

DOI:10.11686/cyxb2017250

<http://cyxb.lzu.edu.cn>

李尚中, 樊廷录, 赵刚, 王磊, 党翼, 张建军, 唐小明, 王淑英. 品种、密度与覆膜方式对旱地春玉米产量和水分利用效率的影响. 草业学报, 2017, 26(12): 35-47.

LI Shang-Zhong, FAN Ting-Lu, ZHAO Gang, WANG Lei, DANG Yi, ZHANG Jian-Jun, TANG Xiao-Ming, WANG Shu-Ying. Effects of hybrid, plant density and plastic film mulching on yield and water use efficiency of dryland maize. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(12): 35-47.

品种、密度与覆膜方式对旱地春玉米 产量和水分利用效率的影响

李尚中, 樊廷录, 赵刚, 王磊, 党翼, 张建军, 唐小明, 王淑英

(甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要:探求品种、密度和覆膜方式对旱地地膜玉米群体特征、耗水量、产量及水分利用效率的影响,以期高效利用和开发有限的自然降水资源。试验采用裂区设计,主区为全膜双垄沟覆盖(FFDRF)和窄膜覆盖(NF)2个处理,裂区为紧凑型中晚熟先玉335和紧凑型中熟吉祥1号及平展型早熟酒单4号3个杂交种,裂区为低密度(4.5万株/hm²)、中密度(6.75万株/hm²)和高密度(9.0万株/hm²)3个处理。测定不同处理玉米的株高、叶面积指数、干物质积累量、0~2 m 土层土壤贮水量,结合作物产量分析农田水分利用效率。结果表明,全膜双垄沟覆盖可以有效地保蓄小量降水(小于10.7 mm),改善玉米生长条件,能快速提高苗期玉米株高和叶面积指数,干物质积累量、产量和水分利用效率较窄膜覆盖增加15.6%、14.3%和8.8%。随着密度的增加,百粒重、穗粒数表现为下降趋势,但增加种植密度的群体优势大于单株植株性状的综合劣势,玉米群体干物质积累量、产量和水分利用效率随着种植密度的增加而增加,9.0万株/hm²条件下,玉米干物质积累量、产量和水分利用效率较6.75和4.5万株/hm²依次增加8.3%、5.2%、3.4%和27.7%、32.9%、28.1%。不同品种适应密度改变的能力也不同,紧凑型的先玉335和吉祥1号适应密度改变能力强,耐密植,平展型酒单4号较弱,其中,先玉335产量和水分利用效率最高,较吉祥1号和酒单4号分别增加3.7%、1.7%和43.8%、37.1%。随着种植密度的增加,玉米耗水量呈增加趋势。不同品种间耗水量呈现出显著的差异,表现为先玉335>吉祥1号>酒单4号。可见,品种、密度、覆膜方式对旱地玉米群体结构、耗水量、籽粒产量和水分利用效率均有一定的调控作用,表现为品种>密度>覆膜方式。在实际生产中,应根据玉米种植区域降水特征,选择适宜的品种及其播种密度和覆盖方式,充分释放玉米增产潜力。降水量为530 mm左右的旱作区,“先玉335+9.0万株/hm²+全膜双垄沟覆盖”组合可以显著提高玉米产量和水分利用效率。

关键词:旱地玉米;品种;种植密度;覆膜方式;产量;水分利用效率

Effects of hybrid, plant density and plastic film mulching on yield and water use efficiency of dryland maize

LI Shang-Zhong, FAN Ting-Lu, ZHAO Gang, WANG Lei, DANG Yi, ZHANG Jian-Jun, TANG Xiao-Ming, WANG Shu-Ying

Institute of Dryland Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China

Abstract: The objective of this experiment was to study the effects of hybrids, plant density and plastic film

收稿日期:2017-05-24;改回日期:2017-09-04

基金项目:国家自然科学基金(31660364),甘肃省农科院基金(2015GAAS19),国家公益性行业(农业)科研专项(201303104),甘肃省重大科技专项(1502NKDA003)和国家高新技术研究发展计划项目(2013AA102902)资助。

作者简介:李尚中(1977-),男,甘肃漳县人,副研究员,硕士。E-mail:lisz7751@163.com

mulching on plant traits, water consumption, grain yield and water use efficiency of dryland maize to help identify opportunities to more effectively utilize limited water resources. A split-split plot designed field experiment was established; the main plot treatments were full plastic film mulching on double ridges and planting in catchment furrows (FFDRF) and flat planting with narrow plastic film mulching (NF). The split-plot treatment was hybrid; Xianyu335, Jixiang1hao and Jiudan4hao and the split-split-plot treatment was plant density; 4.5×10^4 (Low), 6.75×10^4 (Middle) and 9.0×10^4 (High) plants/ha. Plant height, leaf area index (LAI), dry matter, soil moisture at 0–2 m depth, grain yield and water use efficiency were assessed. The results showed that FFDRF increased height, LAI, grain yield and water use efficiency because it more allowed more effective utilization of limited precipitation compared with NF. Increased plant density reduced 100-grain weight and grain number per spike however, increased density resulted in increased dry matter, grain yield and water use efficiency. The 9.0×10^4 plants/ha density increased dry matter, grain yield and water use efficiency by 8.3%, 5.2%, 3.4% and 27.7%, 32.9%, 28.1% compared with the 6.75×10^4 and 4.5×10^4 treatments, respectively. Xianyu335 and Jixiang1hao performed better than Jiudan4hao at high plant densities; grain yield and water use efficiency were highest in Xianyu335; 3.7%, 1.7% and 43.8%, 37.1% higher than Jixiang1hao and Jiudan4hao, respectively. Water consumption increased with increasing plant density and differed among hybrids; Xianyu335 > Jixiang1hao > Jiudan4hao. Hybrids, plant density and plastic film mulching influenced the optimum plant population, water consumption, grain yield and water use efficiency of dryland maize, varieties had the greatest effect followed by plant density and mulch. Selection of appropriate hybrids and plant densities when using and plastic film mulch modes should be undertaken to maximize potential yields.

Key words: dryland spring maize; varieties; plant density; plastic film mulching modes; yield; water use efficiency

玉米(*Zea mays*)是我国种植面积最大且总产最高的第一大作物,发展玉米生产对保障我国粮食安全占有举足轻重的地位^[1]。北方春玉米区玉米播种面积为 0.11 亿 hm^2 ,占全国玉米总面积的 43.1%,区内玉米生产基本处于雨养状态,干旱少雨对玉米生产的威胁很大^[2]。旱作玉米生产实践表明,挖掘玉米生物学潜力和提高土壤生产力是提高玉米产量的有效措施^[3-4]。进一步提高玉米产量的潜力在于提高品种的耐密性和抗逆性,任宪国^[5]研究表明,不同株型玉米杂交种产量差异达显著水平,紧凑型玉米杂交种产量居首位。2005—2008 年我国 57 块玉米高产田采用的品种共 20 个,以郑单 958 和先玉 335 等紧凑、耐密、中穗型品种为代表^[4]。当前玉米单产提升部分归因于种植密度的提高^[6-8]。稳定单穗粒重或稍有减轻的条件下增加种植密度是今后提高玉米单产的发展趋势^[9]。但玉米增加种植密度的同时也会加剧植株间对光、水、肥等资源的竞争,致使单株生长速率降低,增加减产风险^[10]。这就需要进一步优化玉米生长环境来缓解这种负面影响。旱地秸秆和地膜覆盖均能明显改善农田土壤生态条件,促进玉米生长发育,提高产量及水分利用效率,尤其是近年甘肃省大面积应用的玉米全膜双垄沟播技术抗旱增产效果十分显著^[11-12]。随着旱地玉米生产条件的改善,如何合理地选择品种、增加密度,进一步提高玉米生产力成为亟待解决的问题。前人的研究多集中在单一玉米品种、密度或覆膜方式的产量效应方面,而关于不同品种、种植密度和覆膜方式的集成优化研究还鲜有报道。为了进一步探索旱地玉米高产潜力和增产途径,指导生产实践,本研究采用玉米品种、种植密度、覆膜方式三因素试验,对旱地春玉米群体特征、产量及水分利用效率进行研究,为建立旱地春玉米合理的群体结构,实现高产稳产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2012、2013 年在农业部西北旱作营养与施肥科学观测实验站($35^{\circ}30' \text{N}$, $107^{\circ}29' \text{E}$)实施,该地区海拔

1254 m,年平均温度 8.3 ℃,年日照时数 2449.2 h, ≥ 0 ℃年积温 3435 ℃, ≥ 10 ℃年积温 2722 ℃,无霜期 165 d,属完全依靠自然降水的西北半湿润偏旱区。据 1950—2013 年降水资料分析,该地区多年平均年降水量 532 mm,降水主要分布在 7、8、9 三个月。土壤为黑垆土,有机质含量 10.9 g/kg,全氮 0.81 g/kg,碱解氮 91.4 mg/kg,速效磷 10.9 mg/kg,速效钾 203.4 mg/kg,肥力中等。春玉米为当地的主要作物之一,种植制度为一年一熟。

试验年度降水分析表明(表 1),2012 和 2013 年度玉米生育期总降水量分别为 417.3 和 577.1 mm,为同期多年平均降水量的 114.1%和 157.8%,降水年型分别属于平水年和丰水年,玉米生长旺盛的 7、8 月降水量分别为多年同期平均降水量的 73.6%和 95.6%、189.8%和 62.7%。2012 和 2013 年玉米播前(1—4 月中旬)降水量分别为 49.6 和 10.0 mm,为多年同期平均的 153.1%和 30.9%。可见,不管是平水年还是丰水年,此区季节降水分布不均和年际间降水变率较大限制了玉米生产。

表 1 2012—2013 年玉米播前及生育期降水量
Table 1 Precipitation before sowing and maize growth period in 2012—2013

年份 Year	1—4 月中旬 January-the middle 10 d of April (mm)	4 月下旬 The last 10 d of April (mm)	5 月 May (mm)	6 月 June (mm)	7 月 July (mm)	8 月 August (mm)	9 月上旬 The first 10 d of September (mm)	生育期总计 Total of maize growth period (mm)	占多年平均降水量的比例 Percentage of the multi-year average precipitation (%)
2012	49.6	10.3	90.4	56.3	97.1	86.2	77.0	417.3	114.1
2013	10.0	23.4	65.4	68.0	250.3	56.6	113.4	577.1	157.8
2004—2013	32.4	6.8	46.2	44.1	131.9	90.2	46.7	365.8	

1.2 材料与设计

供试玉米品种为酒单 4 号(平展型早熟品种),吉祥 1 号(紧凑型中熟品种)和先玉 335(紧凑型中晚熟品种)。地膜为甘肃济洋塑料有限公司生产的 0.01 mm 聚乙烯吹塑农用地面覆盖薄膜。

试验采用三因素裂区设计,主区为覆膜方式 A[A₁:全膜双垄沟覆盖(带宽 110 cm,每带起底宽 40 cm、高 15~20 cm 的小垄和底宽 70 cm、高 10~15 cm 的大垄,两垄中间为播种沟。选用 120 cm 宽的地膜,边起垄边覆膜,膜与膜间不留空隙,相接处用土压住地膜,每隔 200 cm 压土腰带);A₂:窄膜覆盖(用 70 cm 宽的地膜覆盖,净膜 50 cm,膜间留 60 cm 的空隙,采用宽窄行播种方式,宽行 70 cm,窄行 40 cm,膜内播种,每隔 200 cm 压土腰带)];裂区为品种 B(B₁:吉祥 1 号;B₂:酒单 4 号;B₃:先玉 335);裂裂区为种植密度 C[C₁:4.5 万株/hm²(低密度);C₂:6.75 万株/hm²(中密度);C₃:9.0 万株/hm²(高密度)]。3 次重复,小区面积为 44 m²(5.5 m×8.0 m=44 m²)。2012 年 4 月 13 日覆膜,4 月 15 日播种,2013 年 3 月 29 日覆膜,4 月 19 日播种。按试验设计密度拉绳人工穴播,每穴 2~3 粒,播种深度 4~5 cm。采用普通大田高产施肥管理:覆膜前结合整地基施尿素 300 kg/hm²、普通过磷酸钙 938 kg/hm²,玉米拔节期追施尿素 195 kg/hm²,其他栽培管理同大田生产。2 个年度试验在同一地块同一位置进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 群体质量性状的测定 2012 和 2013 年度,每小区选 10 株有代表性、长势一致植株进行挂牌标记,出苗后每隔 30 d 测定一次株高并同步测定展开绿叶面积,叶面积测定方法采用系数法,按叶片中脉长度(cm)×叶片最大宽度(cm)×系数(0.75)求出每株单叶面积后,累加得单株总叶面积。叶面积指数(leaf area index)=单位土地面积内玉米株数×单株总叶面积/单位土地面积。

2012 和 2013 年度,每小区选 5 株有代表性、长势一致的植株,出苗后每隔 30 d 取样,105 ℃杀青 30 min,然后在 80 ℃条件下烘干至恒重后称重。

1.3.2 土壤水分测定和水分利用效率计算方法^[11] 玉米播种前和收获时分别用土钻法测定沿玉米种植行任意两株之间每个小区 2 m 土层(每 20 cm 为一个层次)的土壤含水率,转换为以 mm 为单位的播前和收获时的土壤贮水量。生育期降水量通过 MM-950 自动气象站获得。利用土壤水平衡方程计算每小区作物耗水量(water consumption)。成熟后,随机取样 20 株考种,按每小区实收计产,计算水分利用效率(water use efficiency, WUE)。

$$\begin{aligned} \text{耗水量 (mm)} &= \text{播前 2 m 土壤贮水量} - \text{收获时 2 m 土壤贮水量} + \text{生育期降水量} \\ \text{水分利用效率 [kg/(hm}^2 \cdot \text{mm)]} &= \text{玉米籽粒产量} / \text{耗水量} \end{aligned}$$

1.4 数据处理

采用 SPSS 11.5 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同覆膜方式对玉米播前土壤水分的影响

2 种不同覆盖方式 0~200 cm 土层土壤水分 2 年定位监测表明(图 1),2012 年试验于 4 月 13 日覆膜,并沿玉米种植行每隔 30 cm 打渗水小孔(直径约为 3 mm),到 4 月 22 日播种时,降水量为 1.62 mm,全膜双垄沟覆盖 0~20 cm 土壤水分含量为 19.3%,较窄膜覆盖提高 1.4 个百分点;2013 年试验于 3 月 29 日揭掉旧膜,施肥、翻耕、定位覆膜,到 4 月 26 日播种时,期间有 3 次降水,分别为 4.8、10.7、3.7 mm,全膜双垄沟覆盖 0~200 cm 土层土壤平均含水量为 16.4%,较窄膜覆盖提高 2.4 个百分点,0~20 cm 土壤含水量为 16.4%,较窄膜覆盖提高 9.6 个百分点。可见,窄膜覆盖方式阻止了降水入渗,在小于 10.7 mm 降水的条件下,覆膜后不能提高土壤含水量,而全膜双垄沟覆盖可以提高土壤含水量。因此,窄膜覆盖方式耕层土壤水分应达到玉米出苗的最低水分要求才能铺膜,全膜双垄沟覆膜对底墒没有要求,是较好抗旱播种方式。

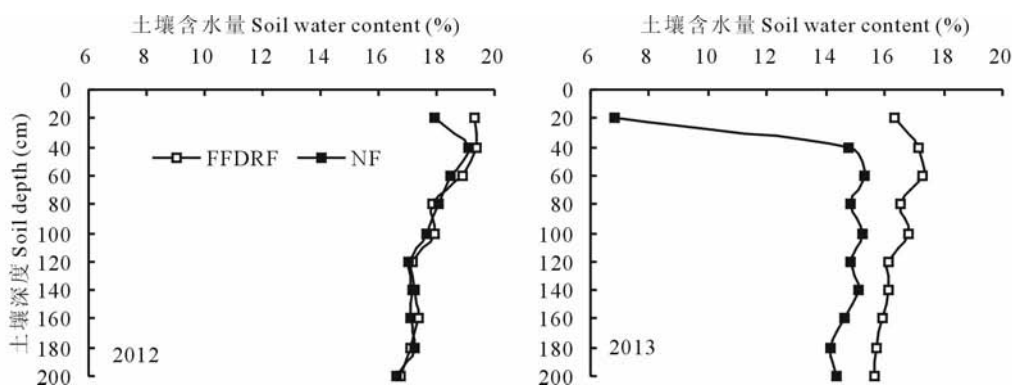


图 1 玉米播种时不同覆膜方式 0~2 m 土壤剖面水分分布

Fig. 1 Soil water distribution along 0-2 m soil profile at maize planting under different mulching modes

FFDRF:全膜双垄沟覆盖; NF:窄膜覆盖。FFDRF: Full plastic film mulching on double ridges and planting in catchment furrows; NF: Flat planting of narrow plastic film mulching; 下同 The same below.

2.2 品种、密度和覆膜方式对玉米主要群体性状的影响

2.2.1 株高 由表 2 可知,不同覆盖方式对玉米株高有显著的影响($P<0.01$),但随着生育进程的推进,对株高的影响逐渐减小,覆膜后 30、60、90、120 d,全膜双垄沟覆盖株高平均依次为 58.9、194.7、255.5 和 258.0 cm,较窄膜覆盖分别增加 93.8%、36.7%、4.1%和 3.8%,说明全膜双垄沟覆盖能促进玉米生育前期快速生长。玉米播种后 30 d 植株生长量小,不同种植密度间株高差异不明显,无明显变化规律。播种后 60 d,随着密度的增加,各品种株高呈增加趋势,但株高在密度间差异未达到显著水平。不同品种间株高存在差异,播种后 30 d,差异达显著水平($P<0.05$),播后 60 d,差异达极显著水平($P<0.01$),在播种 60 d 以前,酒单 4 号株高最高,播后 30 和

60 d 株高平均分别为 47.5 和 178.4 cm,较先玉 335 和吉祥 1 号增加 26.4%和 3.2%,15.4%和 8.5%,在播种 90 d 后,先玉 335 株高最高,播后 90 和 120 d,株高依次为 255.8 和 259.2 cm,较吉祥 1 号和酒单 4 号增加 6.3%和 4.6%,6.5%和 4.5%。覆膜方式和密度、品种和密度互作差异不显著,播后 60 d,覆膜方式和品种两两互作,覆盖方式、品种和密度三因素互作差异达显著水平。

表 2 不同处理下玉米株高变化

Table 2 Effects of different treatments on plant height of maize

cm

试验因子 Testing factor			播种后天数 Days after sowing			
A	B	C	30 d	60 d	90 d	120 d
全膜双垄沟覆盖 FFDRF	吉祥 1 号 Jixiang1hao	4.5	59.6a	185.3a	240.7a	242.0a
		6.75	58.0a	185.8a	242.3a	245.7a
		9.0	64.1a	189.8a	242.7a	247.3a
	酒单 4 号 Jiudan4hao	4.5	63.1a	197.6a	255.0a	257.3a
		6.75	65.1a	202.5a	253.0a	258.3a
		9.0	65.8a	205.4a	256.7a	259.0a
	先玉 335 Xianyu335	4.5	50.3a	191.8a	270.3a	269.7a
		6.75	55.9a	196.7a	268.0a	270.7a
		9.0	57.2a	197.8a	271.0a	272.0a
窄膜覆盖 NF	吉祥 1 号 Jixiang1hao	4.5	31.3a	141.7a	239.3a	241.7a
		6.75	28.1a	141.4a	240.3a	241.3a
		9.0	34.9a	142.0a	239.0a	242.3a
	酒单 4 号 Jiudan4hao	4.5	31.3a	149.9a	231.0a	238.7a
		6.75	36.2a	153.9a	232.7a	235.0a
		9.0	32.2a	160.8a	239.3a	239.3a
	先玉 335 Xianyu335	4.5	25.8a	125.4a	260.0a	263.0a
		6.75	27.6a	126.9a	263.3a	267.7a
		9.0	26.2a	139.8a	264.3a	268.3a
显著性(P 值) Significance (P value)						
A			*	*	*	*
B			*	*	*	*
C			NS	NS	NS	NS
A×B			NS	*	*	*
A×C			NS	NS	NS	NS
B×C			NS	NS	NS	NS
A×B×C			NS	*	*	*

* 表示 $\alpha=0.05$ 水平上差异显著, ** 表示 $\alpha=0.01$ 水平上差异显著,NS 表示差异不显著,A 为覆膜方式,B 为品种,C 为种植密度(万株/hm²),数据为 2012 和 2013 年的平均值,表中数字后的不同字母表示同一品种不同种植密度处理间在 0.05 水平差异显著,下同。“*” means significant difference at the 0.05 probability level, “**” means significant difference at the 0.01 probability level,NS means not significance at the 0.05 probability level, A means plastic film mulching modes, B means corn hybrids, C means plant density (×10⁴ plants/hm²),the data are average for 2012 and 2013, letters after number indicate the significance at 0.05 level among different density of the same cultivar; The same below.

2.2.2 叶面积指数 由表 3 可知,播种 90 d 前,不同覆盖方式 LAI 差异达显著水平($P<0.05$),播后 30、60、90 d 全膜双垄沟覆盖 LAI 分别为 1.29、3.59 和 3.93,较窄膜覆盖提高 167.0%、49.1%和 11.0%,而在播后 120 d,全膜双垄沟覆盖 LAI 为 2.12,较窄膜覆盖降低 8.6%,但 LAI 差异未达显著水平。可见,全膜双垄沟覆盖能快

速增加玉米生育前期叶面积指数,为积累更多干物质奠定基础。除播后 30 d 外,3 个品种 LAI 差异达显著水平 ($P<0.01$),大小顺序为吉祥 1 号>先玉 335>酒单 4 号。不同种植密度 LAI 的总体变化基本一致,均呈单峰曲线变化,即随生育进程呈先增大后下降趋势,各测定时期均随种植密度的增加而增大,播后 90 d 前,不同种植密度下 LAI 差异达极显著水平 ($P<0.01$),播后 120 d, LAI 差异达显著水平 ($P<0.05$)。在各测定时间点上,4.5、6.75 和 9.0 万株/hm² 种植密度下吉祥 1 号平均叶面积指数均大于先玉 335 和酒单 4 号。播后 90 d 前,品种、密度、种植方式两两互作和三因素互作均差异显著。

表 3 不同处理下叶面积指数的变化
Table 3 Leaf area index of maize under different treatments

试验因子 Testing factor			播种后天数 Days after sowing			
A	B	C	30 d	60 d	90 d	120 d
全膜双垄沟覆盖 FFDRF	吉祥 1 号 Jixiang1hao	4.5	1.03c	2.87c	3.21c	2.68b
		6.75	1.29b	3.79b	4.72b	3.25a
		9.0	1.95a	5.06a	5.51a	3.48a
	酒单 4 号 Jiudan4hao	4.5	0.89c	2.45c	2.27c	0.21b
		6.75	1.28b	3.30b	3.12b	0.29a
		9.0	1.37a	3.77a	3.73a	0.33a
	先玉 335 Xianyu335	4.5	0.88c	2.71c	3.10c	2.36b
		6.75	1.32b	3.85b	4.26b	3.16a
		9.0	1.63a	4.53a	5.45a	3.32a
窄膜覆盖 NF	吉祥 1 号 Jixiang1hao	4.5	0.40b	2.01c	3.12c	2.63b
		6.75	0.41b	2.38b	4.25b	3.37a
		9.0	0.82a	3.59a	5.32a	3.96a
	酒单 4 号 Jiudan4hao	4.5	0.32b	1.83b	2.31b	0.25b
		6.75	0.64a	2.65a	3.13a	0.68a
		9.0	0.67a	2.75a	3.09a	0.55a
	先玉 335 Xianyu335	4.5	0.19b	1.52b	2.50c	2.28b
		6.75	0.47a	2.46a	3.99b	3.56a
		9.0	0.44a	2.49a	4.15a	3.59a
显著性(<i>P</i> 值) Significance (<i>P</i> value)						
	A		* *	* *	*	NS
	B		*	* *	* *	* *
	C		* *	* *	* *	*
	A×B		*	*	*	NS
	A×C		*	*	*	NS
	B×C		*	*	*	NS
	A×B×C		*	* *	*	NS

2.2.3 干物质积累量 由表 4 可知,不同覆盖方式之间玉米干物质积累量差异达显著水平 ($P<0.05$),播后 30、60、90、120 d,全膜双垄沟覆盖处理玉米干物质积累量分别为 39.4、4131.3、15060.7、21629.2 kg/hm²,较窄膜覆盖增加 96.0%、143.8%、20.1%、15.6%。不同品种之间生物产量积累量也存在差异,播后 120 d,品种之间差异达极显著水平 ($P<0.01$),生物产量由大到小依次为:先玉 335>吉祥 1 号>酒单 4 号。干物质积累量随密度的增加呈显著上升趋势 ($P<0.05$)。覆膜方式与品种、密度两两互作和三因素互作均对干物质积累存在显著的影响。播种 90 d 后,品种和密度互作差异达显著水平。

表 4 不同处理下干物质积累量的变化

Table 4 Dry matter plant of maize under different treatments

kg/hm²

试验因子 Testing factor			播种后天数 Days after sowing			
A	B	C	30 d	60 d	90 d	120 d
全膜双垄沟覆盖 FFDRF	吉祥 1 号 Jixiang1hao	4. 5	31. 0c	3121. 5b	14520. 0b	21015. 0b
		6. 75	39. 1b	5044. 5a	14702. 4b	25126. 9a
		9. 0	50. 7a	5031. 0a	17028. 0a	24193. 1a
	酒单 4 号 Jiudan4hao	4. 5	20. 4c	3397. 5c	9873. 6c	14169. 0c
		6. 75	35. 2b	4351. 5b	14193. 0b	16483. 5b
		9. 0	42. 2a	4617. 0a	17767. 2a	21660. 0a
	先玉 335 Xianyu335	4. 5	34. 0b	2947. 5c	14536. 8c	21290. 2c
		6. 75	49. 7a	4623. 8a	17649. 0a	26311. 5a
		9. 0	52. 3a	4047. 0b	15276. 0b	24414. 0b
窄膜覆盖 NF	吉祥 1 号 Jixiang1hao	4. 5	15. 2b	1377. 0c	10212. 0c	17640. 0b
		6. 75	16. 6b	1282. 5b	12783. 6b	20965. 5a
		9. 0	27. 0a	1449. 0a	15208. 8a	20880. 0a
	酒单 4 号 Jiudan4hao	4. 5	10. 0b	880. 5c	9730. 8c	12368. 1c
		6. 75	18. 4a	1809. 0b	12763. 8b	13985. 9b
		9. 0	19. 5a	2412. 0a	14248. 8a	21030. 0a
	先玉 335 Xianyu335	4. 5	8. 9c	1315. 5c	9498. 0c	18570. 6c
		6. 75	31. 2b	2184. 8b	12477. 6b	20997. 3b
		9. 0	36. 1a	2538. 0a	15984. 0a	21959. 5a
显著性(<i>P</i> 值) Significance (<i>P</i> value)						
A			* *	* *	*	* *
B			NS	NS	NS	* *
C			* *	*	*	* *
A×B			*	*	*	*
A×C			*	*	*	*
B×C			NS	NS	*	* *
A×B×C			*	*	*	* *

2.3 品种、密度和覆膜方式对玉米主要农艺性状的影响

对玉米主要农艺性状分析表明(表 5),3 个品种的百粒重、穗粒数、穗粗、穗长、径粗随着密度的增加逐渐下降,秃尖长、穗位高则呈现上升的趋势,其中穗位高差异未达显著水平,2 个年度变化趋势基本一致。2012 年度,不同覆膜方式之间百粒重、穗粒数、秃尖长、穗粗、穗长、径粗差异达显著水平($P<0.05$),穗位高差异不显著。全膜双垄沟覆盖分别为 31.2 g、590.6 粒、1.6 cm、5.2 cm、19.6 cm、2.6 cm、111.3 cm,较窄膜覆盖提高 4.2%、19.5%、-27.5%、4.2%、8.1%、13.3%和 12.6%。2013 年度,全膜双垄沟覆盖百粒重、穗粒数、秃尖长、穗粗、穗长、径粗、穗位高分别为 34.7 g、552.5 粒、1.8 cm、5.2 cm、18.7 cm、2.7 cm、96.7 cm,较窄膜覆盖提高 16.3%、13.2%、-17.8%、6.1%、13.2%、13.0%、4.4%,其中穗位高差异未达显著水平。3 个品种间百粒重、穗粒数、秃尖长、穗粗、穗长、穗位高、径粗差异达显著水平($P<0.05$)。2012 年度,百粒重表现为先玉 335>吉祥 1 号>酒单 4 号,2013 年度为吉祥 1 号>先玉 335>酒单 4 号,穗粒数 2 个年度表现均为先玉 335>吉祥 1 号>酒单 4 号,穗位高和径粗 2 个年度表现也一致,穗位高为先玉 335<吉祥 1 号<酒单 4 号,径粗表现为先玉 335>吉祥 1

表 5 不同处理的玉米农艺性状

Table 5 Agronomic properties of maize under different treatments

试验因子 Testing factor			2012						2013								
A	B	C	百粒重 100-grain weight (g)	穗粒数 Grain number per spike	秃尖长 Bald tip length (cm)	穗粗 Spike diameter (cm)	穗长 Spike length (cm)	穗位高 Ear height (cm)	茎粗 Stem diameter (cm)	百粒重 100-grain weight (g)	穗粒数 Grain number per spike	秃尖长 Bald tip length (cm)	穗粗 Spike diameter (cm)	穗长 Spike length (cm)	穗位高 Ear height (cm)	茎粗 Stem diameter (cm)	
全膜双垄 沟覆盖 FFDRF	吉祥 1 号	4.5	33.8a	614.6a	0.8b	5.6a	20.4a	102.7a	3.15a	39.9a	605.9a	0.4b	5.7a	19.6a	94.3a	3.21a	
	Jixiang1hao	6.75	30.7b	552.9b	1.0a	5.2b	18.1b	105.9a	2.84b	39.3a	579.8b	0.7a	5.4b	19.0a	104.2a	2.92b	
		9.0	25.2c	530.5c	1.2a	5.0c	17.3c	107.8a	2.27c	35.6b	508.6c	0.8a	5.3b	17.2b	109.5a	2.32c	
	酒单 4 号	4.5	30.7a	707.9a	1.6c	5.1a	21.7a	118.9a	2.68a	29.7a	574.3a	2.4b	4.9a	18.9a	99.3a	2.79a	
	Jiudan4 hao	6.75	28.9b	556.3b	2.1b	5.0ab	20.0a	130.5a	2.35b	29.2a	503.5b	2.9a	4.8a	17.0b	111.9a	2.43b	
		9.0	27.9b	525.5c	2.5a	4.9b	18.3b	134.9a	2.02c	28.0b	473.2c	3.0a	4.9a	16.9c	100.9a	2.11c	
	先玉 335	4.5	35.7a	739.5a	1.1c	5.6a	21.7a	95.5a	3.26a	39.5a	650.7a	1.2c	5.5a	21.5a	81.1a	3.23a	
	Xianyu335	6.75	34.2b	572.9b	1.8b	5.3b	19.4b	100.9a	2.71b	36.7b	623.3a	2.3b	5.4a	20.8a	85.7a	2.74b	
		9.0	33.3c	514.9c	2.4a	5.2b	19.2b	104.5a	2.41c	34.7c	453.3b	2.9a	5.0b	17.4b	83.5a	2.44c	
	吉祥 1 号	4.5	33.5a	537.2a	0.9c	5.2a	19.1a	93.0a	2.75a	33.5a	590.0a	0.5c	5.2a	20.0a	90.1a	2.81a	
窄膜平铺 NF	Jixiang1hao	6.75	31.8b	511.5b	1.2b	5.1ab	18.1ab	101.2a	2.54b	32.0ab	553.2b	0.9b	5.0b	19.4a	95.2a	2.58b	
		9.0	27.9c	487.7c	2.0a	5.0b	17.9b	103.4a	2.03c	30.1b	485.2c	1.2a	4.8c	17.1b	96.0a	2.20c	
	酒单 4 号	4.5	30.7a	453.6a	2.1c	5.0a	17.4a	102.1a	2.48a	27.6a	605.7a	2.1c	4.7a	19.5a	89.3a	2.49a	
	Jiudan4 hao	6.75	29.2b	375.7b	2.5b	4.5b	16.3b	107.5a	2.29b	26.8a	583.8b	3.0b	4.7a	17.7b	99.3a	2.33a	
		9.0	26.4c	328.5c	3.2a	4.4b	15.0c	114.4a	1.82c	26.4a	547.4c	4.2a	4.7a	16.7c	103.4a	1.81b	
	先玉 335	4.5	31.8a	649.4a	2.6a	5.4a	21.3a	89.0a	2.60a	33.3a	714.2a	2.4c	5.3a	23.1a	81.9a	2.63a	
	Xianyu335	6.75	30.0b	602.6b	2.7a	5.3a	19.4b	94.6a	2.31b	30.0b	628.6b	2.7b	5.1b	21.8b	79.3a	2.43b	
		9.0	27.9c	503.1c	2.8a	5.1b	18.4c	98.6a	2.09c	29.0c	477.2c	3.2a	4.7c	17.8c	88.9a	2.13c	
	显著性(P 值) Significance (P value)																
	A			*	*	*	*	*	NS	*	*	*	*	*	*	NS	*
B			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
C			*	*	*	*	*	NS	*	*	*	*	*	*	NS	*	
A×B			*	*	NS	*	*	NS	*	*	*	NS	*	*	NS	*	
A×C			*	*	NS	*	*	NS	*	*	*	NS	NS	*	NS	*	
B×C			*	*	NS	NS	*	NS	*	*	*	NS	*	*	NS	*	
A×B×C			*	*	NS	*	*	NS	*	*	*	NS	*	*	NS	*	

号>酒单 4 号。覆膜方式、品种、密度两两互作和三因素互作均对百粒重、穗粒数、穗长、茎粗存在显著的影响,对秃尖长和穗位高影响差异不显著。覆膜方式、品种、密度三因素互作对穗粗有显著的影响。可见,覆膜方式、品种、密度均对玉米农艺性状和产量构成因子有调控作用。但穗位高与品种有关,覆膜方式和密度对其影响较小。

2.4 品种、密度和覆膜方式对玉米耗水量、产量及水分利用效率的影响

从表 6 可以看出,2012 年不同覆膜方式之间玉米耗水量差异不显著,全膜双垄沟覆盖平均耗水量为 388.5 mm,较窄膜覆盖少耗水 11.1 mm,2013 年度不同覆膜方式之间玉米耗水量差异达极显著水平($P<0.01$),全膜双垄沟覆盖平均耗水量为456.0 mm,较窄膜覆盖多耗水52.3 mm。可见,不同覆膜方式耗水量受降水影响较大。2 个年度不同覆膜方式产量和水分利用效率差异达显著水平($P<0.05$),全膜双垄沟覆盖产量和水分利用效率分别为 11524.7 kg/hm² 和 27.26 kg/(hm²·mm),较窄膜覆盖增加 14.3%和 8.8%。随种植密度的增加,玉

表 6 不同处理的玉米产量、耗水量和水分利用效率

Table 6 Water consumption, grain yield and water use efficiency of maize under different treatments

试验因子 Testing factor			2012			2013		
A	B	C	耗水量 Water consumption (mm)	籽粒产量 Grain yield (kg/hm ²)	水分利用效率 Water use efficiency [kg/ (hm ² ·mm)]	耗水量 Water consumption (mm)	籽粒产量 Grain yield (kg/hm ²)	水分利用效率 Water use efficiency [kg/ (hm ² ·mm)]
全膜双垄沟覆盖 FFDRF	吉祥 1 号	4.5	371.1b	9406.5b	25.35b	471.0a	11152.5b	23.68b
	Jixiang1hao	6.75	388.2ab	12126.0a	31.24a	466.4b	14370.0a	30.81a
		9.0	398.4a	12303.0a	30.88a	472.9a	14836.0a	31.37a
	酒单 4 号	4.5	367.5b	7857.0c	21.38c	425.8b	6573.0c	15.44b
	Jiudan4 hao	6.75	372.9ab	10828.5a	29.04a	436.5a	9165.0b	21.00a
		9.0	385.2a	9664.5b	25.09b	446.1a	9849.0a	22.08a
	先玉 335	4.5	391.0b	10956.0b	28.02b	461.9a	11442.0c	24.77c
	Xianyu335	6.75	408.3ab	13620.0a	33.36a	461.3a	14235.0b	30.86b
		9.0	414.3a	13953.0a	33.68a	462.2a	15107.0a	32.68a
窄膜覆盖 NF	吉祥 1 号	4.5	373.3b	8653.5c	23.18c	401.7a	10245.0c	25.50c
	Jixiang1hao	6.75	388.1ab	11097.0b	28.59b	406.0a	11557.5b	28.47b
		9.0	403.1a	12319.5a	30.56a	404.6a	12423.0a	30.70a
	酒单 4 号	4.5	398.3a	6583.5c	16.53b	390.5a	6219.0c	15.93c
	Jiudan4 hao	6.75	410.8a	6867.0b	16.72b	394.0a	9360.0b	23.76b
		9.0	416.2a	7750.5a	18.62a	395.6a	10939.5a	27.65a
	先玉 335	4.5	392.0b	9210.0c	23.49b	406.8b	9933.0c	24.42c
	Xianyu335	6.75	401.7ab	11316.0b	28.17a	416.4a	12246.0b	29.41b
		9.0	412.6a	11667.0a	28.28a	417.8a	13038.0a	31.21a
显著性(P 值) Significance (P value)								
A			**	**	**	**	*	*
B			**	**	**	**	**	**
C			**	**	**	*	**	**
A×B			**	**	*	*	**	NS
A×C			NS	**	NS	NS	NS	NS
B×C			NS	**	NS	NS	NS	NS
A×B×C			*	*	*	*	*	*

米耗水量呈增加趋势。2012年, 9.0万株/hm²平均耗水量为405.0 mm, 较4.5万株/hm²增加6.0%, 2013年9.0万株/hm²平均耗水量为433.2 mm, 较4.5万株/hm²增加1.6%。产量和水分利用效率随密度的增加呈增加趋势, 但从密度4.5万株/hm²增加到6.75万株/hm²时增产幅度较大, 从6.75万株/hm²增加到9.0万株/hm²时增加幅度变小。2012年, 9.0万株/hm²条件下平均产量为11276.3 kg/hm², 较4.5和6.75万株/hm²增加28.5%和2.7%, 6.75和9.0万株/hm²条件下水分利用效率均为27.85 kg/(hm²·mm), 较4.5万株/hm²提高21.1%。2013年9.0万株/hm²条件下平均产量为12698.8 kg/hm², 较4.5和6.75万株/hm²增加37.1%和7.4%, 9.0万株/hm²条件下平均水分利用效率为29.28 kg/(hm²·mm), 较4.5和6.75万株/hm²增加35.4%和6.9%。不同品种间产量差异达显著水平($P < 0.01$), 表现为先玉335 > 吉祥1号 > 酒单4号。先玉335产量和水分利用效率依次为12185.3 kg/hm²和28.94 kg/(hm²·mm), 较吉祥1号和酒单4号分别增加3.7%、1.7%和43.8%、37.1%。供试品种之间耗水量差异也达极显著水平($P < 0.01$), 表现为先玉335 > 吉祥1号 > 酒单4号。覆膜方式、品种、密度三因素互作对耗水量、籽粒产量和水分利用效率存在显著的影响($P < 0.05$)。可见, 覆膜方式、品种、密度均对耗水量、籽粒产量和水分利用效率有调控作用, 表现为品种 > 密度 > 覆膜方式。2个年份“先玉335+9.0万株/hm²+全膜双垄沟覆盖”组合产量和水分利用效率最高。

3 讨论

3.1 不同覆膜方式对玉米播前土壤水分的影响

地膜覆盖改变了农田的土壤水分运移方式, 阻断了土壤水分的垂直蒸发和水汽的乱流交换, 增大了水分蒸发的阻力, 提高了土壤保墒性能。王进鑫等^[13]研究表明, 在持续干旱时段, 覆盖不仅改善了覆盖区土壤水分状况, 而且强化了覆盖区与相邻非覆盖区下层土壤液态水的运移与再分布, 有利于减轻持续干旱的威胁。覆膜的保墒作用已被大量的研究所证实^[11-14], 但不同覆盖方式对降水入渗研究较少, 对小于10 mm的降水保蓄研究更少。本研究表明, 不同的覆盖方式, 同样的降水对土壤水的补充效果明显不一。2012年0~20 cm土层墒情较好(土壤含水量为18.1%)的条件下覆膜后, 有1.62 mm的一次降水, 播前全膜双垄沟覆盖0~20 cm土壤水分含量为19.3%, 较窄膜覆盖提高1.4个百分点; 2013年在0~20 cm墒情很差(土壤含水量为7.0%)的条件下覆膜后, 分别有4.8、10.7、3.7 mm的3次降水, 播前全膜双垄沟覆盖0~20 cm土壤含水量为16.4%, 较窄膜覆盖提高9.6个百分点。可见, 窄膜覆盖方式阻止了少量降水(小于10.7 mm)入渗, 覆膜后不能提高土壤含水量, 全膜双垄沟覆膜后可以有效地提高土壤含水量。而胡亚瑾等^[14]研究了大量降水(一次30.5 mm)的入渗情况表明, 地膜平铺也可以提高降水的保蓄率, 但显著低于垄覆地膜沟覆秸秆处理。因此, 垄膜集雨种植是较好的抗旱减灾种植方式。

3.2 品种、密度和覆膜方式对玉米群体性状的影响

玉米群体质量指标是指群体结构中产量具有密切联系的性状指标。通过高产栽培技术调节使群体的各项质量指标, 不断接近优化目标, 实现物质生产因素与产量构成因素间的高效协调, 是获得玉米高产的重要方法^[15-17]。本研究表明, 覆膜方式、品种、密度均对玉米群体质量性状有一定调控作用。全膜双垄沟覆盖可有效地改善玉米生长条件, 提高玉米株高、叶面积指数、干物质积累、百粒重、穗粒数等。覆膜后30、60、90、120 d, 全膜双垄沟覆盖株高分别平均为58.9、194.7、255.5和258.0 cm, 较窄膜覆盖分别增加93.8%、36.7%、4.1%和3.8%, LAI分别为1.29、3.59、3.93和2.12, 较窄膜覆盖提高167.0%、49.1%、11.0%和-8.6%, 干物质积累量分别为39.4、4131.3、15060.7、21629.2 kg/hm², 较窄膜覆盖增加96.0%、143.8%、20.1%、15.6%, 百粒重和穗粒数平均为32.9 g和571.5粒, 较窄膜覆盖增加10.2%和6.8%。可见, 全膜双垄沟覆盖能促进玉米生育前期快速生长, 使株高和叶面积快速增加, 为改善产量构成因子、积累更多干物质奠定基础。随着密度的增加, 玉米株高、叶面积指数、干物质积累量、秃尖长、穗位高则呈增加的趋势, 百粒重、穗粒数、穗粗、穗长、径粗表现为下降趋势。这与范继征等^[18]研究结果一致。可见, 增加种植密度各植株性状的发展趋势均不利于单株产量形成。陈立军等^[19]研究发现玉米产量提高的主导因素是群体总粒数, 其次是千粒重。即增加种植密度的群体优势大于单株植

株性状的综合劣势。在供试三因素中,品种对群体质量性状起重要的调控作用,差异达显著水平,这与梁素明等^[15]研究结果基本一致。不同品种间 LAI 大小顺序为吉祥 1 号>先玉 335>酒单 4 号,生物产量为先玉 335>吉祥 1 号>酒单 4 号,穗位高表现为先玉 335<吉祥 1 号<酒单 4 号,径粗表现为先玉 335>吉祥 1 号>酒单 4 号,百粒重和穗粒数均表现为先玉 335>吉祥 1 号>酒单 4 号。可见,先玉 335 具有较好的综合群体质量性状,吉祥 1 号次之,酒单 4 号最差。且不同品种适应密度改变能力也不同,紧凑型的先玉 335 和吉祥 1 号适应密度改变能力强,耐密植,平展型酒单 4 号弱。故实际生产中,应根据具体品种选择适宜种植密度,协调好群体和个体矛盾关系,充分释放玉米增产潜力。

3.3 品种、密度和覆膜方式对玉米产量、耗水量及水分利用效率的影响

随着玉米种植密度的增加,加剧了植株间对光、水、肥等资源的竞争,致使单株生长速率降低,增加减产风险^[10]。本研究表明,随种植密度的增加,玉米耗水量呈增加趋势,这与刘战东等^[20]研究一致。供试品种之间耗水量差异达极显著水平($P<0.01$),表现为先玉 335>吉祥 1 号>酒单 4 号。不同覆膜方式耗水量也有一定的差异,平水年份(2012 年),窄膜覆盖耗水量大于全膜双垄沟播,丰水年份(2013 年)刚好相反。因此,旱地地膜玉米应根据当地降水量承载力选择适宜的种植方式。为了减缓旱地玉米增密带来土壤水分匮乏问题,需要进一步优化玉米生长环境来缓解这种负面影响。旱地秸秆和垄膜沟种均能明显改善农田土壤生态条件,促进玉米生长发育,提高产量及水分利用效率^[11-12,20-21]。本研究表明,全膜双垄沟覆盖产量和水分利用效率分别为 11524.7 kg/hm²和 27.26 kg/(hm²·mm),较窄膜覆盖增加 14.3%和 8.8%。密度和品种对玉米产量和水分利用效率也有重要的调节作用,这与文献^[15-22]研究结果一致。随着密度的增加,产量和水分利用效率呈增加趋势,9.0 万株/hm²播种密度下,产量和水分利用效率分别为 11987.5 kg/hm²和 28.57 kg/(hm²·mm),较 6.75 和 4.5 万株/hm²依次增加 5.2%、3.4%和 32.9%、28.1%。3 个参试品种中先玉 335 产量和水分利用效率最高,依次为 12185.3 kg/hm²和 28.94 kg/(hm²·mm),较吉祥 1 号和酒单 4 号分别增加 3.7%、1.7%和 43.8%、37.1%,这与任宪国^[5]研究结论基本一致。可见,根据玉米种植区域降水特征,选择适宜的品种及其播种密度和覆盖方式是旱地玉米高产的关键。

4 结论

品种、密度、覆膜方式对旱地玉米群体结构、产量构成因子、耗水量、籽粒产量和水分利用效率均有一定的调控作用,表现为品种>密度>覆膜方式。在实际生产中,应根据玉米种植区域降水特征,选择适宜的品种及其播种密度和覆盖方式,充分释放玉米增产潜力。降水量为 530 mm 左右的旱作区,“先玉 335+9.0 万株/hm²+全膜双垄沟覆盖”组合可以显著提高玉米产量和水分利用效率。

参考文献 References:

- [1] Zhao J R, Wang R H. Development process, problem and countermeasure of maize production in China. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15(3): 1-6.
赵久然, 王荣焕. 中国玉米生产发展历程、存在问题及对策. *中国农业科技导报*, 2013, 15(3): 1-6.
- [2] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. The programme of superior regional distribution of maize in China (2008—2015). *Agricultural Engineering Technology*, 2010, (5): 11-13.
农业部. 玉米优势区域布局规划(2008—2015 年). *农业工程技术*, 2010, (5): 11-13.
- [3] Dong D X, Li Y S. An evaluation of yield potentiality of spring corn and its water conditions on weibei rainfed highland. *Journal of Northwestern Agricultural University*, 1993, (12): 108-112.
董大学, 李玉山. 渭北旱源春玉米生产力及其水分条件评价. *西北农业大学学报*, 1993, (12): 108-112.
- [4] Li S K, Wang C T. Potential and Ways to High Yield in Maize. Beijing: The Science Publishing Company, 2010: 266-272.
李少昆, 王崇桃. 玉米高产潜力·途径. 北京: 科学出版社, 2010: 266-272.
- [5] Ren X G. Yield components of maize hybrids with different plant types and their correlation analysis. *Maize Science*, 1996, 4(2): 42-45.

任宪国. 不同株型玉米杂交种产量构成因素及其相关分析. 玉米科学, 1996, 4(2): 42-45.

- [6] Duan M X. Some advice on corn breeding obtained from the elite varieties of Nongda108 and Zhengdan958. *Maize Science*, 2005, 13(4): 49-52.
- 段民孝. 从农大 108 和郑单 958 中得到的玉米育种启示. 玉米科学, 2005, 13(4): 49-52.
- [7] Tokatlidis I S, Koutroubas S D. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. *Field Crops Research*, 2004, 12: 103-114.
- [8] Liu T N, Xu C L, Gu L M, *et al.* Effects of leaf removal on canopy apparent photosynthesis and individual leaf photosynthetic characteristics in summer maize under high plant density. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(1): 143-153.
- 刘铁宁, 徐彩龙, 谷利敏, 等. 高密度种植条件下去叶对不同株型夏玉米群体及单叶光合性能的调控. 作物学报, 2014, 40(1): 143-153.
- [9] Bai W, Sun Z X, Zheng J M, *et al.* Effect of different planting patterns on maize growth and yield in western Liaoning Province. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(1): 181-189.
- 白伟, 孙占祥, 郑家明, 等. 辽西地区不同种植方式对春玉米产量形成及其生长发育特性的影响. 作物学报, 2014, 40(1): 181-189.
- [10] Borrás L, Westgate M E, Astin J P, *et al.* Coupling time to silking with plant growth rate in maize. *Field Crops Research*, 2007, 102: 73-85.
- [11] Li S Z, Wang Y, Fan T L, *et al.* Effects of different plastic film mulching modes on soil moisture, temperature and yield of dryland maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(5): 922-931.
- 李尚中, 王勇, 樊廷录, 等. 旱地玉米不同覆膜方式的水温及增产效应. 中国农业科学, 2010, 43(5): 922-931.
- [12] Wang S X, Wang Z J, Zuo Z, *et al.* Effects of difference mulching on the soil environment and maize yield in rain fed land. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18(9): 135-137.
- 王顺霞, 王占军, 左忠, 等. 不同覆盖方式对旱地玉米田土壤环境及玉米产量的影响. 干旱区资源与环境, 2004, 18(9): 135-137.
- [13] Wang J X, Liu G Q, Wang D H. Relationship between evaporation potential and movement property of soil water under partial-mulch conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 142-145.
- 王进鑫, 刘广全, 王迪海. 局部覆盖条件下土壤水分移动性能与蒸发力的关系. 水土保持学报, 2004, 18(4): 142-145.
- [14] Hu Y J, Wu S F, Feng H, *et al.* Effects of different mulching models on soil moisture and summer maize yields. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(6): 699-708.
- 胡亚瑾, 吴淑芳, 冯浩, 等. 覆盖方式对夏玉米土壤水分和产量的影响. 中国农业气象, 2015, 36(6): 699-708.
- [15] Liang S M, Wang A P, Ren H E, *et al.* Influence of the density control for different plant type corn varieties to the formation of source-sink and yield. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2013, 41(7): 686-692, 715.
- 梁素明, 王爱萍, 任海娥, 等. 不同株型玉米品种密度制约对源库形成与产量的影响. 山西农业科学, 2013, 41(7): 686-692, 715.
- [16] Du T Q, Hao J P, Ma L L, *et al.* Agronomic characteristics and yield of density-tolerant spring maize cultivars in different planting densities and row spacing. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(4): 101-106, 111.
- 杜天庆, 郝建平, 马磊磊, 等. 密度与行距配置对耐密型春玉米农艺性状及产量的影响. 玉米科学, 2013, 21(4): 101-106, 111.
- [17] Zhang B, Zhao M, Dong Z Q. "Three combination structure" quantitative expression and high yield analysis in crops. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 35(10): 1624-1681.
- 张宾, 赵明, 董志强. 作物产量“三合结构”定量表达及高产分析. 作物学报, 2007, 35(10): 1624-1681.
- [18] Fan J Z, Yan F Y, Shi D J, *et al.* Effects of different planting densities and cultivation methods on major agronomic characters and yield of maize. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(6): 759-763.
- 范继征, 闫飞燕, 石达金, 等. 不同密度与种植方式对玉米迪卡 008 主要农艺性状和产量的影响. 南方农业学报, 2012, 43(6): 759-763.
- [19] Chen L J, Tang Q Y. Population quality index of maize with high yield and its influencing factors. *Crop Research*, 2008, 22(5): 428-434.
- 陈立军, 唐启源. 玉米高产群体质量指标及其影响因素. 作物研究, 2008, 22(5): 428-434.
- [20] Liu Z D, Xiao J F, Yu J C, *et al.* Effects of varieties and planting density on plant traits and water consumption characteristics of spring maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 125-131.
- 刘战东, 肖俊夫, 于景春, 等. 春玉米品种和种植密度对植株性状和耗水特性的影响. 农业工程学报, 2012, 28(11): 125-

131.

- [21] Wang X L, Chen M C, Yi X F, *et al.* Effects of ridge width and planting density on corn yields in rainwater-harvesting system with plastic film mulching on ridge. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(8): 40-47.

王晓凌, 陈明灿, 易现峰, 等. 垄沟覆膜集雨系统垄宽和密度效应对玉米产量的影响. 农业工程学报, 2009, 25(8): 40-47.

- [22] Yang F K, He B L, Zhang L G, *et al.* Effects of double mulched furrow-ridge cropping with film and straw on soil nutrients balance and maize yield in semiarid area of China. Pratacultural Science, 2015, 32(11): 1892-1900.

杨封科, 何宝林, 张立功, 等. 膜下秸秆还田双垄种植对土壤养分平衡及玉米产量的影响. 草业科学, 2015, 32(11): 1892-1900.