

种植密度对机收玉米干物质积累与转运及产量的影响

胡俊鹏¹, 张仁和², 李婷婷¹

(1. 陕西农林职业技术大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 探究种植密度对机收玉米品种干物质与氮素转运、籽粒含水率和产量的影响, 为陕西灌区玉米机械化密植高产技术提供支撑。于2021-2022年以机收品种陕单650和普通品种秦龙14为试验材料, 设置60 000(LD)、75 000(MD)、90 000(HD)株/hm² 3个种植密度, 测定干物质与氮素积累转运、籽粒灌浆脱水和产量等指标。结果表明 秦龙14和陕单650分别在75 000株/hm²和90 000株/hm²密度下产量达到最高值15 235.5 kg/hm²和17 104.9 kg/hm², 较低密度分别产量提高15.8%和24.9%, 密植后陕单650比秦龙14增产18.2%, 同时籽粒含水率降低16.5%。与秦龙14相比, 陕单650在高密下具有相对较高的茎秆干物质和氮素转运效率(34.2%和4.5%), 为籽粒生长发育提供更多碳源。同时, 陕单650密植下达到最大灌浆速率所需要的时间比秦龙14早0.71 d, 平均灌浆速率较秦龙14高0.05 g/d, W_{max}较秦龙14高0.81 g。因此与普通品种秦龙14相比, 机收品种陕单650高密下维持更高的群体干物质与氮素积累量, 促进籽粒灌浆速率, 较快的花后叶茎秆干物质与氮素转运, 加快籽粒脱水, 获得相对较高的籽粒产量和较低含水率, 有利于玉米机械籽粒直收。

关键词: 玉米; 种植密度; 干物质与氮素积累; 籽粒灌浆与脱水; 籽粒产量

中图分类号: S513 文献标识码: A 文章编号: 0488-5368(2026)02-0067-09

Effects of Planting Density on Dry Matter Accumulation and Translocation and Grain Yield of Mechanically Harvestable Maize

HU Junpeng¹, ZHANG Renhe², LI Tingting¹

(1. Shaanxi A&F Technology University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The effects of planting density on basal stem characteristics, lodging rate, grain moisture content, and yield of spring maize at different maturity stages were investigated to provide a theoretical basis and practical guidance for high-yield and high-efficiency cultivation in the irrigated area of northern Shaanxi. Three planting densities—60,000 (LD), 75,000 (MD), and 90,000 (HD) plants hm⁻²—were tested using the mechanically harvestable cultivar SD650 and the conventional cultivar QL14. Basal stem characteristics, lodging rate, dry matter accumulation and translocation, grain-filling characteristics, yield, and yield components were determined. The results showed that QL14 and SD650 achieved maximum yields of 15,235.5 and 17,104.9 kg hm⁻² at 75,000 and 90,000 plants hm⁻², respectively, representing increases of 15.8% and 24.9% compared with 60,000 plants hm⁻². Compared with QL14, SD650 produced a higher yield (by 18.2%) and a lower grain moisture content (by 16.5%). Under high density, SD650 exhibited higher leaf and stem dry matter and higher nitrogen translocation efficiency (3.2% and 4.5%), providing more assimilates for grain growth and development. In addition, under high density, SD650 reached the maximum grain-filling rate 0.71 d earlier than QL14,

收稿日期: 2025-03-06 修回日期: 2025-05-12

基金项目: 陕西省重大科技专项(ZDNY2023-02-08); 旱区农业陕西实验室开放课题(2024ZY-JCYJ-02-13); 陕西省科技厅科技项目(2024NC-XCZX-11)。

第一作者简介: 胡俊鹏(1972-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事作物管理与推广。

and the average grain-filling rate and W_{max} were 0.05 g/d and 0.81 g higher, respectively (W_{max} should be defined at first mention). In conclusion, compared with QL14, the mechanically harvestable cultivar SD650 maintains higher population-level dry matter accumulation, greater post-flowering leaf and stem dry matter and nitrogen translocation, a higher grain-filling rate, and a lower grain moisture content under higher planting density, thereby achieving higher grain yield and facilitating mechanical grain harvesting.

Key words: Maize; Planting density; Dry matter and nitrogen accumulation; Grain filling and dehydration; Grain yield

玉米作为我国第一大粮食作物,同时也是陕西省主要种植的粮食作物,在保障国家粮食安全中占有重要地位^[1]。种植密度是决定玉米产量的关键因子,适当增加种植密度成为保证我国玉米高产稳产的重要措施^[2];而种植密度过高会造成株高增加、茎秆细弱,易引发倒伏,影响玉米全程机械化作业^[3-5]。因此,研究种植密度对机收玉米品种干物质与氮素积累转运,及籽粒脱水的影响,对促进陕北灌区玉米合理密植和机械粒收具有重要意义。前人研究表明,种植密度的提升会使群体对资源竞争加剧而造成单株生产能力的下降^[6],但这种产量损失会通过合理密植而产生的有效穗数提高而被弥补^[7]。合理的种植密度有利于调节玉米植株群体结构,构建高效的冠层结构,促进群体光能利用率提高,增加群体光合同化产物的生产及其向籽粒的运转,增加穗粒数和粒重,从而提高产量^[8]。王鸿宇等^[9]研究表明,适宜增密下玉米提高了吐丝期植株地上部氮含量。随着玉米生产方式的改变,机械粒收已成为玉米生产的必然趋势,降低收获时籽粒含水率是实现玉米机械化粒收的重要保障^[10]。收获时籽粒含水率的变化由籽粒灌浆和籽粒脱水两个关键因素分阶段主导,且与籽粒灌浆速率和干物质与氮素积累转运密切相关^[11]。早熟品种籽粒从授粉到开始脱水所需积温少,后期脱水快,但较中晚熟品种产量优势不明显^[12];而晚熟品种易导致籽粒收获时成熟度不足,含水量高的问题^[13],在一定范围内,种植密度能协调干物质与氮素积累转运、籽粒灌浆与脱水间关系^[14]。前人关于种植密度对不同品种玉米间株型差异、熟期的研究较多^[15,16],而关于机收玉米品种干物质与氮素积累、籽粒灌浆与脱水、籽粒产量对不同密度的响应研究报道鲜少。本研究以机收品种和遗普通品种为试验材料,分析不同种植密度对机收玉米品种干物质与氮素转运、籽粒灌浆脱水和产量的影响,以期对陕北灌区玉米密植高产机械化高效生产技术提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2021—2022 年在陕西省榆林市定边县玉米试验示范站(109°45'N,38°16'E)进行。该地属于干旱半干旱大陆性季风气候,年日照时数 2 593.5~2 914.4 h,试验土壤为沙壤土,耕层 0~20 cm 土壤主要理化参数为,有机质 6.76 mg/kg,速效氮 42.75 mg/kg,速效磷 16.98 mg/kg,速效钾 99.77 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,选用 2 个陕西主推玉米品种秦龙 14(普通品种)和陕单 650(机收品种)为试验材料,设置 60 000、75 000 和 90 000 株/hm² 三个种植密度,小区面积 18 m²,等行距种植,行间距 0.6 m,每个小区内种植 8 行,设置 4 个重复。2021 和 2022 年播种日期分别为 4 月 30 日和 5 月 1 日,收获日期均为 10 月 1 日。施氮 240 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm² 和 K₂O 120 kg/hm²,氮肥为尿素(含纯氮 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 17%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%)。40%氮肥用作基肥,60%氮肥在小喇叭口期施入,磷钾肥全部基肥施入,其他田间管理水平同当地大田管理水平保持一致。

1.3 测量项目及方法

1.3.1 植株干物质和氮素积累测定 于玉米拔节期、吐丝期、吐丝后 20 d、吐丝后 40 d 和成熟期在每个小区选择长势均匀一致的 3 株植株,每株按茎秆(含穗轴和雄穗)、叶片、籽粒、苞叶进行分解并装入纸袋,在烘箱内 105 ℃杀青 15 min,80 ℃烘干至恒重后称重。另一部分样品称重后粉碎,四分法过 1 mm 筛后,采用凯氏定氮法测定各器官的含氮量。测定单株地上部生物量,计算群体干物质积累量和吐丝后物质转运率^[17]:

吐丝期叶茎干物质转运量 = 吐丝期叶茎干物质积累量 - 成熟期叶茎干物质积累量

吐丝后叶茎干物质转运率(%) = (吐丝期叶茎

干物质积累量-成熟期叶茎干物质积累量)/吐丝期叶茎干物质积累量×100;

干物质转移对籽粒贡献率(%)=(干物质转移量/籽粒干重)×100

吐丝后叶茎氮素转移量=吐丝期叶茎氮素积累量-成熟期叶茎氮素积累量

吐丝后叶茎氮素转运率(%)=(吐丝期叶茎氮素积累量-成熟期叶茎氮素积累量)/吐丝期叶茎氮素积累量×100

1.3.2 籽粒灌浆和脱水特性调查 于玉米吐丝期,从小区内选择长势均匀,同一天吐丝的若干健康植株统一挂牌标记。吐丝后每7 d从标记植株随机选取3个均匀果穗,然后从每个果穗上取果穗中部子粒100粒,称取鲜重,然后将其置于烘箱,在105℃下杀青30 min,80℃烘干至恒重,称取重量并记录数据。

灌浆速率(g/d)=[本次测定的百粒干重(g)-前一次测定的百粒干重(g)]/2次测定的间隔日数(d);

籽粒含水率(%)=[1-籽粒干重(g)/籽粒鲜重(g)]×100;

利用籽粒灌浆速率及灌浆参数通过logistic方程模拟计算籽粒灌浆模型^[18],模型形式如下:

$$W = a / [1 + b \times \exp(-ct)]$$

公式中W(g)表示测定的籽粒百粒干重(g),t(d)为自变量,即吐丝后天数,a、b和c是拟合的灌浆特征参数。利用以下公式计算灌浆参数:

籽粒灌浆速率达到最大时所需的天数(Tmax,d):Tmax=lnb/c

籽粒灌浆速率达到最大时籽粒的干重(Wmax,g):Wmax=a/[1+b×exp(-c×Tmax)]

籽粒的最大灌浆速率(Gmax,g kernel⁻¹d⁻¹):
Gmax=a×b×c×exp(-c×Tmax)/(1+b×exp(-c×Tmax))^2

籽粒平均灌浆速率(Gmean,g 100-kernels⁻¹d⁻¹):Gmean=a×c/6

籽粒活跃灌浆持续时间(D,d):D=a/Gmean

1.3.3 玉米产量及其产量构成要素 在玉米成熟期,每个小区收获靠近中间位置且长势均匀的2行进行记产,根据小区平均产量选取10个果穗调查穗长、秃尖长、穗粗、穗行数、行粒数等穗部性状,并使用PM8818谷物水分测定仪测量籽粒含水率,记产时籽粒含水率统一折算成14%。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2020进行数据整理,IBM SPSS 26.0软件统计和分析数据,Origin 2021进行绘图。

2 结果与分析

2.1 种植密度对不同玉米产量及其构成因素的影响

种植密度对不同玉米品种产量及其构成因素存在显著影响(表1)。随着种植密度的增加,秦龙14籽粒产量呈先增加后降低的趋势,而陕单650呈逐渐增加的趋势。2年的平均产量陕单650(15 966.4 kg/hm²)比秦龙14(14 388.2 kg/hm²)高10.9%,在密植条件下陕单650比秦龙14增产18.2%;同时,秦龙14和陕单650分别在MD和HD处理下平均产量达到最高15 235.5 kg/hm²和17 104.9 kg/hm²。与LD处理相比,秦龙14在MD处理下的平均产量提高15.8%;而陕单650在HD处理下的平均产量提高22.1%。

表1 种植密度对不同玉米品种产量及其构成因素的影响

年份	品种	密度	穗粒数	百粒重 /g	籽粒含水率 /%	籽粒产量 (kg/hm ²)
2021	秦龙14	LD	654.3 a	39.79 a	25.07 a	12 178.6 c
		MD	599.8 b	36.99 b	23.95 b	14 314.5 a
		HD	523.5 c	35.63 bc	22.96 c	13 612.7 b
	陕单650	LD	6884 a	37.12 a	23.73 a	12 945.2 b
		MD	671.2a	36.98 a	22.45 b	15 855.3 ab
		HD	624.2 b	35.87 b	21.14 c	16 347.6 a
2022	秦龙14	LD	671.1 a	41.78 a	27.60 a	14 118.3 c
		MD	635.4 b	37.86 b	25.78 b	16 156.5 a
		HD	576.4 c	37.22b	24.92 c	15 308.2 b
	陕单650	LD	702.6 a	39.96 a	24.20 a	15 046.5 c
		MD	682.2 ab	38.49 b	23.35 ab	17 403.4 b
		HD	661.3 b	37.74 c	22.55 b	17 862.2 a

产量构成中 2 个品种的穗粒数、百粒重和籽粒含水率均随密度的增加而显著降低。2022 年春玉米穗粒数、百粒重和籽粒含水率较 2021 年分别提高 4.7%、4.9%、5.8%。与 LD 相比,秦龙 14 在 HD 处理下的穗粒数、百粒重和籽粒含水率分别下降 17.0%、10.9%、9.1%;而陕单 650 在 HD 处理下的穗粒数、百粒重和籽粒含水率分别下降 8.8%、4.6%、8.9%。密度每增加 1 万株/hm²,穗粒数平均减小 28 粒,百粒重平均减小 1.0 g,籽粒含水率平均减小 0.8%。秦龙 14 在 75 000 株/hm² 密度下籽粒产量达到最高值 15 235.5 kg/hm²,籽粒含水率 24.9%;陕单 650 在 90 000 株/hm² 密度下籽粒产量达到最高值 17 104.9 kg/hm²,籽粒含水率 21.

8%。

2.2 种植密度对不同玉米品种干物质积累与转运的影响

由图 1 可知,种植密度显著影响不同玉米品种群体干物质积累量。2 个玉米品种群体干物质积累量随种植密度的增加而增加,在 HD 处理下达到最高。吐丝期秦龙 14 在 MD 和 HD 处理下的群体干物质积累量较 LD 处理分别增加了 16.7%、26.5%;陕单 650 在 MD 和 HD 处理下的群体干物质积累量较 LD 处理分别增加了 14.8%、25.3%。2 年试验中,同一密度下陕单 650 的群体干物质积累量均高于秦龙 14。在 HD 处理下,成熟期陕单 650 的群体干物质积累量较秦龙 14 高 13.4%。

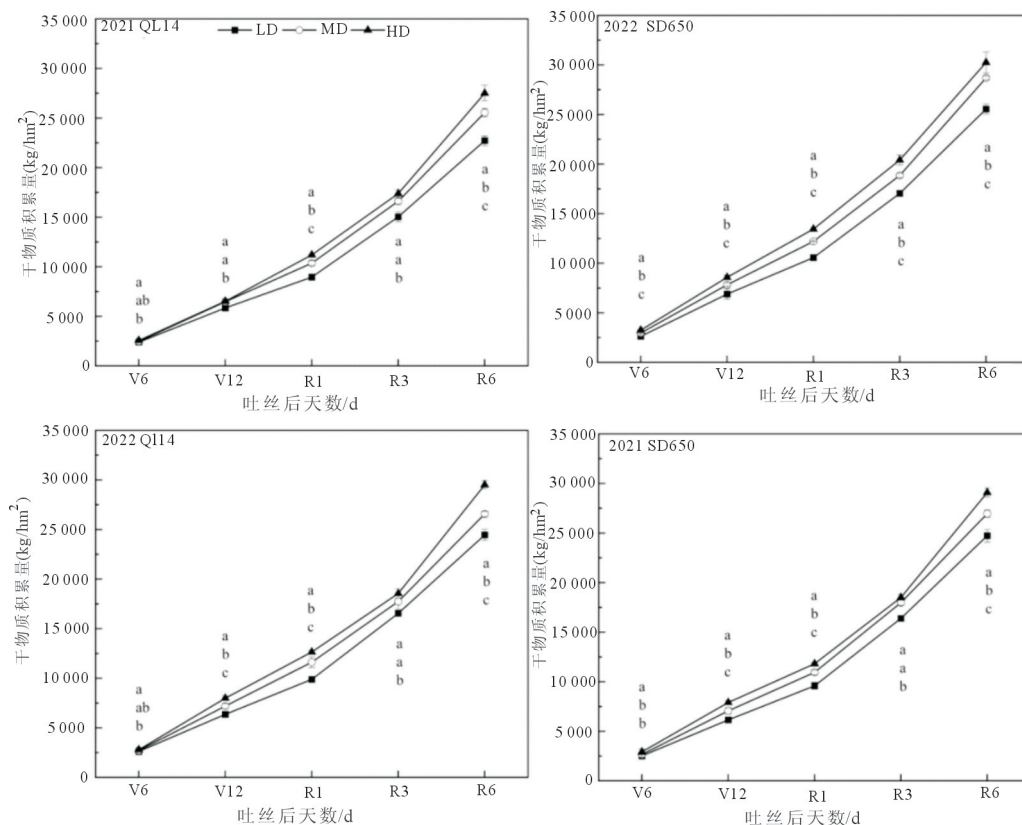


图 1 种植密度对不同玉米品种群体干物质积累的影响

2 年试验中,秦龙 14 干物质转运量、转运率以及对籽粒的贡献率随着种植密度的增加呈先增加后降低的趋势,陕单 650 则呈持续增加的趋势(表 2)。种植密度每增加 1 万株/hm²,秦龙 14 茎和叶片干物质转运量分别增加 24.8 kg/hm² 和 76.3 kg/hm²,茎和叶片干物质转运率分别增加 0.5% 和 0.9%,茎和叶片对籽粒的贡献率分别增加 0.2% 和 0.8%;陕单 650 茎和叶片干物质转运量分别增加 82.5 kg/hm² 和 128.4 kg/hm²,茎和叶片干物质转运率分别增加 1.5% 和 1.2%,茎和叶片对籽粒的

贡献率分别增加 0.7% 和 1.1%。与 LH 处理相比,秦龙 14 在 HD 处理下茎和叶干物质转运量分别提高了 16.7% 和 37.1%,干物质转运率分别提高了 7.0% 和 14.9%,对籽粒的贡献率分别提高 12.2% 和 37.6%;陕单 650 下茎和叶干物质转运量分别提高 43.9% 和 74.5%,干物质转运率分别提高 20.8% 和 24.6%,对籽粒的贡献率分别提高 41.6% 和 58.4%。陕单 650 叶的干物质转运率较秦龙 14 高 10.2%,而茎的干物质转运率较秦龙 14 低 13.7%。机收品种在合理密植下极大的促进花后干物质的

转运,为籽粒发育提供物质基础。

表2 种植密度对不同玉米干物质转运量、转运率以及对籽粒的贡献率

年份	品种	密度	转运量(kg/hm ²)		转运率/%		对籽粒的贡献率/%	
			叶	茎	叶	茎	叶	茎
2021	秦龙 14	LD	436.02 b	595.20 c	17.69 c	14.62 c	4.16 b	5.62 b
		MD	517.36 a	909.58 a	22.10 a	18.33 a	5.91 a	8.79 a
		HD	505.64 ab	839.63 b	19.61 b	17.96 b	4.98 ab	8.49 a
	陕单 650	LD	547.52 c	496.70 c	19.72 c	11.78 c	4.62 b	4.18 c
		MD	617.20 b	694.44 b	21.04 b	14.75 b	5.13 b	5.59 b
		HD	787.26 a	858.86 a	24.51 a	16.28 a	7.15 a	7.74 a
2022	秦龙 14	LD	457.2 c	637.40 c	23.37 b	19.42 c	6.08 b	7.16 c
		MD	638.83 a	975.82 a	24.47 a	24.20 a	8.27 a	10.93 a
		HD	536.34 b	850.68 b	24.33 ab	21.15 b	6.51 a	9.09 b
	陕单 650	LD	580.28 c	537.80 c	24.40 c	17.52 c	5.58 b	6.22 c
		MD	670.22 b	831.71 b	26.56 b	19.23 ab	6.25 b	7.46 b
		HD	835.38 a	946.23 a	28.79 a	20.22 a	7.29 a	8.73 a

2.3 种植密度对不同玉米品种氮素积累与转运的影响

2个不同玉米品种吐丝期和成熟期叶茎氮素含量随种植密度增加而增加(表3),HD处理下,2年秦龙14和陕单650品种丝期和成熟期叶片氮素积累量分别增加38.8%、16.9%和35.3%、16.1%,茎秆氮素积累量分别增加47.5%、46.1%和40.

9%、36.8%。种植密度增显著增加陕单650品种叶片和茎秆氮素转运效率;而种植密度的增加没有影响2个玉米品种茎秆氮素转运效率。所有密度下陕单650品种叶和茎的氮素转运效率显著高于秦龙14(34.2%和4.5%)。在3个种植密度下成熟期陕单650籽粒氮积累量显著高于秦龙14(11.3%)。

表3 种植密度对不同玉米品种叶茎氮素含量与转运效率的影响

年份	品种	密度	吐丝期氮含量(g/m ²)		成熟期氮积累量(g/m ²)			氮素转运效率/%	
			叶	茎	叶	茎	籽粒	叶	茎
2021	秦龙 14	LD	8.26 c	5.42 c	4.25 c	2.95 c	12.68 c	48.5 c	45.6 b
		MD	11.08 b	7.44 b	4.64 b	3.97 b	14.24 b	54.5 b	46.7 a
		HD	12.05 a	8.04 a	4.89 a	4.34 a	16.58 a	59.4 a	46.1 a
	陕单 650	LD	8.65 c	5.56 c	2.63 c	2.88 c	13.12 c	70.3 b	48.2 a
		MD	10.97 b	6.85 b	2.87 b	3.52 b	16.92 b	73.8 a	48.6 a
		HD	11.82 a	7.89 a	3.12 a	3.98 a	18.26 a	73.6 a	49.6 a
2022	秦龙 14	LD	9.13 c	6.06 c	3.98 c	3.29 c	13.32 c	56.4 b	45.7 a
		MD	10.73 b	7.52 b	4.69 a	4.08 b	16.81 b	56.3 b	45.7 a
		HD	12.02 a	8.89 a	4.72 a	4.77 a	18.24 a	60.7 a	46.3 a
	陕单 650	LD	8.95 c	6.18 c	2.65 c	3.11 c	14.65 c	70.4 c	49.7 a
		MD	10.54 b	7.46 b	2.87 b	3.56 b	17.23 b	72.8 b	52.2 a
		HD	11.98 a	8.64 a	3.01 a	4.21 a	19.46 a	74.9 a	51.2 a

2.4 种植密度对不同玉米品种籽粒灌浆及含水率的影响

随着生育时期的推移,不同密度下的玉米品种粒重变化呈现“S”型曲线增长,同时籽粒灌浆速率呈先增加后降低的单峰曲线变化(图2)。随着密度增加2个品种的籽粒灌浆速率和粒重逐渐降低,

同一密度下,陕单650的籽粒灌浆速率和粒重均大于秦龙14。不同密度下不同玉米品种达到灌浆峰值的时间有所差异,陕单650达到灌浆峰值的时间要早于秦龙14,灌浆高峰后,陕单650灌浆速率下降幅度快。随着种植密度的增加,2个品种灌浆参数呈规律性的变化,用Logistics模型结果显示2个

品种的灌浆速率达到最大时的天数(T_{max})、粒重(W_{max})、最大灌浆速率(G_{max})、平均灌浆速率(G_{mean})、籽粒活跃灌浆期(D)随着密度增加均呈降低趋势。与 LD 处理相比,陕单 650 在 MD 和 HD 处理下 T_{max} 分别降低 0.3 d 和 0.6 d, W_{max} 分别降低 0.9 g 和 1.6 g, G_{max} 分别降低 0.02 g/d 和 0.04 g/d, G_{mean} 分别降低 0.03 g/d 和 0.05 g/d, D 分别减小 0.95 d 和 2.2 d; 秦龙 14 T_{max} 分

别降低 0.62 d 和 0.87 d, W_{max} 分别降低 0.67 g 和 1.43 g, G_{max} 分别降低 0.02 g/d 和 0.03 g/d, G_{mean} 分别降低 0.04 g/d 和 0.06 g/d, D 分别减小 1.38 d 和 2.67 d。此外,陕单 650 的平均灌浆速率大于秦龙 14, 在 HD 处理下,陕单 650 达到最大灌浆速率所需要的时间 T_{max} 比秦龙 14 早 0.71 d, G_{mean} 较秦龙 14 高 0.05 g/d, W_{max} 较秦龙 14 高 0.81 g, D 较秦龙 14 高 0.74 d。

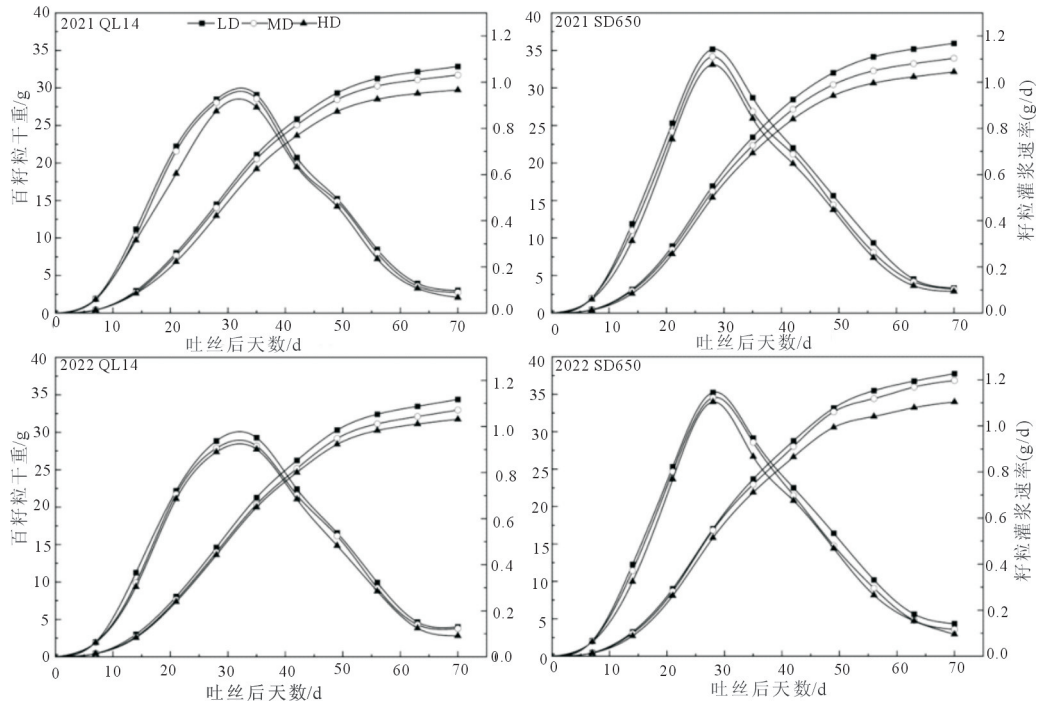


图 2 种植密度对不同玉米品种籽粒灌浆速率和百粒重的影响

表 4 种植密度下不同玉米品种籽粒灌浆特征参数

年份	品种	密度	T_{max} /d	W_{max} /g	G_{mean} (g/d)	G_{max} (g/d)	D /d	a	b	c	决定系数 R^2
2021	秦龙 14	LD	31.19	16.25	0.68	1.02	48.01	33.03	46.74	0.119	0.997
		MD	30.64	15.69	0.67	1.00	46.88	31.47	48.96	0.123	0.998
		HD	30.54	14.76	0.64	0.97	45.82	30.29	52.79	0.127	0.998
2021	陕单 650	LD	30.40	17.68	0.75	1.12	45.11	35.35	47.51	0.127	0.996
		MD	30.16	16.69	0.72	1.08	46.51	33.36	48.95	0.129	0.996
		HD	29.83	15.79	0.70	1.05	47.24	31.57	52.82	0.133	0.996
2022	秦龙 14	LD	32.31	16.52	1.02	1.02	50.42	33.03	46.74	0.119	0.997
		MD	31.63	15.74	0.97	0.97	48.79	31.47	48.96	0.123	0.996
		HD	31.23	15.15	0.96	0.96	47.27	30.29	52.79	0.127	0.996
2022	陕单 650	LD	31.12	17.02	1.05	1.05	48.78	34.03	45.94	0.129	0.998
		MD	30.74	16.32	1.03	1.03	47.62	32.64	48.07	0.126	0.997
		HD	30.51	15.74	1.02	1.02	46.51	31.48	51.22	0.123	0.996

种植密度显著影响不同玉米品种籽粒灌浆过程中籽粒含水率、生理成熟期含水率(图3)。不同熟期玉米籽粒生理成熟期的籽粒含水率和脱水速率也存在差异。陕单650和秦龙14生理成熟时平均籽粒含水率分别为23.5%和26.8%,脱水速率分别为1.0% d和0.9% d。随着密度增加,成熟期不同熟期玉米品种的籽粒含水率降低,脱水速率较

快。与LD处理相比,成熟期陕单650在MD和HD处理下籽粒含水率分别降低9.5%和17.4%,而秦龙14在MD和HD处理下籽粒含水率分别降低3.4%和10.2%;与LD处理相比,陕单650在MD和HD处理下籽粒脱水速率分别增加3.3%和5.6%;秦龙14在MD和HD处理下籽粒脱水速率分别降低1.1%和3.4%。

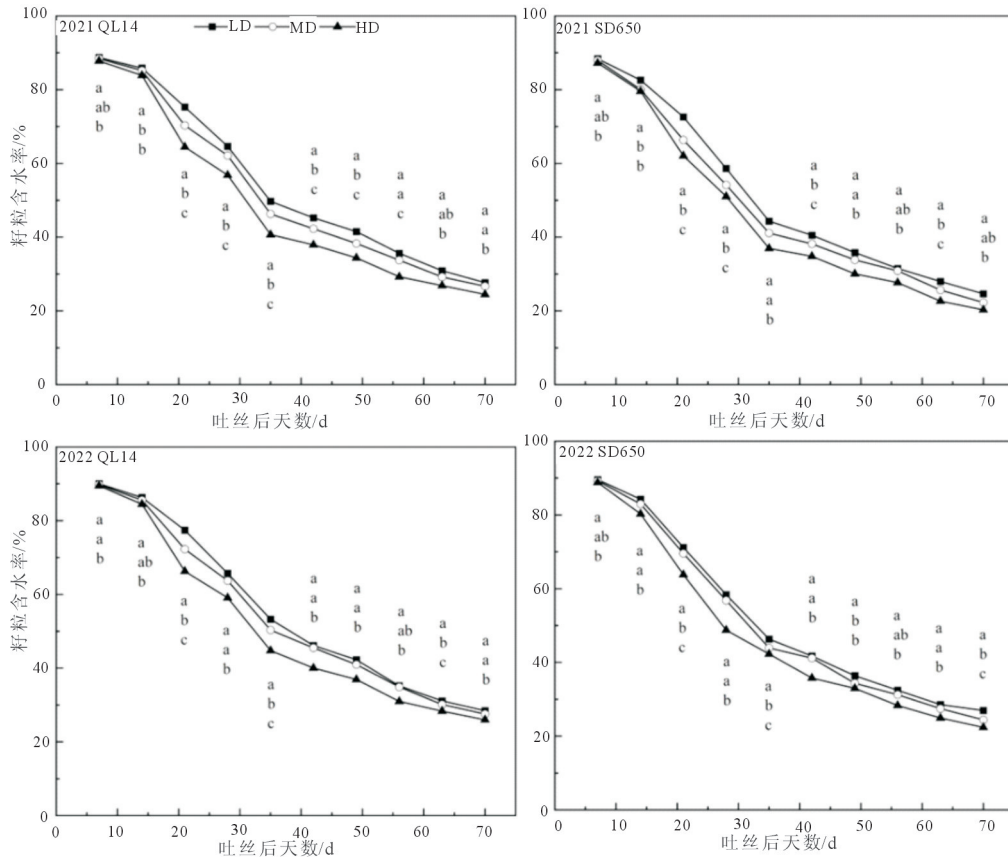


图3 种植密度对不同品种玉米籽粒含水率的影响

3 讨论

增加种植密度是提高玉米产量和光温资源利用效率的有效方法,优化密度的配置,能发挥个体与群体的最大效能,提高单位面积产量和光温利用效率^[19]。本研究中秦龙14在75 000株/hm²密度下产量达到最高值15 235.5 kg/hm²,而陕单650在90 000株/hm²密度下产量达到最高值17 104.9 kg/hm²,机收品种陕单650适当增加种植密度获得较高产量,同时收获时籽粒含水率较低。说明机收品种陕单650通过密植可以弥补生育期缩短带来的产量损失,这与前人研究结果一致^[13]。种植密度显著影响玉米产量及其构成要素,过度增密会导致玉米籽粒产量降低^[20]。玉米穗粒数和百粒重会随着种植密度的增加而降低,而穗行数却没有显著

变化^[6]。在适度密植能提高单位面积有效穗数和籽粒产量,但密度超过一定范围,单位面积有效穗数增加不能弥补穗粒数和粒重所带来损失的产量,导致产量降低^[11]。陕单650在密植下穗粒数和百粒重显著高于秦龙14,同时收获时籽粒含水率较低,因此陕单650比秦龙14更耐密植高产。

大量研究表明,干物质和氮素累积与转运对玉米籽粒产量有重要的影响^[21]。本研究中,机收品种陕单650高密下群体干物质积累量显著高于普通品种秦龙14,且表现出更好的花后茎秆干物质转运优势,为籽粒发育提供更多物质,实现增产。这与前人报道的高产玉米是由于花后具有更高的干物质累积能力观点一致^[3,9]。干物质积累量与氮素积累有着密切的关系,氮素积累是干物质累积的基础^[22]。本研究发现,增密显著提高陕单

650 吐丝期和成熟期叶茎氮素吸收量及转运率,说明陕单 650 高密下不仅促进氮素积累,还优化氮素从叶茎器官再动员,使氮素向有利于产量形成的器官转化,导致陕单 650 籽粒氮积累量显著增加(图 3),这是其高产的物质基础。相反,普通品种较长生殖生长期有利于花后干物质积累量,但一定程度上减缓氮素向籽粒的转运,后期没有足够的积温进行籽粒脱水,难以适应机械化作业。这与前人研究密度调控早熟玉米品种氮素积累与转运的试验结果保持一致^[13,14]。

干物质与氮素累积转运是籽粒灌浆的主要物质来源,而籽粒灌浆速率的加快有助于脱水速率的提高,降低玉米籽粒生长发育过程中的含水量^[23]。合理种植密度能够显著提升籽粒灌浆速率以及灌浆速率达到最大值时的生长量,有效延长灌浆活跃期,从而实现穗粒数与粒重的增加,最终提高玉米产量^[11]。籽粒灌浆速率和有效灌浆时间决定了籽粒库容充实程度,籽粒积累量最终决定了玉米产量^[24]。本研究表明,不同种植密度下玉米籽粒灌浆动态生育期符合慢-快-慢的“S”型增长曲线。同时,本研究 Logistic 方程拟合结果中,模拟相关系数均达到 0.997 以上,说明该方程可准确描述玉米籽粒灌浆过程。2 年中增加种植密度导致 2 个玉米品种籽粒灌浆速率降低和灌浆活跃期缩短,达到最大灌浆速率提前,粒重降低,后期脱水加快。但与秦龙 14 相比,陕单 650 高密下维持较高的平均灌浆速率和较快的脱水速率,有利于群体库容量的提升和籽粒含水率的降低,获得高产和适宜机械粒收。可能原因是增密促进陕单 650 群体植株茎秆和叶片干物质和氮素的转运,导致植株衰老,进而加快籽粒脱水,这与文中研究结果相吻合(图 2, 3)。而机收玉米品种冠层干物质与氮素的时空分布、籽粒灌浆与脱水特性对密度的响应及调控机制还需深入研究。

4 结论

陕单 650 和秦龙 14 分别在 90 000 株/hm² 和 75 000 株/hm² 密度下达到最高产量 15 235.5 kg/hm² 和 17 104.9 kg/hm²;成熟期籽粒含水量分别是 21.8%和 24.9%。与秦龙 14 相比,机收玉米陕单 650 高密补偿生育期缩短的产量效应,归因于密植下增加其群体干物质和氮素积累量,促进籽粒灌浆速率,灌浆后期叶茎干物质与氮素快速转运,加快籽粒脱水。选择机收品种匹配密植能协同玉米籽粒高产和低含水率,可作为陕北灌区春玉米机

械粒收高效栽培技术措施。陕单 650 与秦龙 14 分别在 90 000 株/hm² 和 75 000 株/hm² 密度下获得最高产量 17 104.9 kg/hm² 和 15 235.5 kg/hm²,且陕单 650 成熟期籽粒含水率显著低于秦龙 14。两品种产量与脱水特性的差异主要由三方面协同作用:首先,陕单 650 株型紧凑(茎粗增加 12.3%,基部节间缩短 18.7%),茎秆抗折力强,高密条件下群体透光率提高 23.5%,保障冠层光合效率(干物质积累量较秦龙 14 高 13.4%);而秦龙 14 植株松散,密度 > 75 000 株/hm² 时茎秆抗折力下降 36.2%,光合面积指数在吐丝后 20 d 降低 23.4%,导致干物质生产受限。其次,陕单 650 全生育期较秦龙 14 短 4 d,但通过“前快后稳”的灌浆策略(最大灌浆速率提前 0.71 d,平均速率提高 0.05 g/d)和高效花后物质转运(叶茎干物质转运率高 10.2%,氮素转运率高 34.2%),快速充实籽粒库容,弥补生育期较短的不足;而秦龙 14 灌浆速率低且花后物质滞留茎叶(转运贡献率低 37.6%),导致籽粒脱水滞后。此外,陕单 650 果穗较小、籽粒排列疏松,结合薄层苞叶(苞叶干重低 26.4%),显著提升籽粒脱水速率;而秦龙 14 果穗粗大、籽粒紧密排列,增加内部水分扩散阻力,延缓脱水进程。综上,陕单 650 通过株型耐密性(抗倒伏、高光效)、灌浆速生性(速率补偿生育期)与果穗适配性(形态促脱水)的三维协同,在密植条件下实现高产(增产 18.2%)与低含水率(降幅 16.5%)的协同提升,为陕北灌区春玉米机械粒收品种选育提供了“耐密-速生-易脱水”的性状优化路径。

参 考 文 献:

- [1] 李少昆,赵久然,董树亭,等. 中国玉米栽培研究进展与展望[J]. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1 941-1 959.
- [2] 梁书荣,赵会杰,李洪岐,等. 密度、种植方式和品种对夏玉米群体发育特征的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1 927-1 931.
- [3] 黄海,常莹,吴春胜,等. 群体密度对玉米茎秆强度及相关生理指标的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 81-87.
- [4] Bin L I, Gao F, Ren B Z, et al. Lignin metabolism regulates lodging resistance of maize hybrids under varying planting density[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(8): 2 077-2 089.
- [5] Li R, Zhang G, Liu G, et al. Improving the yield potential in maize by constructing the ideal plant type and optimizing the maize canopy structure[J]. Food and En-

- ergy Security, 2021(3):312.
- [6] 柏延文,张宏军,朱亚利,等.不同株型玉米冠层光氮分布,衰老特征及光能利用对增密的响应[J].中国农业科学,2020,53(15):12.
- [7] 陈尚洪,陈红琳,沈学善,等.密度和施氮量对丘陵区机播夏玉米产量及倒伏影响研究[J].西南农业学报,2012(3):25.
- [8] 田再民,黄智鸿,陈建新,等.种植密度对3个紧凑型玉米品种抗倒伏性和产量的影响[J].玉米科学,2016,24(5):83-88.
- [9] 王鸿宇,张英俊,姜兴芳,等.株行距配置对玉米密植群体根系及养分吸收的影响.玉米科学,2024,32(3):74-80.
- [10] 李璐璐,明博,高尚,等.夏玉米籽粒脱水特性及与灌浆特性的关系[J].中国农业科学,2018,51(10):1878-1889.
- [11] 朱亚利,王晨光,杨梅,等.不同熟期玉米不同粒位籽粒灌浆和脱水特性对密度的响应[J].作物学报,2021,47(3):13.
- [12] 万泽花,任佰朝,赵斌,等.不同熟期夏玉米品种籽粒灌浆与脱水特性及其密度效应[J].作物学报,2018,44(10):1517-1526.
- [13] 杨梅,王晨光,杨林,等.种植密度对不同熟期玉米品种籽粒含水率和产量的影响[J].玉米科学,2022.
- [14] Wang X Y, Wang X L, Xu C C, *et al.*. Decreased kernel moisture in medium-maturing maize hybrids with high yield for mechanized grain harvest[J]. Crop Science, 2019, 59(6):2794-2805.
- [15] 刘晓林,马晓君,豆攀,等.种植密度对川中丘陵夏玉米茎秆性状及产量的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(3):356-364.
- [16] P Yan, Y Q Chen, P Sui, *et al.* Effect of maize plant morphology on the formation of apical kernels at different sowing dates and under different plant densities [J]. Field Crops Research, 2018:223.
- [17] 熊伟伦,徐开未,刘明鹏,等.不同氮用量对四川春玉米光合特性,氮利用效率及产量的影响[J].中国农业科学,2022(9):55.
- [18] 陈传永,王荣焕,赵久然.不同生育时期遮光对玉米籽粒灌浆特性及产量的影响[J].作物学报,2014,40(9):1650-1657.
- [19] 郑迎霞,陈杜,魏鹏程,等.种植密度对贵州春玉米茎秆抗倒伏性能及籽粒产量的影响[J].作物学报,2021,47(4):14.
- [20] 郭书磊,陈娜娜,齐建双,等.不同密度下玉米倒伏相关性状与产量的研究[J].玉米科学,2018,26(5):71-77.
- [21] 钱春荣,王荣焕,于洋.不同熟期玉米品种在不同生态区的干物质积累、转运与分配特征[J].玉米科学,2021,29(2):60-68.
- [22] 王荣焕,徐田军,陈传永,等.不同熟期类型玉米品种籽粒灌浆和脱水特性[J].作物学报,2021,47(1):10.
- [23] 李璐璐,明博,谢瑞芝,等.黄淮海夏玉米品种脱水类型与机械粒收时间的确立简[J].作物学报,2018,44(12):10.
- [24] Gao S, Ming B, Li L, *et al.* Grain water weight dynamics and their relationships with grain filling in maize [J]. European Journal of Agronomy, 2025(164):127-148.
- [20] Sanità di Toppi L, Gabrielli R. Response to cadmium in higher plants [J]. Environmental and experimental botany, 1999, 41(2):105-130.
- [21] Seregin IV, Ivanov VB. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants [J]. Russian journal of plant physiology, 2001(48):523-544.
- [22] 曲凯丽,张艺馨,朱宏.镉胁迫对小麦种子萌发的影响[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2014,30(6):94-98.
- [23] 张玲,李俊梅,王焕校.镉胁迫下小麦根系的生理生态变化[J].土壤通报,2002(1):61-65.
- [24] 马文丽,仝小弟,王转花.镉处理对乌麦种子萌发幼苗生长及抗氧化酶的影响.农业环境科学学报. 2004,23(1):55-59.
- [25] 程旺大,姚海根,张国平,等.镉胁迫对水稻生长和营养代谢的影响[J].中国农业科学,2005(3):528-537.

(上接第54页)