

不同种植密度对玉米抗倒伏性的影响

赫云建 石生辉* 郝巧艳 孙姝奇 吕小飞

辽源市农业科学院 吉林 辽源 136200

摘要: 本研究以吉林主栽玉米品种吉单27为材料, 设置4.5-9.0万株/公顷4个密度梯度, 研究密度对抗倒伏性的影响。结果表明: 随密度增加, 茎秆直径由 17.82 ± 0.42 mm降至 14.15 ± 0.34 mm, 穿刺强度由 41.23 ± 2.01 N/mm²降至 30.82 ± 1.52 N/mm², 深层根系占比由35.6%降至26.8%, 倒伏率由4.6%升至19.8%。建议吉林地区吉单27适宜密度为6.0-7.0万株/公顷, 高产田可增至7.0-7.5万株/公顷(需配合化控措施)。

关键词: 玉米; 吉单27; 种植密度; 抗倒伏性; 茎秆力学特性; 根系构型

引言:

吉林省作为我国重要的玉米生产基地, 2022年玉米种植面积达423万公顷(占全国10.2%), 但密植栽培导致的倒伏问题日益突出, 平均造成15-20%的产量损失(严重年份超30%), 并影响机械收获效率和籽粒品质。吉单27作为吉林省农科院选育的中晚熟优良杂交种, 虽具有高产、优质、抗病等特性且在吉林中西部推广超20万公顷, 但其抗倒伏性能的密度响应规律尚未明确。鉴于倒伏受遗传、栽培和环境多因素调控, 其中种植密度作为关键可控因子, 通过加剧株间竞争导致茎秆细弱和根系发育不良——这一问题在吉林温带大陆性季风气候区(5-9月多风雨)尤为突出。为此, 本研究通过梯度密度试验系统解析密度对吉单27茎秆形态、力学特性、根系构型及倒伏率的影响机制, 旨在揭示其抗倒伏性能的密度响应规律、确定适宜密度阈值并建立配套栽培技术体系, 为区域玉米抗逆丰产栽培提供理论支撑和实践指导^[1]。

一、材料与方法

(一) 试验地概况

试验于2021-2023年在吉林省辽源市农业科学院试验基地(东经125° 15', 北纬42° 54')进行。该地区属温带大陆性季风气候, 年平均气温5.2℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 有效积温2800-3000℃·d, 无霜期130-135天, 年降水量600-700mm, 其中6-8月降水量占全年的70%以上。试验地为典型黑钙土, 耕层(0-20cm)基础肥力状况为: 有机质含量 28.4 ± 1.5 g/kg, 全氮 1.52 ± 0.08 g/kg, 有效磷 23.7 ± 1.2 mg/kg, 速效钾 185 ± 9 mg/kg, pH值 6.5 ± 0.3 。前茬作物为大豆, 采用秋翻春耙的耕作方式, 翻耕深度25-30cm。

(二) 试验材料

试验材料为吉林省主推中晚熟玉米品种吉单27, 由吉林省农业科学院玉米研究所选育。该品种在吉林地区生育期 128 ± 3 天, 株高 285 ± 15 cm, 穗位高 115 ± 8 cm, 具有高产、稳产、抗大斑病等特点。

(三) 试验设计

试验采用随机区组设计, 设4个种植密度处理: D1: 4.5万株/公顷(行距60cm, 株距37cm) D2: 6.0万株/公顷(行距60cm, 株距28cm) D3: 7.5万株/公顷(行距60cm, 株距22cm) D4: 9.0万株/公顷(行距60cm, 株距18cm) 每个处理设3次重复, 共12个小区。小区面积50m²(10m×5m), 四周设置2行保护行。试验于每年5月5日±3天采用机械精量播种, 播种深度4-5cm, 保证出苗整齐一致。

(四) 田间管理

试验采用统一的田间管理标准, 确保各处理间的可比性。施肥方案为: 播种前一次性基施复合肥(N-P₂O₅-K₂O=15-15-15)600kg/ha, 大喇叭口期(V12)追施尿素300kg/ha。除草措施采用“化学+人工”相结合的方式, 播后苗前喷施乙草胺(900g/ha)进行土壤封闭处理, 苗期辅以人工除草。水分管理方面, 根据土壤墒情监测结果, 在关键生育期(拔节-抽雄)通过补充灌溉使土壤含水量维持在田间持水量的70-80%。病虫害防治以玉米螟、蚜虫和叶部

病害为重点防控对象，分别采用5%甲维盐微乳剂（防治玉米螟）、10%吡虫啉可湿性粉剂（防治蚜虫）和25%嘧菌酯悬浮剂（防治大小斑病）进行科学防治。所有农事操作均严格按照时按量执行，确保试验条件的一致性^[2-3]。

（五）测定项目与方法

1. 茎秆形态特征测定

茎秆形态特征的测定工作于抽雄期（R1，播种后约65天）进行。每小区选取生长均匀、无病虫害的10株代表性植株作为测定样本。测定时，首先使用日本Mitutoyo数显游标卡尺（精度0.01mm）测量基部第3节间中部的直径，为确保数据准确性，在每个节间的垂直方向测量2次后取平均值。随后，使用经过校准的钢卷尺精确测量该节间的长度。最后，通过计算直径与长度的比值获得茎粗系数。所有测量工作均在上午8:00-10:00进行，以消除植株水分状况对测量结果的影响。测量过程中保持测量部位统一，避免节间弯曲或损伤对数据造成干扰。

2. 茎秆力学性能测定

茎秆力学性能测定包括穿刺强度和抗折力两个指标。穿刺强度测定采用中国农业大学研制的YYD-1型茎秆强度测定仪，选取基部第3节间中部10cm长的茎段作为测试样品。测试时设置穿刺速度为10mm/min，使用直径2mm的圆柱形探头垂直穿刺茎秆中部，记录最大穿刺力值，并通过公式计算得到单位面积的穿刺强度（N/mm²）。抗折力测定则采用INSTRON 3365万能材料试验机，设置跨距为10cm，加载速度为50mm/min，直至茎秆断裂，记录最大载荷值（N）。每个处理重复测定15个样本，确保数据可靠性。测试前所有茎秆样品均置于标准环境（25℃，相对湿度65%）中平衡24小时。

3. 根系参数测定

根系参数的测定在灌浆中期（R3，播种后约85天）完成。每小区选取3株具有代表性的植株，采用改良式根钻法取样，取样器直径为20cm，深度为40cm。取样后将根系按0-20cm和20-40cm土层分层收集。样品处理过程包括：使用2mm孔径筛网在流水下轻柔冲洗，去除附着土壤；采用加拿大Regent公司生产的WinRHIZO Pro 2019根系分析系统进行扫描，获取根长密度等参数；将洗净的根系在105℃烘箱中杀青30分钟后，调至80℃烘干至恒重，精确称量各土层根干重（精度0.01g）。同时称取对应植株地上部干重，计算

根冠比（根系干重/地上部干重）。整个操作过程注意保持根系完整，避免机械损伤。

4. 倒伏情况调查

倒伏调查于生理成熟期（R6，播种后约110天）进行。调查时制定明确的倒伏标准：茎秆倾斜角度 $\geq 45^\circ$ 或发生茎折的植株均记为倒伏株。调查方法为：避开边际2行植株，统计中间3行的全部植株（约50株/小区）。倒伏率计算公式为：倒伏率（%）=（倒伏株数/调查总株数） $\times 100\%$ 。同时详细记录倒伏类型（区分根倒和茎折）和倒伏程度：轻度倒伏（ $45^\circ-60^\circ$ ）、中度倒伏（ $61^\circ-75^\circ$ ）和重度倒伏（ $>75^\circ$ ）。调查工作由3名经验丰富的技术人员独立完成，最终结果取平均值，确保数据客观准确。遇到临界情况时，使用量角器进行精确测量判定^[4-5]。

（六）数据分析

采用SAS9.4软件进行统计分析：1）正态性检验（Shapiro-Wilk法）；2）方差齐性检验（Levene法）；3）单因素方差分析（ANOVA）；4）Duncan多重比较（ $\alpha=0.05$ ）；5）回归分析：建立密度与各指标的数学模型；6）主成分分析（PCA）：综合评价抗倒伏性能。

二、结果与分析

（一）茎秆形态特征

吉单27的茎秆形态参数受种植密度显著影响。随着密度从4.5万株/公顷增加到9.0万株/公顷，基部第3节间直径呈线性下降趋势，由 $17.82 \pm 0.42\text{mm}$ 显著降至 $14.15 \pm 0.34\text{mm}$ ，降幅达20.6%。同时，节间长度从 $12.03 \pm 0.51\text{cm}$ 增至 $15.12 \pm 0.61\text{cm}$ ，增幅25.7%，导致茎粗系数（直径/长度）由 1.48 ± 0.07 降至 0.94 ± 0.05 ，降幅36.5%。各处理间差异均达到显著水平（ $p < 0.05$ ）。

（二）茎秆力学性能

茎秆力学性能随密度增加显著降低。穿刺强度与密度的关系符合线性模型，由 $41.23 \pm 2.01\text{N/mm}^2$ 降至 $30.82 \pm 1.52\text{N/mm}^2$ ，降幅25.3%。抗折力表现出相似趋势，从 $154.92 \pm 7.52\text{N}$ 降至 $109.72 \pm 5.33\text{N}$ ，降幅29.2%。显微结构观察显示，高密度条件下茎秆维管束数目减少15-20%，厚壁细胞层厚度降低25-30%，木质素含量下降18-22%，这些结构变化直接导致了力学性能下降。

（三）根系发育特征

种植密度显著影响根系发育。在0-20cm土层，单株根干

重从 $15.18 \pm 0.74\text{g}$ 降至 $10.35 \pm 0.50\text{g}$, 降幅31.8%。20-40cm 深层根系占比从 $35.6 \pm 1.8\%$ 显著降至 $26.8 \pm 1.3\%$ 。根冠比由 0.21 ± 0.01 降至 0.14 ± 0.01 , 降幅33.3%。高密度条件下根系呈现“窄而浅”的空间构型特征, 侧根夹角减小 $15-20^\circ$, 显著降低了抗根倒能力。

(四) 倒伏率表现

倒伏率与种植密度呈极显著正相关。低密度处理(4.5万株/公顷)平均倒伏率为 $4.6 \pm 0.8\%$, 而高密度处理(9.0万株/公顷)达 $19.8 \pm 1.7\%$ 。Logistic回归模型分析显示, 当密度超过7.5万株/公顷时, 倒伏风险急剧增加。高密度处理茎折比例达 $68.5 \pm 3.3\%$, 显著高于低密度处理的 $21.3 \pm 2.1\%$, 这与茎秆力学性能的测定结果一致。

三、讨论

(一) 密度效应的生理机制

密度影响吉单27抗倒伏性的双重途径: 茎秆强度途径和根系锚固途径。高密度条件下, 红光/远红光比值降低, 诱导光敏色素信号通路激活, 促进赤霉素合成, 导致节间过度伸长。同时, 同化物优先供应地上部, 使茎秆机械组织和根系发育受限。与华北平原相比, 吉单27在吉林地区的密度敏感性更高, 可能与较低的光热资源有关。

(二) 适宜密度推荐

建议吉林地区吉单27玉米品种的适宜种植密度应根据不同生态条件进行差异化选择。在吉林中西部雨养区, 推荐采用6.0万-7.0万株/公顷的种植密度, 这一密度范围能

够确保植株茎粗系数维持在1.05以上, 茎秆穿刺强度超过 $35\text{N}/\text{mm}^2$, 同时深层根系占比保持在30%以上, 在保证产量的同时有效控制倒伏风险。对于灌溉条件良好的高产田块, 可适当提高种植密度至7.0万-7.5万株/公顷, 但必须配合化控调节措施以增强植株抗倒性。在易倒伏地区(如多风地带或土壤疏松地块), 建议将种植密度控制在6.5万株/公顷以下, 以确保稳产性。试验结果表明, 在上述推荐密度范围内, 吉单27能够较好地协调群体产量与个体发育的关系, 实现高产与抗倒伏的平衡

(三) 配套栽培措施

针对高密度(>7.5万株/公顷)栽培条件下的倒伏风险防控, 本研究提出以下配套栽培技术方案: 首先, 在化控调节方面, 建议在拔节期(V6-V8)叶面喷施乙烯利, 施用量控制在 $40-45\text{g}$ 有效成分/公顷, 该措施可使株高降低 $10-12\text{cm}$, 穗位高度相应降低 $8-10\text{cm}$, 显著改善植株抗倒伏能力。其次, 在土壤耕作方面, 推荐实施 $35-40\text{cm}$ 的深松作业, 打破犁底层, 改善土壤通透性, 促进根系下扎, 使 $20-40\text{cm}$ 深层根系占比提高5-8个百分点。第三, 在施肥管理上, 应采用基肥深施技术($15-20\text{cm}$ 土层)配合追肥分次施用策略, 建议将总氮肥的60%作为基肥深施, 40%在大喇叭口期和抽雄期分两次追施。此外, 建议配套实施宽窄行($80\text{cm}+40\text{cm}$)种植方式, 改善群体通风透光条件, 进一步降低倒伏风险。这些技术措施的综合应用, 可使高密度栽培条件下的倒伏率控制在10%以内, 实现高产与稳产的协同提升。

参考文献:

- [1]陈斌.种植密度对不同株高玉米茎秆抗倒伏能力的影响[J].农业技术与装备,2023(12).
- [2]门洪文,郭守鹏,黄昌见,等.种植密度对不同株型玉米农艺性状、产量及抗倒伏特性的影响[J].农学报,2021(7).
- [3]徐幸.种植密度对不同株高玉米品种茎秆抗倒伏性能及产量的影响[D].吉林农业大学,2019.
- [4]崔日鲜,梁淑敏,韩伟,等.种植密度对玉米抗倒指数的影响[C]//第十五届全国玉米栽培学术研讨会会议论文集.2017:78-79.
- [5]刘圣源.施氮量与种植密度对不同生育期春玉米茎秆抗倒伏特性的影响[D].吉林大学,2024.