

宽垄沟播种植模式对夏玉米生长发育及水分利用率的影响

董飞¹, 闫秋艳¹, 李峰¹, 鲁晋秀¹, 贾亚琴¹,
杨峰¹, 王苗¹, 张建诚¹, 王小泰², 阴东娟²

(1.山西省农业科学院小麦研究所,山西 临汾 041000;2.山西省洪洞县农业委员会,山西 临汾 041600)

摘要: 探讨水地条件下种植模式对夏玉米产量及水分利用的影响,为夏玉米节水种植高产稳产栽培提供依据。以玉米品种“登海 685”为试验材料,研究宽垄沟播和等行距平播模式下不同种植密度(6.00,6.75,7.50 万株/hm²)对夏玉米生长发育、产量、养分吸收及水分利用率的影响。结果表明:沟播种植模式较平播增加玉米植株株高,使茎粗和单株干物质重降低。沟播模式的穗性状比平播处理较优,单穗重增加,且受种植密度影响较小,表现出明显的边行优势。沟播模式的玉米叶片叶绿素相对含量始终高于平播处理,生育期延长,为后期籽粒形成提供了物质保障。在种植密度为 7.50 万株/hm²时,沟播模式夏玉米产量最高。沟播模式下夏玉米灌水量较平播减少 52.9%,灌水时间减少 50.1%,日均蒸发量减少,且水分含量高于平播处理,使灌溉水利用效率提高 139.5%,水分利用效率平均提高 16.7%。可见,宽垄沟播是夏玉米增产增效的一种节水种植模式,明显提高玉米水分利用效率。

关键词: 种植方式; 种植密度; 夏玉米; 产量及构成因素; 水分利用率

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)05-0266-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.039

Effects of Wide Ridge and Furrow Planting on Growth and Water Use Efficiency of Summer Maize

DONG Fei¹, YAN Qiuyan¹, LI Feng¹, LU Jinxiu¹, JIA Yaqin¹,

YANG Feng¹, WANG Miao¹, ZHANG Jiancheng¹, WANG Xiaotai², YIN Dongjuan²

(1. *Institute of Wheat Research, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Linfen, Shanxi 041000;*

2. *Agriculture Committee of Hongtong Country, Linfen, Shanxi 041600*)

Abstract: The effects of planting model on the water use efficiency and yield composition of summer maize under irrigated land conditions were discussed in order to provide a basis for high and stable yield cultivation of summer maize. Denghai 685 was used as the experimental material, the effects of different planting densities (6.00×10^4 , 6.75×10^4 , 7.50×10^4 plants / hm²) on the growth and development, yield, nutrient absorption and water utilization rate of summer maize under wide ridge and furrow planting and equal row spacing horizontal planting models were studied. The results showed that the furrow planting increased the plant height and reduced the stem diameter and dry matter weight per plant. For the summer maize of furrow planting mode, the panicle traits were better than that of planar planting, single panicle weight increased, and was less affected by planting density, showing obvious edge row advantage. The relative chlorophyll content of maize leaves in furrow planting mode was always higher than that in planar planting mode, and the growth period was extended, which provided material guarantee for the later grain formation. When the planting density was 7.50×10^4 plants / hm², summer maize yield in furrow planting mode was the highest. In the furrow planting mode, the irrigation water amount of summer maize decreased by 52.9% compared with planter planting, the irrigation time decreased by 50.1%, the average daily evaporation reduced, and the water content was higher than that of the planter planting. As a result, the utilization efficiency of irrigation water increased by 139.5% and the average water utilization efficiency increased by 16.7%. Wide ridge and

收稿日期: 2019-01-28

资助项目: 山西省重点研发计划重点项目(201703D211002-5)

第一作者: 董飞(1983-),男,硕士,助理研究员,主要从事大田作物栽培生理研究。E-mail: yqyadf@163.com

通信作者: 张建诚(1963-),男,学士,研究员,主要从事大田作物节水旱作模式研究。E-mail: Zhangjc@126.com

furrow planting was a water-saving planting mode for increasing yield and efficiency of summer maize, which could significantly improve water use efficiency of maize.

Keywords: planting methods; planting density; summer maize; yield and components; water use efficiency

根据研究目前世界范围玉米平均水分生产效率 1.80 kg/m^3 , 水分利用效率最高水平可达 2.7 kg/m^3 , 存在巨大的提升潜力, 也可以看出通过提高水分利用效率, 发展高用水农业对解决全球缺水问题的重要性^[1-2]。受水热条件在不同时间尺度上动态变化特征和作物水分需求规律的影响, 我国农田生态系统水分利用率存在显著的时间变异特征^[3]。以小麦—玉米一年两作为主的井灌区, 其生产中灌水方式仍以大水漫灌为主, 单次灌水量过大, 灌水周期过长, 水资源浪费严重等, 降低了水资源利用效率和供水能力, 加剧了水资源短缺的危机。这种无视水资源紧缺的低效、粗放与浪费水方式成为当前管理性缺水的根本原因^[4]。

夏玉米是我国主要粮食作物和经济作物, 增加产量和提高养分水肥利用率一直是玉米研究的重点^[5]。传统等行距平播再加漫灌方式, 一方面满足不了大面积作物在需水关键时期的灌水需求, 另一方面过量、无效灌水引发的水资源浪费、供水能力不足, 导致大面积玉米减产。玉米生长周期短, 需水和需肥量大, 根据灌水周期及施肥方式不同导致夏玉米的增产效应不同^[6]。近年来, 许多学者在玉米种植技术和种植结构, 改善灌水方式等方面进行大量的研究工作。垄作沟灌模式^[7]、全膜双垄沟播栽培技术^[8]在我国干旱与半干旱地区作为重要的集雨抗旱模式而备受重视。在夏玉米生产方面, 带耕沟播节水灌溉模式^[4]、以扩行距、缩株距为核心内容的宽行种植模式^[9]、两垄空一垄种植模式^[10]等均为玉米高效节水及高产栽培提供了新思路。因此, 开展玉米高效灌水种植模式的节水灌溉方式研究, 对实现生物节水措施与农艺措施的有效结合, 合理分配水资源、节约水资源、提升灌水能力和水资源利用效率具有重要意义。

在节水的基础上, 增密是增产的重要途径, 但随着密度增加, 群体内透光性能减弱, 叶片功能期缩短, 衰老程度加剧, 因此要保障玉米高产稳产, 必须确定适宜种植密度^[11]。因此, 无论哪种种植模式, 首先应考虑增密后群体的通风透光性能, 增强群体后期光合能力, 并增加产量。

为有效应对水资源危机, 提高夏播玉米灌溉水利用效率, 并挖掘沟播模式下玉米的增产潜力, 本研究在山西省洪洞县开展了小麦—玉米一年两作区玉米宽垄沟播及不同种植密度对节水增效的试验研究, 旨在系统探讨沟播模式的增产效应, 为生产实践提供技

术支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 6—9 月在山西省临汾市洪洞县马三村示范基地进行。试验地常年以小麦—玉米一年两熟种植模式为主。该区年平均降水量 $450 \sim 500 \text{ mm}$, 其中小麦季降水量占 30%, 玉米季占 70%, 每季作物需人工灌水 2~3 次。该区年平均日照时间 $2\,416.5 \text{ h}$, 年平均气温为 $12.18 \text{ }^\circ\text{C}$, $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的积温 $4\,677.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 全年无霜期 203 d。土壤类型为石灰性褐土, 土壤 0—20 cm 基础肥力: pH 为 8.12、有机质含量为 12.16 g/kg , 全氮含量为 0.9 g/kg , 速效磷含量为 8.76 mg/kg , 碱解氮含量为 63.3 mg/kg , 速效钾含量为 123.5 mg/kg , 参照鲍士旦^[12]方法测定。试验季(6—9月)降雨量总量为 394.5 mm , 月份降水量和空气温度情况见表 1。

表 1 试验区玉米生长季月份降水量和气温

指标	6 月	7 月	8 月	9 月
降水量/mm	43.2	145.5	46.0	82.0
气温/ $^\circ\text{C}$	26.8	28.0	28.7	20.2

1.2 试验设计

选用当地主栽品种“登海 685”(先锋种业有限公司)为供试材料。采用裂区组设计, 种植模式为主区, 种植密度为副区。设置 4 个处理, CK: 等行距平播(行距 60 cm); T: 宽垄沟播(每沟种植 2 行玉米, 行间距 40 cm, 垄宽 100 cm, 垄高 25 cm)。每种种植模式下设置 D1(6.00 万株/hm^2)、D2(6.75 万株/hm^2)和 D3(7.50 万株/hm^2) 3 个密度处理。每处理施肥一致, 均采用复合肥(N:P:K 为 18:22:6), 施肥量为 450 kg/hm^2 。种肥同播。玉米生长后期追施尿素两次, 随水冲施, 追施量均为 150 kg/hm^2 。分别于 6 月 16 日、7 月 23 日和 9 月 1 日统一进行灌溉。沟播模式采用沟灌, 平播方式采用传统大水漫灌。于 2018 年 10 月 12 日收获。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤水分 于玉米种植前、苗期(播种后 34 天)、大喇叭口期(播种后 64 天)和成熟期(播种后 115 天)在每个小区按“S”形曲线, 采用土钻分别取 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 土层的新鲜土壤样品, 所取土样在 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘至恒重后称重, 烘干称重法测定土壤含水量。

土壤贮水量(mm)=土壤容重(g/cm³)×土层深度(cm)×土壤含水量(%)

水分利用效率(kg/(hm²·mm))=籽粒产量(kg/hm²)/生育期耗水量(mm)

生育期耗水量(mm)=玉米生育期内降水量(mm)+玉米播前和收获后土壤贮水量变化量(mm)

每次灌水记录时间,并测定灌水量(出水量按 60 m³/h 计算),计算灌溉水利用效率和灌溉效率。灌溉水利用效率(kg/m³)=籽粒产量(kg)/灌溉量(m³)

土壤日蒸发量测定采用马富亮等^[13]研究结果中微型蒸发器的方法。微型蒸发器的制作材料为 PVC 管,管内径为 10 cm,长度为 15 cm。每天 16:00—17:00 将微型蒸发器取出称质量,每个样点测量时严格控制在同一时间点,2 次质量之差为当天的日蒸发量,电子天平精度为 0.1 g。

1.3.2 植株指标 叶绿素相对含量(SPAD):在苗期、大喇叭口期和成熟期分别于各小区选取代表性植株 10 株,使用掌上叶色值测定仪(美能达 SPAD 502 Plus,日本)测定穗位叶片的 SPAD 值,选取叶片长度的 50%处,避开叶脉,分别在叶片两侧选取 5 个点进行测定,取平均值。

玉米成熟后,每小区取样 20 株,进行室内考种,测定穗长、穗粗、穗行数、行粒数等穗部性状以及百粒重等产量构成因子指标。生物产量和籽粒产量按照

小区地上部干物质重折算(折算成籽粒含水量为 14%)。收获指数=玉米产量(kg)/生物产量(kg)。

1.4 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 和 Sigma plot 14.0 软件对试验数据进行处理和作图。采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,利用最小显著极差法进行显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 种植方式和密度对夏玉米茎秆性状的影响

从表 2 可以看出,种植方式和密度对玉米苗期株高、茎粗和地上部干重的影响不大,处理间差异不显著。随着玉米生育期延长,株高、茎粗和单株干物质重在大喇叭口期出现明显差异。相同种植方式下,植株株高均随种植密度的增加而增加(平播增加 1.24%~2.82%,沟播增加 4.83%~7.33%),且沟播模式下植株株高较平播模式的同密度处理高。2 种植方式下,茎粗均随种植密度增加而降低,平播和沟播处理茎粗最大差值分别为 2.23,1.29 mm。相反,沟播模式下单株干物质重均低于同密度处理的平播模式。玉米成熟期,植株株高在密度间的差异除 D1 处理较低外,其余处理间差异不显著。茎粗极差增加,平播和沟播处理分别为 3.08,4.49 mm。单株干物重均随种植密度增加而降低,同密度下的沟播模式均低于平播处理。

表 2 种植方式和密度对玉米茎秆性状的影响

种植方式	种植密度	株高/cm			茎粗/mm			单株干物质量/g		
		苗期	大喇叭口期	成熟期	苗期	大喇叭口期	成熟期	苗期	大喇叭口期	成熟期
CK	D1	53.45±2.1a	152.2±4.5c	219.6±11.2cd	99.8±4.5ab	22.34±1.0a	26.52±1.2a	0.52±0.04a	122.9±3.6a	170.20±6.7a
	D2	51.2±1.3ab	154.1±3.4c	228.9±9.6c	100.1±6.7a	22.19±0.9a	25.36±0.6b	0.54±0.02a	114.5±6.1b	165.90±7.8ab
	D3	54.3±2.4a	156.5±3.2bc	228.2±6.8c	103.2±6.1a	20.11±1.3b	23.44±0.9c	0.51±0.01a	113.4±4.5b	164.15±8.4ab
T	D1	55.1±2.1a	163.6±6.2b	273.6±7.5b	103.4±7.2a	21.87±0.6b	25.81±1.4b	0.55±0.05a	110.3±3.1b	129.4±6.9b
	D2	56.7±1.9a	171.5±2.6ab	276.2±6.6a	109.9±3.4a	20.26±0.4b	24.71±0.9bc	0.52±0.05a	104.5±2.4c	111.9±7.1c
	D3	55.8±3.5a	175.6±6.7a	278.8±11.0a	104.5±5.1a	18.97±0.1c	21.32±2.1d	0.53±0.07a	100.1±5.6c	106.4±6.5c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同种植密度间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 种植方式和密度对叶绿素相对含量(SPAD)的影响

由图 1 可知,苗期玉米叶片 SPAD 值在种植方式间的变化不明显,在密度间的变化趋势随着密度的增加叶片 SPAD 值降低。随着生育期延长,大喇叭口期和成熟期种植方式对叶片 SPAD 值的变化产生差异影响。沟播处理的叶片 SPAD 值始终高于平播处理,且后期差异程度变大。

2.3 种植方式和密度对夏玉米穗部性状及产量的影响

从表 3 可以看出,种植密度增加对穗位高增加有显著影响,尤其在沟播模式下增加较明显(比平播处

理平均增加 12.9%)。穗粗和穗行数在种植方式和密度间的差异均不显著。百粒重随种植密度的增加而减小。单穗重在平播处理下随密度增加而降低,在沟播处理下随密度增加而增加。在 D1 密度处理下,沟播模式的生物产量和籽粒产量均低于平播处理,在 D2 和 D3 处理下,沟播模式的生物产量和籽粒产量均高于平播处理。沟播模式的玉米收获指数均比平播处理高。

2.4 种植方式和密度对玉米水分利用率的影响

从表 4 可以看出,播种前各处理间的贮水量差异不显著,收获后的贮水量在种植模式和密度间均出现

差异影响。收获后贮水量随种植密度的增加而略有增加,但同种植模式下的密度处理间差异不显著。沟播模式下玉米收获后贮水量明显高于平播处理。沟播模式下的灌水量比平播减少 120.5%,密度对灌水量的影响较小。平播模式的农田耗水量较沟播模式高。沟播模式下灌水时间较平播模式减少 52.8%,且高密度处理的灌水时间略高于低密度处理,但在密度间的差异不显著。沟播模式较平播模式明显提高灌溉水利用效率,平均增加 139.5%。

玉米水分利用效率随种植密度的增加而增加。同密度下,D1 处理下沟播处理的水分利用效率小于

平播处理,D2 和 D3 处理下沟播处理的水分利用效率比平播处理分别增加 11.1%和 18.7%。

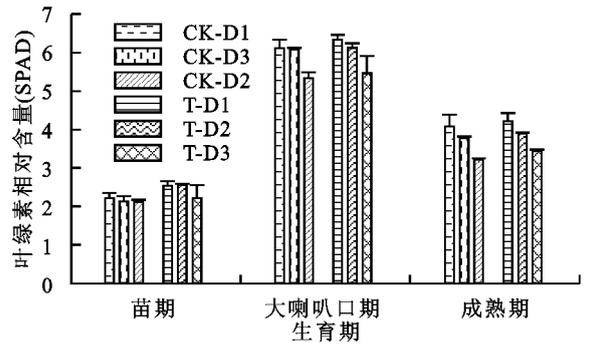


图1 种植方式和密度对玉米叶片叶绿素相对含量的影响

表3 种植方式和密度对玉米穗部性状及产量的影响

种植方式	种植密度	穗位高/cm	穗粗/mm	穗长/cm	穗行数/行	百粒重/g	单穗重/g	生物产量/(kg·hm ⁻²)	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	收获指数
CK	D1	108.4±4.3bc	45.07±1.2a	18.10±0.2c	16.00±0.09a	31.1±1.2a	215.0±3.1a	9985.6±102.1b	9678.3±99.7c	0.909±0.01b
	D2	108.7±5.6bc	45.89±2.3a	18.23±0.1c	16.20±0.06a	30.9±3.1b	195.0±6.2b	11235.4±98.7ab	9956.5±134.2c	0.886±0.02c
	D3	110.4±7.8b	46.04±0.9a	18.73±0.09c	16.40±0.07a	29.7±1.4b	195.0±6.7b	12310.4±145.6b	10982.1±111.2bc	0.892±0.04c
T	D1	110.4±10.1b	45.76±3.1a	18.23±0.2c	16.40±0.05a	32.3±2.6a	217.5±2.1b	9694.5±134.3c	9590.5±108.7c	0.919±0.01b
	D2	115.6±9.3a	45.77±1.0a	18.93±0.3b	16.20±0.03a	28.2±2.1b	222.5±5.6a	12450.4±122.5b	11242.6±78.9b	0.923±0.03a
	D3	122.4±5.3a	44.44±1.1ab	19.23±0.5a	16.60±0.02a	28.6±3.1b	225.0±3.4a	13274.3±234.1a	12780.7±107.3a	0.963±0.04a
与产量相关性		0.746	0.856*	0.873*	0.698	0.837*	0.923**	0.911**	1.000	0.723

注: * 表示差异显著(P<0.05); ** 表示差异极显著(P<0.01)。

表4 种植方式和密度对灌溉水利用效率的影响

种植方式	种植密度	播种前贮水量/mm	收获后贮水量/mm	生育期降水量/mm	灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)	总耗水量/mm	灌水时间/(h·hm ⁻²)	灌溉水利用效率/(kg·hm ⁻² ·m ⁻³)	水分利用效率/(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
CK	D1	376.5±1.2a	247.7±3.4a	315.1	1147.5±12.1a	568.0±23.1a	18.4±0.12a	126.45±2.78d	19.65±1.21c
	D2	375.2±1.4a	245.6±4.5a	315.1	1162.5±10.8a	548.2±11.4a	16.8±0.09ab	128.41±3.22d	20.85±0.98bc
	D3	375.3±0.9a	254.1±5.4a	315.1	1170.0±9.5a	558.2±14.5a	20.1±0.04ab	140.85±3.12c	21.60±0.76b
T	D1	378.2±2.3a	347.8±2.3a	315.1	520.5±11.2b	478.5±11.5b	11.4±0.16b	276.45±5.34b	18.90±1.01c
	D2	366.4±2.2a	345.2±4.6a	315.1	525.0±10.5b	488.3±33.2b	9.15±0.17c	321.15±3.14a	22.50±1.21b
	D3	374.3±2.1a	347.8±6.5a	315.1	541.5±6.7b	467.2±20.9b	8.4±0.05c	352.05±1.66a	25.65±0.76a

2.5 种植方式对土壤水分含量及蒸发量的影响

从图2可以看出,玉米苗期,2种植植模式的土壤含水量差异明显。大喇叭口期,沟播模式下各土层土壤含水量均高于平播处理,且沟播模式的各土层间含水量变化差异较大,0-60 cm 土层含水量较高。从图3可以看出,相同种植模式下,随着种植密度的增加,土壤日蒸发量有所减少。沟播处理的水分蒸发量小于平播。

3 讨论

植株茎秆性状是作物干物质积累与合理分配的保障,也是玉米籽粒产量形成的物质基础^[14]。本研究表明,沟播模式下玉米植株普遍表现为细长型,这与同密度下沟播处理的植株株距近有关,且沟播模式

下单株干物质质量低于平播处理。但是在产量上,沟播处理除了低密度处理低外,D2 和 D3 处理的产量均较高。要实现密植高产,可在 7.5 万株/hm² 种植密度下选用宽垄沟播种植模式,最高产量达 12 780.7 kg/hm²,比对照平播处理增加 16.3%。席天元等^[15]采用沟播模式在种植密度为 6.0 万株/hm² 的条件下获得 10 011.4 kg/hm² 的产量,比对照平播增产 6.2%。张丽娟等^[16]采用宽行种植模式种植的玉米产量较对照平播高 7.8%,且在种植密度为 7.5 万株/hm² 时,产量间的差异较大。刘璐璐等^[17]沟垄集雨种植相较于平作能显著促进玉米生长和干物质积累。本研究在密度上限选择 7.5 万株/hm²,产量仍有增加趋势,增加密度对产量增加的潜力如何仍

需进一步研究。

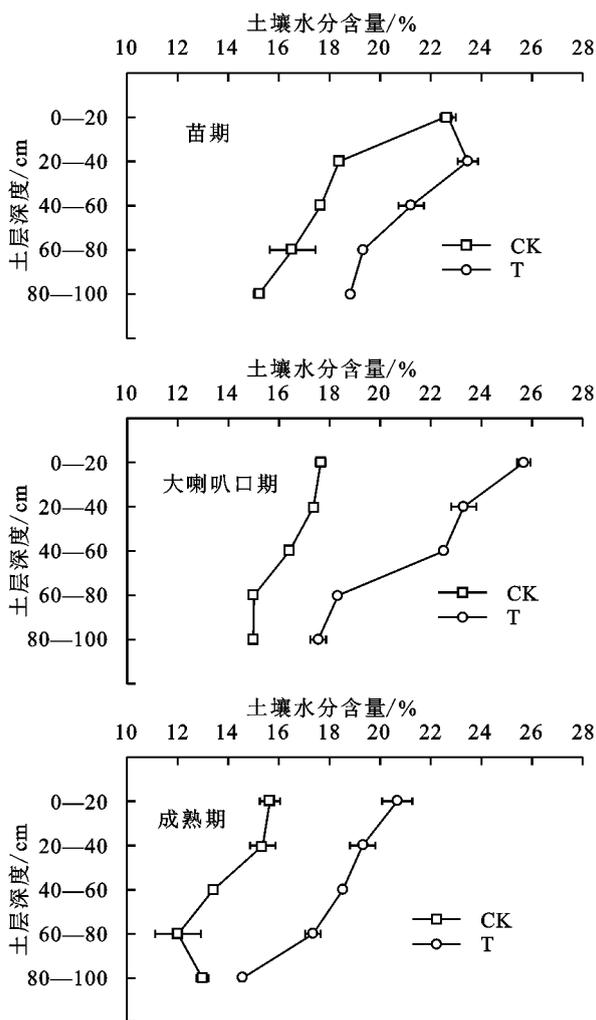


图 2 种植方式对玉米不同生育期土壤含水量的影响

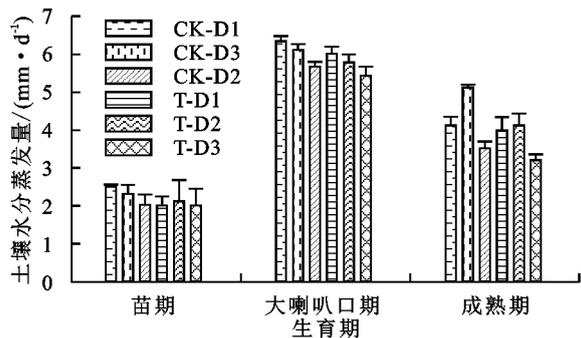


图 3 种植方式和密度对玉米不同生育期土壤水分蒸发量的影响

种植密度是影响玉米叶片衰老及产量增加的一个重要因素。合理的群体结构下,叶片持绿期延长,衰老程度降低,增产潜力较大^[18]。低密度下虽然有良好的光照条件,单株生产率高,但群体过小难以高产;在传统平播处理下,密度过大则透光率低,中下层叶片早衰严重,单株生产力降低,群体光合能力下降^[19]。宽行种植模式下,生育后期玉米叶片仍保持较高的叶绿素含量,使叶片持绿期增长,延缓叶片衰老,增加叶片光合有效时间,是产量增加的原因之一^[20]。本研究中,沟播模式下各处理穗位叶的

SPAD 值均高于平播模式,这与前人^[19]研究结果一致。黄智鸿等^[21]对高产玉米品种的研究发现,玉米籽粒产量主要源于玉米后期光合产物的积累,玉米生育后期较高的 LAI 和 SPAD 是玉米高光合功能的象征。此外,宽行播种能够充分体现玉米生长的边行优势,植株的通风透光能力强。柳娜^[22]研究表明,覆膜沟播能显著缩短旱地玉米的生育前期,延长生育中后期,整个生育期较传统平作缩短 21 天。这与水地沟播条件的结果不尽相同,可能是水地条件浇水次数较多,对生育期的延长作用更明显。

此外,沟播种植模式的肥料施入相对较集中,在 2 行沟播玉米的中间,有效改善了肥料的空间利用效果。田间水肥条件改善,可以维持玉米后期较高的 SPAD,从而提高了玉米生育后期的光合能力。而且,较好的氮肥供应有效地抑制植株衰老过程,为玉米保持较高的光合能力提供保障^[23]。沟播模式下植株对大量元素的吸收量均高于平播处理,这与肥料集中在沟内有关,养分运移的距离短,玉米根际周围的养分有效性较高^[18]。有研究^[24]指出,在沟播模式下,由于积温增加,有机质、土壤酶和土壤水分等交换运移增强,加之有效保持了土壤水肥含量。沟播处理下,沟内土壤水分含量也相对较高,这与沟播模式下种植行内土壤蒸发量低有关,也与沟播模式下株距近,地表裸露少有关。土壤水分含量高更有利于肥效发挥,提高养分有效性。

从水分利用角度来看,宽垄沟播沟灌模式是一种高效节水的种植模式。在高密度下,灌溉水利用效率较高,可能与高密度下产量高有关。Golzardi 等^[25]和罗慧等^[26]指出,交替隔沟灌玉米是一种较好的节水模式,且有利于提高玉米穗产量和土壤质量的水肥供应。沟灌的主要优势表现在灌水量和灌水时间较平播下的大水漫灌显著减少,且沟灌模式下适宜的密度处理产量较高,因此,灌溉水利用效率和水分利用效率比平播模式高,可见产量增加对水分利用率的提高作用很关键。

4 结论

宽垄沟播种植模式玉米穗性状较平播处理较优,单穗重增加,且受种植密度影响较小,表现出明显的边行优势。沟播模式的玉米叶片叶绿素相对含量始终高于平播处理,生育期延长,为后期籽粒形成提供了物质保障。沟播模式在 7.5 万株/hm² 种植密度下产量较高,灌水量较平播减少 52.9%,灌水时间减少 50%,土壤日均蒸发量减少,灌溉水利用效率提高 139.5%,玉米水分利用效率平均提高 16.7%。可见,

宽垄沟播是夏玉米增产增效的一种节水种植模式,明显提高玉米水分利用效率。

参考文献:

- [1] 徐同庆,陶健,王程栋,等.中国农田生态系统水分利用效率的格局与成因[J].中国农学通报,2018,34(16):83-91.
- [2] 张喜英.提高农田水分利用效率的调控机制[J].中国生态农业学报,2013,21(1):80-87.
- [3] 吴伟,廖允成.中国旱区沟垄集雨栽培技术研究进展及展望[J].西北农业学报,2014,23(2):1-9.
- [4] 席天元,梁哲军,谢三刚,等.玉米带耕沟播高效种植模式初步研究[J].山西农业科学,2016,44(5):614-616,639.
- [5] 孟春芬,陈远学.玉米不同种植模式下土壤表层温湿度变化研究[J].耕作与栽培,2016(5):38-40.
- [6] 王敬亚,齐华,梁熠,等.种植方式对春玉米光合特性、干物质积累及产量的影响[J].玉米科学,2009,17(5):113-115.
- [7] 师学珍,王增丽,温广贵.垄作沟灌条件下不同灌溉制度对土壤水分及制种玉米产量的影响[J].节水灌溉,2017(1):41-44.
- [8] 刘生瑞,杨子凡,顿志恒,等.甘肃省全膜双垄沟播栽培技术增产效果评价:以环县玉米为例[J].中国农学通报,2017,33(19):18-21.
- [9] 何冬冬,杨恒山,张玉芹,等.扩行缩株对春玉米干物质积累与转运的影响[J].玉米科学,2017,25(3):73-79.
- [10] 赵艳宏,牛真.玉米二比空种植模式研究[J].农业与技术,2018,38(16):83.
- [11] 陈辉云,范大泳,石志斯,等.不同株型玉米适宜种植模式的研究[J].安徽农业科学,2014,42(18):5773-5774.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999:42-50.
- [13] 马富亮,朱小立,符素华,等.封底与不封底微型蒸发器测定东北典型黑土区土壤蒸发量差异性研究[J].灌溉排水学报,2016,35(12):7-11.
- [14] 任金虎,谢军红,李玲玲,等.种植模式对旱地玉米光合特性和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):8-13.
- [15] 席天元,许爱玲,卫晓东,等.玉米带耕沟播不同灌水方式对水分利用效果及产量构成的影响[J].中国农学通报,2018,34(22):25-30.
- [16] 张丽娟,杨恒山,张玉芹,等.宽行种植模式对春玉米叶片生理特性及产量的影响[J].内蒙古民族大学学报(自然科学版),2018,33(4):333-338.
- [17] 刘璐璐,张雪玲,郗洛延,等.沟垄集雨种植和氮肥对春玉米生长及产量的影响[J].西北农业学报,2018,27(5):675-684.
- [18] 王洋,齐晓宁,刘胜群,等.宽窄行种植方式对生育后期玉米叶片衰老的影响[J].土壤与作物,2016,5(4):211-214.
- [19] Eldoma I M, Li M, Zhang F, et al. Alternate or equal ridge-furrow pattern: Which is better for maize production in the rain-fed semi-arid Loess Plateau of China [J]. Field Crops Research,2016,191:131-138.
- [20] 陈芳,谷晓平,于飞,等.不同栽培方式对玉米光合特性及产量的影响[J].中国农学通报,2017,33(10):23-30.
- [21] 黄智鸿,王思远,包岩,等.超高产玉米品种干物质积累与分配特点的研究[J].玉米科学,2007,15(3):95-98.
- [22] 柳娜.全膜垄作沟播对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J].甘肃农业科技,2011(7):37.
- [23] Wu J P, Xiao K, Zhao C. Ridge-furrow cropping of maize reduces soil carbon emissions and enhances carbon use efficiency [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2018,256:153-162.
- [24] 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.
- [25] Golzardi F, Baghdadi A, Afshar R K. Alternate furrow irrigation affects yield and water-use efficiency of maize under deficit irrigation [J]. Crop and Pasture Science,2017,68(8):726-734.
- [26] 罗慧,吴祥颖,李伏生.沟灌方式和有机肥配合对甜糯玉米产量和土壤有机碳组分及酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(3):31-38.