

尚 赏,郭书亚,张 艳,等. 种植密度对夏玉米穗部性状、力学特征及机械粒收破碎率的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(17):64-70.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.17.008

种植密度对夏玉米穗部性状、力学特征 及机械粒收破碎率的影响

尚 赏,郭书亚,张 艳,汤其宁,卢广远
(商丘市农林科学院,河南商丘 476000)

摘要:为探讨种植密度对夏玉米穗部性状、力学特征及机械粒收破碎率的影响,以 6 个夏玉米品种为试验材料,设置 6.0 万株/hm² (D1)、7.5 万株/hm² (D2)、9.0 万株/hm² (D3) 等 3 个种植密度,系统分析不同密度下穗部性状、力学特征、籽粒含水率及破碎率的动态变化规律及其之间的相关性。结果表明,随着种植密度的增加,穗长、穗粗、穗柄长和轴粗均呈下降趋势,其中穗长和穗柄长受密度影响显著。D1 增至 D2 苞叶层数均值略有降低,但差异不显著,D2 增至 D3 苞叶层数均值保持不变,均为 9.7 层。增密显著提高籽粒产量,D3 较 D1 增产 14.0%。穗轴力学强度随密度增加而降低,D3 较 D1 穗轴抗折断力、穿刺强度分别降低 17.0%、16.9%。籽粒含水率、穗轴含水率变化趋势一致,D3 较 D1 分别降低 1.15、2.40 个百分点。籽粒破碎率随密度增加呈下降趋势,D3 较 D1 均值降低 1.25 百分点,其中破碎率和破皮率占比均值分别为 52.5% 和 38.2%。相关性分析表明,籽粒破碎率与籽粒含水率呈极显著的正相关关系,与穗长呈显著的正相关关系;籽粒含水率与穗粗、轴粗、苞叶层数及穗轴穿刺强度呈显著的正相关关系,与穗轴抗折断力及穗轴含水率呈极显著正相关关系,其中穗轴含水率与籽粒含水率相关性最密切(相关系数为 0.762)。综上表明,合理增加种植密度可提高夏玉米籽粒产量,降低收获时籽粒含水率和破碎率。

关键词:玉米;种植密度;穗部性状;力学特征;机械粒收

中图分类号:S513.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)17-0064-07

玉米是我国重要的粮食作物,其生产能力提升对保障国家粮食安全具有重要战略意义。在耕地资源约束趋紧的背景下,发展耐密植、高产技术,并配套机械粒收技术,是实现玉米生产提质增效的必

然选择。合理增加种植密度能显著提高单位面积内玉米有效穗数,是提升玉米单产的关键措施之一^[1]。除种植密度因素外,不同熟期的夏玉米品种的产量存在差异,其中中晚熟品种的产量高于早熟品种^[2]。机械粒收技术是实现玉米现代化高效生产的重要手段,我国自 20 世纪 80 年代开始引进玉米机械收获技术并开展相关研究,但起步较晚,推广面积有限^[3]。玉米机械粒收质量的主要评价指标包括籽粒的破碎率、杂质率和总损失率,其中破碎率高是玉米进行机械粒收技术推广面临的主要瓶颈问题^[4-5]。研究表明,籽粒含水率能显著影响机械粒收的破碎率,且两者呈显著正相关关系^[6]。

收稿日期:2025-02-28

基金项目:河南省现代农业产业技术体系建设专项(编号:HARS-22-02-24);河南优势特色农业产业科技支撑行动计划专项(编号:20241102002)。

作者简介:尚 赏(1984—),女,河南商丘人,硕士,助理研究员,从事玉米栽培和遗传育种研究。E-mail:shangshangsq@163.com。

通信作者:卢广远,研究员,从事玉米栽培与遗传育种研究。E-mail:Lugy378@163.com。

[21]王健胜,侯桂玲,王二伟,等. 国内外小麦种质农艺性状遗传多样性分析与筛选利用[J]. 分子植物育种,2024,22(17):5714-5724.

[22]黄 杰,葛昌斌,王 君,等. 基于主成分回归模型的漯河市小麦相对气象千粒重的模拟模型[J]. 作物杂志,2023(5):212-218.

[23]张正斌,徐 萍,李奉令,等. 彩色小麦农艺性状和微量营养素相关回归分析[J]. 中国生态农业学报,2024,32(10):1669-1678.

[24]孙现军,姜奇彦,胡 正,等. 小麦种质资源苗期耐盐性鉴定评价[J]. 作物学报,2023,49(4):1132-1139.

[25]张宁丹,任建强,吴尚蓉. 基于花后累积地上生物量比例的冬小麦动态收获指数估算[J]. 农业工程学报,2022,38(7):189-199.

[26]刘 佳. 小麦籽粒灌浆速率测定及全基因组关联分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024:1.

[27]孙昊蔚. 气候变化对中国小麦产量和适宜种植区的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2024:9.

李璐璐等研究发现,籽粒含水率在 16.15% ~ 24.78% 范围内,籽粒破碎率和落穗率均可控制在 5% 以下^[7]。薛军等的研究表明,穗轴中部 8 cm 和全长抗折断力能显著影响籽粒破碎率,当籽粒含水率低于 20.1% 时,破碎率随穗轴抗折断力的增加而显著升高^[8]。此外,刘志辉等在长江中游地区的研究表明,春玉米成熟后推迟 7 d 收获,可使籽粒含水率和破碎率分别平均下降 7.2%、3.48%^[9]。除籽粒含水率之外,品种、播期、籽粒硬度和收获留茬高度也是影响籽粒破碎率的重要因素^[10-12]。然而,高产目标与机械粒收质量间的协同优化机制尚未明晰,在农艺学性状方面甚至表现冲突现象。研究表明,随着种植密度的增加,玉米节间粗和单位茎长干重均呈下降趋势,茎秆的穿刺强度、压碎强度和折断强度降低,茎秆倒伏率增加^[13-14]。李川等的研究表明,玉米穗位高的增加易导致玉米倒伏,进而影响机械粒收质量^[15]。目前关于种植密度对玉米倒伏率、茎秆强度、产量影响的研究较多,在机械粒收方面的研究主要关注不同收获时期对机收质量的影响及籽粒含水率与机收质量指标间的关系。然而,关于种植密度对玉米穗部性状、力学特征及

其与机械粒收质量(特别是破碎率)之间关系的研究较少。本研究基于前人关于密度与茎秆强度的研究,进一步探讨穗部性状、力学特征对种植密度的响应规律,并将破碎率细分为破皮率、破裂率和破缺率,探究其与种植密度的关系。同时通过分析破碎率与穗部性状及力学特征间的相关性,为玉米协调耐密植、高产与机械粒收技术的发展和推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年在河南省商丘市农林科学院薛庄示范基地(115°64'E,34°50'N)进行。玉米生育期 6—10 月,试验基地日平均气温和日降水量分布如图 1 所示,其中 6 月的日平均气温均值最高(29.0 °C),7 月降水总量最大(363.3 mm)。试验地土壤为沙土,耕层(0~20 cm)有机质含量为 13.9 g/kg、全氮含量为 1.4 g/kg、速效氮含量为 70.21 mg/kg、有效磷含量为 34.7 mg/kg、速效钾含量为 92.17 mg/kg。前茬作物为冬小麦。

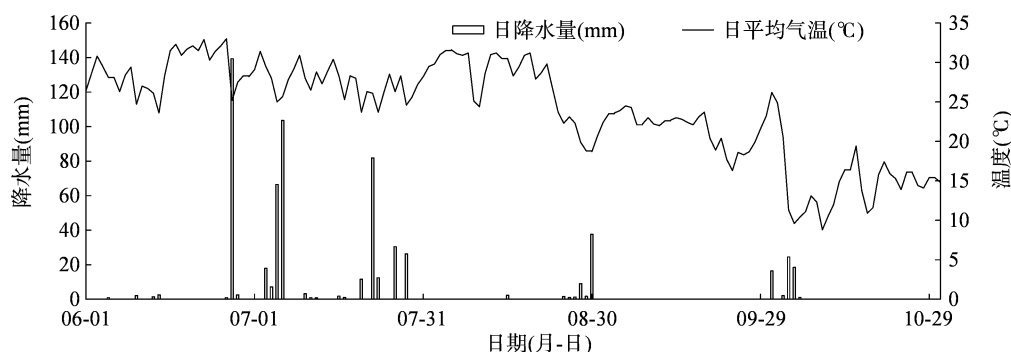


图1 2022 年玉米生育期 6—10 月日降水量和日平均气温

1.2 试验设计

供试材料为 6 个夏玉米品种,分别为裕丰 303 (V1)、郑单 958 (V2)、联创 808 (V3)、先玉 335 (V4)、京农科 728 (V5)和迪卡 517 (V6)。试验采用裂区设计,主区为种植密度,设 6.0 万株/hm² (D1)、7.5 万株/hm² (D2)和 9.0 万株/hm² (D3) 3 个水平,裂区为品种。每个品种种植 5 行,行距 60 cm,行长 20 m,重复 3 次。试验于 6 月 11 日播种,10 月 2 日进行机械化籽粒收获。试验地田间管理措施与当地高产大田栽培技术一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 穗部性状与产量

于收获期选取连续且整齐度一致的 10 株果穗,连同苞叶和穗柄一并收获。每个果穗苞叶从外向内逐层剥开计数。使用刻度尺测量每个果穗穗长、穗粗和穗柄长,果穗进行脱粒后用游标卡尺测量穗轴中部的轴粗,各性状取其平均值。每个品种小区收获后计算实际产量,并按 14% 的籽粒含水率折算为单位面积产量。

1.3.2 穗部力学强度

每个品种分别选取 5 个穗轴用茎秆强度测定仪测量穗轴中部的抗折断力和穿刺强度,并取其平均值。

1.3.3 穗轴含水率和籽粒含水率

每个品种分别称取穗轴和籽粒鲜重后,置于 75 °C 恒温鼓风干燥箱中烘至恒重,称取干重,按以下公式计算含水率:

穗轴含水率 = (穗轴鲜重 - 穗轴干重) / 穗轴鲜重 × 100%。

籽粒含水率 = (籽粒鲜重 - 籽粒干重) / 籽粒鲜重 × 100%。

1.3.4 籽粒破碎率 机械粒收后,从机仓内随机取约 2 kg 籽粒,去除穗轴、碎叶等杂质后,挑拣出完整籽粒和不完整籽粒并称重,分别记为 M_{kw} 和 M_{bkw} 。不完整籽粒根据损伤程度分 3 类:(1)破皮型:籽粒外形完整,表面或胚乳内部没有裂痕,但种皮有明显擦破;(2)破裂型:籽粒外形完整,但表面或胚乳内部有明显裂痕,但籽粒没有碎粒;(3)破缺型:籽粒外形不完整,籽粒残缺呈碎块状。将这 3 种类型的籽粒进行称重,分别记为 M_1 、 M_2 和 M_3 ,按以下公式计算破皮率、破裂率、破缺率和破碎率,结果取 3 次重复的平均值:

$$\text{破皮率} = M_1 / (M_{bkw} + M_{kw}) \times 100\% ;$$

$$\text{破裂率} = M_2 / (M_{bkw} + M_{kw}) \times 100\% ;$$

$$\text{破缺率} = M_3 / (M_{bkw} + M_{kw}) \times 100\% ;$$

$$\text{破碎率} = (M_1 + M_2 + M_3) / (M_{bkw} + M_{kw}) \times 100\% 。$$

1.4 数据统计和分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据统计与作图,DPS 7.05 软件进行裂区试验统计分析,LSD 法进行多重比较和方差分析,SPSS 23 软件采用 Pearson 法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同种植密度下穗部性状的差异

通过对 3 个密度处理下 6 个夏玉米品种穗部性状的比较(表 1)得知,随着种植密度增加,各品种的穗长、轴粗、穗柄长和轴粗均呈逐渐降低的趋势,其中,D1 密度下穗长、轴粗、穗柄长和轴粗均值最大,分别为 18.6、4.99、9.5、2.52 cm,D3 较 D1 这些性状分别下降 8.6%、3.0%、11.6%、4.4%。苞叶层数均值由 D1 增至 D2 略有降低,但差异不显著,密度从 D2 增至 D3,苞叶层数均值保持不变,均为 9.7 层。在不同品种的比较中,V1 和 V3 的穗长均值最长,均为 18.6 cm,显著高于 V2、V5,但与 V4、V6 差异不显著;V2 的穗粗均值最大,为 5.12 cm,显著高于 V1 和 V6,但与其他品种间差异不显著;V3 的穗柄长均值最大,为 10.8 cm,显著高于其他品种;V2 的轴粗均值最大,为 2.69 cm,与 V5 差异不显著,但显著高于其他品种;V1 的苞叶层数均值最多,为 11.5 层,显著高于其他品种。方差分析结果表明,

种植密度对穗长影响显著,对穗柄长的影响达到极显著水平,但对穗粗、轴粗和苞叶层数的影响均未达到显著水平。品种对穗长、穗粗的影响显著,对穗柄长、轴粗和苞叶层数的影响均达到极显著水平。此外,种植密度和品种互作对所调查的穗部性状均无显著影响。

表 1 不同种植密度下夏玉米穗部性状的差异

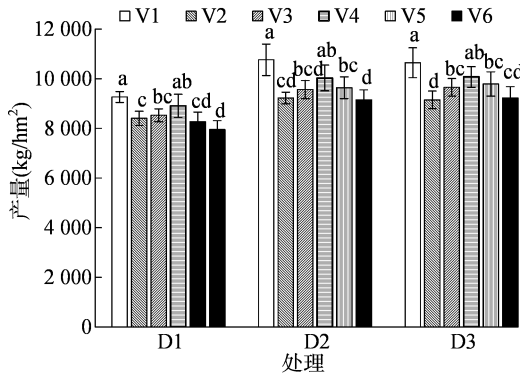
密度	品种	穗长 (cm)	穗粗 (cm)	穗柄长 (cm)	轴粗 (cm)	苞叶层数 (层)
D1	V1	19.4a	4.85ab	10.5a	2.42b	11.5a
	V2	17.6b	5.21a	7.5d	2.75a	9.5b
	V3	19.7a	4.96ab	11.3a	2.44b	9.2b
	V4	18.3ab	5.03ab	10.7a	2.47b	9.0b
	V5	17.8b	5.13a	8.2c	2.63a	10.1a
	V6	18.8ab	4.75b	8.9b	2.39b	9.5b
D2	V1	18.8a	4.77ab	9.8b	2.36c	10.9a
	V2	17.1a	5.10a	6.9e	2.68a	9.3b
	V3	18.4a	4.90ab	10.8a	2.40bc	9.2b
	V4	17.5a	4.94ab	10.1ab	2.42bc	9.4b
	V5	17.2a	5.05ab	7.6d	2.56ab	9.9ab
	V6	17.9a	4.66b	8.3c	2.35c	9.6b
D3	V1	17.6ab	4.73ab	9.2b	2.34bc	10.8a
	V2	16.4ab	5.04a	6.6d	2.63a	9.5bc
	V3	17.8a	4.83ab	10.4a	2.32c	9.3c
	V4	16.8ab	4.85ab	9.5ab	2.35bc	9.2c
	V5	16.1b	4.99a	7.1cd	2.52ab	10.2ab
	V6	17.2ab	4.57b	7.8c	2.30c	9.5bc
F 值	D	10.873 *	0.901ns	22.596 **	1.227ns	0.058ns
	V	2.979 *	3.015 *	47.090 **	8.613 **	9.449 **
	D × V	0.058ns	0.010ns	0.076ns	0.029ns	0.153ns

注:同栏同列数字后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著,**、* 分别表示在 0.01、0.05 水平下差异显著,ns 表示差异不显著,下表同。

2.2 不同种植密度下夏玉米品种籽粒产量的差异

由图 2 可知,随着种植密度的增加,玉米籽粒产量呈增加趋势。6 个夏玉米品种在 3 个种植密度下的籽粒产量均值分别为 8 556.47、9 730.63、9 758.18 kg/hm²。其中,D2 密度处理下产量显著高于 D1,增幅为 13.7%;而 D3 与 D2 密度处理下的产量差异不显著,增幅仅为 0.3%。在不同品种的比较中,3 个种植密度下,V1 的产量均最高,均值为 10 226.5 kg/hm²,显著高于 V2、V3、V5、V6,但与 V4 差异不显著。种植密度从 D1 增至 D2,6 个夏玉米品种产量增幅依次分别为 16.2%、9.8%、12.1%、12.6%、16.5%、15.1%。当种植密度从 D2 增至 D3,V1、V2 产量分别下降了 1.1%、0.8%,而 V3、

V4、V5、V6 产量均呈增加趋势,产量增幅分别为 0.9%、0.4%、1.6%、0.8%。



图中不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。下图同
图2 种植密度对不同夏玉米品种产量的影响

2.3 不同种植密度下夏玉米品种的穗轴力学特征变化分析

由图 3 - a 可知,随着种植密度的增加,穗轴抗折断力呈降低趋势。3 个密度处理下穗轴抗折断力均值分别为 98.7、85.6、81.9 N。其中,D2 密度下的

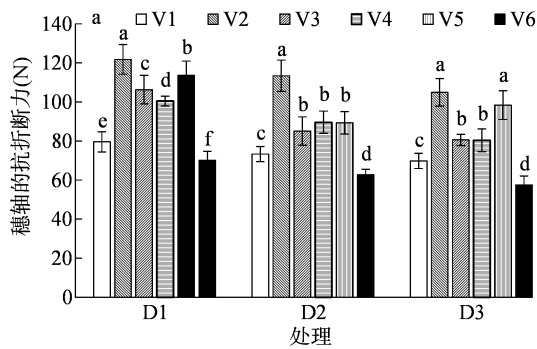
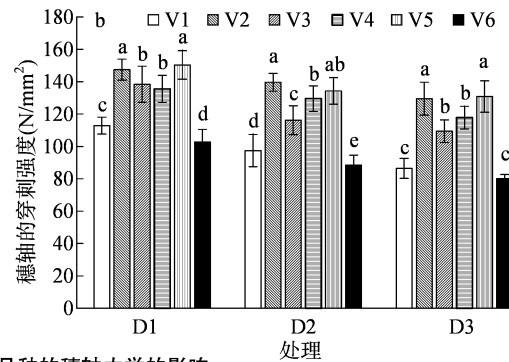


图3 种植密度对夏玉米品种的穗轴力学的影响

穗轴抗折断力显著低于 D1,降幅为 13.3%;而 D3 与 D2 密度下的穗轴抗折断力差异不显著,降幅为 4.3%。在不同夏玉米品种间,V2 的穗轴抗折断力均值最大,为 113.4 N,在 D1 和 D2 密度处理下显著高于其他品种,在 D3 密度下仅与 V5 差异不显著,与其他品种差异显著;V6 的穗轴抗折断力最低,均值为 63.5 N,在 3 个密度下均显著低于其他品种。

由图 3 - b 可知,随着种植密度的增加,穗轴穿刺强度也呈现下降趋势。3 个密度处理下穗轴穿刺强度均值分别为 131.2、117.6、109.0 N/mm²,D3 较 D1 下降了 16.9%。在品种方面,V2 在 3 个密度处理下的穗轴穿刺强度均值最大,为 138.8 N/mm²,其次为 V5。在 D1 和 D3 密度下 V5 的穗轴穿刺强度高于 V2,D2 密度下 V2 的穗轴穿刺强度高于 V5,两者穗轴穿刺强度显著均高于其他品种;V6 的穗轴穿刺强度均值最低,为 90.5 N/mm²,在 D1 和 D2 密度处理下显著低于其他品种,在 D3 密度下仅与 V1 差异不显著,与其他品种差异显著。



2.4 不同种植密度下夏玉米品种穗轴含水率和籽粒含水率的变化分析

由图 4 - a 所示,随着种植密度的增加,穗轴含水率呈现下降趋势。在 3 个密度处理下,穗轴含水率的均值分别为 59.4%、58.1%、57.0%。其中,D1 处理下穗轴含水率最高,D2、D3 较 D1 分别下降了 1.3、2.4 个百分点。在不同夏玉米品种的比较中,6 个品种的穗轴含水率均值范围在 52.3% ~ 66.4% 之间。其中,V5 在 3 个密度处理下的穗轴含水率均值最高,为 65.7%,其次是 V2,两者的穗轴含水率显著高于其他品种。相比之下,V4 的穗轴含水率均值最低,为 53.7%,显著低于 V2 和 V5,但与其他品种差异不显著。

由图 4 - b 可知,籽粒含水率随种植密度的增加也呈逐渐下降的趋势,与穗轴含水率的变化趋势一致。在 3 个密度处理下,籽粒含水率的均值分别为

26.6%、25.7% 和 25.5%。其中,D1 处理下的籽粒含水率最高,D2、D3 较 D1 分别下降了 0.9、1.1 个百分点。在不同夏玉米品种的比较中,6 个品种的籽粒含水率均值范围在 22.1% ~ 30.3% 之间。其中,V5 在 3 个密度处理下的籽粒含水率均值最高,为 29.5%,显著高于 V3、V4 和 V6;V6 的籽粒含水率均值最低,为 22.2%,显著低于 V1、V2 和 V5。在 3 个密度处理下,V4 和 V6 的籽粒含水率均低于 25%,符合国家《玉米收获机械》(GB/T 21962—2020)标准规定的作业性能含水率指标(15% ~ 25%)。

2.5 不同种植密度下夏玉米品种破碎率的变化分析

由表 2 可知,随着种植密度增加,破裂率和破缺率的均值均呈逐步下降趋势。D3 处理下的破裂率和破缺率较 D1 分别下降了 0.65、0.17 百分点。而破皮率的均值则呈现先增后降的趋势。通过对 3 种

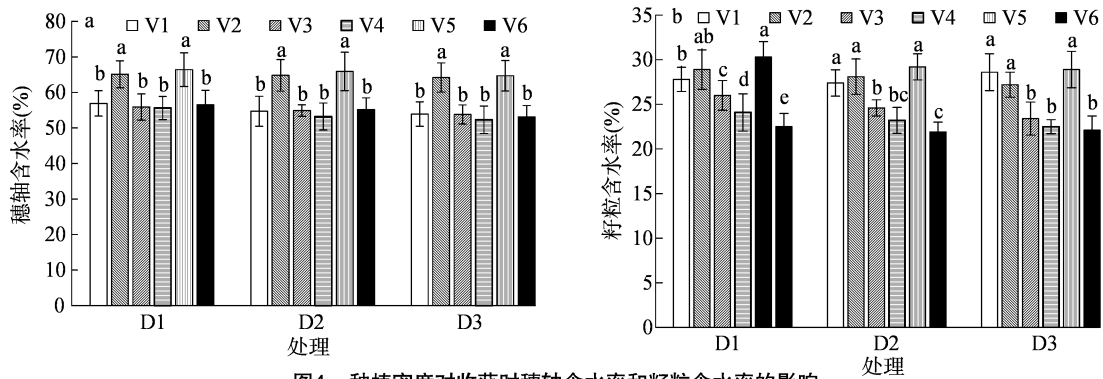


图4 种植密度对收获时穗轴含水率和籽粒含水率的影响

表2 种植密度对籽粒破碎率的影响

密度	品种	破裂率 (%)	破皮率 (%)	破缺率 (%)	破碎率 (%)
D1	V1	4.58a	3.17b	0.81b	8.56a
	V2	3.28d	3.39a	1.08a	7.75b
	V3	3.29d	3.06b	0.78b	7.13c
	V4	3.73c	1.94d	0.51c	6.18d
	V5	4.07b	2.36c	0.52c	6.95c
	V6	2.96e	1.55e	0.39d	4.90e
D2	V1	4.96a	2.58bc	0.59c	8.13a
	V2	2.81d	3.75a	0.76b	7.32b
	V3	4.23b	2.47c	1.03a	7.73ab
	V4	2.02e	2.76b	0.26f	5.04d
	V5	3.88c	2.25d	0.45d	6.58c
	V6	2.64d	1.89e	0.39e	4.92d
D3	V1	3.41a	2.69a	0.69b	6.79a
	V2	3.57a	2.04b	0.32de	5.93b
	V3	3.26a	2.57a	1.05a	6.88a
	V4	2.12c	1.86c	0.40c	4.38e
	V5	2.86b	2.13b	0.28e	5.27c
	V6	2.81b	1.56d	0.35cd	4.72d
F 值	D	22.834 **	18.125 **	136.398 **	260.104 **
	V	80.720 **	115.162 **	241.856 **	104.431 **
	D × V	25.977 **	26.430 **	49.320 **	4.998 **

破损方式与破碎率占比的分析发现,破碎率主要以破裂率为主,其次为破皮率,两者占比均值分别为52.5%、38.2%,合计占破碎率的90.7%。在不同品种间的比较中,V1的破碎率在3个密度处理下均值最高,为7.83%,显著高于其他品种。而V6在3个密度处理下的破碎率均值最低,为4.85%,显著低于其他品种。根据方差分析结果可知,密度、品种以及密度与品种互作均对破碎率有极显著影响。此外,在收获时不同密度处理下供试品种的破碎率均符合《玉米》(GB 1353—2018)质量要求中三级粮不完善粒含量≤8%的标准。V6在3个密度处理下

收获的籽粒均符合《玉米收获机械》(GB/T 21962—2020)中破碎率≤5%的机收标准。

2.6 穗部性状、力学特征、含水率与破碎率之间的相关性分析

进一步的相关性分析结果(表3)表明,籽粒含水率与穗长、穗柄长呈不显著的负相关关系,但与苞叶层数和穗轴穿刺强度呈显著的正相关关系,同时与穗粗、轴粗、穗轴抗折断力、穗轴含水率呈极显著正相关关系。根据相关系数分析,穗轴性状、力学特征与籽粒含水率的相关程度依次为穗轴含水率>轴粗>穗粗>穗轴抗折断力>苞叶层数>穗轴穿刺强度。其中,籽粒含水率与穗轴含水率相关性最为密切(相关系数为0.762)。此外,籽粒破碎率与穗长呈显著的正相关关系,与籽粒含水率呈极显著的正相关关系。在穗部性状、力学特征和含水率之间的关系中,穗长与穗柄长呈极显著的正相关关系;穗粗、轴粗均与穗轴抗折断力、穗轴穿刺强度呈极显著的正相关关系;穗轴抗折断力与穗轴穿刺强度呈极显著的正相关关系。穗轴含水率与穗粗、轴粗、穗轴抗折断力和穗轴穿刺强度呈极显著的正相关关系,但与穗柄长呈极显著的负相关关系。

3 结论与讨论

3.1 增加种植密度对穗部性状和穗轴力学特征的影响

不同种植密度下,玉米穗部性状和穗轴力学强度表现存在显著差异。张宇星等通过研究发现,1980—2010年选育的玉米杂交种在密度增加条件下,果穗长度变短、行粒数呈减少趋势^[16]。此外,随着种植密度的增加,玉米果穗的穗粗变细、秃尖变长,苞叶重量和长宽均降低^[17-18]。本研究结果发现,穗长、穗粗、穗柄长、轴粗和苞叶层数均随密度的增加呈下降趋势。方差分析结果表明,种植密度

表 3 穗部性状、含水率与破碎率间的相关性分析

指标	相关系数									
	穗长	穗粗	穗柄长	轴粗	苞叶层数	抗折断力	穿刺强度	穗轴含水率	籽粒含水率	破碎率
穗长	1.000									
穗粗	-0.200	1.000								
穗柄长	0.742**	-0.247	1.000							
轴粗	-0.307	0.892**	-0.584*	1.000						
苞叶层数	0.114	-0.200	-0.086	-0.105	1.000					
抗折断力	-0.152	0.962**	-0.235	0.885**	-0.260	1.000				
穿刺强度	-0.123	0.964**	-0.143	0.815**	-0.312	0.949**	1.000			
穗轴含水率	-0.392	0.757**	-0.715**	0.904**	0.097	0.717**	0.682**	1.000		
籽粒含水率	-0.123	0.637**	-0.370	0.677**	0.558*	0.592**	0.512*	0.762**	1.000	
破碎率	0.496*	0.367	0.256	0.305	0.384	0.354	0.257	0.238	0.611**	1.000

对穗长的影响显著,对穗柄长的影响达到极显著水平,但对穗粗、轴粗和苞叶层数的影响未达到显著水平。穗轴与籽粒直接相连,其力学强度与籽粒破碎率密切相关。薛军等的研究表明,随着收获期的推迟,穗轴机械强度呈先降低后升高趋势,且穗轴抗折断力可解释 14%~20% 的籽粒破碎率^[8]。彭丹丹等的研究表明,籽粒穿刺强度、压碎强度和穗轴的抗折断力均随密度增加呈降低趋势,穗轴含水率变化呈增加趋势^[19]。本研究中,穗轴抗折断力和穿刺强度均随密度增加呈下降趋势,且与穗粗、轴粗呈极显著的正相关关系。而穗轴含水率随密度的增加呈降低趋势,与彭丹丹等的研究结果^[19]不同,可能是由于种植密度增加导致植株对光、水等资源的竞争加剧,茎秆和穗轴等器官干物质积累速度降低,引起玉米植株出现早衰,穗轴和籽粒失水加快,导致籽粒与穗轴含水率同步降低。此外,黄淮海地区高温、干旱气候可能加速籽粒脱水,需进一步结合区域气候验证。

3.2 合理增加种植密度可显著提高玉米籽粒产量

玉米耐密型在不同种植区域表现存在差异。黄淮海地区作为典型的冬小麦—夏玉米一年两熟制种植区,夏玉米种植密度通常在 6.0 万~9.0 万株/hm²,通过提高种植密度和选用中晚熟品种实现增产^[20-21]。研究表明,增密种植后,玉米穗粒数和千粒重呈下降趋势,空秆率增加,但单位面积有效穗数显著增加^[1,22]。杨仁能等研究发现,湖北低丘平原种植密度从 7.5 万株/hm² 增至 9.0 万株/hm²,春玉米、夏玉米产量分别增加 10.5%、14.4%^[23]。而徐宗贵等的研究表明,渭北旱地种植密度从 6.75 万株/hm² 增至 9.75 万株/hm²,籽粒产量呈下降趋势^[24]。本研究中,D2 密度处理下产量显著高

于 D1,增幅为 13.7%;D3 与 D2 密度处理下的产量差异不显著,增幅仅为 0.3%。不同品种从 D1 增至 D2 产量均呈增加趋势,而 V1 和 V2 从 D2 增至 D3 时产量略有降低,其他品种产量仍呈增加趋势。这表明不同品种对增密的增产效率存在差异,过度增加种植密度不利于产量提升。通过产量结合籽粒含水率和机收质量指标破碎率分析得知,V1 的产量均值最高,其次为 V4,分别为 10 226.5、9 674.1 kg/hm²。V1 和 V4 的籽粒含水率、破碎率均值分别为 27.9%、7.8% 和 23.3%、5.20%,相比之下,V4 的籽粒含水率较低,符合国家《玉米收获机械》(GB/T 21962—2020)标准规定的作业性能含水率指标,在 D3 密度下籽粒破碎率为 4.38%,符合《玉米收获机械》(GB/T 21962—2020)中破碎率≤5% 的机收标准。V6 的籽粒含水率和破碎率分别为 22.2%、4.85%,虽同时符合上述 2 个标准,但籽粒产量在 6 个品种中表现最低。

3.3 合理增加种植密度可以提高玉米机械粒收质量

玉米机械粒收质量受品种、栽培模式、播期、气候条件、收获机型和收获期等多种因素影响^[6,9-10,25]。降低籽粒破碎率是提高机械粒收质量的关键。以往研究多围绕籽粒含水率和机械粒收质量指标展开,但有关种植密度对籽粒含水率和破碎率的影响研究较少,且结论不一。夏来坤等的研究表明,不同夏玉米和春玉米的籽粒含水率、破碎率均随种植密度增加呈降低趋势^[26-27];而王荣焕等研究发现,京农科 728 在 9.0 万株/hm² 密度处理下的籽粒含水率和破碎率显著高于 6.0 万株/hm²^[28]。本研究中,籽粒含水率和破碎率均随种植密度增加呈降低趋势。本研究也选取了京农科 728(V5)为试

验材料,密度由 D1 增至 D3,籽粒含水率和破碎率分别下降 1.4、1.7 百分点。试验结果的差异可能与播期有关,玉米夏播时间推迟可使生育期缩短,籽粒成熟后脱水时间减少,收获时籽粒含水率相对较高^[29]。此外,不同种植区域玉米吐丝后有效积温和日照时数的差异也会影响籽粒含水率^[30]。有研究表明,籽粒破碎率与籽粒类型有关,硬粒型籽粒破碎率显著低于马齿型籽粒,且籽粒与果柄的力学特性对籽粒未脱净率有较大影响^[31]。前人研究普遍表明,籽粒含水率与破碎率呈极显著正相关^[5,12],本研究结果与之一致。本研究发现,籽粒破碎率与穗长呈显著正相关关系,可能是由于较长果穗与脱粒器械接触次数增多,脱粒时间相对延长,受到机械打击损伤的概率增加,导致破碎率升高,但需进一步试验验证。

综上所述,黄淮海地区是推广玉米机械粒收技术的重要产区,通过选择适宜品种和合理增加种植密度,可提高玉米籽粒产量,降低机械粒收的籽粒含水率和破碎率,从而减少收获后玉米籽粒储存和烘干成本。综合考虑种植密度、产量和宜机收性能,V4 在 D3 密度下表现最佳。

参考文献:

- [1] 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,2022,30(5):90-98.
- [2] 赵继玉,任伯朝,赵斌,等. 不同熟期夏玉米品种生长发育特性与产量形成的关系[J]. 中国农业科学,2021,54(1):46-57.
- [3] 王克如,李璐璐,高尚,等. 中国玉米机械粒收质量主要指标分析[J]. 作物学报,2021,47(12):2440-2449.
- [4] 柳枫贺,王克如,李健,等. 影响玉米机械粒收质量因素的分析[J]. 作物杂志,2013(4):116-119.
- [5] 孔凡磊,赵波,詹小旭,等. 四川省夏玉米机械粒收适宜品种筛选与影响因素分析[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020,28(6):835-842.
- [6] 尚赏,郭书亚,张艳,等. 不同收获期玉米籽粒穿刺强度差异及其与破碎率的相关性分析[J]. 江苏农业科学,2022,50(12):81-87.
- [7] 李璐璐,薛军,谢瑞芝,等. 夏玉米籽粒含水率对机械粒收质量的影响[J]. 作物学报,2018,44(12):1747-1754.
- [8] 薛军,李璐璐,张万旭,等. 玉米穗轴机械强度及其对机械粒收籽粒破碎率的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(10):1868-1877.
- [9] 刘志辉,展茗,梁如玉,等. 延迟收获对长江中游春玉米农艺性状及机收质量的影响[J]. 中国农业大学学报,2021,26(11):10-22.
- [10] 董朋飞,李潮海,李少昆,等. 持续阴雨对不同播期玉米籽粒含水率和机械粒收质量的影响[J]. 玉米科学,2019,27(5):137-142.
- [11] 刘佳媛,刘倩倩,陈祥,等. 不同玉米品种籽粒耐破碎性差异及影响因素[J]. 中国农业大学学报,2021,26(12):207-220.
- [12] 马文杰,邓敏,胡锦涛,等. 洞庭湖区夏玉米机收籽粒破碎率和含杂率相关因素分析[J]. 分子植物育种,2021,19(7):2338-2345.
- [13] 凌莉,裴文东. 种植密度对不同熟期玉米茎秆抗倒伏特性及产量的影响[J]. 玉米科学,2024,32(2):106-113.
- [14] 徐丽娜,安治良,陈士林,等. 种植密度对玉米茎秆强度和穗部性状的影响[J]. 河南农业科学,2023,52(8):11-17.
- [15] 李川,乔江方,谷利敏,等. 影响玉米籽粒直接机械化收获质量的生物学性状分析[J]. 华北农学报,2015,30(6):164-169.
- [16] 张宇星,杨致远,张丰屹,等. 不同年代玉米品种穗部性状对种植密度的响应[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(4):1016-1023.
- [17] 郑迎霞. 密度对两个春玉米品种生长特性、机收特性和产量的影响[D]. 贵阳:贵州大学,2021.
- [18] 张顺风,张桂萍,Marasini M,等. 玉米苞叶性状与收获期籽粒含水率相关性研究[J]. 河南农业大学学报,2020,54(4):551-558,565.
- [19] 彭丹丹,徐开未,陈远学. 密植夏玉米穗部脱水及力学特性研究[J]. 玉米科学,2024,32(2):84-94.
- [20] 任伟,赵鑫,黄收兵,等. 不同密度下增施有机肥对夏玉米物质生产及产量构成的影响[J]. 中国生态农业学报,2014,22(10):1146-1155.
- [21] 徐田军,吕天放,赵久然,等. 黄淮海地区主推夏播玉米品种籽粒脱水特性研究[J]. 中国农业科学,2021,54(4):708-719.
- [22] 张士龙,贺正华,黄益勤. 湖北省夏玉米耐密植宜机收品种筛选与评价[J]. 种子,2021,40(7):90-98.
- [23] 杨仁能,孙璐,张槐林,等. 增密对湖北省春玉米与夏玉米产量与机收质量的影响[J]. 玉米科学,2023,31(2):89-96.
- [24] 徐宗贵,孙磊,王浩,等. 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[J]. 中国农业科学,2017,50(13):2463-2475.
- [25] 李少昆. 我国玉米机械粒收质量影响因素及粒收技术的发展方向[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2017,35(3):265-272.
- [26] 夏来坤,谷利敏,丁勇,等. 不同夏玉米品种及其密度对籽粒机收质量的影响[J]. 玉米科学,2019,27(5):143-150.
- [27] 刘亚楠,路战远,孙峰成,等. 种植密度对不同玉米品种籽粒脱水特性和机收质量的影响[J]. 华北农学报,2022,37(6):132-141.
- [28] 王荣焕,徐田军,赵久然,等. 播期和密度对玉米籽粒机收主要性状的影响[J]. 玉米科学,2017,25(3):94-98.
- [29] 魏雯雯,刘彦佐,吴杨,等. 播期对不同熟期玉米产量及生理成熟后茎秆力学特性的影响[J]. 玉米科学,2024,32(2):114-125.
- [30] 闫丽慧,王昌亮,常建智,等. 气象因子对黄淮海地区粒收玉米籽粒灌浆与脱水特性的影响[J]. 玉米科学,2022,30(6):78-84,92.
- [31] 蔡超杰,陈志,韩增德,等. 种子玉米生物力学特性与脱粒性能的关系研究[J]. 农机化研究,2017,39(4):192-196.