

# 适宜机械收获株行距对黄土旱塬春玉米产量及水分利用效率的影响

王磊<sup>1,2</sup>, 李雅文<sup>3</sup>, 樊廷录<sup>1,2</sup>, 张建军<sup>1</sup>, 赵刚<sup>1</sup>, 党翼<sup>1</sup>, 李尚中<sup>1,2</sup>

(1. 甘肃省农业科学院 旱地农业研究所, 兰州 730070;

2. 甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室, 兰州 730070; 3. 中国农学会, 北京 100125)

**摘要:**通过黄土旱塬适宜机械化收获的不同株行距种植模式, 研究不同株行距对春玉米产量和水分利用效率的影响, 为该春玉米生产力提升提供理论依据。以紧凑型高产先玉 335 为供试品种, 设置适宜机械化收获的 55 cm 和 75 cm 两种行距, 通过株距调整设置 6.0 万株/hm<sup>2</sup>, 7.5 万株/hm<sup>2</sup>, 9.0 万株/hm<sup>2</sup>, 10.5 万株/hm<sup>2</sup> 共 4 种栽培密度, 于 2014 年和 2015 年连续 2 年定位试验, 研究株行距对春玉米生长发育及水分利用效率的影响。结果表明: 与 55 cm 行距相比, 75 cm 行距在干旱条件下能够有效延缓叶片衰老, 成熟期依然具有较高的 SPAD 值、叶面积和叶面积指数, 持绿性良好, 为光合产物提高给予了支撑。不同株行距种植模式 WUE 表现不同, 吐丝期 WUE<sub>F</sub> 基本随密度增加而增大, 2 种行距下 2014 年和 2015 年均是 9.0 万株/hm<sup>2</sup>, 10.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度处理 WUE<sub>F</sub> 较高; 收获期 2014 年 55 cm 行距 9.0 万株/hm<sup>2</sup>, 10.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度处理 WUE<sub>H</sub> 较高, 75 cm 行距 7.5 万株/hm<sup>2</sup>, 10.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度处理 WUE<sub>H</sub> 较高, 2015 年 2 种行距下均为 6.0 万株/hm<sup>2</sup>, 10.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度处理 WUE<sub>H</sub> 较高。产量水分利用效率 WUE<sub>Y</sub>, 55 cm 行距变化无规律, 75 cm 行距随密度增加而增大。55 cm 行距和 75 cm 行距均可以作为黄土旱塬区春玉米机械化收获种植行距, 综合土壤水分变化、叶面积指数、SPAD 值、收获指数、产量及水分利用效率等, 75 cm 行距 7.5 万株/hm<sup>2</sup> 种植密度可以作为紧凑型春玉米试验区域内最佳株行距设置。

**关键词:** 春玉米; SPAD 值; 株行距; 水分利用效率; 叶面积指数

中图分类号: S513; S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)05-0363-08

## Effect of Row Spacing on Grain Yield and Water Use Efficiency of Mechanical Harvest Spring Maize in Dryland of the Loess Plateau

WANG Lei<sup>1,2</sup>, LI Yawen<sup>3</sup>, FAN Tinglu<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianjun<sup>1</sup>,

ZHAO Gang<sup>1</sup>, DANG Yi<sup>1</sup>, LI Shangzhong<sup>1,2</sup>

(1. Dryland Agricultural Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences,

Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Efficient Water Utilization in Dryland Farming,

Lanzhou 730070, China; 3. Chinese Association of Agricultural Science Societies, Beijing 100125, China)

**Abstract:** The influence of different plant row spaces on spring maize yield and water use efficiency was investigated under the suitable for mechanical harvesting of different row spacing cropping patterns through the Loess Plateau Dryland in order to provide theoretical basis for the productivity of spring maize. XY335 with compact and high yield was selected as the test variety, suitable for mechanized harvesting 55 cm and 75 cm two plant row spacing were set up. By planting distance adjusting setting  $6.0 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup>,  $7.5 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup>,  $9.0 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup>, and  $10.5 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup> four planting density, in a row positioning experiment in 2014 and 2015, the influence of the plant row spacing on spring maize growth and water use efficiency were examined. Results showed that compared with 55 cm row spacing, 75 cm row spacing in dry conditions can effectively delay leaf senescence, SPAD value, leaf area and leaf area index are still high in mature period, the green leaf gave support for the increase of photosynthetic product. Different plant row

收稿日期: 2016-08-21

修回日期: 2016-09-18

资助项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAD09B03, 2012BAD20B04-4, 2015BAD22B02-02); 国家公益性行业(农业)专项(201303104, 201503124); 国家自然科学基金(31660364, 41561067); 国家现代玉米产业技术体系(CARS-02-66); 农业部创新团队; 甘肃省重大专项(1502NKDA003)

第一作者: 王磊(1982—), 男, 甘肃酒泉人, 助理研究员, 主要从事旱地作物抗逆防灾减灾及水分高效利用研究。E-mail: qyzlwl@163.com

spacing cultivation modes have different WUE, spinning  $WUE_F$  increases with increase of density,  $WUE_F$  were high in two types of plant row spacing under the densities of  $9.0 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup> and  $10.5 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup> in 2014 and 2015;  $WUE_H$  were high in 55 cm row spacing under densities of  $9.0 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup> and  $10.5 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup> in 2014,  $WUE_H$  were high in 75 cm row spacing under the densities of  $7.5 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup> and  $10.5 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup>,  $WUE_H$  were high in two kinds of plant row spacing under densities of  $6.0 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup> and  $10.5 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup> in 2015. Production water use efficiency irregularly changed in 55 cm row spacing, and increased with the increase of density in 75 cm row spacing. 55 cm and 75 cm row spacing can be used as the row spacing of spring maize under mechanical harvest in Dryland of the Loess Plateau, 75 cm row spacing with the planting density of  $7.5 \times 10^4$  plant/hm<sup>2</sup> can be used as a best compact set of planting pattern of spring maize in the test area in terms of soil moisture change, leaf area index, SPAD value, harvest index and yield and water use efficiency.

**Keywords:** spring maize; SPAD value; row spacing; water use efficiency; leaf area index

春玉米是黄土旱塬区主要粮食作物之一,也是该区域重要的粮饲兼用作物。随着产业结构及种植业结构调整,黄土旱塬区果树、药材等经济作物面积扩大,粮食作物土地空间受到压缩,而养殖业与草食畜牧业的不断发展对粮饲兼用作物生产力的提高有着迫切的需求<sup>[1]</sup>。黄土旱塬属半湿润偏旱区,该地区地表水资源匮乏,地下水埋深通常在 100 m 左右,农业生产用水主要依靠自然降水,是典型的旱作雨养农业区,水分是该地区玉米产量提升的主要限制因素,如何提高水分利用效率是旱作雨养农业研究的重要问题<sup>[2]</sup>。水分利用效率能够反映玉米植株水分利用状况,水分利用效率与作物产量联系紧密,增加作物种植密度能够提高作物产量<sup>[3-5]</sup>,但密度增加改变了农田小气候条件<sup>[6]</sup>,同时也改变水分养分及光热资源分配,影响植株物质转运、光合及呼吸作用,进而影响作物产量形成<sup>[7-8]</sup>。通过调整株行距配置,能够构建合理群体结构、提高群体光合及呼吸作用,是最终实现作物高产和提升作物水分利用效率的可行措施<sup>[9-14]</sup>。多年来,前人围绕株行距配置做了大量研究工作。李洪等<sup>[15]</sup>研究认为株行距合理配置可以提高玉米种植密度达到增产效果,宽窄行种植增产效果与等行距种植差异较小。梁曦彤等<sup>[16]</sup>研究认为在设置试验条件下等行距种植能够有较高增产潜力。杨吉顺等<sup>[17]</sup>研究认为玉米产量提升要选择高密度种植,配合宽窄行种植能够改善植株冠层结构,提高光合作用。段宏凯等<sup>[11]</sup>研究认为等行距种植有利于玉米群体产量提升。茆建峰等<sup>[18]</sup>认为等行距种植可以提高群体整齐度,有利于产量提升。以上研究表明,调整株行距配置可以改善农田小气候,提升群体光合作用,提高玉米产量。提升产量必然造成劳动强度增加,传统人力收获已经不能满足玉米现代化生产的需要,玉米机械化生产是提升玉米生产现代化的重要措施,随着机械

化收获的普及,玉米收获机械研发与应用取得了较大进展,同一收获机可适应不同行距进行收获,对行收获行距为 40—50 cm,55 cm 和 60—75 cm,不对行收获行距适应范围为 30—80 cm,由于我国现用收获机型多为“辊式收获”设计,不对行收获时会出现收拢器一次收进多行玉米,较对行收获出现收获籽粒及果穗损失率大、作业效率低等情况<sup>[19-22]</sup>,对玉米种植全程机械化推广产生一定影响,而以往研究对黄土旱塬区适宜机械收获株行距配置方面研究较少。适宜机械化收获等行距种植模式可以有效解决不对行收获问题,减少因机械化收获造成籽粒及果穗损失率大的影响,由于黄土旱塬区对行收获机多数为收获行距 60—80 cm 3 行与收获行距 55 cm 4 行收获机,而且小于 55 cm 行距种植因为行距过窄会造成田间管理不便,因此本研究以对行收获行距 55 cm 和 75 cm 等行距种植模式为基础,通过不同密度处理,研究株行距对黄土旱塬区春玉米产量及水分利用效率的影响,以期为该地区玉米生产力提升和玉米种植全程机械化生产提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2014—2015 年在甘肃省农业科学院镇原综合试验站进行(107°39'E,35°30'N),试验站位于我国黄土旱塬西北部,隶属于我国北方典型的半湿润偏旱雨养农业区,该地区海拔 1 297 m,平均气温 8.59℃,年日照时数 2 300~2 500 h,日照百分率达 50%~55%, $\geq 0^\circ\text{C}$  积温 3 400~3 800℃, $\geq 10^\circ\text{C}$  积温 2 700~3 200℃,无霜期 166 d,土壤为黑垆土,0—200 cm 土层平均容重为 1.3 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量 10.93 g/kg,全氮 0.89 g/kg,碱解氮 85 mg/kg,速效磷 11 mg/kg,速效钾 230 mg/kg,肥力中等。该地区多年平

均年降水量 547 mm,降水主要分布在 7—9 月 3 个月,属完全依靠自然降雨的西北半湿润偏旱区。

1.2 试验设计

指示品种为当地广泛种植紧凑型高产品种先玉 335,试验采用裂区设计,主处理为 55 cm 和 75 cm 两种行距(播前起垄全地面覆盖,55 cm 行距垄宽 55 cm,75 cm 行距垄宽 75 cm,等行距种植),副处理为不同种植密度:6.0 万株/hm<sup>2</sup>,7.5 万株/hm<sup>2</sup>,9.0 万株/hm<sup>2</sup>,和 10.5 万株/hm<sup>2</sup>。肥料施用尿素(含 N46%)、过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>14%),覆盖选用幅宽 120 cm 地膜,地膜厚度为 0.008 mm。试验自 2014 年起定位实施,设置 3 次重复,当年收获后留膜保墒,次年春季 3 月中旬揭膜、翻耕,顶凌覆膜,4 月中下旬播种,9 月中旬收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量及水分利用效率 土壤含水量采用烘干称重法测定。用土钻人工分层取土,于每年玉米播种前、吐丝期及收获后由地表向下依次取 0—200 cm 土层,每隔 20 cm 为一层,分 10 层测定土壤含水量。土壤容重选取 0—200 cm 平均值,为 1.3 g/cm<sup>3</sup>。

土壤含水量=(湿土质量-烘干土质量)/烘干土质量×100%。

土壤贮水量=土壤质量含水量×土壤容重×土层深度

$ET = P + I + \Delta W$

$WUE_Y = Y / ET$

$WUE_F = Y_F / ET$

$WUE_H = Y_H / ET$

式中:ET 为作物耗水量(mm);P 为作物生育期间降水量(mm);I 为玉米生育期内灌溉量(本试验不灌溉,I 取值为 0);ΔW 为玉米播前和收获土壤贮水量的变化(mm);WUE<sub>Y</sub> 为产量水分利用效率[kg/(hm<sup>2</sup>·mm)];Y 为籽粒产量(kg/hm<sup>2</sup>);WUE<sub>F</sub> 为吐丝期全生物水分利用效率[kg/(hm<sup>2</sup>·mm)];Y<sub>F</sub> 为吐丝期干物质质量(kg/hm<sup>2</sup>);WUE<sub>H</sub> 为收获期全生物水分利用效率[kg/(hm<sup>2</sup>·mm)];Y<sub>H</sub> 为收获期干物质质量(kg/hm<sup>2</sup>)。试验区域降水量通过 MM-950 自动气象站记录仪获得。

1.3.2 叶面积与相对叶绿素含量测定 每小区在苗期标定 3 株长势良好植株,在关键生育期测定全株叶面积,展开叶面积=长×宽×0.75,未展开叶面积=长×宽×0.5。同时在关键生育期每小区选取 10 株代表性植株,用日本产手持式相对叶绿素测定仪(SPAD-502)测定 SPAD 值,苗期测植株顶部完全展开叶,抽雄后测定穗位部叶片,每个叶片测 5 个点,取平均值。

1.3.3 气孔导度测定 在玉米苗期、吐丝期、灌浆期等关键生育期每小区选取 5 株代表性植株,用美国产手持式稳态气孔计(SC-1)测定气孔导度,苗期测植株顶部完全展开叶,抽雄后测定穗位部叶片,每个叶片测 3 个点,取平均值。

1.3.4 产量及产量性状测定 成熟时每小区除去边际 4 株植株后按整行逐株取 20 株进行测产和室内考种,测定秃尖、百粒重等产量性状,产量以籽粒 14%含水量计算。收获指数=收获期籽粒干重/收获期干物质质量×100%

1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 软件处理数据和制图,DPS7.01 软件进行统计分析,最小显著极差法(LSD)进行差异显著性检验(*p*<0.05 或 *p*<0.01)。

2 结果与分析

2.1 试验年份玉米生育期降水量变化

由表 1 可见,试验年份玉米生育期降水变化分布不均。随气温升高,5—8 月春玉米生长进入旺盛期,该时期是春玉米干物质积累和产量形成的主要耗水阶段,与多年平均值(293.4 mm)相比,2014 年和 2015 年分别减少 37.8%和 21.2%,说明 2014 年与 2015 年均为玉米生育期欠水年份。充足降水在满足春玉米生长发育需求的同时还能将富余降水蓄积在土壤中,对深层土壤水分进行补给;降水不能满足春玉米生长发育需求时,土壤蓄积水分是春玉米水分消耗的主要供给方式。黄土旱塬春玉米 7 月以后开始抽雄、吐丝,进入灌浆阶段,该阶段是春玉米产量形成关键阶段。2014 年 7 月降水仅为多年同期降水的 13.1%,且仅在 7 月初有 12.3 mm 降水,剩余 2.5 mm 为零星降水对土壤水分补给作用较弱,2015 年 7 月降水为多年同期降水的 39.8%,降水少有利于扬花授粉,但降水过少会造成干旱发生,影响植株蒸腾作用降低水分运移与养分转移效率,对密度提升造成一定影响。

表 1 玉米生育期降水量变化 mm

年份	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
2014	98.6	21.7	64.1	14.8	81.9	188.8
2015	94.1	34.4	79.8	45.1	72.0	65.3
多年平均	25.4	43.9	49.5	113.3	86.7	96.8

2.2 株行距对春玉米土壤水分的影响

图 1,图 2 是 2014 年和 2015 年不同株行距春玉米土壤含水量的变化。吐丝期土壤含水量,相同处理 2014 年和 2015 年差异不显著;收获期土壤含水量,相同处理 2014 年和 2015 年差异显著,2015 年高于 2014 年。2014 年 7 月降水较少春玉米生长发育对土壤深层水分消耗

增加,显著降低了 60 cm 以下土壤含水量。说明受春玉米生长发育的影响,7—8 月降水能够显著影响土壤含水量。由图可以看出,55 cm 行距和 75 cm 行距在 0—

200 cm 土壤含水量变化趋势相同,不同行距相同密度下土壤含水量没有显著差异,说明不同行距处理株距缩短对土壤水分没有显著影响。

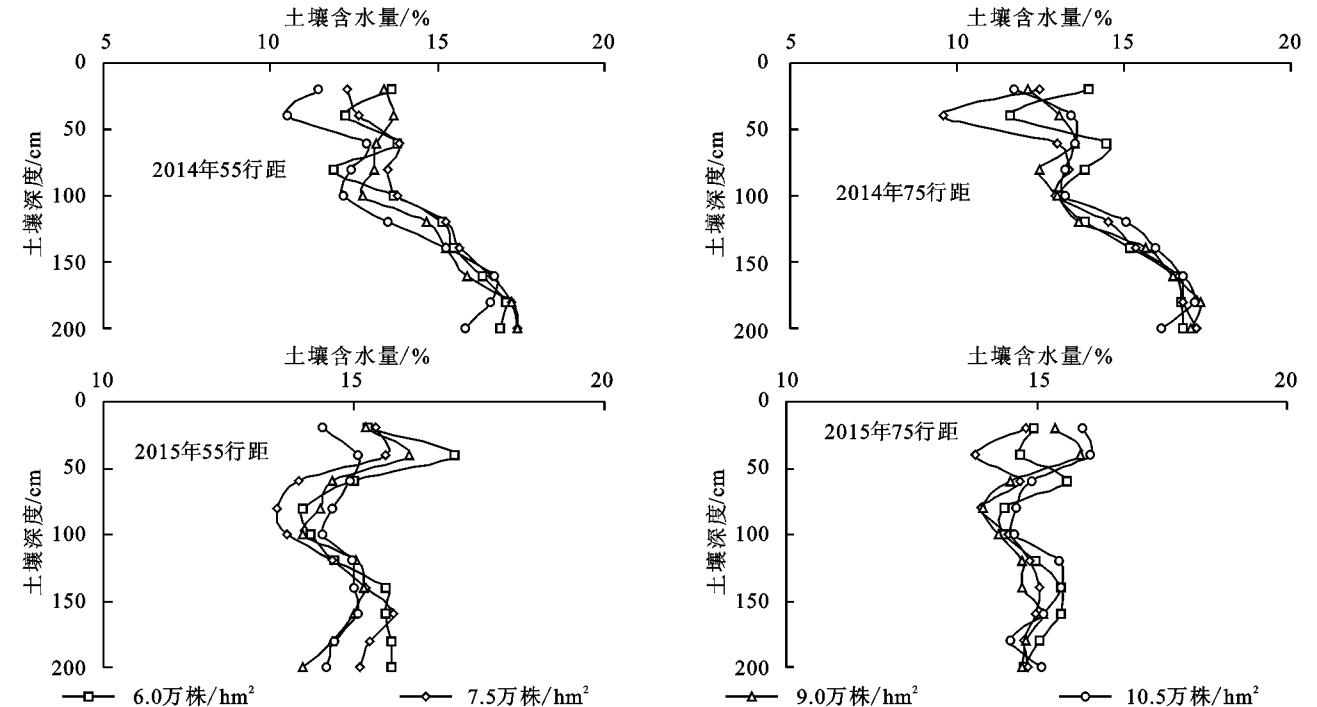


图 1 株行距对春玉米吐丝期土壤水分的影响

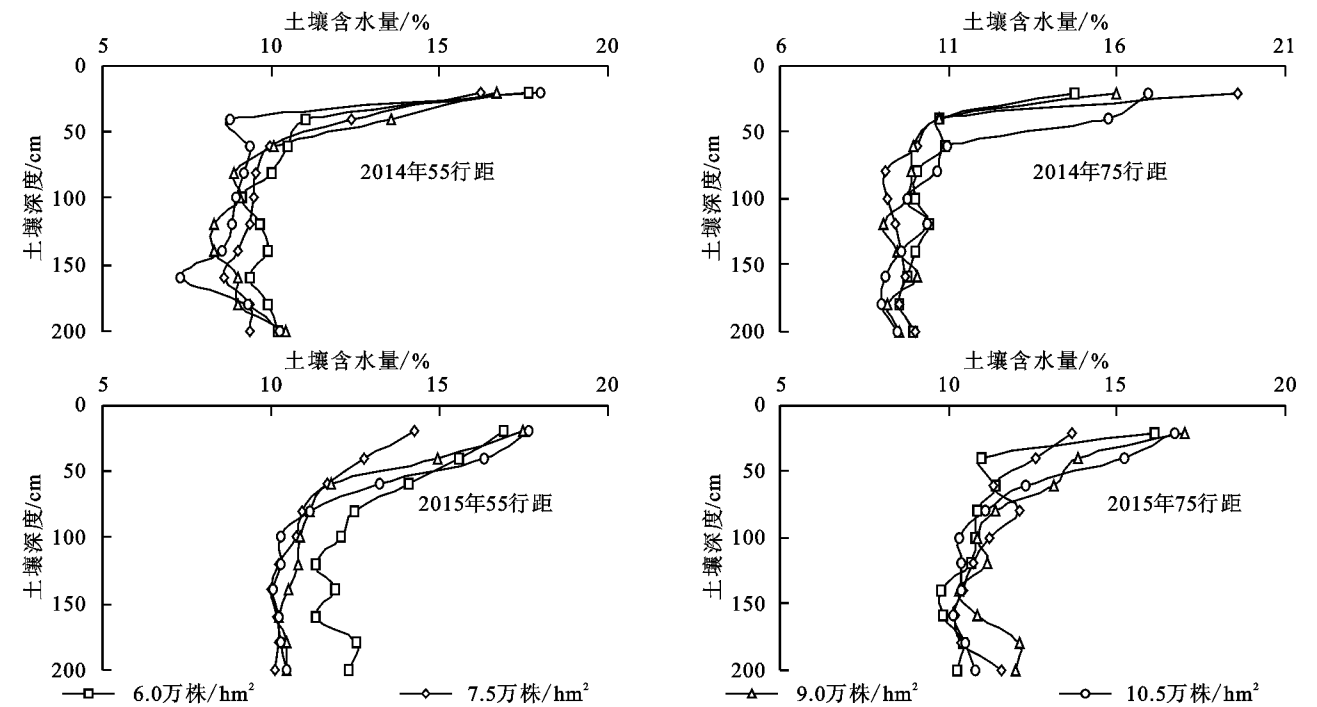


图 2 株行距对春玉米收获期土壤水分的影响

2.3 株行距对春玉米叶面积和叶面积指数的影响

叶片是作物光能截获并进行光合作用的重要器官,叶面积指数反映了作物光合利用面积<sup>[23-24]</sup>。由表 2 可知,2 个试验年中,吐丝、灌浆、收获期 LAI 均随密度增加而增大,受株距缩短、密度增加的影响各阶段单株叶面积呈逐渐减小趋势。吐丝期 2014 年和 2015 年 2 种行距

下,相同密度 LAI 和单株叶面积无显著差异,灌浆期和收获期 LAI 和单株叶面积 2014 年 6.0 万株/hm<sup>2</sup>,7.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度处理 55 cm 和 75 cm 行距差异显著( $p < 0.05$ ),其余密度处理虽然差异不显著,但整体趋势 75 cm 行距大于 55 cm 行距。灌浆期 75 cm 行距平均单株叶面积与 55 cm 行距相比,2014 年、2015 年分别高

7.7%和1.5%,收获期分别高9.5%和4.2%,说明植株叶片发育75 cm行距较55 cm行距有一定优势。从单株叶面积减少率来看,2014年由于受到7月干旱的影响,加速了吐丝至灌浆阶段叶片衰亡,2015年灌浆至收获期单株叶面积减少率随着春玉米叶片衰

亡加快而增加。单株叶面积减少率除2014年10.5万株/hm<sup>2</sup>密度处理75 cm行距高于55 cm行距外,其余处理均为75 cm行距低于55 cm行距,说明75 cm行距较55 cm行距能够有效改善群体环境,减缓叶片衰老,为提高植株光合产物奠定基础。

表 2 株行距对春玉米叶面积指数(LAI)和单株叶面积的影响

年份	行距/ cm	密度/ (万株·hm <sup>-2</sup> )	叶面积指数/(m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> )			单株叶面积/m <sup>2</sup>			单株叶面积减少率/%	
			吐丝	灌浆	收获	吐丝	灌浆	收获	吐丝—灌浆	灌浆—收获
2014	55	6.0	4.38d	3.66d	3.40d	0.73a	0.61b	0.57bc	16.44	6.97
		7.5	5.40c	4.35c	3.93c	0.72ab	0.58b	0.52c	19.44	9.75
		9.0	6.02b	5.22b	5.04b	0.67bcd	0.58b	0.56bc	13.35	3.46
		10.5	6.94a	5.84a	5.77a	0.66cd	0.56b	0.55bc	15.77	1.18
	75	6.0	4.26d	4.02c	3.82c	0.71abc	0.67a	0.64a	5.63	4.98
		7.5	5.25c	5.13b	4.87b	0.70abcd	0.68a	0.65a	2.37	4.89
		9.0	6.03b	5.33b	5.21b	0.67bcd	0.59b	0.58b	11.61	2.21
		10.5	6.82a	5.98a	5.67a	0.65d	0.57b	0.54bc	12.31	5.26
2015	55	6.0	4.36d	4.06d	3.73e	0.73ab	0.68ab	0.62ab	6.86	8.13
		7.5	5.50c	5.08c	4.27cd	0.73ab	0.68ab	0.57b	7.49	16.01
		9.0	5.69bc	5.61b	5.34b	0.63c	0.62c	0.59b	1.28	4.89
		10.5	7.24a	6.84a	6.21a	0.69abc	0.65bc	0.59b	5.52	9.21
	75	6.0	4.51d	4.29d	3.91de	0.75a	0.71a	0.65a	4.90	8.85
		7.5	5.22c	4.86c	4.49c	0.70ab	0.65bc	0.60ab	6.81	7.61
		9.0	6.01b	5.87b	5.58b	0.67bc	0.65bc	0.62ab	2.38	4.86
		10.5	7.32a	6.88a	6.35a	0.70ab	0.66abc	0.60ab	6.03	7.73

注:处理间不同小写字母表示0.05水平上差异显著( $p<0.05$ ),下同。

2.4 株行距对春玉米 SPAD 和气孔导度的影响

由表3可知,株行距对春玉米 SPAD 的影响规律相同,均呈现先增高后下降趋势,并且随着密度增加 SPAD 呈减小趋势。8月12日之前各处理 SPAD 均呈增加趋势,8月12日以后 SPAD 显著下降,75 cm行距斜率大于55 cm行距,说明8月12日以后75 cm行距处理 SPAD 下降速率高于55 cm行距处理,但75 cm行距处理相同密度下相对叶绿素含量均高于55 cm行距处理,说明75 cm行距处理能够提升植株叶片持绿时间。气孔导度各阶段变化无明显规律(图3),苗期气孔导度最高的是55 cm行距9.0万株/hm<sup>2</sup>密度处理为387.1 mmol/(m<sup>2</sup>·s),其次是

75 cm行距6.0万株/hm<sup>2</sup>密度处理为352.5 mmol/(m<sup>2</sup>·s);吐丝期气孔导度最高的是75 cm行距9.0万株/hm<sup>2</sup>密度处理为401.1 mmol/(m<sup>2</sup>·s),其次是55 cm行距10.5万株/hm<sup>2</sup>密度处理为375.8 mmol/(m<sup>2</sup>·s);灌浆期气孔导度最高的是75 cm行距9.0万株/hm<sup>2</sup>密度处理为408.4 mmol/(m<sup>2</sup>·s),其次是55 cm行距6.0万株/hm<sup>2</sup>密度处理为402.9 mmol/(m<sup>2</sup>·s)。气孔导度灌浆期75 cm行距7.5万、9.0万、10.5万株/hm<sup>2</sup>密度处理显著高于55 cm行距,主要是由于行距增大,田间郁闭程度减弱,植株光合作用、叶片呼吸作用增加,水分和养分运移效果75 cm行距较55 cm行距显著。

表 3 不同株行距 SPAD 值差异性分析

行距/cm	密度/ (万株·hm <sup>-2</sup> )	5月13日	5月15日	5月27日	7月3日	7月10日	8月11日	8月25日
55	6.0	29.54a	34.67abc	45.53ab	56.34bc	60.43b	66.85ab	57.16ab
	7.5	29.03a	33.59bc	44.73ab	56.89bc	59.75b	61.91cd	55.89ab
	9.0	28.70a	33.18bc	44.48b	55.81bc	57.90b	59.65cd	53.11bc
	10.5	28.69a	32.23a	44.46b	55.11c	58.64b	58.31d	51.18c
	6.0	30.93a	36.69a	46.78a	60.85a	64.58a	68.45a	57.79a
75	7.5	30.60a	35.23ab	46.34ab	58.48ab	60.20b	63.26bc	56.13ab
	9.0	30.43a	34.16abc	45.96ab	57.53bc	60.45b	61.15cd	53.23abc
	10.5	29.23a	32.49c	45.65ab	56.11bc	59.05b	60.73cd	54.94abc

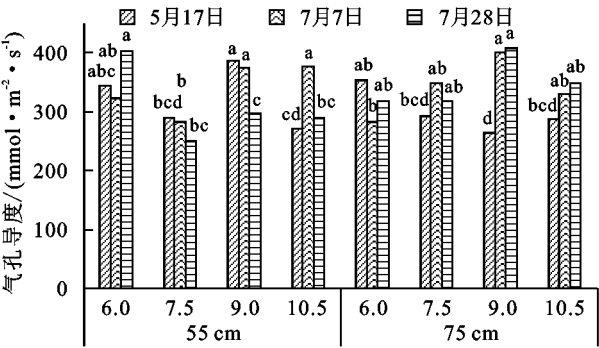


图 3 不同密度不同株行距对春玉米气孔导度的影响

2.5 株行距对春玉米产量及产量构成因素的影响

由表 4 可以看出,不同株行距处理对春玉米产量及产量构成因素有显著影响( $p<0.05$ )。不同年份春玉米产量变化趋势不同,主要是受气候影响不同年份间春玉米生育期降水量变化与分布不同对产量构成因素造成影响。7—9 月是试验区玉米抽雄吐丝至灌浆的产量形成重要时期,适宜的降水可以补充本时期植株生长水分消耗,促进物质运移与产量形成,本时期高温干旱则限制物质运移与产量形成。两个试验年春玉米在抽雄吐丝至灌浆阶段均遭受不同程度干旱灾害,2014 年 7 月 10 日至 8 月 6 日近一个月时间降水稀少,仅为 2.5 mm,最高气温 30℃ 以上天数达 18 d,连续 3 d 出现 35℃ 以上高温,而此前 10 d 总降水仅为 15.7 mm,造成春玉米抽雄吐丝至灌浆初期长时间干旱,受高温少雨影响春玉米花药及花丝活力降低<sup>[25]</sup>,影响授粉造成秃顶较长、千粒重、穗行数及行粒数减少。2015 年 6 月 29 日至 7 月 15 日连续 17 d 没有降水,但该时期仅有 1 d 出现 30℃ 以上高温,且持续时间较短,而此前 10 d 降水量达 57.2 mm,对土壤水分进行有效补充,充足的水分和适宜的温度使春玉米有良好的授粉环境,果穗生长良好,

秃顶较短、千粒重、穗行数及行粒数较 2014 年增加,但 2015 年 7 月 23 日至 8 月 2 日、8 月 12 日至 9 月 2 日连续遇到连阴干旱天气,造成春玉米灌浆中后期光照不足和水分缺乏引起物质转运减缓,灌浆减慢,生育期推迟,对后期籽粒成熟度有不利影响。

千粒重、穗长、穗行数、行粒数两种行距配置下均随密度增加而减少,75 cm 行距千粒重、穗长均高于 55 cm 行距同密度处理,秃顶、穗行数、行粒数、穗粗不同行距间无明显变化规律。籽粒产量随密度增加整体呈增加趋势,受干旱气候影响 2014 年 55 cm 行距 10.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度下产量低于 9.0 万株/hm<sup>2</sup>, 75 cm 行距 10.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度下产量高于 9.0 万株/hm<sup>2</sup> 密度但差异不显著( $p>0.05$ )。表明适度增密是提高产量的有效途径,75 cm 行距耐密性优于 55 cm 行距。对产量及产量构成因素方差分析表明(表 5),不同年份对产量及穗行数影响显著( $p<0.05$ ),对穗长、秃顶及行粒数影响影响极显著( $p<0.01$ ),行距对产量、千粒重及穗长影响显著( $p<0.05$ ),密度对产量、千粒重、穗长、秃顶、行粒数及穗粗影响极显著( $p<0.01$ ),不同年份与密度交互作用对秃顶和行粒数影响分别达极显著和显著水平( $p<0.01$ ,  $p<0.05$ ),不同年份株行距配置交互作用下,春玉米产量及产量构成因素差异不显著( $p>0.05$ ),说明行距与密度交互作用对春玉米产量及产量构成因素影响不大。可以看出 75 cm 行距 10.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度种植条件下 2014 年、2015 年两个试验年度均获得了最高产量,分别为 16 809.8 kg/hm<sup>2</sup>, 17 774.0 kg/hm<sup>2</sup>,但随着株行距调整,株距缩小玉米灌浆期倒伏风险增大,因此高密度种植还需要进一步研究,就试验结果来看,两种行距种植方式下选择 7.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度种植在试验区较为适宜。

表 4 株行距对春玉米产量及产量构成因素的影响

年份	行距/ cm	密度/ (万株·hm <sup>-2</sup> )	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	千粒重/ g	穗长/ cm	秃顶/ cm	穗行数/ 行	行粒数/ 粒	穗粗/ cm
2014	55	6.0	11942.4d	342.5abc	19.6abc	1.2d	16.4a	38.9a	5.1ab
		7.5	14121.0c	333.4bc	19.2bcd	1.8bcd	16.3a	37.0ab	5.2a
		9.0	14982.0abc	318.1c	18.2ef	2.3ab	16.2a	33.4c	4.9c
		10.5	14536.2bc	313.7c	17.5f	2.4ab	16.0a	32.6c	5.0bc
	75	6.0	13837.6cd	386.5a	20.3a	1.3d	16.3a	39.1a	5.1ab
		7.5	16282.0ab	373.9ab	20.1ab	1.5cd	16.2a	38.2a	5.2a
		9.0	16585.2a	339.0bc	18.7cde	2.0bc	15.9a	34.7bc	5.0bc
		10.5	16809.8a	317.6c	18.2def	2.6a	15.8a	32.2c	4.9c
2015	55	6.0	14097.5c	368.4a	20.8a	0.7a	16.9a	40.0ab	5.2ab
		7.5	14245.0bc	348.4ab	20.2abc	1.0a	16.7a	39.2abc	5.1ab
		9.0	14862.4bc	338.0bc	19.6bc	1.0a	16.6a	37.8c	5.3a
		10.5	17105.7ab	311.7c	19.3c	1.0a	16.0a	37.6c	5.1b
	75	6.0	13106.4c	375.5a	20.9a	0.6a	16.6a	40.5a	5.3ab
		7.5	15411.6abc	355.6ab	20.4ab	0.9a	16.5a	38.6abc	5.2ab
		9.0	15509.3abc	335.7bc	19.8bc	0.9a	16.5a	38.1bc	5.1b
		10.5	17774.0a	330.3bc	19.5c	0.9a	16.5a	38.7abc	5.1ab

表 5 春玉米产量及产量构成因素方差分析

变异来源	产量	千粒重	穗长	秃顶	穗行数	行粒数	穗粗
年份	*		*	*	*	*	*
行距	*	*	*				
密度	*	*	*	*		*	*
年份×行距							
年份×密度				*		*	
行距×密度							
年份×行距×密度							

注：\* 表示 0.05 水平上差异显著( $p<0.05$ ), \*\* 表示 0.01 水平上差异显著( $p<0.01$ )。

2.6 株行距对春玉米水分利用效率和收获指数的影响

总体来看,2014 年吐丝期水分利用效率(WUE<sub>F</sub>)、收获期水分利用效率(WUE<sub>H</sub>)和产量水分利用效率(WUE<sub>Y</sub>)相同密度下 75 cm 行距高于 55 cm 行距。2015 年 6.0 万株/hm<sup>2</sup>,7.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度处理吐丝期水分利用效率 75 cm 行距低于 55 cm

行距,说明吐丝期 55 cm 行距在较低密度下水分利用效率较高;6.0 万株/hm<sup>2</sup> 密度 55 cm 行距收获期水分利用效率和产量水分利用效率均高于 75 cm 行距,但其他密度处理 75 cm 行距收获期水分利用效率和产量水分利用效率均高于 55 cm 行距,说明 75 cm 行距处理随密度提高植株对水分利用效率高于 55 cm 行距处理,原因是在相同种植密度条件下,75 cm 行距有利于通风透光,加快了玉米生长发育,提高了对土壤水分消耗,同时,也提高了光合产物向籽粒的转运速率,进而改变了不同生育阶段的水分利用效率。相同处理收获指数 2014 年均高于 2015 年,这主要是由于 2014 年 7 月干旱对植株生长发育造成不利影响,抑制了茎秆和叶片的生长,而 2015 年水分相对 2014 年较为充足,茎秆和叶片生长较为旺盛,并且在灌浆关键期低温少雨影响了玉米灌浆程度,从而降低了收获指数。

表 6 株行距对春玉米水分利用效率和收获指数的影响

年份	行距/ cm	密度/ (万株·hm <sup>-2</sup> )	WUE <sub>F</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	WUE <sub>H</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	WUE <sub>Y</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> )	收获 指数/%
2014	55	6.0	33.0d	32.9c	22.8c	59.7
		7.5	38.8cd	40.0bc	26.5abc	56.9
		9.0	44.7abc	41.5ab	28.1ab	58.3
		10.5	44.8abc	43.4ab	26.6abc	52.8
	75	6.0	39.4cd	40.3bc	25.2bc	53.7
		7.5	43.1bc	48.7a	29.7ab	52.5
		9.0	50.5ab	47.9a	29.9ab	53.6
		10.5	51.4a	48.2a	31.2a	55.7
	55	6.0	43.0c	65.5ab	33.4abcd	43.8
		7.5	46.8bc	51.9c	30.1cd	50.0
2015	75	9.0	52.6ab	57.8abc	32.8bcd	48.9
		10.5	48.5bc	66.3a	38.0ab	49.3
		6.0	42.2c	60.3abc	27.8d	39.6
		7.5	44.7bc	55.3bc	32.7bcd	50.8
		9.0	53.0ab	60.2abc	35.1abc	50.1
		10.5	60.5a	67.7a	39.0a	49.6

3 讨论与结论

通过株行距调整方式可以调整玉米群体局部密度,对光、热、水等资源进行再分配,进而影响玉米物质生产和产量形成<sup>[26]</sup>,试验表明,在试验条件下通过 2 a 定位研究,75 cm 行距处理株距缩小但对土壤水分的影响与 55 cm 相同密度比较没有显著差异,与 2014 年相比,2015 年 5—8 月春玉米关键生育期降水量尤其是 7 月降水量较多,因此植株叶片衰老较慢,植株持绿性较好,有利于物质转运。高英波等<sup>[12]</sup>研究表明叶片叶绿素相对含量 SPAD 值低密度高于高

密度种植。曹娜等<sup>[27]</sup>研究表明吐丝期后叶片需要维持较长的功能期才能够保证高产,若灌浆期叶面积衰亡过快,会导致产量降低。本研究表明,75 cm 行距处理在干旱条件下能够延缓叶片衰亡,叶面积较 55 cm 行距处理下降缓慢,SPAD 值随密度增加而减小且 75 cm 行距处理各生育阶段均高于 55 cm 行距处理,叶片衰亡速度减慢有效延长了叶片光合期,保证了植株通过叶片呼吸作用利用水分运移将养分向各器官运送,提高了光合产物向籽粒的转运速率,并增加了光合产物积累时间促进产量形成。叶片气孔导度表明了春玉米植株水分和养分运移能力的强弱,株

行距调整对气孔导度有不同的影响,灌浆期 75 cm 行距 7.5 万、9.0 万、10.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度处理显著高于 55 cm 行距。75 cm 行距由于光合期增长有效增加了光合产物,提高了千粒重,增加了产量,提高了水分利用效率。随密度增加在提高了对土壤水分的消耗的同时,也增加了单位面积上的生物量,吐丝期以前光合产物主要向茎秆和叶片转移,吐丝期以后光合产物逐渐向籽粒转运,物质增长主要体现为果穗质量增加,因此改变了不同生育阶段水分利用效率。从试验结果来看,两种行距处理对土壤水分影响没有显著差异,都可以作为黄土旱塬区春玉米机械化收获种植行距,55 cm 行距和 75 cm 行距 7.5 万株/hm<sup>2</sup>,9.0 万株/hm<sup>2</sup> 密度种植模式能够获得理想产量和较高水分利用效率,9.0 万株/hm<sup>2</sup> 密度种植投入较大但产量与 7.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度差异不显著,10.5 万株/hm<sup>2</sup> 密度处理虽然产量和水分利用效率最高,但倒伏风险和对土壤水分消耗强度较高,在黄土旱塬区种植还需要进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 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[J]. 中国农业科学,2010,43(5):922-931.
- [2] 李尚中,樊廷录,王磊,等. 不同覆膜方式对旱地玉米生长发育、产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究,2013,31(6):22-27.
- [3] 张仁和,胡富亮,杨晓钦,等. 不同栽培模式对旱地春玉米光合特性和水分利用率的影响[J]. 作物学报,2013,39(9):1619-1627.
- [4] 刘伟,吕鹏,苏凯,等. 种植密度对夏玉米产量和源库特性的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1737-1743.
- [5] 肖继兵,孙占祥,蒋春光,等. 垄膜沟种条件下品种和密度对玉米生长的影响[J]. 水土保持研究,2013,20(1):134-140.
- [6] 周勋波,杨国敏,孙淑娟,等. 不同株行距配置对夏大豆群体结构及光截获的影响[J]. 生态学报,2010,30(3):0691-0697.
- [7] 梁熠,齐华,王敬亚. 行距配置对春玉米群体冠层环境与光合特性的影响[J]. 西北农业学报,2014,23(8):66-72.
- [8] 同小娟,李俊,刘渡. 华北平原玉米田生态系统光合作用特征及影响因素[J]. 生态学报,2011,31(17):4889-4899.
- [9] 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[J]. 玉米科学,2013,21(4):101-106,111.
- [10] 李娜,李慧,裴艳婷,等. 行株距配置对不同穗型冬小麦品种光合特性及产量结构的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(14):2869-2878.
- [11] 段宏凯,李卫东,王锦慧,等. 密度与行距对玉米“协玉3号”穗部性状及产量的影响[J]. 中国农学通报,2015,31(24):78-85.
- [12] 高英波,陶洪斌,黄收兵,等. 密植和行距配置对夏玉米群体光分布及光合特性的影响[J]. 中国农业大学学报,2015,20(6):9-15.
- [13] 高玉红,郭丽琢,牛俊义,等. 栽培方式对玉米根系生长及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(2):210-216.
- [14] 刘志,肖继兵,崔丽华. 垄膜沟种不同沟垄比对春玉米水分利用和产量的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(1):38-43.
- [15] 李洪,王斌,李爱军,等. 玉米株行距配置的密植增产效果研究[J]. 中国农学通报,2011,27(9):309-313.
- [16] 梁曦彤,陆至远,李文莹,等. 种植行距对春玉米干物质积累动态及分配规律的影响[J]. 玉米科学,2015,23(4):110-116.
- [17] 杨吉顺,高辉远,刘鹏,等. 种植密度和行距配置对超高产夏玉米群体光合特性的影响[J]. 作物学报,2010,36(7):1226-1233.
- [18] 裴建峰,张海红,董朋飞,等. 种植模式对不同株型夏玉米品种生理生态效应比较[J]. 玉米科学,2014,22(3):115-120.
- [19] 张道林,刁培孙,董锋,等. 拨禾指式不对行玉米收获装置的试验[J]. 农业工程学报,2010,26(5):103-106.
- [20] 杨富营,余泳昌,高献坤,等. 4 YW-2 型玉米收获机的性能改进与试验分析[J]. 农业工程学报,2007,23(12):114-118.
- [21] 耿爱军,杨建宁,张兆磊,等. 国内外玉米收获机械发展现状及展望[J]. 农机化研究,2016(4):251-257.
- [22] 陈志,郝付平,王锋德,等. 中国玉米收获技术与装备发展研究[J]. 农业机械学报,2012,43(12):44-50.
- [23] 丁林,王福霞,王以兵,等. 调亏条件下春播蚕豆生长动态及其产量效应[J]. 水土保持研究,2008,15(6):236-240.
- [24] 王永宏,王克如,赵如浪,等. 高产春玉米源库特征及其关系[J]. 中国农业科学,2013,46(2):257-269.
- [25] 宋凤斌,戴俊英. 干旱胁迫对玉米花粉和花丝表面超微结构及两者活力的影响[J]. 吉林农业大学学报,2004,26(1):1-5.
- [26] 裴建峰,张海红,李鸿萍,等. 不同行距配置方式对夏玉米冠层结构和群体抗性的影响[J]. 作物学报,2016,42(1):104-112.
- [27] 曹娜,于海秋,王绍斌,等. 高产玉米群体的冠层结构及光合特性分析[J]. 玉米科学,2006,14(5):94-97.