

种植密度对旱地不同株型春玉米品种光合特性与产量的影响

徐宗贵¹, 孙磊^{1,3}, 王浩², 王淑兰², 王小利², 李军²

(¹西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100; ³菏泽学院园林工程系, 山东菏泽 274015)

摘要:【目的】研究种植密度对渭北旱塬不同株型春玉米品种光合特性与产量差异的影响,旨在揭示旱地不同株型玉米品种对种植密度的响应规律,确定与降水资源相适应的适宜种植密度。【方法】于2015—2016年以豫玉22、郑单958和先玉335为供试品种,设置D1(5.25万株/hm²)、D2(6.75万株/hm²)、D3(8.25万株/hm²)和D4(9.75万株/hm²)4个种植密度处理,研究玉米各生育时期光合特性、叶面积指数(LAI)、干物质和产量相关性状的变化规律。【结果】(1)随着种植密度增加,光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)均降低,而LAI增加,密度每增加1万株/hm², P_n 降低1.32 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, T_r 降低0.297 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,LAI增加0.181。(2)有效穗数随种植密度增加而显著增加,但穗粒数和千粒重显著降低($P<0.05$),密度每增加1万株/hm²,穗粒数平均减少45粒,千粒重平均减小12g。3个品种籽粒产量均以D2密度最高,2015年豫玉22、郑单958、先玉335产量分别为10.52、9.59、9.14 t·hm⁻²,2016年分别为11.37、9.73、9.77 t·hm⁻²。密度从5.25万株/hm²增加到6.75万株/hm²,两年内平均籽粒产量分别提高了21.9%、19.5%和7.5%;密度从6.75万株/hm²增加到9.75万株/hm²,籽粒产量分别降低了19.8%、15.4%和7.7%。(3)春玉米基部茎粗、穗长随种植密度增加而逐渐减小。密度每增加1万株/hm²,穗长平均降低0.86 cm,基部茎粗平均减小0.09 cm,豫玉22和郑单958倒伏率随之增高,但先玉335各密度下均未出现倒伏。(4)收获指数在两年间差异较大,平均表现为2015年高于2016年,品种间表现为先玉335>郑单958>豫玉22。水分利用效率和光能利用率均随着种植密度增加而先增大后降低。【结论】渭北旱塬旱地豫玉22、郑单958和先玉335最适种植密度分别为7.25、7.40、7.32万株/hm²,其中豫玉22稳产性和丰产性较高,不同类型玉米品种最适种植密度范围为7.26—7.40万株/hm²,稀植型品种宜采用较低密度,密植型品种宜采用较高密度。

关键词: 渭北旱塬; 玉米; 品种; 密度; 光合特性; 资源利用效率

Effects of Different Planting Densities on Photosynthetic Characteristics and Yield of Different Variety Types of Spring Maize on Dryland

XU ZongGui¹, SUN Lei^{1,3}, WANG Hao², WANG ShuLan², WANG XiaoLi², LI Jun²

(¹College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi; ²College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi; ³Department of Landscape and Engineering, Heze University, Heze 274015, Shandong)

Abstract: 【Objective】Effects of different planting densities and different variety types of spring maize on physiological characteristics and yield in Weibei highland were investigated. The aim of this study was to determine the suitable maize varieties and their planting densities in dryland. 【Method】Field experiments were carried out by using spring maize cultivar Yuyu22, Zhengdan958, Xianyu335, and four planting density treatments including D1(52 500 plants/hm²), D2(67 500 plants/hm²), D3(82 500 plants/hm²) and D4(97 500 plants/hm²) were designed. The changes of photosynthetic characteristics, leaf area index(LAI), biomass

收稿日期: 2017-02-21; 接受日期: 2017-04-11

基金项目: 国家“863”计划(2013AA102902)、国家科技支撑计划(2015BAD22B02)、国家公益性行业(农业)科研专项(201303104)

联系方式: 徐宗贵, E-mail: xzgnwsuaf@sina.com. 通信作者李军, E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

yield and yield related traits of spring maize at different growth stages were observed. 【Result】(1)Photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (T_r) decreased with the increase of planting density, while LAI increased. P_n decreased by $1.32 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, T_r decreased by $0.297 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and LAI increased by 0.181 for each increase in density of 10 000 plants/ hm^2 . (2)The number of productive ear was remarkably increased with the increase of planting density, but the kernels per ear and 1 000-kernel weight were significantly decreased($P<0.05$). The kernels per ear decreased by 45 and the 1 000-kernel weight decreased by 12 g for each increase in density of 10 000 plants/ hm^2 . The yield of three maize varieties was the highest at D2 density. In treatment D2, the yield of Yuyu 22, Zhengdan 958, and Xianyu 335 were 10.52, 9.59, and 9.14 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ in 2015, and 11.37, 9.73, and 9.77 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ in 2016, respectively. The average yield of three maize varieties was increased by 21.9%, 19.5%, and 7.5%, respectively, within two years, when the density was increased from 52 500 plants/ hm^2 to 67 500 plants/ hm^2 . The average yield of three maize varieties was decreased by 19.8%, 15.4%, and 7.7%, respectively, within two years, when the density was increased from 67 500 plants/ hm^2 to 97 500 plants/ hm^2 . (3) The stem diameter, and ear length of spring maize decreased with the increase of planting density. The ear length decreased by 0.86 cm, the stem diameter decreased by 0.09 cm for each increase in density of 10 000 plants/ hm^2 . The lodging rate of Yuyu 22 and Zhengdan 958 rather than Xianyu 335 increased with the decrease of stem diameter. (4)The harvest index varied greatly in two years, the average performance was 2015>2016, and the varieties showed that Xianyu 335>Zhengdan 958>Yuyu 22. Water use efficiency(WUE) and radiation use efficiency(RUE) were increased with the increase of planting density and then decreased. 【Conclusion】The optimum planting density of different variety types of spring maize in Weibei dryland was different. Yuyu 22 was 72 500 plants/ hm^2 , Zhengdan 958 was 74 000 plants/ hm^2 , and Xianyu 335 was 73 200 plants/ hm^2 . Yuyu 22 had high stability and high yield. The optimum planting density of different variety types of spring maize was 72 600-74 000 plants/ hm^2 . Low density was recommended for thin planting varieties, and high density was recommended for close planting varieties.

Key words: Weibei highland; maize; variety; planting density; photosynthetic characteristic; resource use efficiency

0 引言

【研究意义】渭北旱塬位于陕西关中平原区以北、陕北丘陵沟壑区以南,属于暖温带半湿润易旱气候区,年降水 530—630 mm,且降水时空分布不均匀、变化大^[1],粮食生产以冬小麦和春玉米为主,光热水土条件有利于玉米稳产和高产^[2]。通过增加种植密度来提高玉米单产,是当前玉米品种改良和栽培耕作技术创新的重要方向。合理密植是获得玉米高产的重要途径,在一定范围内玉米单产与密度呈现正相关,密度过高则导致玉米产量降低^[3-4]。【前人研究进展】前人有关种植密度对玉米光合特性的影响研究表明,玉米干物质生产特性是植株光合产物积累与不同器官间分配的结果^[5]。水热条件和土壤肥力对玉米生长发育和产量形成具有重要影响^[6]。干旱胁迫会导致玉米蒸腾速率、光合速率和气孔导度等光合能力显著下降,但适度干旱胁迫能提高玉米叶片水分利用能力和水分利用效率(WUE),而过长和过重干旱胁迫会不可逆性地降低叶片光合能力^[7]。叶面积指数(LAI)、净同化速率是反映不同株型玉米品种耐密性的本质特征^[8]。LAI大小是影响玉米群体呼吸速率的重要因素,随 LAI 的增大(5 以下),群体呼吸速率不断增强^[9]。在一定密度范围内,玉米干物质积累量随密度增大而增加,但密度过大时则会制约群体干物质积累^[10]。只注重增加密

度提高穗数,易导致玉米群体密闭,通风透光性不良,中下部叶片受光变差^[11],中后期群体光合生产力下降,植株易产生倒伏,稳产性明显变差。陈延玲等^[12]研究表明,不同耐密性品种之间的根系特性差异主要表现在 0—40 cm 土层,密植主要降低 0—20 cm 土层中的根系生长,对深层根系影响较小。程帅等^[13]研究结果表明,施氮 $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,高密度种植使地上节根数平均减少 3—6 条,而地下节根数量不受影响,抗倒拉力降低 14%—29%,增加了倒伏的风险^[14]。王楷等^[15]研究指出,实现玉米 $15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上产量水平的最适种植密度范围为 7.15—14.45 万株/ hm^2 。不同生态区域适宜的玉米品种类型和种植密度差异显著,因地制宜确定合理密度是旱地玉米增产稳产的重要措施。种植密度对玉米冠层结构和功能的影响明显大于其他栽培措施^[16-17]。【本研究切入点】旱地玉米密植增产效应受土壤水分不足制约,针对渭北旱塬玉米品种杂、密度低等玉米生产中的主要问题,确定渭北旱塬半湿润易旱区旱地玉米合理的种植密度,有利于发挥密植增产效应,挖掘旱地玉米水分生产潜力,而目前关于渭北旱塬区不同春玉米品种类型合理密植效应的研究报道较少。【拟解决的关键问题】本研究选择不同株型玉米品种设置不同种植密度处理,研究不同株型玉米品种在不同种植密度下的光合指标和群体指标响应规律,分析品种类型和种植密度对旱

地玉米产量构成因素及产量的影响,旨在为渭北旱地玉米合理密植和增产稳产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015—2016 年于陕西省渭北旱塬东部合阳县甘井镇(35°20'N, 110°06'E, 海拔 877 m)进行。该地为暖温带半湿润偏旱大陆性季风气候区,无霜期 190 d,多年平均气温为 10.5℃,年降水量仅 550 mm,降水主要集中在 7—9 月,降雨年际间分配不均,以旱作农业为主。试验地为旱平地,土壤为黑垆土,土层有机质含量为 11.83 g·kg⁻¹,土壤容重平均为 1.31 g·cm⁻³,田间持水量平均为 31.2%。2015、2016 年春玉米生育期内太阳辐射量分别为 2 105 MJ·m⁻²、2 058 MJ·m⁻²,春玉米生育期内降水量分别为 288.6 mm、357.5mm,降水具体分布情况见图 1。

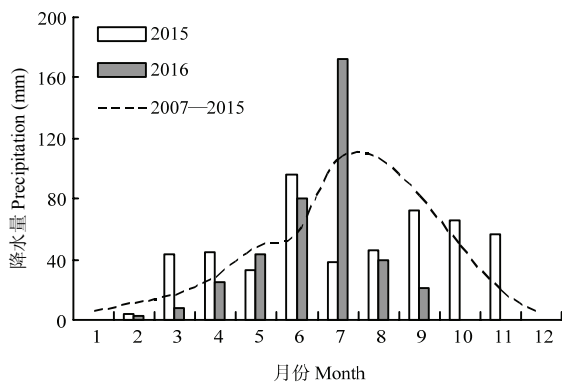


图 1 试验期间逐月份降雨量分布

Fig. 1 Distribution of monthly precipitation at the experimental site (2015-2016)

1.2 试验设计

本试验采用玉米品种和种植密度二因素裂区设计,种植密度为主处理,品种类型为副处理,设置 3 次重复。选择豫玉 22(稀植型)、郑单 958(紧凑型)、先玉 335(密植型)等 3 个品种类型。种植密度设置 D1(5.25 万株/hm²)、D2(6.75 万株/hm²)、D3(8.25 万株/hm²)、D4(9.75 万株/hm²)等 4 个水平,行距均为 50 cm,密度由株距控制,株距分别为 38.1、29.6、24.3、20.5 cm。小区面积 45.5 m²(13.0 m×3.5 m)。

豫玉 22 是河南农业大学玉米研究所育成的优良杂交种,属于大穗大粒稀植型品种,株型并不紧凑^[18]。

郑单 958 是河南省农业科学院粮食作物研究所育成的中早熟玉米单交种,具有高产、稳产、多抗、耐旱、优质、耐密和广适的特性^[19]。先玉 335 是由美国先锋公司选育的玉米杂交种,属于紧凑型品种,其个体株型具有独特的几何构形和空间排列方式,使个体与群体在较高的光合效率和物质生产水平上达到动态平衡,最终获得高产^[20]。

玉米两年播种期分别为 2015 年 4 月 26 日和 2016 年 4 月 30 日,收获期为 2015 年 9 月 25 日和 2016 年 9 月 16 日,施肥量为 150 kg N·hm⁻²(底肥)+75 kg N·hm⁻²(大喇叭口期追肥),120 kg P₂O₅·hm⁻²(底肥),90 kg K₂O·hm⁻²(底肥),其中所施氮肥、磷肥和钾肥分别为尿素、磷酸二铵和硫酸钾。在春玉米播种时,先人工将底肥撒施入试验田块,再通过旋耕机旋地时混入土壤。采用人工点播的方式播种,一穴两粒,拔节前间苗定苗。追肥用耧逐行条施。试验地春玉米其他田间管理措施与当地农户一致。

1.3 测定项目及方法

分别于苗期(2015 年 5 月 31 日和 2016 年 5 月 28 日)、拔节期(2015 年 6 月 19 日和 2016 年 6 月 18 日)、大喇叭口期(2015 年 7 月 5 日和 2016 年 7 月 3 日)、抽雄期(2015 年 7 月 23 日和 2016 年 7 月 25 日)、灌浆期(2015 年 8 月 26 日和 2016 年 8 月 22 日)对下列指标采样和分析:

(1) 光合指标。采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 型便携式光合系统分析仪^[21]在春玉米抽雄期于 9:00—11:30 进行光合作用的测定,测量叶为穗 3 叶。

(2) 单株叶面积和叶面积指数。在各生育时期,从每小区选取有代表性的植株 5 株,逐一测定其全部展开绿叶的长度与最大宽度,最后计算单株叶面积和叶面积指数(本试验暂未考虑未完全展开叶)。其中,单株叶面积为全株单叶面积之和,叶面积指数采用下式计算:

单叶面积=叶片长度×叶片宽度×0.75(0.75 为校正系数)^[22];

叶面积指数 LAI=(单株叶面积×单位土地面积内的株数)/单位土地面积;

平均叶面积指数 mLAI^[23]:各生育时期叶面积指数的平均值。

(3) 干物质积累量、基部茎粗、倒伏率。于成熟期,选择生长发育一致、叶片无病斑和破损的植株,用游标卡尺测量基部茎直径,并取地上部,在烘箱内

105℃杀青 30 min, 再经 85℃烘至恒重称干重, 重复 5 次; 倒伏率为倒伏面积占取样小区面积的比率, 其中测产区总面积为 28 m²。

(4) 测产与考种。实地计算实际公顷穗数, 春玉米收获期每小区取 4.5 m²样方玉米穗, 进行室内考种, 测定玉米穗长、穗粗、穗秃顶长、穗粒数、千粒重。

(5) 水分利用效率和光能利用率^[3,24]。WUE=Y/ET。式中, WUE 为水分利用效率 (kg·hm⁻²·mm⁻¹), Y 为籽粒产量 (kg·hm⁻²), ET 为玉米生育期耗水量 (mm)。

RUE=(H×W/Q)×100%。式中, RUE 为光能利用率, H 为单位质量干物质的产热率, 其中籽粒为 1.63×10³ kJ·kg⁻¹, 秸秆为 1.46×10³ kJ·kg⁻¹; W 为单位土地面积作物干物质的质量 (kg); Q 为生育期太阳总辐射量 (kJ)。

1.4 数据处理

使用 Excel 2010 和 Origin 2010 对数据进行处理及图表制作, 用 IBM SPSS Statistics 19 进行数据的统计分析, 不同处理间用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果

2.1 种植密度对不同品种类型春玉米抽雄期光合特性的影响

随种植密度增加, 2015—2016 年玉米叶片净光合

速率 (P_n) 和蒸腾速率 (T_r) 均表现为降低趋势 (表 1), 密度每增加 1 万株/hm², 净光合速率平均降低 1.32 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 蒸腾速率平均降低 0.297 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2016 年 3 个玉米品种在 4 个密度下抽雄期叶片净光合速率 (P_n) 均较 2015 年低。在 2015 年, D1、D2 和 D3 密度下净光合速率均值在品种间表现为: 先玉 335>豫玉 22>郑单 958; 但在 4 个密度下, 豫玉 22、郑单 958 和先玉 335 的净光合速率平均值分别为 29.0、28.1 和 29.0 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 蒸腾速率平均值分别为 5.96、6.02 和 5.99 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 2 个指标在 3 个品种间均差异不显著 ($P<0.05$)。在 2016 年, 4 个密度下净光合速率和蒸腾速率在不同品种间仍以先玉 335 最大; 在 D1、D2 和 D4 密度下, 豫玉 22 叶片净光合速率低于郑单 958, 平均低 4.3%; 4 个密度下豫玉 22、郑单 958 和先玉 335 净光合速率平均值分别为 25.8、26.9 和 28.3 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 3 个品种间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 种植密度对不同品种类型春玉米叶面积指数 (LAI) 的影响

从拔节期到抽雄期, 不同品种和密度处理下春玉米 LAI 均呈增长趋势, 增幅随生育期进程而逐渐增大 (图 2)。3 个品种不同密度处理下全生育期 LAI 平均值随密度增加而增大, 密度每增加 1 万株/hm², LAI 平均增加 0.181。2015 年抽雄期各品种 4 个密度

表 1 种植密度对不同品种类型玉米抽雄期光合特性的影响

Table 1 Changes of photosynthetic characteristics at tasseling stage under different planting densities and different variety types of spring maize

品种 Variety	密度 Density	光合速率 Photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		蒸腾速率 Transpiration rate ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	
		2015	2016	2015	2016
豫玉 22 Yuyu 22	D1	31.4±2.9ab	27.7±2.2b	6.60±0.33b	6.22±0.23c
	D2	30.6±2.6abc	25.7±2.1c	6.18±0.31c	6.08±0.37cd
	D3	28.5±2.3de	25.9±2.1c	5.80±0.28c	5.77±0.25de
	D4	25.4±2.1f	23.7±1.8d	5.25±0.23d	5.45±0.25ef
郑单 958 Zhengdan 958	D1	30.8±2.5ab	30.0±2.6a	6.77±0.37ab	6.06±0.29cd
	D2	29.8±2.5bcd	28.2±2.3b	6.73±0.35ab	5.93±0.28cf
	D3	27.2±2.2e	24.3±2.0cd	5.39±0.24d	5.76±0.27de
	D4	24.5±1.9f	24.1±2.0cd	5.20±0.28d	5.11±0.28f
先玉 335 Xianyu 335	D1	32.2±2.9a	30.1±3.1a	7.02±0.38a	7.37±0.31a
	D2	30.6±2.8abc	29.3±3.0ab	6.69±0.39a	6.92±0.20b
	D3	28.8±2.6cde	27.9±2.1b	5.25±0.22d	6.03±0.20cd
	D4	24.1±1.7f	25.7±3.0c	5.01±0.21d	6.01±0.25cd

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters in same column mean significant difference at the 0.05 level among different treatments. The same as below

处理 LAI 平均值表现为豫玉 22>先玉 335>郑单 958, 2016 年抽雄期各品种 4 个密度处理 LAI 平均值表现为先玉 335>豫玉 22>郑单 958, 并较 2015 年明显提高。3 个玉米品种全生育期 mLAI 与种植密度之间均呈现极显著线性相关关系(表 2), 而抽雄期最大 LAI 与产量呈现极显著二次曲线相关关系(表 3), 豫玉 22、郑单 958 和先玉 335 最大产量下的最大 LAI 分别为 4.168、4.364 和 3.963, 平均为 4.145。

表 2 春玉米生育期 mLAI 与种植密度回归关系

Table 2 Regression equation between mean LAI of growth period and planting densities of spring maize

品种 Variety	回归方程 Regression equation	R^2
豫玉 22 Yuyu 22	$y=0.1733x+0.6482$	0.9290**
郑单 958 Zhengdan 958	$y=0.1845x+0.4193$	0.8956**
先玉 335 Xianyu 335	$y=0.1845x+0.4704$	0.9025**
平均 Average	$y=0.1807x+0.5126$	0.8760**

*表示显著 ($P<0.05$) 相关; **表示极显著 ($P<0.01$) 相关。x: 密度, 万株/hm²。下同

* represents significant difference at the 0.05 level; ** represents significant different at the 0.01 level. x: Density, 10 000 plants/hm². The same as below

表 3 春玉米最大 LAI 与产量回归关系

Table 3 Regression equation between LAI at tasseling stage and grain yield of spring maize

品种 Variety	回归方程 Regression equation	R^2
豫玉 22 Yuyu 22	$y=-1.7006x^2+14.176x-18.973$	0.8211**
郑单 958 Zhengdan 958	$y=-0.6641x^2+5.7962x-3.2701$	0.6766**
先玉 335 Xianyu 335	$y=-0.7378x^2+5.8476x-2.0564$	0.8986**
平均 Average	$y=-0.8335x^2+6.9101x-4.7622$	0.6711**

2.3 种植密度对不同品种类型春玉米干物质积累的影响

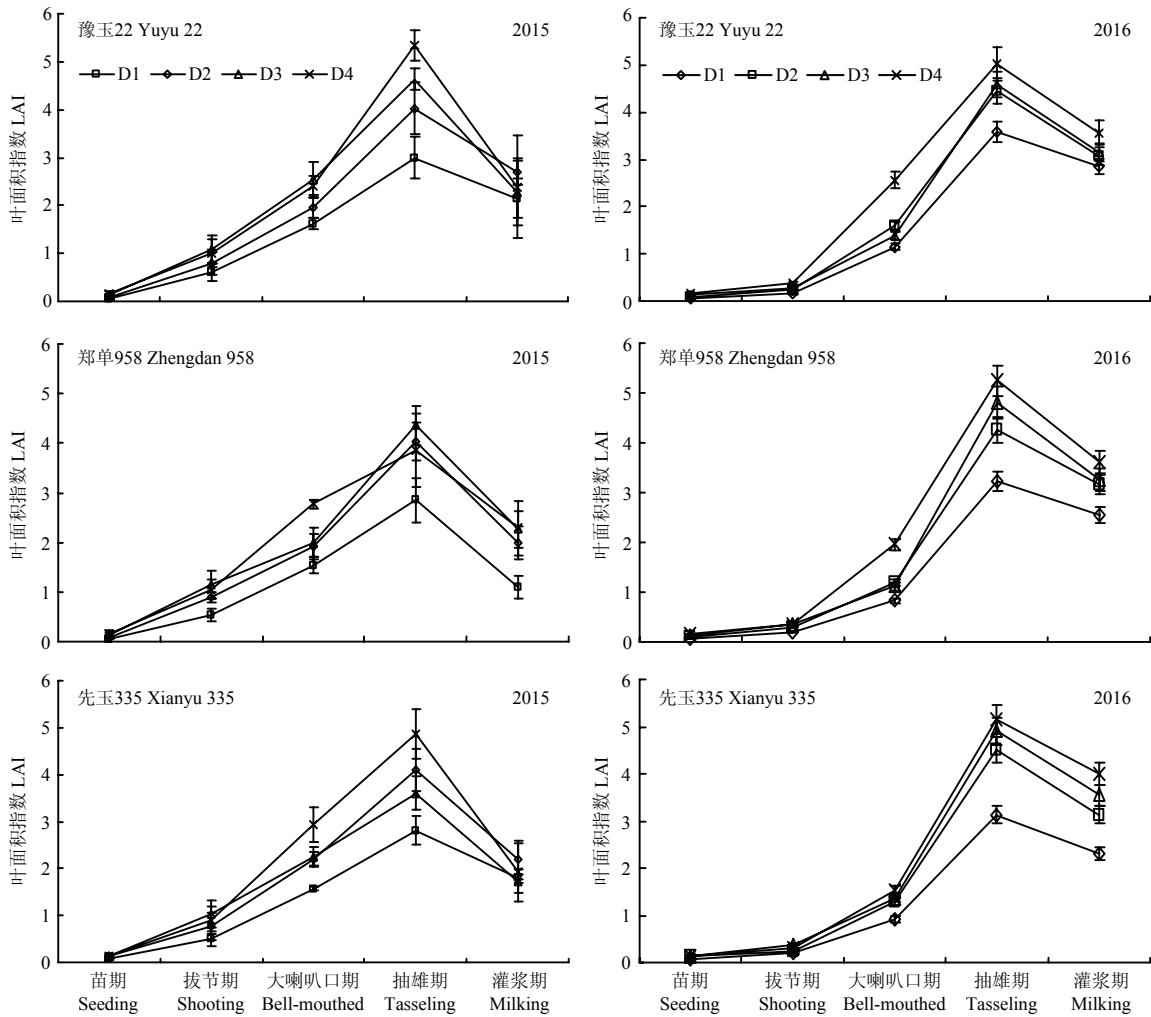
2015—2016 年不同种植密度处理下 3 个品种类型春玉米成熟期群体干物质积累量如图 3 所示, 2 年中相同品种群体干物质积累量变化趋势基本相一致, 即豫玉 22、郑单 958 群体干物质积累量在 D1—D3 密度下随种植密度增加而增大, 在 D3—D4 密度下随种植密度增加而降低, 群体干物质积累量与种植密度之间均存在显著或极显著二次曲线相关关系; 先玉 335 表现为群体干物质积累量随密度增大而逐步增加趋势, 2016 年群体干物质积累量增加趋势较 2015 年明显, D1—D4 密度处理间差异显著 ($P<0.05$)。2015—2016

年豫玉 22、郑单 958 和先玉 335 在 4 个密度处理下群体干物质积累量平均值分别为 22.2、20.0 和 19.3 t·hm⁻²。豫玉 22、郑单 958 和先玉 335 最大群体干物质积累量分别为 24.03、21.40 和 20.90 t·hm⁻², 对应密度分别为 8.10 万株/hm²、8.53 万株/hm² 和 10.85 万株/hm², 平均为 8.55 万株/hm²。

2.4 种植密度对不同品种类型春玉米产量及其构成因素的影响

种植密度对不同品种类型玉米产量及其构成因素的影响见表 4。随着种植密度增加, 2015—2016 年单位面积有效穗数显著增加, 而穗粒数和千粒重显著降低 ($P<0.05$)。密度从 D1 增至 D4, 3 个品种平均穗粒数降低 31.9%, 平均千粒重降低 20.2%, 表明穗粒数降低对产量影响较大。不同密度下各品种籽粒产量均表现为 D2>D3>D1>D4, 即 6.75 万株/hm²>8.25 万株/hm²>5.25 万株/hm²>9.75 万株/hm²。在 D1 与 D2 之间, 3 个供试玉米品种产量均随着密度增加而增大, 种植密度从 5.25 万株/hm² 增大到 6.75 万株/hm², 豫玉 22、郑单 958 和先玉 335 产量分别提高了 2.09 t·hm⁻² (24.8%)、1.45 t·hm⁻² (15.1%) 和 0.76 t·hm⁻² (8.3%)。D2 密度时豫玉 22、郑单 958、先玉 335 产量分别为 10.52、9.59、9.14 t·hm⁻²。当密度大于 D2 时, 玉米产量均随着密度增加而降低, 豫玉 22 在 D3、D4 密度下分别较 D2 降低 0.78 t·hm⁻² (7.4%)、2.28 t·hm⁻² (21.7%), 郑单 958 分别降低 0.76 t·hm⁻² (7.9%)、1.97 t·hm⁻² (20.5%), 先玉 335 产量降幅较小, 分别降低 0.04 t·hm⁻² (0.4%)、0.88 t·hm⁻² (9.6%)。

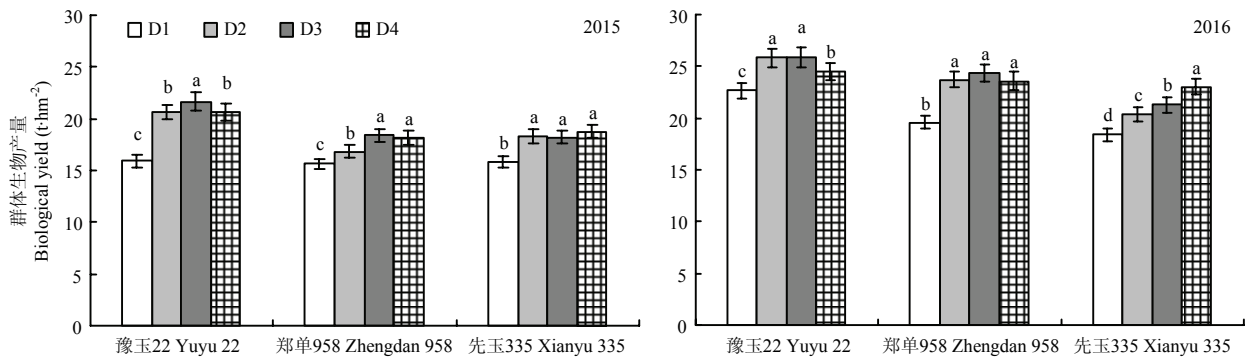
在 4 个密度处理下, 2015—2016 年豫玉 22、郑单 958 和先玉 335 籽粒产量平均值分别为 9.6、8.7 和 9.1 t·hm⁻²。2016 年各处理玉米产量较 2015 年平均提高 7.4%, 2016 年玉米穗粒数和千粒重分别较 2015 年提高 6.6%、1.9%, 由于 2 年间单位面积穗数基本稳定, 这表明 2016 年产量增加主要是由于穗粒数提高所致。2016 年收获指数较 2015 年有所降低, 收获指数均随着密度增加而降低。3 个玉米品种穗粒数、千粒重与种植密度之间均存在极显著负线性相关关系(表 5), 密度每增加 1 万株/hm², 穗粒数平均减小 45 粒, 千粒重平均减小 12 g。而产量与种植密度之间均存在极显著二次曲线相关关系, 豫玉 22、郑单 958 和先玉 335 达到最高产量对应密度分别为 7.34、7.47 和 7.39 万株/hm², 平均为 7.40 万株/hm²。



D1、D2、D3 和 D4 分别代表种植密度为 5.25、6.75、8.25 和 9.75 万株/hm²。下同
 D1, D2, D3, and D4 denote the plant density of 5.25, 6.75, 8.25, 9.75×10⁴ plant/hm², respectively. The same as below

图 2 密度对供试品种不同生育期叶面积指数 (LAI) 的影响

Fig. 2 Effect of planting density on the leaf area index (LAI) of testing varieties at different growth stages



图柱上不同小写字母表示同一品种不同密度间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters above the bars mean significant difference at 0.05 level under different planting densities in the same variety

图 3 种植密度对不同品种类型春玉米干物质积累的影响

Fig. 3 Effect of different planting densities on biological yield of different variety types of spring maize

表 4 种植密度对不同品种类型春玉米产量及其构成因素的影响

Table 4 Changes of grain yield and its components under different planting density and different varieties types of spring maize

年份 Year	品种 Variety	种植密度 Density ($\times 10^4$ 株/hm ²)	穗数 Ear number ($\times 10^3$ ·hm ⁻²)	穗粒数 Kernels per ear	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Grain yield (t·hm ⁻²)	收获指数 Harvest index	
2015	豫玉 22 Yuyu 22	D1	51.87d	575.8bc	282.2a	8.43de	0.53b	
		D2	66.76c	564.9c	279.0a	10.52a	0.51bc	
		D3	81.68b	471.4d	253.0c	9.74b	0.45de	
		D4	96.53a	349.9e	243.9de	8.24def	0.40f	
	郑单 958 Zhengdan 958	D1	51.98d	596.3b	262.5b	8.14ef	0.52b	
		D2	66.96c	594.6b	240.9ef	9.59bc	0.57a	
		D3	81.68b	467.2d	231.4g	8.83cd	0.48cd	
		D4	96.43a	375.4e	210.5h	7.62f	0.42ef	
	先玉 335 Xianyu 335	D1	52.03d	643.5a	250.2cd	8.38de	0.53b	
		D2	66.69c	570.9bc	240.1ef	9.14b	0.50bc	
		D3	81.84b	474.0d	234.7fg	9.10bc	0.50bc	
		D4	96.43a	396.8e	215.7h	8.26def	0.44e	
	2016	豫玉 22 Yuyu 22	D1	51.23d	635.7a	292.7a	9.53bc	0.42bc
			D2	65.29c	627.8a	277.5bc	11.37a	0.44b
			D3	81.64b	510.6d	242.2f	10.10b	0.39ede
			D4	92.62a	465.8f	215.7g	9.31cd	0.38ede
郑单 958 Zhengdan 958		D1	51.66d	570.1bc	272.6c	8.03e	0.41bcd	
		D2	65.69c	560.5c	264.3d	9.73bc	0.41bcd	
		D3	80.66b	502.3d	234.4f	9.50bc	0.39ede	
		D4	92.74a	439.5g	214.2g	8.73d	0.37e	
先玉 335 Xianyu 335		D1	51.28d	639.4a	281.0b	9.21cd	0.50a	
		D2	65.92c	579.6b	255.7e	9.77bc	0.48a	
		D3	80.63b	484.1e	239.8f	9.36cd	0.44b	
		D4	94.37a	465.2f	209.5g	9.20cd	0.40ede	
F 值		品种 Variety		0.054	0.483	8.399**	5.626*	2.026
F-value		密度 Density		1222.939 **	33.619 **	28.400**	10.134**	1.091
		品种×密度 Variety×Density		0.115	0.400	0.289	0.798	1.277

2.5 种植密度对不同品种类型春玉米植株倒伏与穗部性状的影响

2015—2016 年植株密度对春玉米植株基部茎粗、植株倒伏率、穗长和穗秃顶长的影响如表 6 所示。豫玉 22、郑单 958、先玉 335 在 4 个密度下基部茎粗平均值分别为 2.28、2.20、2.16 cm, 随种植密度增大, 各春玉米品种植株基部茎粗逐渐减小, 密度从 D1 增大到 D4, 豫玉 22、郑单 958、先玉 335 基部茎粗 2 年平均分别减少 0.33、0.51 和 0.38 cm, 密度每增加 1 万株/hm², 基部茎粗平均减小 0.09 cm。随着基部茎粗变细, 豫玉 22、郑单 958 倒伏率明显增大, 密度每增加 1 万株/hm², 倒伏率增加 5%, 但品种间差异显著,

先玉 335 在各密度下均无倒伏。

随种植密度增大, 各春玉米品种穗长逐渐减小, 密度每增加 1 万株/hm², 穗长平均降低 0.86 cm。在相同密度下, 玉米穗长表现为豫玉 22>先玉 335>郑单 958。豫玉 22 和郑单 958 在 D2 密度下穗秃顶长较小, 大于 D2 密度时随着密度增加穗秃顶长增大, 先玉 335 在 D1—D4 密度下穗秃顶长逐渐增大, 郑单 958 和先玉 335 穗秃顶长 D4 密度较 D1 密度 2 年平均增加 0.25 cm 和 1.38 cm。

2.6 种植密度对不同品种类型春玉米资源利用效率的影响

随种植密度增加, 2015—2016 年 3 个玉米品种水

表 5 春玉米产量及其构成因素与种植密度回归关系
Table 5 Regression equation between grain yield, yield components and planting densities of spring maize

项目 Item	品种 Variety	回归方程 Regression equation	R ²
产量 Grain yield	豫玉 22 Yuyu 22	$y = -0.3456x^2 + 5.0740x - 7.9906$	0.6778**
	郑单 958 Zhengdan 958	$y = -0.2850x^2 + 4.2600x - 6.3459$	0.7489**
	先玉 335 Xianyu 335	$y = -0.1289x^2 + 1.9053x + 2.3750$	0.6954**
	平均 Average	$y = -0.2531x^2 + 3.7464x - 3.9872$	0.6699**
	穗粒数 Kernels per ear	豫玉 22 Yuyu 22	$y = -46.603x + 874.76$
郑单 958 Zhengdan 958		$y = -41.337x + 823.26$	0.8420**
先玉 335 Xianyu 335		$y = -48.503x + 895.46$	0.9428**
平均 Average		$y = -45.481x + 864.50$	0.8338**
千粒重 1000-kernel weight		豫玉 22 Yuyu 22	$y = -13.573x + 362.58$
	郑单 958 Zhengdan 958	$y = -12.353x + 334.00$	0.9067**
	先玉 335 Xianyu 335	$y = -11.310x + 325.66$	0.8051**
	平均 Average	$y = -12.412x + 340.75$	0.7302**

分利用效率 (WUE) 呈现先增加后降低趋势 (表 7), 均以 D2 密度处理 WUE 最高 (2015 年先玉 335 以 D3 密度最高), D3 和 D4 密度处理依次降低。2015—2016

表 6 种植密度对不同品种类型春玉米产量相关性状的影响

Table 6 Changes of yield characters under different planting densities and different variety types of spring maize

种 Variety	密度 Density	基部茎粗 Stem diameter (cm)		倒伏率 Lodging rate (%)		穗长 Ear length (cm)		穗秃顶长 Bald long (cm)	
		2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
豫玉 22 Yuyu 22	D1	2.12bc	2.96a	0e	0d	19.73a	22.39a	2.01a	1.86b
	D2	2.18b	2.29cd	10c	5c	18.88a	21.36ab	1.16c	1.77b
	D3	2.15bc	2.14ef	15b	12ab	17.09b	18.58cde	1.45b	1.87b
	D4	2.08bc	2.34cd	20a	15a	15.29c	17.78de	1.59b	1.71b
郑单 958 Zhengdan 958	D1	2.04cd	2.78b	0e	0	17.99a	19.50cd	1.34b	0.30d
	D2	2.14bc	2.82b	3e	4c	17.31ab	18.35cde	1.09c	0.45d
	D3	1.94de	2.06f	5d	10b	15.79bc	17.42e	1.54ab	0.31d
	D4	1.69f	2.11f	10c	15a	15.26c	17.00e	1.76a	0.38d
先玉 335 Xianyu 335	D1	2.35a	2.39c	0e	0d	19.69a	22.10a	1.07d	0.87c
	D2	2.05bcd	2.40c	0e	0d	17.49b	18.76cde	1.36c	1.98b
	D3	1.88e	2.24de	0e	0d	15.98bc	19.69bc	1.68b	2.06b
	D4	1.84e	2.14ef	0e	0d	15.38c	17.39e	2.08a	2.62a

年豫玉 22 和郑单 958 光能利用率 (RUE) 均随密度增加而先增加后降低, 且均在 D3 密度下达到最大值 (2016 年豫玉 22 以 D2 密度最大), 而先玉 335 随密度增加逐渐增加。3 个玉米品种 WUE、RUE 与种植密度之间均存在显著或极显著二次曲线相关关系 (表 8)。豫玉 22、郑单 958 和先玉 335 最高 WUE 对应密度分别为 7.16、7.36 和 7.25 万株/hm², 平均为 7.26 万株/hm²; 最高 RUE 对应密度分别为 8.06、8.44 和 10.51 万株/hm², 平均为 8.47 万株/hm²。

3 讨论

玉米产量形成的物质基础, 一方面取决于叶片光合作用形成碳水化合物的多少, 另一方面取决于籽粒对碳水化合物的转化积累。单位面积有效穗数随着密度增加而增加, 但不同株型耐密性不同, 当密度达到一定程度时, 有效穗数、穗粒数随密度增加而减少^[25]。

3.1 品种类型对光合特性及产量的影响

探讨品种的适宜种植密度历来是育种工作中不可缺少的环节^[26]。提高作物产量和光能利用率是科学研究的目的所在^[27-28]。本试验分别选用了大穗大粒型品种豫玉 22^[18]、矮秆紧凑型品种郑单 958^[19]和密植抗倒型品种先玉 335^[20], 先玉 335 和郑单 958 均依靠小根系和较高根系可塑性适应高密度^[12], 这种小根系可减少株间水肥竞争, 使单株生长保持均一, 达到较优群体结构, 进而在高密度下仍保持较高的单株产量。本研究表明, 在不同密度处理下 3 个玉米品种 Pn、Tr

表 7 种植密度对不同品种类型春玉米水分利用效率和光能利用率的影响

Table 7 Changes of WUE and RUE under different planting densities and different variety types of spring maize

品种 Variety	密度 Density	耗水量 ET (mm)		光能利用率 RUE (%)		水分利用效率 WUE (kg·hm ⁻² mm ⁻¹)	
		2015	2016	2015	2016	2015	2016
豫玉 22	D1	434.4	438.7	1.2de	1.7c	19.4cd	21.7a
Yuyu 22	D2	448.4	497.0	1.5a	1.9a	23.5a	22.9a
	D3	433.8	468.0	1.6a	1.9a	22.5ab	21.6a
	D4	429.6	510.6	1.5a	1.8b	19.2d	18.2cd
	郑单 958	D1	434.4	467.2	1.2e	1.4ef	18.7de
Zhengdan 958	D2	454.5	454.2	1.2cd	1.7bc	21.1bc	21.4ab
	D3	452.5	481.9	1.3b	1.8b	19.5cd	19.7bc
	D4	451.9	470.0	1.3bc	1.7bc	16.9e	18.6cd
	先玉 335	D1	465.8	480.7	1.2de	1.4f	18.0de
Xianyu 335	D2	476.8	460.0	1.3b	1.5d	19.2d	21.2ab
	D3	466.8	497.0	1.3b	1.6de	19.5cd	18.8cd
	D4	462.8	491.7	1.4b	1.7c	17.8de	18.7cd

表 8 春玉米 WUE 和 RUE 与种植密度回归关系

Table 8 Regression equation between WUE, RUE and planting densities of spring maize

项目 Item	品种 Variety	回归方程 Regression equation	R ²
光能利用率 RUE	豫玉 22	$y = -0.0425x^2 + 0.6847x - 1.005$	0.9849**
	Yuyu 22		
	郑单 958	$y = -0.0267x^2 + 0.4507x - 0.342$	0.9909**
	Zhengdan 958		
	先玉 335	$y = -0.0091x^2 + 0.1912x + 0.516$	0.9555**
	Xianyu 335		
水分利用效率 WUE	平均	$y = -0.0261x^2 + 0.4422x - 0.277$	0.5365*
	Average		
	豫玉 22	$y = -0.6667x^2 + 9.5533x - 11.150$	0.8494**
	Yuyu 22		
	郑单 958	$y = -0.5722x^2 + 8.4333x - 10.316$	0.7379**
	Zhengdan 958		
先玉 335	先玉 335	$y = -0.2778x^2 + 4.0267x + 5.256$	0.4619*
	Xianyu 335		
	平均	$y = -0.5056x^2 + 7.3378x - 5.403$	0.6690**
	Average		

变化趋势一致，但品种间差异不显著 ($P < 0.05$)。在较低密度下，3 个品种蒸腾速率较高，而光合速率不受影响，但随着密度增大，水分成为限制因子，蒸腾作用减弱，光合速率显著降低。但单株光合速率降低时，密植群体优势可以暂时弥补单株劣势，群体干物质积累和产量表现为增大；而随着水分胁迫加剧，单株劣势也加大，最终群体干物质和产量均降低。本研究还发现，随种植密度增加玉米基部茎粗变细，穗长减小，穗秃顶长增加，同时倒伏率也呈线性增大，增

大了机械收获作业难度及成本投入。不同品种间的植株光合指标与产量关系并不一致，如 2016 年豫玉 22 光合速率较郑单 958 和先玉 335 低，但其平均产量最高。2015—2016 年不同品种间玉米群体干物质积累变化规律相似，均以豫玉 22 干物质积累量最高，其次为先玉 335，这与周婷婷等^[3]研究结果中“先玉 335 干物质积累量最高”有所不同，这可能与试验年份降水量及其分布有关。

禾谷类作物产量是由单位面积有效穗数、每穗粒数和千粒重三个因素构成的^[29-30]。合理密植是提高旱地玉米产量的关键因素。增加种植密度能增大群体库容，从而提高玉米群体产量^[31]。本研究发现，2015—2016 年品种间在 4 个密度下产量平均值表现为豫玉 22 > 先玉 335 > 郑单 958。郑单 958 在 2015 年 D2 密度下产量高于先玉 335，但其稳产性低，随着种植密度增大其产量降幅较先玉 335 大，最终平均产量低于先玉 335。

3.2 种植密度对光合特性及产量的影响

适宜密度有利于缓解个体与群体矛盾，构建合理的群体结构，利于穗数、穗粒数和粒重的协调发展，但密度是影响玉米产量的重要因素之一。聂林雪等^[11]研究指出，随密度增加玉米产量提高，但密度过大会导致玉米群体通风透光不良，中下部叶片受光变差，光合速率下降。本研究发现随着种植密度增大玉米单位面积的干物质质量和产量均有所提高，这与程师等^[13]的研究结果一致，但增大种植密度同时也增加了倒伏

的风险^[5,32]。中度和重度水分胁迫条件下,玉米叶片水分利用效率有时甚至高于正常供水条件下的水分利用效率,水分胁迫能使玉米叶片的水分利用效率提高,从而增强叶片对水分的利用能力,抵御干旱逆境^[13]。在同一年内降水相同,增加种植密度也相当于增强了水分胁迫,本研究中 2015—2016 年随密度增加 3 个品种净光合速率 (Pn) 和蒸腾速率 (Tr) 等光合特性逐渐降低^[25]。

叶面积指数是量化玉米群体冠层结构的重要指标^[33],增大种植密度可增加早期光能截获,形成较大绿色覆盖层,但遮阴降低光辐射,导致玉米 LAI 降低显著^[34-35]。同时高密度种植加剧了根系对养分、水分的竞争,并且高密度影响了根系干重和在土壤中的垂直分布,群体密度的增大往往导致株间对光、肥、水的竞争^[13,36]。陈延玲等^[12]研究表明,不管水培或田间条件下,随着密度升高,总根长和根干重都显著减少。干物质积累减少,最终导致产量降低^[11]。本研究与杨吉顺等^[37]、宋振伟等^[38]研究一致,从拔节期到抽雄期 3 个品种叶面积指数平均值,均随着种植密度增加和生育期进程依次增大,抽雄期到灌浆期又开始降低,且降幅随种植密度增加而增大。同时,降水也对不同密度下的叶面积指数产生影响。群体干物质质量取决于单株干物质质量与密度的乘积(图 3),3 个品种在 4 个种植密度下表现出“先增后降”的变化趋势,这是群体优势与单株劣势之间消长的结果。当群体优势>单株劣势,表现为“增”,群体优势<单株劣势,表现为“减”。高密度种植形成大量秸秆,在渭北旱塬还田后分解慢,影响来年播种出苗,虽然提高了 RUE,但高密度又会造成土壤水分过耗而不利于可持续发展。

本研究 3 个品种的种植密度与籽粒产量关系均呈现“抛物线”型,即密度过高或过低都导致减产,这与刘伟等的研究一致^[39]。刘镜波等^[40]研究发现,随种植密度增加,玉米地上节根数量与总根数量明显减少,玉米植株抗倒伏能力明显削弱^[13]。同时密度越大产量变幅越大,稳产性也越差^[5]。因此,因地制宜进行合理密植,使群体和个体矛盾得到协调,即使单株产量随密度增加而降低,但在合理密植范围内群体优势弥补了单株劣势,使穗数、穗粒数、粒重三者乘积达到最大值,最终获得高产^[41-42]。

本试验研究结果表明,密度主要通过影响玉米穗粒数来影响单株产量^[15],豫玉 22 产量最高平均为 10.95 t/hm²。在 D2 和 D3 密度(即 6.75 和 8.25 万株/hm²)下,3 个供试玉米品种均达到本品种的最高产量和次高产

量,进一步结合产量、干物质积累量、WUE、RUE 与密度的回归方程,可以确定种植密度为 7.26 万株/hm² 时具有最大 WUE,7.40 万株/hm² 时具有最大产量,8.47 万株/hm² 时具有最大 RUE,8.55 万株/hm² 时具有最大干物质积累量,但本研究追求的是最大经济产量,且高密度下籽粒产量降低,群体倒伏率线性增加。因此,将最大 WUE 和最大产量对应密度(7.26—7.40 万株/hm²)作为最佳种植密度范围。本研究还发现,具有较大遗传背景差异的春玉米品种最高籽粒产量种植密度没有本质上的差异,这主要由于在旱地缺水条件下,玉米自身遗传潜力得不到充分发挥。本试验仅有两年的大田数据,因此,对于试验结果及其规律性有待进一步研究。

4 结 论

渭北旱地不同株型春玉米品种最适种植密度:稀植型品种豫玉 22 为 7.25 万株/hm²,紧凑型品种郑单 958 为 7.40 万株/hm²,密植型品种先玉 335 为 7.32 万株/hm²。豫玉 22 在不同降水年份仍能保持高产水平,适合在渭北旱地推广种植。种植密度对春玉米光合能力、光合生产力、资源利用效率及产量的影响显著。渭北旱地春玉米种植密度宜采用 7.26—7.40 万株/hm²,对于稀植型品种采用低密度,对于密植型品种可以采用高密度。

References

- [1] 陈宁宁,李军,吕薇,王淑兰.不同轮耕方式对渭北旱塬麦玉轮作田土壤物理性状与产量的影响.中国生态农业学报,2015,23(9):1102-1111.
CHEN N N, LI J, LÜ W, WANG S L. Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties and yield of winter wheat-spring maize rotation field in Weibei highland. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9): 1102-1111. (in Chinese)
- [2] 李荣,王敏,贾志宽,侯贤清,杨宝平,韩清芳,聂俊峰,张睿.渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响.农业工程学报,2012,28(2):106-113.
LI R, WANG M, JIA Z K, HOU X Q, YANG B P, HAN Q F, NIE J F, ZHANG R. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(2): 106-113. (in Chinese)
- [3] 周婷婷,李军,司政邦.种植密度与品种类型对渭北旱地春玉米生长和光能利用的影响.西北农林科技大学(自然科学版),2015,11(7):54-62.

- ZHOU T T, LI J, SI Z B. Effects of planting density and different variety types on growth and RUE of spring maize in Weibei Highland. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science)*, 2015, 11(43): 54-62. (in Chinese)
- [4] 陈传永, 侯玉虹, 孙锐, 朱平, 董志强, 赵明. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析. *作物学报*, 2010, 36(7): 1153-1160.
- CHEN C Y, HOU Y H, SUN R, ZHU P, DONG Z Q, ZHAO M. Effects of planting density on yield performance and density-tolerance analysis for maize hybrids. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7): 1153-1160. (in Chinese)
- [5] 于吉琳, 聂林雪, 郑洪兵, 张卫建, 宋振伟, 唐建华, 林志强, 齐华. 播期与密度对玉米物质生产及产量形成的影响. *玉米科学*, 2013, 21(5): 76-80.
- YU J L, NIE L X, ZHENG H B, ZHANG W J, SONG Z W, TANG J H, LIN Z Q, QI H. Effects of sowing date and density on maize material production and yield formation. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(5): 76-80. (in Chinese)
- [6] 白彩云, 李少昆, 张厚宝, 柏军华, 谢瑞芝, 孟磊. 郑单 958 在东北春玉米区生态适应性研究. *作物学报*, 2010, 36(2): 296-302.
- BAI C Y, LI S K, ZHANG H B, BAI J H, XIE R Z, MENG L. Ecological adaptability of Zhengdan 958 hybrid in northeast of China. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(2): 296-302. (in Chinese)
- [7] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 赵先丽, 张玉书. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应. *生态学报*, 2015, 35(9): 2902-2909.
- YU W Y, JI R P, FENG R, ZHAO X L, ZHANG Y S. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2902-2909. (in Chinese)
- [8] 薛吉全, 梁宗锁, 马国胜, 路海东, 任建宏. 玉米不同株型耐密性的群体生理指标研究. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 55-59.
- XUE J Q, LIANG Z S, MA G S, LU H D, REN J H. Study on population physiological indexes of different plant types in maize. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 55-59. (in Chinese)
- [9] 董树亭, 胡昌浩, 高荣岐, 王群瑛. 夏玉米高产群体呼吸速率与光合特性关系的研究. *玉米科学*, 1994, 2(3): 61-65.
- DONG S T, HU C H, GAO R Q, WANG Q Y. Relationship between canopied respiratory rate and photosynthetic characteristics of high-yielding summer maize. *Maize Science*, 1994, 2(3): 61-65. (in Chinese)
- [10] 刘志新. 不同耐密性玉米的密植效应及耐密性遗传规律研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009: 95-97.
- LIU Z X. Study on the close planting effect and the hereditary law of density tolerance of maize with different densities[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009: 95-97. (in Chinese)
- [11] 聂林雪, 逢焕成, 朱海燕, 李玉义, 于吉琳, 吴亚男, 齐华. 播期与密度对郑单 958 产量形成的影响. *玉米科学*, 2014, 22(5): 104-108.
- NIE L X, PANG H C, ZHU H Y, LI Y Y, YU J L, WU Y N, QI H. Effects of sowing date and planting density on Zhengdan 958 yield formation. *Journal of Maize Sciences*, 2014, 22(5): 104-108. (in Chinese)
- [12] 陈延玲, 吴秋平, 陈晓超, 陈范骏, 张永杰, 李前, 袁力行, 米国华. 不同耐密性玉米品种的根系生长及其对种植密度的响应. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 52-59.
- CHEN Y L, WU Q P, CHEN X C, CHEN F J, ZHANG Y J, LI Q, YUAN L X, MI G H. Root growth of maize varieties with different densities and its response to planting density. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 52-59. (in Chinese)
- [13] 程帅, 李鹏程, 刘志刚, 赵龙飞, 米国华, 袁力行, 陈范骏. 密度、氮肥对玉米杂交种节根数量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 1118-1125.
- CHENG S, LI P C, LIU Z G, ZHAO L F, MI G H, YUAN L X, CHEN F J. Effects of planting density and nitrogen fertilizer on root nodules of maize hybrids. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 1118-1125. (in Chinese)
- [14] 田再民, 黄智鸿, 陈建新, 史宝林, 魏东, 瞿文洁, 李环. 种植密度对 3 个紧凑型玉米品种抗倒伏性和产量的影响. *玉米科学*, 2016, 24(5): 83-88.
- TIAN Z M, HUANG Z H, CHEN J X, SHI B L, WEI D, ZHAI W J, LI H. Effects of planting density on lodging resistance and yield of three compact maize varieties. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(5): 83-88. (in Chinese)
- [15] 王楷, 王克如, 王永宏, 赵健, 赵如浪, 王喜梅, 李健, 梁明晰, 李少昆. 密度对玉米产量 ($>15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 及其产量构成因子的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(16): 3437-3445.
- WANG K, WANG K R, WANG Y H, ZHAO J, ZHAO R L, WANG X M, LI J, LIANG M X, LI S K. Effects of density on maize yield ($>15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) and yield components. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(16): 3437-3445. (in Chinese)
- [16] 李明, 李文雄. 肥料和密度对寒地高产玉米源库性状及产量的调节作用. *中国农业科学*, 2004, 37(8): 1130-1137.
- LI M, LI W X. Regulation of fertilizer and density on sink, source traits, and yield of maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(8): 1130-1137. (in Chinese)
- [17] 方日尧, 同延安, 赵二龙, 梁东丽. 渭北旱塬不同保护性耕作方式

- 水肥增产效应研究. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 54-57.
- FANG R Y, TONG Y A, ZHAO E L, LIANG D L. Effect of conservation tillage on moisture, fertility and yield in Weibei Highland. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2003, 21(1): 54-57. (in Chinese)
- [18] 陈伟程. 玉米杂交种豫玉22号快速持续大面积推广的启示和分析. 河南农业科学, 2001, 30(7): 7-9.
- CHEN W C. Revelation and analysis with maize hybrids and Yuyu 22 rapid continuous large extension. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2001, 30(7): 7-9. (in Chinese)
- [19] 堵纯信, 曹春景, 曹青. 玉米杂交种郑单 958 的选育与应用. 玉米科学, 2006, 14(6): 43-45, 49.
- DU C X, CAO C J, CAO Q. The breeding and application of maize hybrid Zhengdan 958. *Journal of Maize Sciences*, 2006, 14(6): 43-45, 49. (in Chinese)
- [20] 李永泉, 侯文英. 先玉 335 增产机理与山旱地高产栽培. 种子科技, 2008, 10(2): 65-66.
- LI Y Q, HOU W Y. The production mechanism and dryland high-yield cultivation of Xianyu 335. *Seed Science & Technology*, 2008, 10(2): 65-66. (in Chinese)
- [21] 张倩, 张洪生, 宋希云, 姜雯. 种植方式和密度对夏玉米光合特征及产量的影响. 生态学报, 2015, 35(4): 1235-1241.
- ZHANG Q, ZHANG H S, SONG X Y, JIANG W. The effects of planting patterns and densities on photosynthetic characteristics and yield of summer maize. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4): 1235-1241. (in Chinese)
- [22] 王庆燕, 叶德练, 张钰石, 李建民, 张明才, 李召虎. 种植行向对玉米茎叶形态建成与产量的调控效应. 作物学报, 2015, 41(9): 1384-1392.
- WANG Q Y, YE D L, ZHANG Y S, LI J M, ZHANG M C, LI Z H. Effects of row orientation on leaf and stalk morphogenesis and grain yield in maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(9): 1384-1392. (in Chinese)
- [23] 孙雪芳, 丁在松, 侯海鹏, 葛均筑, 唐丽媛, 赵明. 不同春玉米品种花后光合物质生产特点及碳氮含量变化. 作物学报, 2013, 39(7): 1284-1292.
- SUN X F, DING Z S, HOU H P, GE J Z, TANG L Y, ZHAO M. Post-anthesis photosynthetic assimilation and the changes of carbon and nitrogen in different varieties of spring maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(7): 1284-1292. (in Chinese)
- [24] 尚金霞, 李军, 贾志宽, 张丽华. 渭北旱塬春玉米田保护性耕作蓄水保墒效果与增产增收效应. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2668-2678.
- SHANG J X, LI J, JIA Z K, ZHANG L H. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures in spring maize field on Weibei Highland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(13): 2668-2678. (in Chinese)
- [25] 胡萌, 魏混, 杨猛, 矫海波, 魏玲, 王焱, 吉彪. 密度对不同株型玉米光合特性及产量的影响. 玉米科学, 2010, 18(1): 103-107.
- HU M, WEI D, YANG M, JIAO H B, WEI L, WANG Y, JI B. Effect of planting density on photosynthetic characteristics and yield of different plant type. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(1): 103-107. (in Chinese)
- [26] 薛珠政, 卢和顶, 林建新, 杨人震. 种植密度对玉米单株和群体效应的影响. 玉米科学, 1999, 7(2): 52-54.
- XUE Z Z, LU H D, LIN J X, YANG R Z. Effect on single plant and population efficiency by different density on maize. *Journal of Maize Sciences*, 1999, 7(2): 52-54. (in Chinese)
- [27] 张洪艳, 吕超, 代玉仙, 李淑华, 于明彦, 徐国良, 任军. 2014 年美国玉米高产竞赛简报. 玉米科学, 2015, 23(3): 154-158.
- ZHANG H Y, LÜ C, DAI Y X, LI S H, YU M Y, XU G L, REN J. Introduction of America National maize yield contest in 2014. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(3): 154-158. (in Chinese)
- [28] 周昌明, 李援农, 银敏华, 谷晓博, 赵玺. 连垄全覆盖降解膜集雨种植促进玉米根系生长提高产量. 农业工程学报, 2015, 31(7): 109-117.
- ZHOU C M, LI Y N, YIN M H, GU X B, ZHAO X. Ridge-furrow planting with biodegradable film mulching over ridges for rain harvesting improving root growth and yield of maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 109-117. (in Chinese)
- [29] 侯月. 种植密度对玉米产量及相关生理特性影响的研究[D]. 天津: 天津农学院, 2015.
- HOU Y. Study on the effect of plant density on yield and related photosynthetic characteristics of maize[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [30] 王庆燕. 不同群体结构下玉米避阴反应的生理生化机制及其调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- WANG Q Y. Corn shade avoidance response under different population structure of the physiological and biochemical mechanism and its control[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [31] 李淑华, 许明学, 张亚辉, 代玉仙, 任军, 于明艳, 才卓, 徐国良, 荆绍凌. 2012 年美国玉米高产竞赛简介. 玉米科学, 2013, 21(3): 154-156.
- LI S H, XU M X, ZHANG Y H, DAI Y X, REN J, YU M Y, CAI Z,

- XU G L, JING S L. Brief introduction of America National maize yield contest in 2012. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(3): 154-156. (in Chinese)
- [32] 勾玲, 黄建军, 孙锐, 丁在松, 董志强, 赵明. 玉米不同耐密植品种茎秆穿刺强度的变化特征. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 156-162.
- GOU L, HUANG J J, SUN R, DING Z S, DONG Z Q, ZHAO M. Variation characteristic of stalk penetration strength of maize with different density-tolerance varieties. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11): 156-162. (in Chinese)
- [33] 沈绣琪, 戴俊英, 胡安畅, 顾慰连, 郑波. 玉米群体冠层特征与光截获及产量关系的研究. *作物学报*, 1993, 19(3): 246-252.
- SHEN X Y, DAI J Y, HU A C, GU W L, ZHENG B. Studies on relationship among character of canopy light interception and yield in maize populations (*Zea mays* L). *Acta Agronomica Sinica*, 1993, 19(3): 246-252. (in Chinese)
- [34] 葛均筑. 气象资源特性对玉米产量形成的影响及长江中游玉米高产关键技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- GE J Z. The effect of meteorological resources characteristics of maize yield formation and key technology of maize yield in the middle reach of Yangtze river[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [35] CIRILO A G, ANDRADE F H. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Science*, 1996, 36(2): 325-331.
- [36] ROSSINI M A, MADDONNI G A, OTEGUI M E. Inter-plant competition for resources in maize crops grown under contrasting nitrogen supply and density: Variability in plant and ear growth. *Field Crops Research*, 2011, 121(3): 373-380.
- [37] 杨吉顺, 高辉远, 刘鹏, 李耕, 董树亭, 张吉旺, 王敬锋. 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. *作物学报*, 2010, 36(7): 1226-1233.
- YANG J S, GAO H Y, LIU P, LI G, DONG S T, ZHANG J W, WANG J F. Effects of planting density and row spacing on canopy apparent photosynthesis of high-yield summer corn. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7): 1226-1233. (in Chinese)
- [38] 宋振伟, 齐华, 张振平. 春玉米中单 909 农艺性状和产量对密植的响应及其在东北不同区域的差异. *作物学报*, 2012, 38(12): 2267-2277.
- SONG Z W, QI H, ZHANG Z P. Effects of plant density on agronomic traits and yield in spring maize Zhongdan 909 and their regional differences in Northeast China. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(12): 2267-2277. (in Chinese)
- [39] 刘伟, 吕鹏, 苏凯, 杨今胜, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏, 孙庆泉. 种植密度对夏玉米产量和源库特性的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1737-1743.
- LIU W, LÜ P, SU K, YANG J S, ZHANG J W, DONG S T, LIU P, SUN Q Q. Effects of planting density on the grain yield and source-sink characteristics of summer maize. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1737-1743. (in Chinese)
- [40] 刘镜波, 王小林, 张岁岐, 张仁和, 薛吉全. 有机肥与种植密度对旱作玉米根系生长及功能的影响. *水土保持学报*, 2011, 31(6): 32-36.
- LIU J B, WANG X L, ZHANG S Q, ZHANG R H, XUE J Q. Effect of organic fertilizer and planting density on root growth and function of maize in dryland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(6): 32-36. (in Chinese)
- [41] 董树亭. 作物栽培学概论. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- DONG S T. *Introduction to Plant Cultivation*. Beijing: China Agriculture Press, 2007. (in Chinese)
- [42] TOLLENAAR M, BRUULSEMA T W. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. *Agronomy Journal*, 1988, 80(4): 580-585.

(责任编辑 杨鑫浩)