

行距比例及密度对绿洲灌区玉米水分利用效率的互作效应

贺玉鹏, 樊志龙, 赵财, 胡发龙, 殷文, 于爱忠, 柴强

(甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃农业大学农学院, 兰州 730070)

摘要: 探究是否可以将行距比例和种植密度集成于同一作物生产系统中来提高作物产量, 增加水分利用效率。以玉米“五谷 568”为研究材料, 于 2017—2018 年进行大田试验, 设 7 : 3 (L_1 , 宽行 56 cm : 窄行 24 cm), 6 : 4 (L_2 , 宽行 48 cm : 窄行 32 cm), 5 : 5 (L_3 , 等行距 40 cm) 3 个行距比例水平, 82 500 株/hm² (D_1), 90 000 株/hm² (D_2), 97 500 株/hm² (D_3), 105 000 株/hm² (D_4), 112 500 株/hm² (D_5) 5 个种植密度, 探讨不同行距比例及密度处理对玉米的耗水特征、产量及水分利用效率的影响。结果表明, L_1 行距比例可有效降低玉米耗水量, 但会增加行间蒸发, 对 E/ET 影响不显著, 其中 2017 年 L_1 较 L_3 能有效降低耗水量 11.9%, 2018 年无显著差异; 此外与传统行距比例相比, L_1 行距比例具有增产优势, 玉米增产 5.2%~10.5%, 提高水分利用效率 6.5%~8.7%。密度间比较, D_3 密度较传统密度 D_1 能有效降低耗水量、行间蒸发量以及 E/ET , 对玉米增产及水分利用效率的提高有促进作用; 其中 D_3 密度较传统密度 D_1 耗水量降低 13.3%, 2018 年差异不显著; 行间蒸发量减小 7.1%~7.2%; E/ET 减小 6.8%~19.2%; 玉米增产 7.5%~17.1%; 水分利用效率提高 23.9%~46.2%。2 年 L_1D_3 较传统处理 L_3D_1 耗水量降低 12.8%~30.6%; 行间蒸发量降低 8.5%~10.4%; E/ET 降低 7.3%~7.5%; 玉米产量增加 7.7%~25.5%; 水分利用效率提高 36.0%~41.2%。因此, 在河西绿洲灌区, 7 : 3 (L_1 , 宽行 56 cm : 窄行 24 cm) 行距比例结合 97 500 株/hm² (D_3) 种植密度可有效增加玉米产量, 提高玉米水分利用效率。

关键词: 行距比例; 种植密度; 耗水量; 行间蒸发量; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2020)04-0224-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.033

The Interaction Effect of Row Spacing Ratio and Planting Density on Water Use Efficiency of Maize in Oasis Irrigation District

HE Yupeng, FAN Zhilong, ZHAO Cai, HU Falong, YIN Wen, YU Aizhong, CHAI Qiang

(Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Faculty of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: The objective of this study was to explore whether the integration of row spacing ratio with planting density in one cropping system will increase water use efficiency of ‘Wugu 568’ maize at the Oasis Irrigation District. A field experiment was conducted at the Oasis experimental station from 2017 to 2018, to investigate the above objective. Three row spacing levels were used in the ratio; 7 : 3 (L_1 , 56 cm wide : 24 cm narrow), 6 : 4 (L_2 , 48 cm wide : 32 cm narrow), and 5 : 5 (L_3 , equal row spacing 40cm); with five plant density levels, thus, 82 500 plants / hm² (D_1), 90 000 plants / hm² (D_2), 97 500 plants / hm² (D_3), 105 000 plants / hm² (D_4), 112 500 plants / hm² (D_5). The primary objective of this research was to investigate the effect of different row spacing ratio and planting densities on water consumption, grain yield and water use efficiency of maize. The results showed that row spacing ratio of L_1 can effectively reduce the water consumption and increase the evaporation between rows and has no significant effect on E/ET . Among the treatments, L_1 can effectively reduce water consumption by 11.9% compared with L_3 in 2017, and there was no significant difference in 2018. Comparing the row spacing ratio, the L_1 row spacing ratio has the advantage of increasing grain yield by 5.2%~10.5%, and improving water use efficiency by 6.5%~8.7%. By comparing the density treatments, D_3 density can effectively reduce water consumption and the evaporation between rows, and E/ET as compared to the traditional density D_1 . The treatment D_3 is 13.3% lower than

收稿日期: 2020-01-11

资助项目: 国家自然科学基金项目(31771738); 国家公益性行业(农业)科研专项(201503125-3)

第一作者: 贺玉鹏(1993—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事旱地与绿洲农作制研究。E-mail: kkkooking@163.com

通信作者: 柴强(1972—), 男, 教授, 主要从事多熟种植、循环农业、保护性耕作技术与理论研究。E-mail: Chaiq@gsau.edu.cn

that of the traditional density D_1 and promoted and increased corn yield and water use efficiency. In 2018, the difference was not significant; the evaporation between rows decreased by 7.1%~7.2%; E/ET decreased by 6.8%~19.2%; increased grain yield by 7.5%~17.1%; and also increased water use efficiency by 23.9%~46.2%. Comparing the traditional treatment L_3D_1 water consumption to L_1D_3 in two years, it reduced by 12.8%~30.6%. The evaporation between rows reduced by 8.5%~10.4%; E/ET reduced by 7.3%~7.5%; water use efficiency improved by 36.0%~41.2%, and increased the grain yield by 7.7%~25.5%. Therefore, 7:3 (L_1 , 56 cm wide:24 cm narrow) row spacing ratio combined with 97 500 plants/hm² (D_3) plant density can effectively increase maize yield and improve maize water use efficiency in Hexi oasis irrigation area.

Keywords: row spacing; planting density; water consumption; evaporation; yield; water use efficiency

水分是限制作物群体生长发育极其重要的因子之一,探究如何提高水分利用效率是农业生产中亟待解决的重要问题^[1-2]。目前,学者在不同行距比例、不同密度对作物水分利用效率的影响进行了不同程度的研究。有研究^[3-6]指出,控制灌水及晚播条件下,缩小行距比例显著增加作物水分利用效率,并且适宜的种植密度下,扩株距缩行距比例以及不同宽窄行比例下控制播量均有利于作物水分利用效率的提高,若不断增加行距比例反而增加行间蒸发,降低作物的产量与水分利用效率;另有研究^[7-9]指出,合理密植对作物干物质积累量、产量及水分利用效率有明显提高作用,并且密度的合理调控可有效降低作物行间蒸发,但密度过大又会导致作物冠层中下部光截获能力下降、灌浆速率降低、群体内水分竞争加剧,严重影响作物产量,降低作物水分利用效率。近年来,学者在关于密度与作物水分利用效率的研究已有较为完善的理论和依据,而在行距比例对作物影响方面的研究,当前仍以作物产量及受光结构方面的研究为热点,在行距比例对作物水分利用效率方面的研究,虽有报道但仍缺乏理论和实践经验。纵观近年来关于行距比例及密度对作物水分利用效率的研究发现,将“行距比例”“密度”2个决定因子集成在同一作物生产系统中用于提高作物水分利用效率的研究却鲜有报道,理论依据仍有待进一步完善。

甘肃河西走廊是我国玉米生产的重要基地,该地区深处内陆,气候炎热且雨水较少,是我国典型的水资源匮乏地区^[10]。可以假设根据作物不同空间布局的耗水特性分别制定种植行距比例及密度,形成不同空间结构,可实现玉米的高产及水分利用效率的提高。因此,本研究依托大田试验,以玉米为研究对象,通过调控玉米行距比例及种植密度,探究其水分利用特征,以期为玉米的高效节水提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验与2017—2018年在武威绿洲试验站进行,该地区位于河西走廊东端,海拔1 776 m。年平

均蒸发量2 400 mm,干燥度5.58,年平均降水量160 mm,其中2017年和2018年玉米生育期降雨量分别为170.0,244.4 mm,7,8,9月降水较集中。干旱缺水是限制该区农业生产的主要因素之一。该区以玉米种植为主,生育期4—9月,玉米生产中常采用等行距(40 cm)种植,传统种植密度82 500株/hm²,多采用覆膜种植,土壤为砂壤土。

1.2 试验材料

2017年4月25日至9月20日、2018年4月21日至9月22日进行播种与收获;采用聚乙烯透明地膜,地膜宽1.4 m、厚0.01 mm。

1.3 试验设计

试验采用裂区试验设计,以行距比例作为主处理,密度作为副处理。其中,设7:3(L_1 ,宽行56 cm:窄行24 cm),6:4(L_2 ,宽行48 cm:窄行32 cm),5:5(L_3 ,等行距比例40 cm)3个行距比例;82 500株/hm²(D_1)、90 000株/hm²(D_2)、97 500株/hm²(D_3)、105 000株/hm²(D_4)、112 500株/hm²(D_5)5个种植密度,共组成15个处理,3次重复。

灌溉总额为405 mm,其中冬储灌量为120 mm,生育期内灌水5次,分别于苗期(90 mm)、拔节期(75 mm)、大喇叭口期(90 mm)、开花期(75 mm)和灌浆期(75 mm)进行膜下滴灌。各处理施氮水平相同,均为360 kg/hm²,其中基肥30%,大喇叭口期追肥50%,灌浆期追肥20%;纯磷(P_2O_5)180 kg/hm²,全作基肥。小区长12 m,宽5 m,面积60 m²。

1.4 测定指标与计算方法

1.4.1 土壤含水量 0—30 cm按10 cm 1个层次采用烘干法测定;30—120 cm按30 cm 1层采用中子水分仪测定。于2017年4月25日、2018年4月27日在玉米苗期初次测定,间隔20天测定1次,在玉米播种之前和收获之后加测。

1.4.2 土壤贮水量(SWS)

$$SWS = \theta \times h \times a \times 10 \quad (1)$$

式中:SWS为土壤贮量(mm); θ 为土壤含水量(%); h 为土层深度(cm); a 为土壤容重(g/cm³);10为单位

换算系数。测定土壤容重时,在代表性地块挖 1 个测定所需深度的剖面坑,用环刀自下而上分别取 90—120,60—90,30—60,20—30,10—20,0—10 cm 6 个土层的容重;环刀内的土壤需烘干称干土质量。

1.4.3 土壤容重(r)

$$r = \frac{M \times 100}{V(100 + W)} \quad (2)$$

式中: r 为土壤容重(g/cm^3); V 为环刀体积(cm^3); M 为湿土重量(g); W 为土壤含水量(%). 每层取 3 个重复的环刀做平均值作为其测定最终结果。本试验从下到上 6 个层次的土壤容重分别为 1.472 8, 1.429 2, 1.431 3, 1.435 9, 1.406 1, 1.318 2 g/cm^3 。

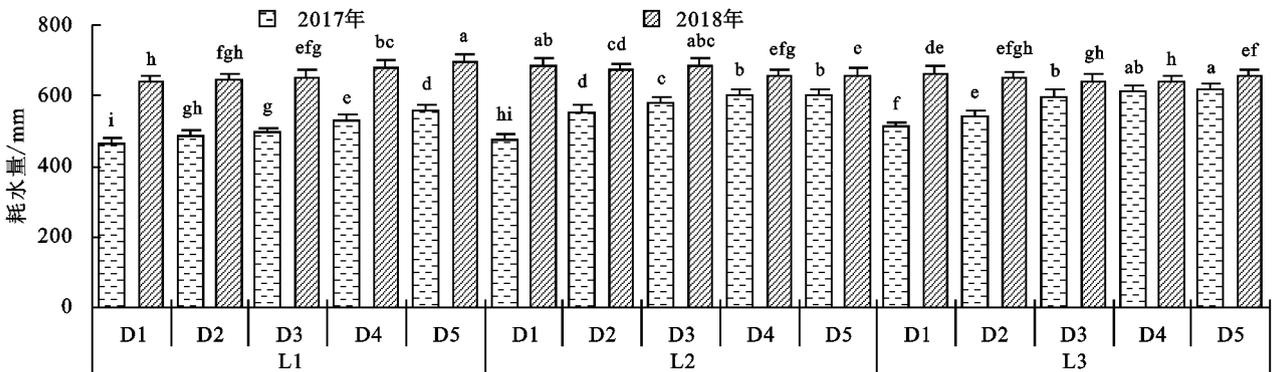
1.4.4 作物耗水量(ET)

$$ET = \text{SWS}_{t_2} + I + P - \text{SWS}_{t_1} \quad (3)$$

式中: SWS_{t_2} 为 t_2 时期的土壤贮水量(mm); I 为 $t_1 \sim t_2$ 时期的灌溉量(mm); P 为 $t_1 \sim t_2$ 时期的降雨量(mm); SWS_{t_1} 为 t_1 时期的土壤贮水量(mm)。

1.4.5 裸间蒸发量(E)

采用高 15 cm、直径 10 cm、壁厚 5 mm 的微型蒸渗仪(Micro-lysimeter,简称 ML)测定。从玉米苗期开始,以每隔 3 天测定 1 次,下午 16:00 进行测定,在雨后和灌水后换土加测,每个小区安装 1 个微型蒸渗仪。微型蒸渗仪中的土样重量每少 1 g 即可视为蒸发水分 0.105 1 $\text{mm}^{[1]}$,采用 JEA10001 电子天平进行土壤称重,同一个处理的 3 个重复做平均值,计算该处理的裸间蒸发量。



注:同一年度中,不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

图 1 不同行距比例和密度对膜下滴灌玉米耗水总量的影响

2.1.2 不同行距比例及密度处理的裸间蒸发总量

从图 2 可以看出,2 年行距比例、密度及其二者的交互效应对玉米裸间蒸发均有显著影响。2017 年 L_1 行距比例裸间蒸发量最小,传统行距比例 L_3 裸间蒸发量最大, L_1 较 L_3 裸间蒸发量降低 5.2%;2018 年正好相反,且 L_1 与 L_3 行距比例差异不显著。不同密度间, D_3 密度较传统密度 D_1 裸间蒸发量降低 7.1%~7.2%。 $L_1 D_3$ 较 $L_3 D_1$ 裸间蒸发量降低 8.5%~10.4%。表明合理的行距比例配合适宜的密度可有效缓解行距比例过大造成的裸间蒸发

1.4.6 E/ET 裸间蒸发量与耗水量的比值,其中 E 为裸间蒸发量; ET 为耗水量(mm)。

1.4.7 作物水分利用效率(WUE)

$$\text{WUE} = Y/ET \quad (4)$$

式中: WUE 为水分利用效率($\text{kg}/(\text{hm}^2/\text{mm})$); Y 为籽粒产量(kg/hm^2); ET 为作物生育期总耗水量(mm)。

1.5 数据统计

采用 Microsoft Excel 整理、汇总数据,用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析、显著性分析(Duncan's multiple range tests $P < 0.05$)、主效应检验及交互效应分析。

2 结果与分析

2.1 玉米耗水结构对不同行距比例及密度的响应

2.1.1 不同行距比例及密度下玉米生育期耗水总量

从图 1 可以看出,主效应分析显示,行距比例和密度及二者交互作用对玉米耗水量影响显著。2017 年 7:3(L_1 ,宽行 56 cm:窄行 24 cm)行距比例较传统行距比例 5:5(L_3 ,等行距比例 40 cm)耗水量降低 11.9%,2018 年差异不显著。不同密度比较,2017 年,82 500 株/ hm^2 (D_1)密度较 97 500 株/ hm^2 (D_3)密度耗水量降低 13.3%,2018 年两者无显著差异。但 2 年 $L_1 D_3$ 较传统处理 $L_3 D_1$ 耗水量降低 12.8%~30.6%。说明增加种植密度能显著提高玉米全生育期耗水量,适当比例的行距比例能有效降低玉米无效耗水,综合 2 年比较可知,以 L_1 行距 D_3 密度效果最好。

2.1.2 不同行距比例及密度对膜下滴灌玉米耗水结构的

影响 从图 3 可以看出,2 年密度及其二者交互作用对玉米耗水结构影响显著,但 2018 年行距比例对玉米耗水结构影响不显著。行距比例间差异不显著。随密度的增加 E/ET 显著降低, D_3 密度较 D_1 密度 E/ET 降低 6.8%~19.2%。 $L_1 D_3$ 较 $L_3 D_1$ 处理

量增大的问题,在 L_1 行距比例下适宜增加玉米种植密度 D_3 可降低裸间蒸发量,对抑制土壤无效耗水具有很重要的作用,以 $L_1 D_3$ 处理效果最好。

E/ET 降低 7.3%~7.5%。 E/ET 较小,说明棵间蒸发占耗水量的比值减小,即适宜行距比例调控种植密

度既可以使作物产量得到有效保障,又可以降低土壤无效耗水,增加作物水分利用的有效性。

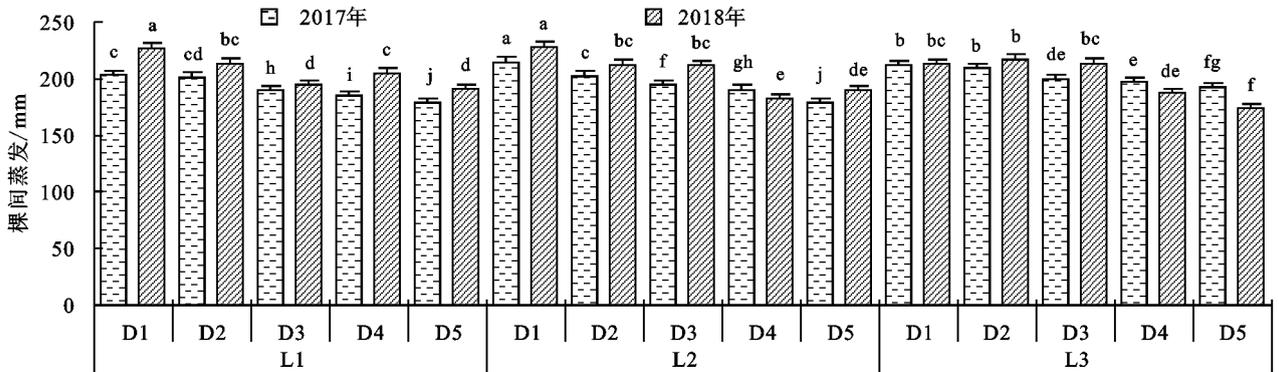


图2 不同行距比例及密度处理生育期间棵间蒸发总量

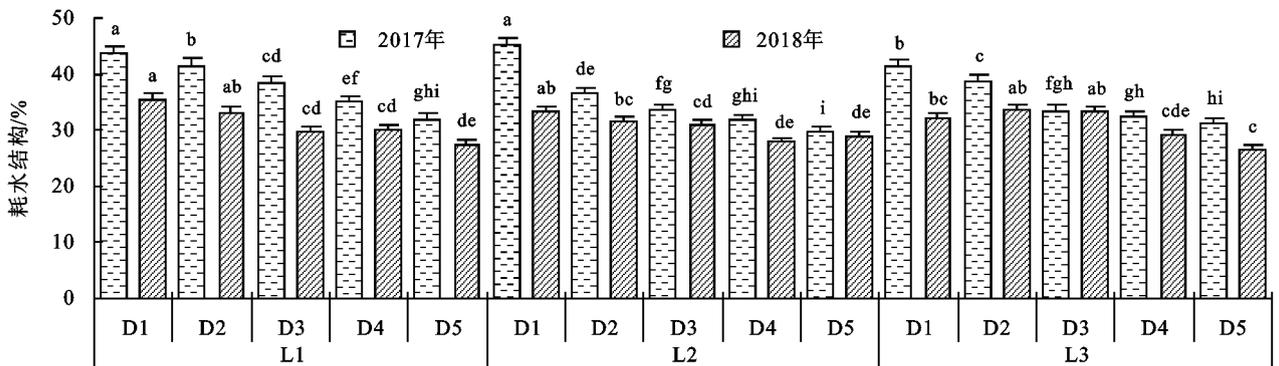


图3 不同行距比例及密度处理棵间蒸发量占耗水量百分比

2.2 不同行距比例及密度下玉米籽粒产量

从表1可以看出,2年玉米的行距比例、密度以及二者的交互作用均有显著差异。其中在 L_1 和 L_2 行距比例下,2年的玉米籽粒产量均随密度增加呈先增加后降低趋势, D_3 密度都有最大籽粒产量。2年 L_1 行距比例玉米籽粒产量均最大,且 L_1 行距比例较传统行距比例 L_3 玉米籽粒产量增加5.2%~10.5%。2年 D_3 密度较传统密度 D_1 籽粒产量增加7.5%~17.1%。另外,2年 L_1D_3 较 L_3D_1 处理增产7.7%~25.5%。在不同行距比例及密度处理下,2年 L_1D_3 处理玉米籽粒产量均表现为最大,即在行距比例为7:3,种植密度为97 500株/hm²时,玉米增产最为明显。

2.3 玉米水分利用效率对不同行距比例及密度的响应

2年密度对玉米全生育期水分利用效率均有显著影响,并且2018年行距比例及密度与行距比例的互作效应对水分利用效率也有影响。由表1可知,2年的水分利用效率在不同行距比例下随密度的增加均呈现先增高后降低的趋势。不同行距比例间比较, L_1 行距比例有最大水分利用效率,较 L_3 水分利用效率增加6.5%~8.7%。不同密度间比较,2年 D_3 的水分利用效率均最大, D_3 较 D_5 水分利用效率增加23.9%~46.2%。 L_1D_3 处理较 L_3D_1 处理水分利用效率增加36.0%~41.2%。综合2年水分利用效率比较发现,在玉米行距比例为7:3(L_1),密度为97 500

株/hm²(D_3)时可显著提高玉米水分利用效率。

3 讨论

3.1 行距比例及密度对作物耗水量的调控效应

作物耗水量受作物自身、气象、水分等因素的影响。当前许多研究^[12-13]指出,作物耗水量还受种植密度的影响,随密度的增加作物耗水总量增加。这与本试验研究结果一致,同行距比例随密度增大,耗水量增加,原因是随密度的增加,玉米单株叶面积指数变化不显著,但玉米能获得较大的群体叶面积指数,在玉米生育期内,玉米群体叶面积增加最终使玉米叶片蒸腾耗水增加^[14-15]。与传统行距比例相比,宽窄行处理降低耗水量,是因为宽窄行降低了土壤含水量,在玉米生长阶段水分的来源主要是土壤中的水分,而行距的变大会加大土壤水分的蒸发,使玉米不能得到充分的水资源,从而导致耗水量降低^[16]。而在高密度下玉米耗水量较高,一方面是因为行距比例提高了玉米耐密性,有效的延缓了叶片衰老,使叶片功能期增长,增加了光合作用,导致玉米耗水量增加;另一方面是因为密度增大,玉米个体数量增加,较普通密度整体耗水必然增大^[17]。行距比例与密度交互作用显著,合理的行株距比例有效的增加了玉米生育期耗水,使更多的水分被玉米吸收和利用。因为宽窄行与密度的合理配置使得玉米群体通风透光条件得以改善,降低了密度过大导致玉米群体遮蔽严重的问题,有利于穗位叶光合有效辐射的提高,使群体

光合能力增强,呼吸消耗降低,耗水量增加^[18]。2018 年玉米的耗水量比 2017 年大,这有可能与 2018 年玉米生育期降雨较多有关,并且增加水分提高玉米生育期耗水量的研究早已被学者^[19]证实。

表 1 不同行距及密度玉米的产量与水分利用效率

处理	2017 年		2018 年	
	产量/ (kg · hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)	产量/ (kg · hm ⁻²)	水分利用效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)
L1D1	14299.7ef	13.7e	13179.1h	22.4c
L1D2	15030.7bc	15.9cd	14886.1b	23.3b
L1D3	16198.2a	22.9a	15150.4a	24.8a
L1D4	13744.0g	21.0b	14226.3d	20.2e
L1L5	12897.8h	16.0cd	10484.3i	18.6gh
L2D1	13142.5h	16.2cd	13640.8f	19.2fg
L2D2	14472.6de	15.3cde	14589.1c	21.5d
L2D3	15392.3b	20.8b	14664.6c	22.5bc
L2D4	14036.1fg	16.6c	13449.9g	21.4d
L2L5	12158.4i	14.8de	10067.9j	18.5gh
L3D1	12071.7i	16.2cd	13988.9e	18.2h
L3D2	14758.5cd	16.4cd	13833.0ef	22.7bc
L3D3	13851.6g	21.4b	13661.1f	21.6d
L3D4	12423.0i	16.2cd	13054.9h	19.5f
L3L5	12192.4i	13.8e	10034.7j	18.6gh
显著性(P 值)				
行距(L)	0	0.300	0	0
密度(D)	0	0	0	0
行距×密度(L×D)	0	0.225	0	0

注:数据后不同字母表示同一年度中不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

棵间蒸发作为反映植株间土壤水分无效损耗的重要指标,其大小除受到作物本身的影响外还受到农艺措施等多种因素的影响。本试验中,宽窄行较传统行距比例棵间蒸发明显增大。这是因为增大行距比例使地表裸露面积增加,植株覆盖度变小,行间通透性过大,加之白天气温较高,地表裸露部位温度升高较其余部位更快,最终导致了棵间蒸发的增大^[20]。而密度增加,棵间蒸发量降低,是由于高密度使植株群体数量增加明显,植株遮蔽严重,地表温度降低所致^[7]。此外,在不同月份,不同行距比例、密度对棵间蒸发的影响不同,但大致规律相同^[21-22]。耗水结构(E/ET)是棵间蒸发与耗水量的比值,其大小可反映作物消耗无效水分的比例。本试验中随密度增加 E/ET 降低。这是因为密度增加使棵间蒸发降低,而 E/ET 降低最主要原因还是玉米的叶面积指数变大,通过调控种植密度改善玉米叶面积指数,降低无效耗水以增加玉米生育期耗水量^[14]。这也是提高作物产量,增加作物水分利用效率的有效措施。

3.2 行距比例和密度对作物产量及水分利用效率的影响

玉米作为一种耗水量较高的作物,生育期内必须获得足够的水分才能使植株正常发育成熟。但近年来,由于水资源消耗严重、降雨稀少等因素导致我国

多数地区农业缺水严重,而作物在生育期保持足够的水分是获得高产稳产的关键所在,所以在农业缺水条件下,力争使作物获得高产以增加作物水分利用效率显得尤为重要。本研究发现, L_1 行距比例较传统行距比例 L_3 有最大籽粒产量。这是因为宽窄行比例可使植株间竞争严重问题进一步缓解,优化作物群体结构,有利于植株吸收更多的营养物质以促进干物质积累^[23-24]。密度增加,玉米籽粒产量明显增加,并且在 D_3 密度的籽粒产量最高,但过高则导致减产。这是因为密植可有效增加植株干物质积累量,以增加作物产量,但高密度也导致植株群体结构破坏,株间竞争较低密度更大,营养生长更慢^[7,25-26],致使玉米结构性生产的潜力降低,影响产量。

降低耗水量,增加作物产量是作物水分高效利用的重要手段^[27-28]。本试验中,在 L_1 处理下,玉米水分利用效率最大,可能是由于宽窄行处理的玉米群体结构较好,加之植株个体较大,最终增加了产量,增加了水分利用效率^[29]。2 年 D_3 密度玉米水分利用效率最大,这是因为虽然密度增大,植株个体较小,但群体数量增加,最终增加产量,提高了水分利用效率^[29]。 L_1D_3 处理 2 年的水分利用效率最大。这是因为调控作物种植密度改善作物行距比例可以降低土壤水分的无效损耗,提高作物产量,进而增加作物水

分利用效率^[30-31]。因此,在水资源匮乏、农业生产常年依赖灌溉,但光热资源充足的河西绿洲灌区,以调整行距比例及种植密度为手段,发展以提高作物水分利用效率为主体的节水型农业,可为该地区大田玉米生产提供重要的理论依据和技术支撑^[32]。

4 结论

与传统行距比例相比, L_1 可有效降低玉米耗水量,但会增加棵间蒸发量,对 E/ET 影响不显著。 L_1 较 L_3 增产5.2%~10.5%,提高水分利用效率6.5%~8.7%。与传统密度相比, D_3 有效降低玉米耗水量13.3%,棵间蒸发量7.1%~7.2%,蒸散比6.8%~19.2%,玉米产量增加7.5%~17.1%,增产效果显著;玉米水分利用效率提高23.9%~46.2%。与传统处理 $L_3 D_1$ 相比, $L_1 D_3$ 处理可有效降低玉米耗水量12.8%~30.6%,棵间蒸发量8.5%~10.4%,蒸散比7.3%~7.5%,增产7.7%~25.5%,水分利用效率提高36.0%~41.2%。说明 $L_1 D_3$ 可低水分无效损耗,增加玉米产量,提高水分利用效率。

参考文献:

[1] 殷文,陈桂平,柴强,等.前茬小麦秸秆处理方式对河西走廊地膜覆盖玉米农田土壤水热特性的影响[J].中国农业科学,2016,49(15):2898-2908.

[2] Jia Q, Sun L, Ali S, et al. Effect of planting density and pattern on maize yield and rainwater use efficiency in the loess plateau in china[J].Agricultural Water Management,2018,202:19-32.

[3] 刘雪薇,董宝婧,苗芳,等.不同行距和播量对重穗型高产冬小麦生物学性状的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(4):161-165.

[4] 周勋波,杨国敏,孙淑娟,等.不同行距对雨灌夏大豆土壤水分特征及产量影响[J].水土保持学报,2008,22(6):217-221.

[5] 薛盈文,艾米拉古丽,王志敏,等.行距对晚播冬小麦群体物质积累和水分利用的影响[J].中国农业大学学报,2014,19(5):1-7.

[6] 孙宏勇,刘昌明,张喜英,等.不同行距对冬小麦麦田蒸发、蒸散和产量的影响[J].农业工程学报,2006,22(3):22-26.

[7] 张冬梅,张伟,陈琼,等.种植密度对旱地玉米植株性状及耗水特性的影响[J].玉米科学,2014,22(4):102-108.

[8] 时荣超,佟玲,何柳月,等.种植密度对制种玉米耗水量的影响及模型验证[J].灌溉排水学报,2017,36(4):66-71.

[9] 柏延文,杨永红,朱亚利,等.种植密度对不同株型玉米冠层光能截获和产量的影响[J].作物学报,2019,45(12):1868-1879.

[10] 柴强,杨彩虹,黄高宝.干旱区绿洲不同种植模式作物的耗水特征[J].中国沙漠,2010,30(5):1153-1159.

[11] 张乃旭,赵财,赵良霞,等.绿洲灌区一膜覆两年玉米的节水潜力[J].作物学报,2018,44(6):876-885.

[12] 李栋浩,姜雪连,佟玲.种植密度对制种玉米根冠生长及耗水量的影响[J].排灌机械工程学报,2014,32(12):1091-1097.

[13] Xin M R, Dong B S, Qing S W. Effects of plastic film mulching and plant density on yield and evapotranspiration of rainfed spring maize[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(1):206-211.

[14] 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[J].农业工程学报,2012,28(11):125-131.

[15] 罗洋,郑洪兵,李瑞平,等.行距配置对春玉米种植区土壤含水量的影响[J].东北农业科学,2017,42(4):1-4.

[16] 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.

[17] 范秀玲,李凤海,史振声,等.玉米偏垄宽窄行种植方式的增产作用和生理特性研究[J].玉米科学,2010,18(1):108-111.

[18] Timlin D J, Fleisher D H, Kemanian A R, et al. Plant density and leaf area index effects on the distribution of light transmittance to the soil surface in maize[J].Agronomy Journal,2014,106(5):1828-1838.

[19] 陈素英,张喜英,陈四龙,等.种植行距对冬小麦田土壤蒸发与水分利用的影响[J].中国生态农业学报,2006,14(3):86-89.

[20] 柴强,杨彩虹,黄高宝.交替灌溉对西北绿洲区小麦间作玉米水分利用的影响[J].作物学报,2011,37(9):1623-1630.

[21] 王小林,张岁岐,王淑庆.不同密度下品种间作对玉米水分平衡的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(2):171-178.

[22] 王健,蔡焕杰,康燕霞,等.夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究[J].农业工程学报,2007,23(4):27-32.

[23] 芪建峰,董鹏飞,张海红,等.行距配置方式对夏玉米氮素吸收利用及产量的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(7):853-863.

[24] 张倩,张洪生,宋希云,等.种植方式和密度对夏玉米光合特征及产量的影响[J].生态学报,2015,35(4):1235-1241.

[25] 王磊,樊廷录,李尚中,等.株行距配置连作对黄土旱塬覆膜春玉米土壤水分和产量的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):79-86,92.

[26] 李荣发,刘鹏,杨清龙,等.玉米密植群体下部叶片衰老对植株碳氮分配与产量形成的影响[J].作物学报,2018,44(7):1032-1042.

[27] 张平良,郭天文,刘晓伟,等.密度和施氮量互作对全膜双垄沟播玉米产量、氮素和水分利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(4):579-590.

[28] 高繁,胡田田,姚德龙,等.密度和品种对夏玉米产量及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(6):21-25,47.

作物种类间存在明显互作效应,可降低油菜、玉米秸秆还田后土壤容重,增加孔隙度和田间持水量。

5种作物秸秆还田后,0—60 cm土层均以 >0.25 mm粒级团聚体为优势团聚体,且0—20 cm土层大团聚体数量增加,MWD、GMD值增大, D 值减小,土壤团聚体稳定性增加。施肥条件下0—60 cm土层大团聚体数量呈减少趋势,团聚体稳定性降低。

综上所述,作物秸秆还田对潮土结构有改良效果。可不同程度降低土壤容重,增大土壤孔隙度和田间持水量,增加土壤大团聚体数量及土壤团聚体稳定性,但配施化肥的效果不显著。且总体来看,油菜秸秆还田对土壤结构的改良效果最明显,表明油菜秸秆还田更有利于土壤结构与环境的改善,可为合理轮作并秸秆还田在稳产、高产的基础上实现土壤可持续发展提供新思路以及理论依据。

参考文献:

- [1] 黄婷苗,郑险峰,侯仰毅,等.秸秆还田对冬小麦产量和氮、磷、钾吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):853-863.
- [2] 刘吉宇.秸秆还田方式及年限对土壤肥力及团聚体中有机质结构特征的影响[D].长春:吉林农业大学,2018.
- [3] 黄婷苗.秸秆还田条件下冬小麦高产高效的氮素管理与调控[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [4] 胡宏祥,程燕,马友华,等.油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J].中国生态农业学报,2012,20(3):297-302.
- [5] 乌兰,马伟杰,义如格勒图,等.油菜秸秆饲用价值分析及其开发利用[J].畜牧与饲料科学,2010,31(增刊1):421-422.
- [6] 于寒.秸秆还田方式对土壤微生物及玉米生长特性的调控效应研究[D].长春:吉林农业大学,2015.
- [7] 邹文艳,曹永慧,赵立梅,等.马铃薯高产栽培技术研究[J].农业与技术,2018,38(6):142.
- [8] 董雪妮,唐宇,丁梦琦,等.中国荞麦种质资源及其饲用价值[J].草业科学,2017,34(2):378-388.
- [9] 徐冉,续荣治,王彩洁,等.用荞麦秸秆粉防除杂草的初步研究[J].植物保护,2002(5):24-26.

(上接第229页)

- [39] 马爱平,王娟玲,靖华,等.不同播种行距与密度对小麦产量和水分利用效率的影响[J].陕西农业科学,2009,55(1):3-5.
- [30] Jiang X L, Tong L, Kang S Z, et al. Planting density affected biomass and grain yield of maize for seed production in an arid region of Northwest China[J].Journal of Arid Land,2018,10(2):292-303.

- [10] 战秀梅,彭靖,李秀龙,等.耕作及秸秆还田方式对春玉米产量及土壤理化性状的影响[J].华北农学报,2014,29(3):204-209.
- [11] 施平丽.配方施肥对巨峰葡萄园土壤理化性质及果实品质的影响研究[D].四川 雅安:四川农业大学,2017.
- [12] 聂军,郑圣先,廖育林,等.湖南双季稻种植区不同生产力水稻土的物理性质[J].应用生态学报,2010,21(11):2777-2784.
- [13] 潘彬.长期不同施肥及产胞外多糖菌株对土壤团聚体结构与生物活性的影响[D].南京:南京农业大学,2015.
- [14] 顾道健,薛朋,陆希婕,等.秸秆还田对水稻生长发育和稻田温室气体排放的影响[J].中国稻米,2014,20(3):1-5.
- [15] 刘威.连续秸秆还田对土壤结构性、养分和有机碳组分的影响[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [16] 田育天,李湘伟,谢新乔,等.秸秆还田对云南典型烟区土壤物理性状的影响[J].土壤,2019,51(5):964-969.
- [17] 江晶,武均,张仁陟,等.碳氮添加对雨养农田土壤物理性状的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):234-240.
- [18] 岳海晶,樊贵盛.灰色GM(0,N)模型在土壤田间持水量预测中的应用[J].节水灌溉,2016(1):19-22.
- [19] 颜永毫,郑纪勇,张兴昌,等.生物炭添加对黄土高原典型土壤田间持水量的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):120-124,190.
- [20] 杨滨娟,黄国勤,钱海燕.秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J].土壤学报,2014,51(1):150-157.
- [21] 王丽,李军,李娟,等.轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J].应用生态学报,2014,25(3):759-768.
- [22] 高洪军,彭畅,张秀芝,等.不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):75-79.
- [23] 蒋劭博.长期施肥对灰漠土团聚体形成及有机碳固存影响机制研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.
- [24] 李涵,张鹏,贾志宽,等.渭北旱塬区秸秆覆盖还田对土壤团聚体特征的影响[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):27-33.
- [25] 冀保毅.深耕与秸秆还田的土壤改良效果及其作物增产效应研究[D].郑州:河南农业大学,2013.
- [31] Zheng J, Fan J L, Zhang F C, et al. Mulching mode and planting density affect canopy interception loss of rainfall and water use efficiency of dryland maize on the Loess Plateau of China[J].Journal of Arid Land,2018,10(5):794-808.
- [32] 王新兵,侯海鹏,周宝元,等.条带深松对不同密度玉米群体根系空间分布的调节效应[J].作物学报,2014,40(12):2136-2148.