

西北旱塬区不同株型玉米增密对产量的影响

赵刚,王淑英,樊廷录,党翼,王磊,张建军,李尚中,程万莉

(甘肃省农业科学院旱地农业研究所,甘肃兰州730070)

摘要:为了探明增密对西北黄土旱塬区玉米产量的影响,于2011–2014年在农业部西北旱作区作物营养与施肥科学观测实验站进行田间试验,选取不同株型(紧凑型、平展型)玉米品种5个,每个品种设4个密度梯度,分析了不同株型玉米产量、干物质、根冠比、灌浆速率等指标。结果表明:不同株型玉米品种,随着密度增加田间耗水量差异不显著;紧凑型玉米品种产量大于平展型,在同等栽培条件下,平展型最佳播种密度为 $7.07 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$,紧凑型较之增加 $0.91 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$,产量增加 $2\,085.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;密度增加单株干物质和根冠比均呈减小趋势,两种株型玉米品种规律一致,在灌浆和成熟期,紧凑型玉米品种 7.5 、 $9.0 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 根冠比基本一致,平展型玉米品种密度为 $6.0 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 干物质质量最高($32\,310 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),紧凑型在 $7.5 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时为 $29\,226 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,干物质积累量平展型大于紧凑型;灌浆速率参数平展型较紧凑型玉米品种最大灌浆速率高 $0.18 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,平均灌浆速率高 $0.03 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,灌浆持续期相差不大;低密度较高密度灌浆速率快 $0.01 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,但灌浆持续期延长 $5 \sim 15 \text{ d}$ 。西北旱塬区选择紧凑型较平展型玉米品种播种密度增加 $9\,000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,有利于优化群体结构,增加玉米产量。

关键词:西北旱塬;玉米;株型;密度;产量;干物质;灌浆速率

中图分类号:S513 **文献标志码:**A

Effects of planting density of different plant type maize on yield in northwest dry highland of loess plateau

ZHAO Gang, WANG Shu-ying, FAN Ting-lu, DANG Yi, WANG Lei, ZHANG Jian-jun,
LI Shang-zhong, CHENG Wan-li

(Gansu Academy of Agricultural Sciences Institute of Dryland, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to clarify the effect of densification on yield in Northwest dry highland of Loess Plateau, a study was carried out in 2011–2014 at Ministry of Agriculture Northwest Dryland Crop Nutrition and Fertilization Experiment Station Scientific Observations, using five maize cultivars and conducting four density treatments. The results showed that the field water consumption of different plant types was basically similar. Compact varieties yielded more than flat-type, and the optimum planting density for flat-type was $70\,700 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$, the density for the compact type was increased by $9\,100 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the yield increased by $2\,085.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. With the increase in the density of the two plant-type varieties, dry matter of individual plant and root-shoot ratio showed a decreasing trend, at the filling and maturity stage, the density of $75\,000$ and $90\,000 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ of compact maize had same root to shoot ratio. and the highest dry matter of flat-type maize varieties with $60\,000 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ was $32\,310 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and that of the compact type with $75\,000 \text{ plants} \cdot \text{hm}^{-2}$ was $29\,226 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. The dry matter accumulation amount of flat-type is more than that of the compact type; the filling rate parameter of flat type is $0.18 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ higher than that of the compact type, and the average filling rate is $0.03 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ higher, the duration of grain filling is not much different. the density has little effect on grain filling rate, and the rate of the low-density was fast $0.01 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ than that of high density, but the grain filling duration was delayed by $5 \sim 15 \text{ d}$. So selecting compact maize or relatively flat varieties for Northwest dry highland of Loess Plateau, and the sowing density increased by

收稿日期:2017-04-05

修回日期:2017-10-13

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0300110);“十二五”国家科技支撑计划(2015BAD22B02-02);国家玉米产业技术体系(CARS-02-66);农业部公益性(农业)行业专项(201503124)

作者简介:赵刚(1981–),男,甘肃静宁人,硕士研究生,主要从事旱作农业栽培等方面研究工作。E-mail:7635423@163.com

通信作者:樊廷录(1965–),男,甘肃临洮人,研究员,主要从事农田生态和旱作农业研究。E-mail:fantinglu3394@163.com

9 000 plants · hm⁻², which was beneficial to optimizing the structure of population and increasing the yield of maize.

Keywords: northwest dry highland of Loess Plateau;maize;plant type; planting density; yield; dry matter; filling rate

玉米是我国第一大粮食作物,为国家粮食安全战略发挥着重要作用^[1]。玉米产量的提高是优良品种和优化栽培措施共同的结果,不同区域玉米产量构成因素受到降水、气候等因素影响,因此,研究不同降水区域不同株型玉米群体结构具有重要意义。增加植株密度被普遍认为是玉米增产的主要途径之一^[2-4],然而不同玉米株型在不同播种密度对产量影响不同^[5],选择紧凑型玉米品种是获得高产的关键^[6-7],从 1950 s 玉米密度随着时间的推移逐渐增加^[8],株型决定了作物植株的分布态势,密度增加,植株生长空间压力增大及对养分、水分竞争加剧^[9]。黄土旱塬区干旱缺水是限制玉米生产的主要因素,因此,在前人研究的基础上,本研究主要在全膜垄沟栽培下,通过在有限的降水条件下增加密度,改变玉米群体结构,研究不同株型玉米在不同密度下群体结构的变化规律,对黄土旱塬区玉米产业发展具有指导意义。

1 试验设计的方法

1.1 试验地概况

镇原试验站位于甘肃省镇原县上肖乡(35°30'N,107°29'E),常年平均降水量 540 mm,年蒸发量 1 500 mm,干燥度 1.5,属稳定单向缺水农业区。土壤为黑垆土,耕层土壤有机质含量 10.62 g · kg⁻¹,全氮 0.94 g · kg⁻¹,碱解氮 89 mg · kg⁻¹,速效磷 12 mg · kg⁻¹,速效钾 231 mg · kg⁻¹,肥力中等。据测定,该地降水量的 10%~15%形成径流流失,60%~65%为无效蒸发,仅有 25%~30%被作物利用,且 60%的降水多集中在 7~9 月,年平均日照时数为 2 300~2 500 h,日照百分率达 50%~55%,年辐射量为 525~567 kJ · cm⁻²,≥0℃积温为 3 400~3 800℃,≥10℃积温为 2 700~3 200℃。

1.2 试验设计

依托国家玉米产业体系兰州综合试验站和农业部西北旱作区作物营养与施肥科学观测实验站,于 2011-2014 年连续 4 年进行试验;试验采用裂区设计,主因素设 4 个播种密度,分别为 4.5、6.0、7.5、9.0 万株 · hm⁻²;副处理为不同株型的 5 个玉米品种,其中紧凑型 3 个,分别为郑单 958、先玉 335 和吉祥 1 号,平展型 2 个,为陇单 4 号和中玉 9 号;小区为全膜双垄沟栽培,面积为 3.3 m×6 m=19.8 m²,

每处理重复 3 次,共计 60 个小区。播种采用定株距播种,施肥为纯氮 225 kg · hm⁻²,其中氮肥 50%施作底肥,50%为拔节期追肥,纯磷 120 kg · hm⁻²一次性基施底肥,其他管理同大田。

1.3 测定项目与方法

灌浆速率:玉米抽雄期选择长势一致且无病害植株开始挂牌标记,自开花后每隔 5 d 取样一次,每次取 3 个果穗,带回后 105℃杀青 10 min,80℃下烘干,每穗取中部籽粒 100 粒称重。

干物质:在玉米不同生育期选择小区长势一致植株取样,每次取 3 株,然后 105℃杀青 10 min,80℃下烘干至恒重后称重。取地上部分植株样的同时,以茎秆为圆心,以 1/2 株距为半径,挖取 0~30 cm 土层根系,带回洗净后杀青烘干称重。

产量:在玉米成熟后,剔除边行,在小区中间连续取 25 株测产,收获后自然风干,考种后脱粒记产(按 14%含水量折合产量)。

土壤水分和玉米水分利用效率(WUE)测定:播种前和收获时分别用土钻法测定每个小区 2 m 土层(每 20 cm 为一个层次)的土壤含水率,转化为播前和收获时的土壤贮水量(mm)。生育期降雨量通过 MM-950 自动气象站获得。试验地在旱原地带,降雨不产生径流,所以在本研究中地表径流可忽略不计,利用土壤水分平衡方程计算作物耗水量(ET,土壤水分蒸发与作物蒸腾量)。各指标计算公式:

玉米耗水量(ET,mm)=播前 2 m 土壤贮水量-收获时 2 m 土壤贮水量+生育期降水量(mm);

玉米水分利用效率(WUE,kg · hm⁻² · mm⁻¹)=籽粒产量/生育期耗水量。

2 结果与分析

2.1 不同品种玉米不同播种密度下产量和水分利用效率的变化

不同品种玉米群体变化差异较大,结果如表 1 所示,4 年结果裂区分析显示,品种和密度、产量和水分利用效率的影响均达到极显著水平,密度与品种互作效应也达到了极显著水平;说明品种和密度之间搭配可以提高产量和水分利用效率。

不同品种产量,先玉 335>中玉 9 号>吉祥 1 号>郑单 958>陇单 4 号,紧凑型品种先玉 335 平均产量为 12 940.5 kg · hm⁻²,较稀植大穗品种陇单 4 号增

产 10.41%;不同密度,7.5 万株 · hm⁻²>9.0 万株 · hm⁻²>6.0 万株 · hm⁻²>4.5 万株 · hm⁻²,产量分别为 13 275.0、12 780.0、12 181.5、10 806.0 kg · hm⁻²,密度增加 1.5 万株 · hm⁻²,产量平均增加 1 234.5 kg ·

hm⁻²,密度达到 7.5 万株 · hm⁻²时,再增加密度产量开始下降,说明在陇东旱塬区播种适宜密度为 7.5 万株 · hm⁻²左右。

表 1 玉米不同品种不同密度产量和水分利用效率方差分析

Table 1 Analysis of variance of different variety under different densities

变异来源 Source of variation		平方和 Square	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	显著水平 Significant level
产量 Yield	品种 Variety	93150.7	4	23287. 7	10.582	0.0002
	密度 Density	380408.2	3	126802.7	60.796	<i>P</i> <0.0001
	品种×密度 Variety×density	116404.2	12	9700.353	4.651	<i>P</i> <0.0001
水分利用效率 WUE	品种 Variety	0.4298	4	0.1075	7.22	0.0016
	密度 Density	2.9516	3	0.9839	63.575	<i>P</i> <0.0001
	品种×密度 Variety×density	0.774	12	0.0645	4.168	0.0001

表 2 不同品种玉米在不同密度下产量、水分利用效率

Table 2 Yield and WUE of different maize variety under different densities

品种 Variety	密度/(10 ⁴ 株 · hm ⁻²) Density	产量 Yield	变异系数 CV/%	水分利用效率 WUE	变异系数 CV/%	耗水量 ET/mm	变异系数 CV/%
	/(10 ⁴ plants · hm ⁻²)	/(kg · hm ⁻²)		/(kg · mm · hm ⁻²)			
吉祥 1 号 Jixiang1	4.5	10851.9c	8.03	25.83a	5.83	421.8a	13.83
	6.0	12287.1b	11.17	31.48b	8.01	392.8a	14.75
	7.5	13666.5a	1.81	34.65a	13.35	400.1a	14.42
	9.0	12818.1b	6.69	33.07ab	14.95	392.0a	11.22
中玉 9 号 Zhongyu9	4.5	11827.0b	5.74	28.41b	17.54	420.7a	11.86
	6.0	11829.4b	15.27	29.58b	24.62	410.4a	15.74
	7.5	13601.8a	4.09	33.04a	9.57	415.5a	13.15
	9.0	12589.0ab	6.18	30.54ab	15.65	418.3a	12.80
陇单 4 号 Longdan4	4.5	10948.3b	9.62	26.55a	6.47	414.5a	16.04
	6.0	12055.2a	8.77	29.30a	16.35	416.1a	10.39
	7.5	12280.6a	2.70	29.75a	12.37	417.3a	12.12
	9.0	11598.4a	7.06	28.58ab	17.16	411.9a	12.97
郑单 958 Zhengdan958	4.5	10231.9c	8.65	25.97b	8.12	396.6a	16.71
	6.0	11443.4b	13.21	28.75b	10.42	398.6a	9.93
	7.5	12580.2a	9.73	32.67a	15.29	390.4a	14.84
	9.0	12853.0a	3.28	33.25a	16.90	394.1a	15.63
先玉 335 Xianyu335	4.5	10179.3c	12.74	24.07b	27.14	431.5a	14.65
	6.0	13293.6b	6.50	32.45a	10.59	413.7a	13.70
	7.5	14249.1a	6.63	34.50a	16.05	419.7a	14.39
	9.0	14044.2a	1.75	33.81a	13.06	421.1a	13.76

注:同一列不同字母表示同一指标不同处理之间的差异性显著(*P*<0.05)。下同。
Note: The different letters in the same column indicate the significant difference at *P*<0.05. The same below.

同一品种不同密度产量差异显著(表 2),郑单 958 在 9.0 万株 · hm⁻²时产量最高,其余 4 个品种产量均在 7.5 万株 · hm⁻²时最高,平展型品种陇单 4 号在 6.0、7.5 万株 · hm⁻²时产量差异不显著,其他 3 个品种均显著增产。不同年型来看,最低密度受年际间其它因素影响较大,随着密度的增加影响逐渐减小,其中先玉 335 在 7.5、9.0 万株 · hm⁻²时,受年际间其它因素影响较大;说明不同品种之间可以通过适当增加密度,减小干旱对玉米产量的影响。

不同品种不同播种密度耗水量在 390.4~431.5 mm,变异系数为 2.98%,差异不显著(表 2),年际之间同一处理变异系数为 9.93%~16.71%,说明不同

品种在不同播种密度下耗水基本一致,稀植主要棵间蒸发损失较大,密植主要为植株蒸腾;年际之间变异系数较大,不同降水年型对玉米耗水量影响显著。

不同品种间水分利用效率由高到低依次是:吉祥 1 号、先玉 335、中玉 9 号、郑单 958 和陇单 4 号;不同密度下水分利用效率由高到低依次为 7.5、9.0、6.0 万株 · hm⁻²和 4.5 万株 · hm⁻²,4 个密度之间差异均达到了显著水平;密度从 4.5~7.5 万株 · hm⁻²,每公顷增加 1.5 万株,平均水分利用效率增加 3.3 kg · mm⁻¹ · hm⁻²,达到 9.0 万株 · hm⁻²时,开始下降。

郑单 958 在 9.0 万株 · hm⁻²时水分利用效率最

高,其他 4 个品种均在 7.5 万株·hm⁻²时最高,但均与 9.0 万株·hm⁻²差异不显著,密度增加到一定程度,水分利用效率不再增加。

2.2 不同密度下不同玉米品种农艺性状分析

同一品种不同密度各农艺性状之间分析结果见表 3,随着密度增加株高差异不显著,穗位高和秃顶长各品种均随着密度增加逐渐增加,穗长、穗粒数和百粒重随着密度增加呈减小趋势,但陇单 4 号、郑单 958 和先玉 335 穗长不同密度之间差异不显著。先玉 335 株高受密度的影响较小,整齐度较高;平展型品种陇单 4 号、中玉 9 号穗粒数和百粒重变幅大于 3 个紧凑型品种,平均增加 39.0%和37.1%,说明密度增加紧凑型品种较平展型产量构成因素

更稳定。
不同年际间,秃顶长、穗粒数和穗位高变幅分别为 0.21~5.28 cm、356.2~691.7 粒·穗⁻¹、78.0~130.5 cm,平均变异系数分别为 43.51%、12.00%和 11.77%;年际间株高、穗长和百粒重变异系数分别为 6.18%、5.72%和 6.10%。在不同年际间,先玉 335 株高和穗位高变幅分别为 254.4~341.7 cm、78.0~149.7 cm,高于其他品种;中玉 9 号穗长变幅为 16.8~26.2 cm;郑单 958 秃顶长、穗粒数和百粒重变幅分别为 0.58~2.60 cm、368.0~651.8 粒·穗⁻¹、27.1~39.7 g,产量主要构成因素穗粒数和百粒重变幅明显高于其他品种,说明郑单 958 的产量构成因素受年际间影响较大。

表 3 不同密度下玉米不同品种农艺性状

Table 3 Agronomic characters of different maize varieties under different densities							
品种 Variety	密度/(10 ⁴ 株·hm ⁻²) Density /(10 ⁴ plants·hm ⁻²)	株高 Plant height/cm	穗位高 Ear height/cm	穗长 Ear length/cm	秃顶长 Bare ear length/cm	穗粒数 Grain number per ear	百粒重 100-kernels weight/g
吉祥 1 号 Jixiang1	4.5	247.4±13.2a	100.4±1.3b	19.5±0.7a	0.4±0.06c	589.8±51.2a	39.2±0.63a
	6.0	243.2±13.7a	111.8±8.7a	19.5±0.5a	0.6±0.14b	577.8±47.0a	35.8±3.13ab
	7.5	239.7±13.8a	115.9±10.6a	19.1±0.3a	0.8±0.26b	560.0±62.2ab	34.3±2.89ab
	9.0	242.9±9.7a	118.0±13.1a	17.8±1.1b	1.3±0.59a	525.9±46.5b	33.0±2.47b
中玉 9 号 Zhongyu9	4.5	279.9±15.7a	105.0±5.4b	25.2±1.5a	2.5±1.06b	611.7±44.4a	44.2±0.45a
	6.0	281.5±19.1a	124.3±16.5a	23.0±2.3ab	2.9±1.27ab	542.0±55.7b	37.8±1.34ab
	7.5	275.7±21.0a	128.0±17.9a	21.0±2.3ab	3.0±1.39a	471.8±80.2c	35.6±1.67b
	9.0	270.7±23.0a	131.9±23.0a	19.6±1.9b	3.1±1.39a	447.8±75.0c	34.2±1.53b
陇单 4 号 Longdan4	4.5	260.3±7.2a	104.7±14.8b	22.4±0.3a	2.4±0.90b	605.5±48.5a	39.6±0.86a
	6.0	261.2±11.3a	117.0±19.0a	21.7±0.5a	2.8±0.56ab	586.4±53.0ab	35.0±3.13ab
	7.5	261.6±10.3a	122.6±14.1a	20.2±1.2a	3.2±0.71a	542.7±63.8b	34.1±2.22ab
	9.0	259.0±9.4a	129.8±19.6a	19.7±1.2a	3.5±1.29a	485.6±35.6a	31.9±2.18b
郑单 958 Zhengdan958	4.5	243.2±14.6a	104.1±9.7b	18.6±0.5a	1.2±0.84b	526.6±38.8a	38.9±1.12a
	6.0	238.8±13.5a	106.9±13.1b	18.1±0.6a	1.4±0.82ab	539.9±87.7a	35.1±3.73ab
	7.5	242.0±12.5a	115.8±9.1a	17.5±0.7a	1.7±0.81a	493.8±82.9ab	33.0±4.16b
	9.0	240.3±10.3a	117.8±8.9a	16.4±1.8a	1.8±1.00a	457.1±96.6b	32.1±3.15b
先玉 335 Xianyu335	4.5	290.5±14.6a	86.8±12.4c	21.8±1.7a	2.2±1.44b	656.7±10.2a	39.2±1.31a
	6.0	290.7±30.0a	109.0±17.3b	20.8±1.5a	2.2±0.98b	598.1±99.9b	36.2±2.37ab
	7.5	295.9±37.2a	112.3±15.5ab	19.4±0.8a	2.9±1.13b	546.7±93.0b	33.6±2.61b
	9.0	294.1±31.2a	120.8±22.3a	19.1±1.4a	2.9±0.79a	497.2±95.0c	32.8±1.29b

2.3 不同播种密度下玉米不同品种干物质分配

干物质积累是玉米光合作用的结果,2013 和 2014 年不同生育期干物质积累量平均值如图 1 所示。苗期各品种干物质质量为 17.5~27.4 g·株⁻¹,其中平展型陇单 4 号干物质积累量最大,拔节期干物质质量为 77.4~93.2 g·株⁻¹,先玉 335 平均干物质质量为 93.2 g·株⁻¹,苗期~拔节期营养生长迅速,干物质迅速积累,其中陇单 4 号干物质质量为 77.4 g·株⁻¹,低于其他品种,较先玉 335 减少 16.0%。吐丝期至成熟期,不同品种干物质均随密度增加而减小,平展型玉米品种陇单 4 号 4 个密度平均干物质质量在灌浆期和成熟期高于其他 4 个品种,其中灌浆期较其他 4 个品种高 8.8%~32.5%,成熟期高 2.7%~14.6%;成熟期先玉 335、郑单 958、吉祥 1 号在 6.0、7.5 万株·hm⁻²密度下单株干物质积累量差异不显著,中玉 9 号差异显著,说明耐密品种密度增加

1.5 万株·hm⁻²时,单株干物质差异不大,但相应单位面积干物质积累总量明显增加。

2.4 不同播种密度不同株型玉米根冠比变化

玉米根系生长情况直接关系到玉米的营养吸收和植株的稳定性。如图 2 所示,不同株型玉米品种在拔节和抽雄期根冠比达到最大,到灌浆期~成熟期迅速减小;密度之间差异均呈现从低密度到高密度根冠比逐渐减小,各个生育期变化规律相同。不同品种来看,平展型品种陇单 4 号、中玉 9 号随着密度的增加,根冠比变化幅度较小,不同生育期平均变异系数分别为 14.6%和 15.5%;紧凑型品种先玉 335、吉祥 1 号变幅较大,平均变异系数分别为 24.0%和 20.0%。

玉米不同生育期不同密度之间根冠比差异较大,全生育期在密度为 4.5 万株·hm⁻²根冠比最高,

随着密度增加逐渐降低,其中灌浆期和成熟期先玉 335 和吉祥 1 号 $7.5 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $9.0 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 两个密度下基本一致;说明在增密的同时,玉米根系生长空间减小,限制了根系生长,根系吸收和运

送养分的能力降低,地上部分也受到限制,耐密品种密度增加对根系生长影响较小。合理的根冠比例有利于玉米构建群体结构,达到高产目标,也有利于后期抵抗大风强降雨天气引起的玉米倒伏。

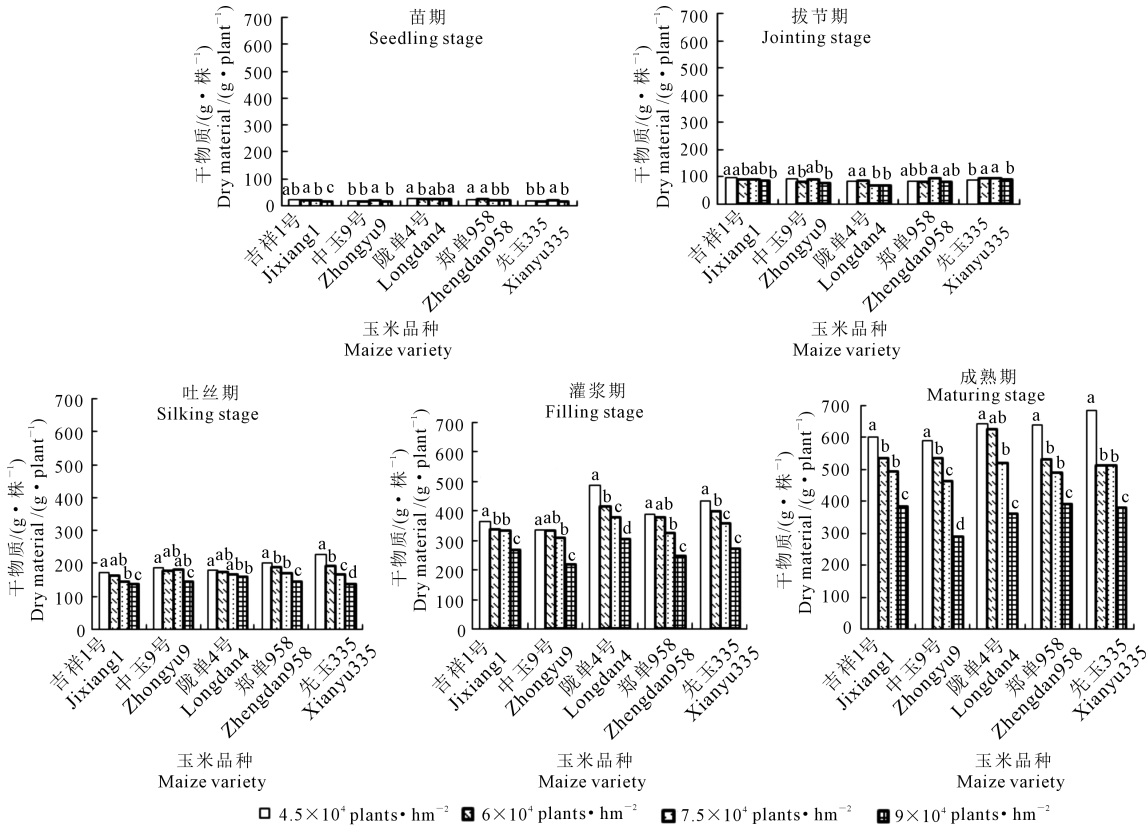


图 1 不同品种不同生育期玉米干物质随密度变化趋势
Fig. 1 The change of dry matter of maize variety with density at different growth stages

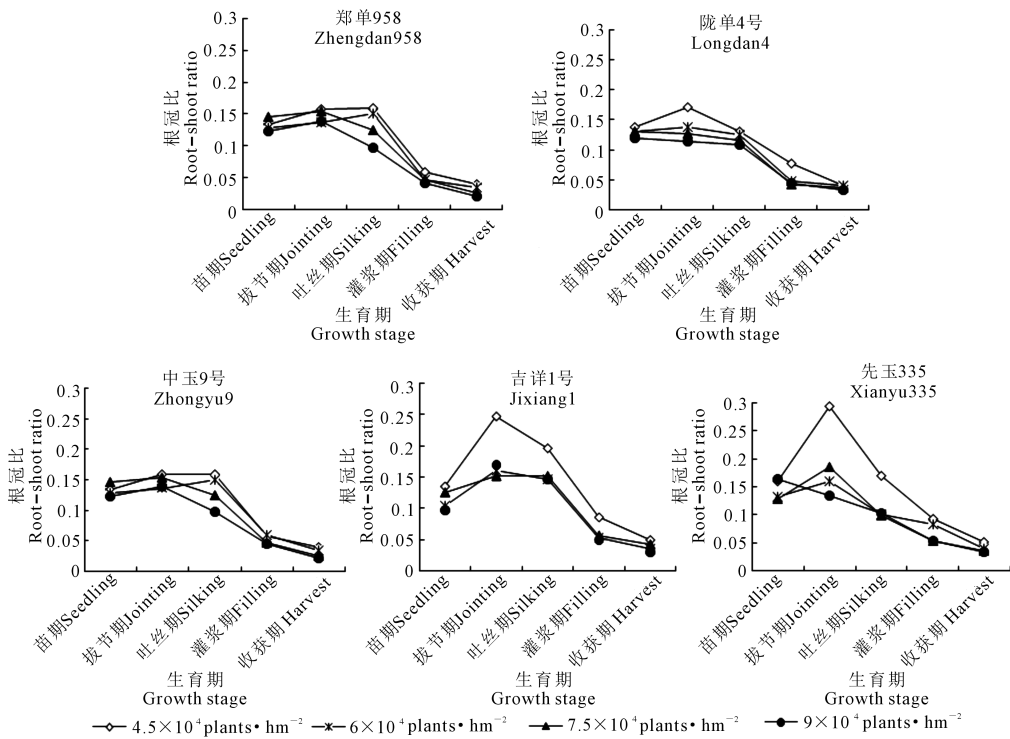


图 2 不同播种密度下不同玉米品种在不同生育期根冠比变化规律
Fig. 2 The change of root-shoot ratio of maize variety with density at different growth stages

2.5 不同播种密度下玉米不同品种灌浆参数变化

不同品种不同密度下灌浆进程拟合方程如表 4 所示,相关系数在 0.99 以上,整体来看,不论是紧凑型还是平展型玉米,最大灌浆速率出现的天数高密度较低密度早 1~5 d,最大灌浆速率高 0.01~0.18 g · d⁻¹;其中平展型玉米品种中玉 9 号和陇单 4 号平均最大灌浆速率为 1.36 g · d⁻¹,紧凑型吉祥 1 号、先玉 335 和郑单 958 平均为 1.18 g · d⁻¹;紧凑型玉米最大灌浆速率出现的天数较平展型玉米品种早 2.1 d。说明紧凑型玉米品种灌浆进程较平展型快,但最大灌浆速率较慢。

不同品种不同密度灌浆参数如表 5 所示,紧凑型玉米品种平均灌浆速率为 0.53 g · d⁻¹,较平展型玉米品种低 0.03 g · d⁻¹,灌浆持续期(T)紧凑型玉米比平展型玉米长 1 d;密度为 4.5、6.0 万株 · hm⁻²的低密度灌浆持续期为 60.9~79.2 d,较 7.5、9.0 万株 · hm⁻²高密度长 4.5~14.7 d,平均灌浆速率低密度为 0.54 g · d⁻¹,高密度为 0.53 g · d⁻¹,两者相差不大;低密度紧凑型和平展型玉米品种较高密度紧凑和平展型平均灌浆速率差异不大,但是灌浆持续期分别延长 8.5 d 和 9.6 d。同一密度下,紧凑型玉米与平展型玉米灌浆速率基本一致,但是灌浆持续期长 1d 左右;随着密度增加,灌浆持续期逐渐降低,同一品种低密度与高密度灌浆速率一致,但是灌浆持续期长,在灌浆期一致的情况下,灌浆持续期长的玉米容易达到高产。

3 结论与讨论

玉米是 C4 植物,属于高光效作物,90%的干物质通过光合作用得到^[10],玉米产量形成是一个群体过程^[6],产量的提高是生物量和收获指数提高的共同结果^[13-14],不同生态区域不同株型玉米品种对密度的适应性不同,玉米株型是由遗传特性决定的,因此播种密度是影响玉米产量的关键因素。产量和密度在一定范围内呈正相关^[11],但是密度的增加会导致个体生长受阻,个体生产力下降^[12],因此合理密植使群体和个体效益最大化是取得高产的主要途径。本研究认为,不同株型玉米产量均随着密度的增加呈现先增加后降低趋势,紧凑型品种在 7.5 万株 · hm⁻²时产量最高,而平展型品种在密度 6.0 万株 · hm⁻²和 7.5 万株 · hm⁻²时产量差异不显著,根据拟合一元二次方程可得,紧凑型玉米品种($y = -0.000\ 04x^2 + 0.425\ 7x - 176.64, R^2 = 0.999\ 9^{**}$)最佳播种密度为 7.98 万株 · hm⁻²,最高产量为 14 331.9 kg · hm⁻²;平展型($y = -0.00003x^2 + 0.282\ 9x - 149.53, R^2 = 0.999\ 9^{**}$)为 7.07 万株 · hm⁻²,最高产量为 12 246.0 kg · hm⁻²,在栽培条件和生长环境一致的情况下,紧凑型品种较平展型播种密度增加 0.91 万株 · hm⁻²,增产 2 085.9 kg · hm⁻²。出现这种情况的主要原因为紧凑型玉米品种叶夹角小,在合理密植时群体结构发生变化,提高了光能利用率,有利于干物质积累和转运。因此在黄土旱塬区要选择紧凑型玉米品种。

表 4 不同密度下玉米不同品种灌浆速率的拟合方程

Table 4 The different variety maize fitting equation of filling rate under different densities					
品种 Variety	密度/(10 ⁴ 株·hm ⁻²) Density/ (10 ⁴ plants·hm ⁻²)	拟合方程 Fitting equation	R ²	d _{Vmax}	V _{max}
吉祥 1 号 Jixiang1	4.5	W = 34.0863/(1+e ^(3.9668-0.121154t))	0.9933	32.7	1.03
	6.0	W = 33.4063/(1+e ^(4.4781-0.149015t))	0.9969	30.1	1.24
	7.5	W = 34.6378/(1+e ^(5.1759-0.163683t))	0.9943	31.6	1.42
	9.0	W = 33.6854/(1+e ^(4.4172-0.141694t))	0.9939	31.2	1.19
中玉 9 号 Zhongyu9	4.5	W = 42.5107/(1+e ^(5.3377-0.156297t))	0.9987	34.2	1.66
	6.0	W = 42.8571/(1+e ^(4.7077-0.145159t))	0.9955	32.4	1.56
	7.5	W = 35.1785/(1+e ^(5.3996-0.170085t))	0.9987	31.7	1.50
	9.0	W = 33.4268/(1+e ^(5.1371-0.162364t))	0.9949	31.6	1.36
陇单 4 号 Longdan4	4.5	W = 42.1159/(1+e ^(5.0142-0.130215t))	0.9901	38.5	1.37
	6.0	W = 31.9028/(1+e ^(4.2793-0.115427t))	0.9926	37.1	0.92
	7.5	W = 30.2367/(1+e ^(5.7222-0.165479t))	0.9912	34.6	1.25
	9.0	W = 29.2520/(1+e ^(5.7016-0.174784t))	0.9972	32.6	1.28
郑单 958 Zhengdan958	4.5	W = 40.8266/(1+e ^(4.3581-0.126674t))	0.9949	34.4	1.29
	6.0	W = 38.6604/(1+e ^(3.7233-0.105063t))	0.9941	35.4	1.02
	7.5	W = 32.7402/(1+e ^(4.3377-0.146820t))	0.9929	29.5	1.20
	9.0	W = 30.9172/(1+e ^(4.1742-0.145762t))	0.9926	28.6	1.13
先玉 335 Xianyu335	4.5	W = 34.3050/(1+e ^(4.4225-0.135047t))	0.9927	32.7	1.16
	6.0	W = 35.5833/(1+e ^(4.2729-0.123673t))	0.9947	34.6	1.10
	7.5	W = 34.0118/(1+e ^(4.7509-0.146045t))	0.9958	32.5	1.24
	9.0	W = 31.2094/(1+e ^(4.5517-0.150301t))	0.9927	30.3	1.17

表 5 不同密度下玉米不同品种灌浆参数的变化
Table 5 The different variety maize filling parameters under different densities

品种 Variety	密度/(10 ⁴ 株·hm ⁻²) Density /(10 ⁴ plants·hm ⁻²)	<i>V</i> _{mean}	<i>T</i>	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₃	<i>W</i> ₁	<i>W</i> ₂	<i>W</i> ₃	<i>V</i> ₁	<i>V</i> ₂	<i>V</i> ₃
吉祥 1 号 Jixiang1	4.5	0.48	70.7	21.9	21.7	27.1	7.2	19.7	6.9	0.33	0.91	0.25
	6.0	0.55	60.9	21.2	17.7	22.0	7.1	19.3	6.7	0.33	1.09	0.31
	7.5	0.58	59.7	23.6	16.1	20.0	7.3	20.0	7.0	0.31	1.24	0.35
	9.0	0.53	63.6	21.9	18.6	23.1	7.1	19.4	6.8	0.33	1.05	0.29
中玉 9 号 Zhongyu9	4.5	0.67	63.5	25.7	16.9	21.0	9.0	24.5	8.6	0.35	1.46	0.41
	6.0	0.67	64.1	23.4	18.1	22.6	9.1	24.7	8.6	0.39	1.36	0.38
	7.5	0.60	58.8	24.0	15.5	19.3	7.4	20.3	7.1	0.31	1.31	0.37
	9.0	0.56	59.9	23.5	16.2	20.2	7.1	19.3	6.7	0.30	1.19	0.33
陇单 4 号 Zhengdan958	4.5	0.57	73.8	28.4	20.2	25.2	8.9	24.3	8.5	0.31	1.20	0.34
	6.0	0.41	76.9	25.7	22.8	28.4	6.7	18.4	6.4	0.26	0.81	0.23
	7.5	0.48	62.3	26.6	15.9	19.8	6.4	17.5	6.1	0.24	1.10	0.31
	9.0	0.50	58.9	25.1	15.1	18.8	6.2	16.9	5.9	0.25	1.12	0.31
郑单 958 Zhengdan958	4.5	0.58	70.7	24.0	20.8	25.9	8.6	23.6	8.2	0.36	1.13	0.32
	6.0	0.49	79.2	22.9	25.1	31.2	8.2	22.3	7.8	0.36	0.89	0.25
	7.5	0.54	60.8	20.6	17.9	22.3	6.9	18.9	6.6	0.34	1.05	0.30
	9.0	0.51	60.2	19.6	18.1	22.5	6.5	17.9	6.2	0.33	0.99	0.28
先玉 335 Xianyu335	4.5	0.51	66.8	23.0	19.5	24.3	7.2	19.8	6.9	0.32	1.02	0.28
	6.0	0.50	71.7	23.9	21.3	26.5	7.5	20.5	7.2	0.31	0.96	0.27
	7.5	0.53	64.0	23.5	18.0	22.4	7.2	19.6	6.8	0.31	1.09	0.31
	9.0	0.51	60.9	21.5	17.5	21.8	6.6	18.0	6.3	0.31	1.03	0.29

农艺性状中株高、穗位高和果穗性状与产量关系密切^[15-17],叶夹角、株高、茎粗等均会随着密度的增加发生变化^[18],耐密品种主要是结构紧凑,仍能使冠层有较大的光能截获能力,株高、穗位高降低,有利于抗倒伏能力的提高^[19],本研究得出不同株型玉米品种均随着密度增加株高基本不变,而穗位高逐渐增加,穗部性状均呈减小趋势,单株干物质积累随着密度增加明显减小,然而,单位面积上干物质积累量平展型和紧凑型株型差异较大,平展型玉米品种密度为 6.0 万株·hm⁻²时干物质积累量为 32 310 kg·hm⁻²,紧凑型在 7.5 万株·hm⁻²时为 29 226 kg·hm⁻²,无论紧凑型带是平展型品种干物质积累量和产量均在 7.5 万株·hm⁻²达到最高,紧凑型玉米品种干物质的积累和运转效率高于平展型,提高了收获指数。

玉米群体结构发生变化,会导致叶面积指数、干物质积累、光合速率^[20-21]等一系列变化,直接改变了田间的微气候^[22]。密度增加影响了玉米冠层

和根系分布空间,对光合产物积累和水肥的吸收有一定影响,因此,合理的根冠比例有利于玉米“源-库-汇”分配。本研究发现,不同株型玉米种植密度增加根冠比呈减小趋势,低密度下根系发达,有利于水分和养分的吸收,抗倒伏能力增强,但是根系的生长牺牲了地上干物质的积累,从而降低产量;高密度根冠比降低,主要因为生长空间减小,地下根系生长受到限制。因此,合理的种植密度优化了根系与冠层生长比例,使干物质积累与水分养分吸收效益最大化。

玉米籽粒灌浆期是干物质向经济产量转化的过程,是一个复杂的生理代谢过程,籽粒灌浆速率高低以及灌浆持续时间长短,决定最终玉米产量^[23-24],籽粒灌浆受品种特性、环境因素、栽培因子的影响较大^[25-26]。本研究结果表明,平展型较紧凑型玉米品种最大灌浆速率高 0.18 g·d⁻¹,平均灌浆速率高 0.03 g·d⁻¹,灌浆持续期相差不大;密度对灌浆速率影响不大,低密度较高密度快 0.01 g·d⁻¹,但

灌浆持续期延长 5~15 d,密度增加,叶片相互遮荫明显,进行光合作用的叶片面积减小,缩短了灌浆时间,百粒重减小。

在西北旱塬区特定气候条件下,选择不同株型玉米品种和播种密度,对该区玉米产量有很大影响,通过本文研究得出,适当增加播种密度,虽然改变了穗部形状、根冠比、干物质积累量和灌浆参数,但是优化了群体结构布局,增加了玉米单产;选择紧凑型玉米品种较平展型播种密度增加 9000 株·hm⁻²左右,产量显著增加。

参 考 文 献:

[1] 中国农业年鉴编委会.中国农业年鉴[M].北京:中国农业出版社,2011.

[2] 王志刚,高聚林,任有志,等.春玉米超高产群体冠层结构的研究[J].玉米科学,2007, 15(6): 51-56.

[3] 王楷,王克如,王永宏,等.密度对玉米产量(>15000kg·hm⁻²)及其产量构成因子的影响[J].中国农业科学,2012, 45(16): 3437-3445.

[4] 刘惠涛,高玉山,窦金刚,等.半干旱区玉米密度对产量及商品品质的影响[J].玉米科学,2008, 16(4):130-134.

[5] 周文伟,李桂芝,李俊杰,等.不同类型玉米杂交种对密度的反应评价[J]. 玉米科学,2004,12(专刊): 63-65.

[6] 赵松龄,李凤民,张大勇,等.作物生产是一个种群过程[J].生态学报, 1997, 17(1) :100-104.

[7] Tollenaar M, Lee E A. Yield potential yield stability and stress tolerance in maize[J]. Field Crops Research, 2002, 88: 161-169.

[8] 杨锦忠,张洪生,杜金哲. 玉米产量-密度关系年代演化趋势的 Meta 分析[J]. 作物学报,2013,39(3) :515-519.

[9] 李志坚,周道玮,胡跃高. 不同积温和种植密度对饲用黑麦分蘖动态的影响[J]. 应用生态学报,2004, 15 (3): 413-419.

[10] 乌瑞翔,刘荣权,卢翠玲,等. 地膜玉米的最佳播期及其“两个学说”的应用[J]. 中国农业科学,2001, 34(4) : 433-438.

[11] 马国胜,薛吉全,路东海,等. 播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(6) : 1247-1253.

[12] 李宗新,陈源泉,王庆成,等.密植条件下种植方式对夏玉米

群体根冠特性及产量的影响[J].生态学报,2012,32(23): 7391-7401.

[13] Gardner F P, Pearce R B, Mitchell R L. Photosynthesis. In: Physiology of Crop Plant [M]. Ames: Iowa State University Press, 1985.

[14] Fageria N K, Baligar V C, Clark R B. Physiology of Crop Production. Food Products Press[M]. New York, London, Oxford: An Imprint of the Haworth Press, Inc., 2005, 72-82.

[15] 谭永平,王桂跃,胡贤女,等. 影响玉米产量效应因子的多元回归与通径分析[J]. 浙江农业学报,2006, 18(4) : 238-240.

[16] Pereira M G, Lee M. Identification of genomic regions affecting plant height in sorghum and maize[J]. Theor Appl Genet, 1995, 90: 380-388.

[17] 张泽民,贾长柱. 玉米株型对遗传增益的影响[J]. 遗传, 1997, 19(2) : 31-34.

[18] 吕丽华,陶洪斌,夏来坤,等.不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J].作物学报,2008,34(3): 447-455.

[19] Sangoi L, Gracietti M A, Rampazzo C, et al. Response of Brazilian maize hybrids from different areas to changes in plant density [J]. Field Crops Res, 2002, 79: 39-51.

[20] 李小勇,唐启源,李迪秦,等.不同种植密度对超高产稻田春玉米产量性状及光合生理特性的影响[J]. 华北农学报, 2011,26(5) :174-180.

[21] 卫丽,熊友才,Bao luo Ma,等. 不同群体结构夏玉米灌浆期光合特性和产量变化[J]. 生态学报,2011, 31(9) :2524-2531.

[22] 刘开昌,王庆成,张秀清,等. 玉米光合性能与耐密性关系的研究[J]. 山东农业科学,2001(6) :25-29.

[23] Borrás L, Zinselmeier C, Senior M L, et al. Characterization of grain-filling patterns in diverse maize germplasm [J]. Crop Science, 2009,49: 999-1009.

[24] Sadras V O, Egli D B. Seed size variation in grain crops: Allometric relationships between rate and duration of seed growth[J]. Crop Science,2008, 48: 408-416.

[25] 张战辉. 玉米籽粒灌浆速率及其相关性状的 QTL 分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011.

[26] 李绍长,白萍,吕新,等. 不同生态区及播期对玉米籽粒灌浆的影响[J]. 作物学报, 2003,29(5): 775-778.