处理 60 cm 范围内平均土壤含水量差异不显著,微集水种植没有表现出明显的增墒效果。6 月 9 日降雨量 35 mm,一场有效降雨过后,垄膜沟种不同带型 60 cm 范围内平均土壤含水量与对照相比差异显著,3 种带型之间土壤含水量差异不显著。随着土层深度的增加,雨后不同处理土壤水分增加幅度逐渐降低。从降水入渗深度上分析,垄膜沟种 3 种处理降水入渗深度至少达到 60 cm,而对照降水入渗深度只有 40 cm 深,降水入渗越深,蒸发损失越小,则集雨增墒效果就越好。观测期间土壤水分测定深度只有 60 cm 深,如果测定深度更深一些,则对不同带型垄膜沟种强化降雨入渗深度及下文玉米生育期间土壤水分的分析会更充分。雨后不同带型垄膜沟种土壤水分增量在 60 cm 范围内分别高出雨前 6.71%,5.87%,6.13%,对照雨后土壤含水量高出雨前 3.85%。可见,垄膜沟种确有一定的集雨、蓄水、增墒效果。3 种不同带型 60 cm : 60 cm,60 cm : 45 cm 和 60 cm : 30 cm 较对照增蓄水量分别为 24.02,16.97,19.15 mm,蓄墒增加率分别为 74.29%,52.47%和 59.22%。

60 cm : 60 cm,60 cm : 45 cm,60 cm : 30 cm 土壤水分分别高出对照 2.52,-2.52,7.05 mm,拔节期分别高出对照 24.94,2.85,15.03 mm,抽雄期分别高出对照 2.36,5.72,4.20 mm,灌浆期分别高出对照 7.65,6.30,13.44 mm,3 种带型整个观测期平均土壤水分分别高出对照 9.37,3.09,9.93 mm;2009 年试验区发生严重的夏旱和秋旱,降雨量较 2008 年减少很多,除苗

期和灌浆期土壤水分与 2008 年相近外,其余时期各处理土壤水分都明显低于 2008 年。苗期 3 种带型 60 cm : 60 cm,60 cm : 45 cm,60 cm : 30 cm 土壤水分分别高出对照 9.75,15.29,7.56 mm,拔节期分别高出对照 3.61,11.34,1.51 mm,抽雄期分别高出对照 -4.45,7.06,-0.34 mm,灌浆期分别高出对照 16.04,3.28,-12.18 mm,其中 60 cm : 60 cm 和 60 cm : 45 cm 两种带型整个观测期平均土壤水分分别高出对照 6.24,

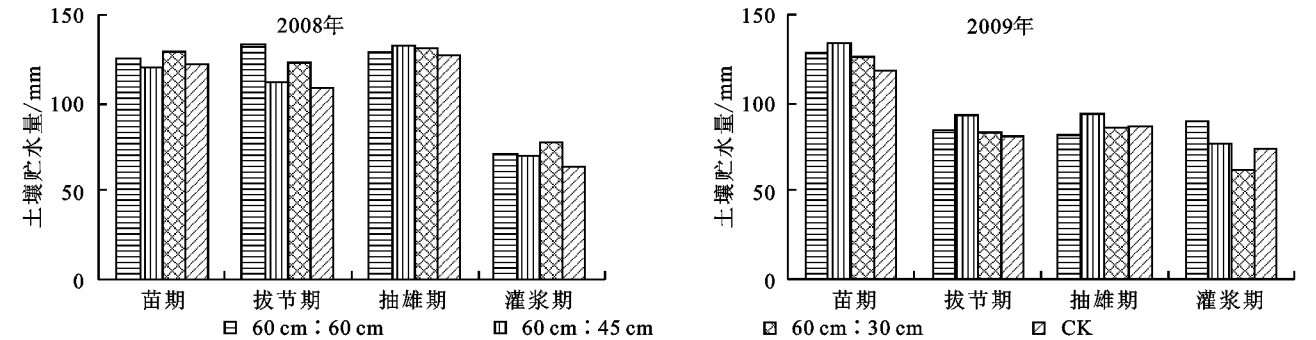


图 2 不同处理生育期间 0—60 cm 土壤水分

2.4 不同带型垄膜沟种对玉米株高的影响

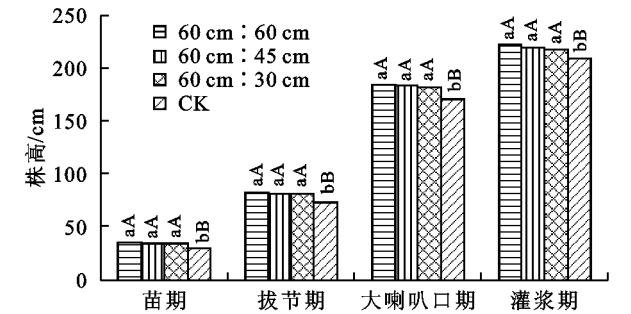
从图 3 可以看出,不同处理各生育时期以 60 cm : 60 cm 处理株高最高。苗期一大喇叭口期阶段,垄膜沟种不同带型集雨种植株高与传统种植差异极显著,各带型之间株高差异不明显;在灌浆期,沟垄比为 60 cm : 60 cm 的带型株高与传统种植差异极显著,60 cm : 45 cm 带型与传统种植株高差异显著,60 cm : 30 cm 带型与传统种植株高差异不显著。由于辽西半干旱区水分是限制该区玉米生产的主要障碍因子,垄膜沟种处理可有效汇集自然降水,具有一定的集雨、蓄水、保墒效果,可有效改善玉米种植区的土壤水分条件,从而促进了玉米的生长发育。

2.5 不同带型垄膜沟种对玉米产量的影响

从表 2 可以看出,不同年份由于降雨量及降雨分布的差异,两年间玉米产量差异非常大,但不同带型垄膜沟种玉米产量较对照的增产趋势基本一致。两年间不同带型垄膜沟种玉米水分利用效率较对照都不同程度增加。这是由于垄膜沟种微集雨种植垄上

9.24 mm,60 cm : 30 cm 带型整个观测期平均土壤水分低于对照 0.86 mm。从两年土壤水分调查结果分析,不同带型集雨种植整个观测期平均土壤水分与对照相比增幅不是非常明显,这是由于在多雨年份(2008 年)水分不再是限制玉米生长的关键因子,而在严重干旱年份(2009 年)可集雨水少,垄膜沟种集雨增墒功能受到抑制,即在丰水年或严重干旱年垄膜沟种集雨增墒效果会受到一定影响。

覆盖地膜,不仅土壤蒸发面减少,而且使无效或微弱降雨充分有效化,改变了降雨的空间分布,使有限降雨集中在沟内种植区,通过强化降雨入渗深度,起到了蓄墒保墒的效果,使“集、蓄、保”3 个技术环节紧密结合起来,最大限度满足玉米对水分的需求,提高了降雨资源利用率,从而提高土壤水分,促进玉米生长,提高了产量和水分利用效率。在干旱年份垄膜沟种集雨种植增产幅度较大。



注:大小写字母分别表示差异极显著和差异显著。

图 3 2009 年不同处理株高变化

表 2 不同处理产量及水分利用效率

处理	2008 年				2009 年			
	产量/ (kg · hm ⁻²)	比 CK 增产/%	WUE/ (kg · mm ⁻¹ · hm ⁻²)	比 CK 增加/%	产量/ (kg · hm ⁻²)	比 CK 增产/%	WUE/ (kg · mm ⁻¹ · hm ⁻²)	比 CK 增加/%
60 cm : 60 cm	10464aA	9.85	20.36	12.57	6716aA	24.88	21.70	15.56
60 cm : 45 cm	10742aA	12.77	20.76	14.75	6785aA	26.16	22.17	18.03
60 cm : 30 cm	10909aA	14.52	20.74	14.66	6841aA	27.20	20.17	7.42
CK	9526bA	—	18.09	—	5378bA	—	18.78	—

为了确定在沟垄微型集水种植体系中的最佳沟垄比例,设对照和垄膜沟种集水处理单位面积的经济产量(垄膜沟种处理的经济产量计算包括垄面积和沟

面积)为 y,覆膜条件下垄宽为 x(x 分别为 0,30,45,60 cm,0 cm 指传统种植),如图 4 所示,它们之间的关系可用一元二次回归方程表达。

对回归方程进行微分处理,发现当垄宽分别为 38, 43 cm 时,经济产量最高,其期望值可以达到 10 891,

6 899 kg/hm²。取两年垄宽平均值 40.5 cm 时,经济产量最高。在干旱年份垄膜沟种覆膜垄相对宽些。

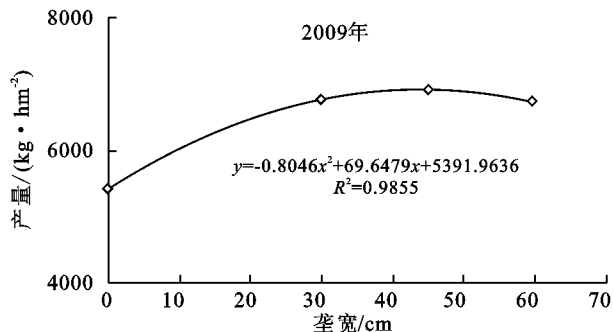
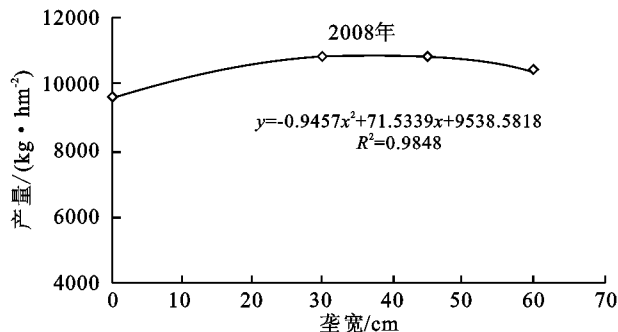


图4 不同处理产量与垄宽的关系

3 讨论与结论

3.1 讨论

沟垄间的几何关系指沟垄比值、宽窄及高度差等方面,沟垄比值和宽窄不同,对降雨的再分配能力也不同,进而影响作物的产量。连续两年试验表明,在朝阳地区沟垄微型集水种植玉米在沟宽:垄宽=60 cm:40.5 cm,此时经济产量理论最高。王俊鹏^[20]和李小雁^[22]等认为玉米垄膜沟种最适沟垄比为60 cm:60 cm,垄高分别为40 cm和15 cm时,能更好地发挥农田微集水技术的综合增产效应及提高水分利用率的作用。曹玉琴等^[23]在甘肃定西地区进行玉米沟垄覆盖试验,将沟垄比按3:1比例起垄覆膜,垄高20 cm。本研究结果与上述前人的研究结果存在一定的差异,这可能与不同地区的降雨特征、耕作习惯和土壤性质等有关。沟、垄宽度和沟垄比的设计即要保证有适宜的沟宽以保证沟内作物适当的种植密度和种植方式,又要有适宜的垄宽以确保集水、保墒效果。增加起垄覆膜宽度,固然提高了产流量和种植区水分,但产流区面积的增加必然引起种植区面积的相对减少^[24],产流区面积增加带来的水分富集所引起的增产效果能否弥补因种植区面积减少而带来的减产效果,还需综合考虑。本文虽然理论分析在沟宽60 cm条件下,垄宽在38~43 cm时玉米产量最高,但从两年试验结果可知,垄膜沟种不同沟垄比处理产量差异并不显著。同时已有研究^[24]表明,年降水量400 mm以上的半干旱或半湿润易旱区,一般要求起垄覆膜产流区宽度小于种植区宽度。辽西地区包括朝阳、阜新、葫芦岛和锦州部分区域,年降水量为300~500 mm,在这一降水量下如何科学构建玉米垄膜沟种合理的沟垄宽窄及比值需重点结合当地的气候特征、耕作习惯、机械水平、土壤和作物品种等因素因地制宜的确定。

3.2 结论

通过连续两年试验表明,垄膜沟种微集水种植具有一定的集雨蓄水保墒效果,无论在丰水年或严重干

旱年玉米生育期平均土壤水分基本都不同程度高于传统种植。不同带型处理株高在玉米不同生育阶段都不同程度高于传统种植。2008—2009年不同带型垄膜沟种处理较传统种植增产幅度分别为9.85%~14.52%和24.88%~27.20%,水分利用效率较传统种植分别增加12.57%~14.75%和7.42%~18.03%。通过连续两年试验表明,朝阳地区沟垄微型集水种植玉米比较适宜的沟垄比为1:0.7左右,即沟宽:垄宽=60 cm:40.5 cm,此时经济产量理论最高。

本研究土壤水分测定深度只有60 cm,如果测定深度更深一些,土壤水分数据会更有说服力。同时本研究垄膜沟种只设置了3种沟垄比且沟宽60 cm为定值,如果多设置几种沟垄比及沟宽多设置几种宽度,则朝阳地区垄膜沟种最优沟垄比的研究结果会更具说服力。

参考文献:

- [1] 姚建民,殷海善.降水资源有效化与旱地农业[J].资源科学,1999,21(4):47-50.
- [2] 李小雁,龚家栋.人工集水面降雨径流观测试验研究[J].水土保持学报,2001,15(1):1-4.
- [3] 王俊鹏,蒋骏,韩清芳,等.宁南半干旱地区春小麦农田微集水种植技术研究[J].干旱地区农业研究,1999,17(2):8-13.
- [4] 朱国庆,史学贵,李巧珍.定西半干旱地区春小麦农田微集水种植技术研究[J].中国农业气象,2001,22(3):6-9.
- [5] 韩娟,贾志宽,任小龙,等.模拟降雨量下微集水种植对玉米光合速率及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):81-85,101.
- [6] 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[J].生态学报,1999,19(2):259-264.
- [7] Boers T M, Zondervan K, Ben-Asher J. Micro-catchment-water-harvesting (MCWH) for arid zone development[J]. Agricultural Water Management, 1986, 12(1): 21-39.
- [8] 吕殿青,邵明安,王全九.垄沟耕作条件下的土壤水分分布试验研究[J].土壤学报,2003,40(1):147-150.
- [9] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation

- and yield of groundnut in northern Vietnam[J]. Field Crops Research, 2006, 95(2): 115-125.
- [10] Romic D, Romic M, Borosic J, et al. Mulching decreases nitrate leaching in bell pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(2): 87-97.
- [11] Tiwari K N, Singh A, Mal P K. Effect of drip irrigation on yield of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) under mulch and non-mulch conditions[J]. Agricultural Water Management, 2003, 58(1): 19-28.
- [12] Carter D C, Miller S. Three years experience with an on-farm macro-catchment water harvesting system in Botswana[J]. Agricultural Water Management, 1991, 19(3): 191-203.
- [13] 王琦, 张恩和, 李凤民, 等. 半干旱地区沟垄微型集雨种植马铃薯最优沟垄比的确定[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 38-41.
- [14] 寇江涛, 师尚礼. 旱地垄沟集雨种植紫花苜蓿最佳沟垄宽比的确定[J]. 草地学报, 2011, 19(2): 247-252.
- [15] 李永平, 贾志宽, 刘世新, 等. 宁南山区旱地苜蓿垄沟集水种植生物群体生长特征及其水分利用效率[J]. 水土保持研究, 2006, 13(5): 199-201, 204.
- [16] 丁瑞霞, 贾志宽, 韩清芳, 等. 宁南旱区沟垄微型集雨种植谷子最优沟垄宽度的确定[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 12-16.
- [17] 杨封科. 旱作春小麦垄膜沟种微集水种植技术研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 47-49.
- [18] 王晓凌, 董普辉. 密度对垄沟覆膜集雨冬小麦产量的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 222-226.
- [19] 强生才, 张恒嘉, 莫非, 等. 微集雨模式与降雨变律对燕麦大田水生态过程的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2365-2373.
- [20] 王俊鹏, 韩清芳, 王龙昌, 等. 宁南半干旱区农田微集水种植技术效果研究[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(4): 16-20.
- [21] Li X Y, Gong J D. Effects of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 243-254.
- [22] 李小雁, 张瑞玲. 旱作农田沟垄微型集雨结合覆盖玉米种植试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 45-48, 52.
- [23] 曹玉琴, 刘彦明, 王梅春, 等. 旱作农田沟垄覆盖集水栽培技术的试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 74-78.
- [24] 樊廷录. 旱地农田微集水种植的水分生产潜力增进机理研究[J]. 水土保持研究, 2003, 10(1): 98-100.

(上接第 37 页)

参考文献:

- [1] 李金峰, 孟杰, 叶菁, 等. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮的形成过程与发育特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 67-79.
- [2] 李聪会, 朱首军, 陈云明, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤抗蚀性的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 6-10.
- [3] Bowker M A, Miller M E, Belnap J, et al. Prioritizing conservation effort through the use of biological soil crusts as ecosystem function indicators in an arid region[J]. Conservation Biology, 2008, 22(6): 1533-1543.
- [4] 孟杰, 卜崇峰, 赵玉娇, 等. 陕北水蚀风蚀交错区生物结皮对土壤酶活性及养分含量的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1864-1874.
- [5] 肖波, 赵允格, 许明祥, 等. 陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 1019-1026.
- [6] 赵建成, 张丙昌, 张元明. 新疆古尔班通古特沙漠生物结皮绿藻研究[J]. 干旱区研究, 2006, 23(2): 189-194.
- [7] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 105-112.
- [8] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持, 2000, 224(11): 11-12.
- [9] 李莉, 孟杰, 杨建振, 等. 不同植被下生物结皮的水分入参与水土保持效应[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 105-109.
- [10] 张侃侃, 卜崇峰, 高国雄. 黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 808-812.
- [11] 孟杰. 黄土高原水蚀交错区生物结皮的时空发育特征研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [12] 肖波, 赵允格, 邵明安. 黄土高原侵蚀区生物结皮的人工培育及其水土保持效应[J]. 草地学报, 2008, 16(1): 28-33.
- [13] 成向荣, 黄明斌, 邵明安. 神木水蚀风蚀交错带主要人工植物细根垂直分布研究[J]. 西北植物学报, 2007, 27(2): 321-327.
- [14] 路炳军, 袁爱萍, 章文波. 径流小区集流桶(池)泥沙含量快速测定方法探讨[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 15-17.
- [15] 熊好琴, 段金跃, 王妍, 等. 毛乌素沙地生物结皮对水分入渗和再分配的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 82-87.
- [16] 张玉斌, 郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 5-10.
- [17] 秦宁强. 黄土丘陵区生物土壤结皮对降雨侵蚀力的响应及影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2012.