

密度和品种对夏玉米产量及水分利用效率的影响

高 繁^{1,2,3}, 胡田田^{1,2,3}, 姚德龙^{1,2,3}, 刘 杰^{1,2,3}

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2.旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;
3.中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:本试验旨在研究品种和密度对夏玉米产量及水分利用效率的影响,通过品种选择和密度优化为玉米节水高产提供依据。试验材料选择郑单 958、屯玉 808、先玉 335、先玉 1266、浚单 29、陕单 226、陕单 609、延科 288、西农 211 和华农 138 共 10 个玉米品种,设置 6.75×10^4 、 7.5×10^4 、 8.25×10^4 株 $\cdot$ hm⁻² 共 3 个种植密度,采用裂区设计进行田间试验,研究夏玉米产量、生物量、耗水量及水分利用效率随密度和品种的变化规律。结果表明:种植密度的增加会影响夏玉米的产量及水分利用效率,不同密度下以 8.25×10^4 株 $\cdot$ hm⁻² 的产量和水分利用效率最高,平均产量为 7 954 kg $\cdot$ hm⁻²,水分利用效率为 22.1 kg $\cdot$ hm⁻² $\cdot$ mm⁻¹;不同品种夏玉米产量和水分利用效率对密度的响应存在差异,屯玉 808 的耐密性最好,西农 211 耐密性最差;产量越高的品种水分利用效率越高。因此在关中平原,适当提高种植密度,并选用耐密型高产品种是实现玉米种植节水高产的有效途径。本试验条件下,以 8.25×10^4 株 $\cdot$ hm⁻² 密度水平种植屯玉 808、华农 138、先玉 1266 和陕单 609,以 7.5×10^4 株 $\cdot$ hm⁻² 密度种植郑单 958,可同时获得产量和水分利用效率最高。

关键词:夏玉米;品种;种植密度;产量;水分利用效率
中图分类号:S513 **文献标志码:**A

Effects of planting density and cultivar on grain yield and water use efficiency of summer maize

GAO Fan^{1,2,3}, HU Tian-tian^{1,2,3}, YAO De-long^{1,2,3}, LIU Jie^{1,2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semi-arid of Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Water Conservation in Dryland, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Effects of cultivar and planting density on grain yield and water use efficiency (WUE) of summer maize were assessed to improve the grain yield and WUE by optimizing the combination of cultivar and planting density. Field experiments were conducted and three planting densities, 67 500, 75 000 and 82 500 individual $\cdot$ hm⁻² were set for ten summer maize cultivars Zhengdan 958, Tunyu 808, Xianyu 335, Xianyu 1266, Jundan 29, Shandan 226, Shandan 609, Yanke 288, Xinong 211 and Huanong 138. The split-plot experiment design was taken to explore the change rules of grain yield, biomass, total water consumption and WUE. The results showed that increasing planting density would affect summer maize grain yield and WUE. The highest average grain yield was 7 954 kg $\cdot$ hm⁻² and the highest average WUE was 22.1 kg $\cdot$ hm⁻² $\cdot$ mm⁻¹ when the density was 82 500 individual $\cdot$ hm⁻². The effect of planting density on yield and WUE of summer maize cultivars varied. The density-tolerance of Tunyu 808 and Xinong 211 was the best and the worst respectively. The cultivars with high WUE had grain yield. It was an efficient way to increase planting density appropriately and select high density-tolerance cultivars to save water and improve grain yield in Guanzhong plain. Both grain yield and WUE would be the highest to plant Tunyu 808, Huanong 138, Xianyu 1266 and Shandan 609 at the density of 82 500 individual $\cdot$ hm⁻² and plant Zhengdan 958 at

the density of 75 000 individual · hm⁻² under the current experimental condition.

Keywords: summer maize; cultivar; planting density; grain yield; water use efficiency

玉米是世界最重要的粮食作物之一^[1]。在过去 12 年里,玉米增产占中国粮食增产量的 57%,并从 2012 年起,玉米成为中国种植面积最大的粮食作物^[2-3]。陕西省关中平原地区光热水土条件丰富,是本省粮食主产区。其中夏玉米作为该地区的主要粮食作物,玉米产量占全省玉米总产量的 70%,对全省的粮食生产具有重要影响^[4-5]。然而农业部在 2015 年提出计划到 2020 年,包括陕西部分地区在内的玉米种植区域将调减 333 万 hm² 以上,2017 年调减 66 万 hm² 以上^[6]。因此,提高单位面积玉米产量,已成为陕西省以及全国玉米生产发展的必由之路。

前人研究认为,种植密度是影响玉米产量的重要因素之一,合理增加群体密度是获得高产的关键措施^[7-8]。Duvick^[9] 研究表明高密度条件下,现代品种产量优势明显。王楷等^[10] 研究表明实现玉米超高产的最适密度在 7.15 ~ 14.45 × 10⁴ 株 · hm⁻²。李淑华等^[11] 研究得出世界玉米高产记录均为高密度群体下实现的,美国玉米高产纪录田收获密度为 10.9 万株 · hm⁻²,而中国玉米高产记录田最大密度仅为 7.0 万株 · hm⁻²。因此,亟待研究优化我国的玉米种植密度。陕西关中平原地区,目前推广种植的杂交玉米品种众多,但很少考虑到不同品种适宜的种植密度可能存在较大差异。实际种植密度介于 5.0 × 10⁴ ~ 7.0 × 10⁴ 株 · hm⁻² 之间,种植密度随意性大,对该地区夏玉米产量的提高造成制约^[12]。另一方面,玉米属于高耗水粮食作物,面对农业节水的要求,如何提高玉米生产的水分利用效率也迫在眉睫。因此,本研究针对关中平原夏玉米种植现状,选择 10 个有代表性的夏玉米品种,研究其不同密度下的产量和水分利用,探讨品种和种植密度优化组合,为关中平原夏玉米节水高产提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验在西北农林科技大学斗口试验站进行。试验站地处关中平原中部 (108° 52' E, 34°36'N),海拔 427.4 m,属暖温带大陆性季风气候区,四季分明,气候温和;全年平均温度 12.9℃,年降水量为 526 mm,夏秋季降水占年降水量的 50% ~

70%,无霜期 218 d,日照 2 095 h^[13]。供试土壤类型为红油土,土壤容重 1.38 g · cm⁻³。试验前茬作物为油菜,玉米生长季降雨量如表 1 所示。

表 1 玉米生长期的降雨量

Table 1 Precipitation during the growth period of maize

月份 Month	生长天数/d Growing days	降雨/mm Precipitation
6 月 Jun.	10	77.3
7 月 Jul.	31	27.1
8 月 Aug.	31	41.6
9 月 Sep.	30	79.5
10 月 Oct.	15	62.3

1.2 试验设计

试验采用裂区设计,以种植密度为主处理,玉米品种为副处理。试验品种包括郑单 958 (ZD958)、屯玉 808 (TY808)、先玉 335 (XY335)、先玉 1266 (XY1266)、浚单 29 (JD29)、陕单 226 (SD226)、陕单 609 (SD609)、延科 288 (YK288)、西农 211 (XN211) 和华农 138 (HN138) 共 10 个。密度设 6.75 × 10⁴、7.5 × 10⁴ 和 8.25 × 10⁴ 株 · hm⁻² 共 3 个水平 (分别简称低密度 LD,中密度 MD,高密度 HD),共 30 个处理,重复 3 次。小区面积为 2.8 m × 10 m,随机区组排列。

2015 年 6 月 21 日人工点播玉米。行距均为 60 cm,低、中、高密度下株距分别为 24.7、22.2、20.2 cm。玉米生长期于拔节期和抽雄期各灌水 50 mm。施肥量 N 为 348 kg · hm⁻²,P₂O₅ 为 77 kg · hm⁻²,其中氮肥为尿素 (N ≥ 46.5%),磷肥为普钙 (P₂O₅ ≥ 16%)。磷肥一次性基施,氮肥基施 20%,拔节期、抽雄期各追施 40%。采用人工除草控制杂草。收获时间为 2015 年 10 月 15 日。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤水分 分别于玉米播种前、收获后,取土测定 0~200 cm 土层土壤含水率,每 20 cm 一层,采用烘干法测定土壤含水率。

1.3.2 作物耗水量 作物耗水量计算如下式:

$$TWC = P + I + \Delta W + K \quad (1)$$

式中,TWC 为作物生长期间的总耗水量 (mm);P 为有效降水量 (mm);I 为灌溉量 (mm);ΔW 为 2 m 土层作物播前与收获时土壤储水量的差值 (mm);K 为地下水补给量 (mm),由于试验区地下水在 20 m 以下^[14],忽略不计。

1.3.3 夏玉米产量及生物量 玉米成熟后每个处

理小区随机收取 20 株玉米,脱粒称重测定产量。每个小区取 6 株,带回置烘箱中 105℃ 杀青 30min 后,75℃ 烘至恒重,计算不同处理玉米地上部生物量。

1.3.4 水分利用效率 水分利用效率 (WUE) 由作物经济产量除以作物生长期总耗水量来确定:

$$WUE = Y/TWC \tag{2}$$

式中, Y 为作物产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.4 数据处理

试验数据的方差分析和多重比较采用 DPS 统计分析软件完成,差异显著性检验采用 Duncan 法进行,绘图用 OriginPro 9.0 完成。

2 结果与分析

2.1 不同品种夏玉米生物量对种植密度的响应

由表 2 可得,不同品种夏玉米随着种植密度增加群体干物质累积量变化不同。屯玉 808、先玉 335、先玉 1266、陕单 226 和陕单 609 的生物量随密度的增加而增加,最高密度较最低密度生物量增幅分别为 13%、20%、15%、13%和 13%;郑单 958、浚单 29 和延科 288 的生物量都随着密度的增加而先增大后减小,但郑单 958 和浚单 29 均在低密度生物量最低,中密度最高,中密度较低密度生物量增加 31%和 18%,而延科 288 在最高密度生物量最低,中密度最高,中密度较高密度生物量增加 9%;西农 211 和华农 138 的生物量随着密度的增加而先减少后增加,高密度较中密度高 18%和 15%。这表明种植密度对夏玉米的生物量有影响,适当增加种植密度能提高夏玉米生物量,但不同品种的夏玉米生物量对种植密度的响应存在差异。

2.2 不同品种夏玉米产量对种植密度的响应

不同品种玉米产量受密度水平的影响见表 3。屯玉 808、先玉 335、先玉 1266、陕单 609 和华农 138 五个品种产量受不同密度的影响呈现出相同的变化趋势:随着密度水平的升高,产量增加,高密度较低密度产量增幅依次为 15.1%、13.5%、14.7%、17.5%和 17.6%。郑单 958、浚单 29、陕单 226 和延科 288 四个品种产量随密度先增后减,中密度较低密度增产分别为 17.8%、9.0%、9.7%和 5.5%,而高密度较中密度分别减产 3.9%、2.4%、1.1%和 1.7%。表明种植密度对玉米产量有影响,但不同品种产量对种植密度的响应存在差异。适当提高种植密度能够提高玉米产量,但密度过高也会导致部分夏玉米品种产量降低。

表 3 还表明,在品种与密度组合的 30 个处理中,高密度屯玉 808 产量最高,高密度华农 138 和先玉 1266 产量次之,三者间无显著差异。中密度西农 211 产量最低,相较高密度屯玉 808 产量少 22.7%,差异显著。郑单 958 作为目前种植面积最大的品种,低密度产量与中密度西农 211 产量无显著差异,且中密度产量与高密度屯玉 808 产量无显著差异,表明该品种达到适宜密度时能够取得高产。浚单 29 平均产量较高,仅次于屯玉 808 和先玉 1266 (表 3),而且产量随密度变化幅度小,表明该品种对种植密度适应力较强,在不同的密度水平下都能保持较高和较稳的产量水平。由此可见,在试验地区,以 $8.25 \times 10^4 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 密度水平种植屯玉 808、华农 138、先玉 1266 和陕单 609,以 $7.5 \times 10^4 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 密度种植郑单 958 和浚单 29 可获得高产。

表 2 不同品种与种植密度下夏玉米生物量
Table 2 Biomass of different maize cultivars and planting densities

品种 Cultivar	低密度生物量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Biomass of LD	中密度生物量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Biomass of MD	高密度生物量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Biomass of HD
ZD958	11958d	15677a	13599abcd
TY808	13091abcd	13585abcd	14796abcd
XY335	11844d	13388abcd	14266abcd
XY1266	13218abcd	13970abcd	15262ab
JD29	12027cd	14242abcd	13150abcd
SD226	13094abcd	14142abcd	14776abcd
SD609	13080abcd	13870abcd	14739abcd
YK288	12927abcd	13482abcd	12329bcd
XN211	13267abcd	11938d	14033abcd
HN138	13518abcd	13045abcd	15005abc

注:30 个处理的数据标以不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著,下同。
Note: Values followed by different letters are significantly difference at the 0.05 probability level within 30 treatments, the same below.

表 3 不同品种与种植密度下夏玉米的产量

Table 3 Grain yield of different maize cultivars and planting densities

品种 Cultivar	低密度产量/(kg·hm ⁻²) Grain yield of LD	中密度产量/(kg·hm ⁻²) Grain yield of MD	高密度产量/(kg·hm ⁻²) Grain yield of HD
ZD958	6929 bc	8163abc	7841abc
TY808	7517abc	7802abc	8650a
XY335	6804bc	7230abc	7725abc
XY1266	7363abc	7739abc	8442ab
JD29	7372abc	8035abc	7841abc
SD226	7132abc	7823abc	7737abc
SD609	6871bc	7304abc	8072abc
YK288	7083abc	7474abc	7344abc
XN211	6891bc	6689c	7413abc
HN138	7209abc	7315abc	8477ab

2.3 不同品种夏玉米耗水量对种植密度的响应

由表 4 可得:不同品种夏玉米随着种植密度增加耗水量变化存在较大差异。郑单 958、先玉 335、浚单 29 和陕单 609 耗水量随密度的增加呈现先增加后减少的趋势;郑单 958 和浚单 29 的耗水量均在低密度最低,中密度最高,最高耗水量较最低分别增加 5%和 14%。而先玉 335 和陕单 609 的耗水量均在高密度最低,中密度最高,分别增加 9%和 7%。屯玉 808 和陕单 226 耗水量随密度的增加逐渐减少;高密度耗水量比低密度分别降低 13%和 1%。延科 288、西农 211 和华农 138 耗水量随密度增加呈现先减小后增加的趋势;延科 288 和西农 211 的耗水量均在中密度最低,高密度最高,分别增加 10%和 4%;而华农 138 的耗水量在中密度最低,低密度最高,耗水量增加 4%。先玉 1266 耗水量随密度增加耗水量逐渐增加,高密度耗水量比低密度高 5%。由此可得,不同品种的夏玉米耗水量对种植密度的响应存在差异。

2.4 不同品种夏玉米水分利用效率对种植密度响应

由表 5 可得,屯玉 808、先玉 335、陕单 609 和

农 138 的水分利用效率随密度的增大而增大,高密度比低密度增加 32.8%、20.8%、24.7%和 19.1%;郑单 958、陕单 226 和延科 288 的水分利用效率随密度的增大先增加后减小,中密度较低密度增加 11.9%、9.5%和 11.6%;先玉 1266、浚单 29 和西农 211 的水分利用效率随密度的增大先减小后增加,水分利用效率最高值比最低值增加 8.5%、4.5%和 6.6%。表明密度变化会影响夏玉米水分利用效率,但不同品种夏玉米水分利用效率对种植密度的响应存在差异。

由表 5 还可得出,高密度屯玉 808 的水分利用效率最高,高密度陕单 609 和郑单 958 次之,三者无显著差异;低密度先玉 335 的水分利用效率最低,中密度的西农 211 和先玉 335 略有增大,但三者无显著差异;高密度屯玉 808 的水分利用效率较低密度先玉 335 高 43.1%,差异显著。综上所述,在本试验条件下以 8.25×10^4 株·hm⁻² 密度水平种植屯玉 808、陕单 609、华农 138 和先玉 1266,以 7.5×10^4 株·hm⁻² 密度种植郑单 958 水分利用效率最高。

表 4 不同品种与种植密度下夏玉米的耗水量

Table 4 Total water consumption of different maize cultivars and planting densities

品种 Cultivar	低密度耗水量/mm TWC of LD	中密度耗水量/mm TWC of MD	高密度耗水量/mm TWC of HD
ZD958	334k	352efghijk	339ijk
TY808	389ab	341hijk	337jk
XY335	380abcd	389abc	357defghijk
XY1266	349efghijk	368bcdefg	370bcdef
JD29	355defghijk	404a	381abcd
SD226	365bcdef	366bcdefgh	364bcdefghi
SD609	363cdefghij	368bcdefg	342ghijk
YK288	366bcdefgh	346fghijk	380abcd
XN211	364bcdefghi	355defghijk	369bcdef
HN138	374bcde	360defghijk	369bcde

表 5 不同品种与种植密度下夏玉米水分利用效率
Table 5 Water use efficiency of different maize cultivars and planting densities

品种 Cultivar	水分利用效率 WUE/(kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)		
	低密度 LD	中密度 MD	高密度 HD
ZD958	20.74bcd	23.20abc	23.13abc
TY808	19.30bcd	22.91abc	25.63a
XY335	17.91d	18.58cd	21.63abcd
XY1266	21.07bcd	21.05bcd	22.84abc
JD29	20.77bcd	19.87bcd	20.60bcd
SD226	19.53bcd	21.39abcd	21.24abcd
SD609	18.92bcd	19.87bcd	23.59ab
YK288	19.36bcd	21.60abcd	19.31bcd
XN211	18.94bcd	18.83cd	20.08bcd
HN138	19.29bcd	20.34bcd	22.96abc

3 讨 论

3.1 品种与种植密度对夏玉米产量的影响

作物生产是一个种群过程,要实现高产取决于群体生产水平的提高,而提高密度能够增加玉米群体数量从而提高玉米产量^[15-17]。本研究表明,密度因素对夏玉米产量有显著影响,玉米产量会先随着种植密度增加而提高,在最适密度时达到最高产量,然后产量会逐渐降低。这与薛珠政和 Echarte 等人研究结果相似^[18-21]。可能原因在于光合作用是玉米干物质形成的基础,高效光合是获取高产的核心^[22]。提高种植密度能显著增加群体的叶面积,有效增大光能截获率,群体的干物质积累量也随之增加,实现玉米群体产量提高。但是随着种植密度增加,地面透光率逐渐降低,减少下部叶片所获光照,从而降低了单株玉米整体的光合作用,导致单株生产效应下降,当单株生产效应对总产量的影响超过群体生产效应时,则群体产量下降^[23-24]。

研究还表明不同品种的最适密度存在差异。在试验密度下,屯玉 808、陕单 609、先玉 335 和先玉 1266 的产量和生物量均随密度增大而增加,郑单 958、浚单 29 和延科 288 的产量和生物量均随密度增加而先增加后减少,陕单 226 的生物量随密度增大而增加,产量则是先增大后减小。原因可能是玉米籽粒产量是由生育期内干物质及养分的积累、分配和转运特性所决定^[25-27],种植密度对干物质累积及转运有显著影响。而品种基因型的差异会使夏玉米耐密性产生区别,因此不同品种夏玉米产量和生物量对密度的响应存在差异。在本试验条件下,屯玉 808、先玉 335、先玉 1266、陕单 609 和华农 138 的最适密度大于 8.25×10⁴株·hm⁻²,郑单 958、浚单 29、陕单 226 和延科 288 的最适密度在 7.5×10⁴株·hm⁻²。

3.2 品种与种植密度对夏玉米水分利用的影响

有研究表明,随密度的增加,玉米的耗水量逐渐增加^[28-29]。但本试验中十个供试品种耗水量未完全呈现单调递增的规律,可能与密度的影响比较复杂有关:高密度群体会消耗更多的土壤水分,但也会提高玉米群体冠层结构,减少棵间蒸发,而不同品种玉米群体冠层结构变化也存在差异,因此最终表现为不同品种夏玉米耗水量对种植密度的响应存在差异^[30-31]。供试品种在不同密度下的水分利用效率不同,除浚单 29 外,郑单 958、屯玉 808、先玉 335、先玉 1266、陕单 226、陕单 609、延科 288、西农 211 和华农 138 九个试验品种的水分利用效率对密度的响应与产量一致,产量高的品种其水分利用效率也高。可能原因是种植密度的增加提高了群体冠层结构,冠层高效利用了光照所增加的水分蒸腾,将其更多的转化为产量,使得产量和水分利用效率均有所提高^[32]。因此选择耐密型高产品种能够有效提高水分利用效率。

4 结 论

在关中平原,适当提高种植密度能够显著提高玉米产量及水分利用效率。产量越高的品种水分利用效率越高,因此选用耐密型高产品种是玉米实现节水高产的有效途径。在本试验条件下,以 8.25×10⁴株·hm⁻²密度水平种植屯玉 808、华农 138、先玉 1266 和陕单 609,以 7.5×10⁴株·hm⁻²密度种植郑单 958 可同时获得产量和水分利用效率最高。

参 考 文 献:

[1] 乔颖丽,王艳华.中国玉米需求及供需平衡趋势分析[J].吉林农业科学,2013,(3):81-85.
[2] 农业部新闻办公室.农业部就玉米结构调整与生猪生产形势有关情况举行发布会[J].吉林农业月刊,2016,(9):23-27.