中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

四川玉米生理成熟后抗倒性能变化及其影响因素

陈　祥，李小龙，杜　霞，刘佳媛，刘倩倩，袁继超，孔凡磊

Changes of maize lodging resistance after physiological maturity and its influencing factors in Sichuan

CHEN Xiang, LI Xiaolong, DU Xia, LIU Jiayuan, LIU Qianqian, YUAN Jichao, and KONG Fanlei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210044

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同播期春玉米生理成熟后倒伏特征及其影响因素

Lodging characteristics after physiological maturity of spring maize sowed at different dates and its influencing factors

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(4): 725–737

密度对春玉米生理成熟后倒伏变化的影响

Effect of planting density on lodging change of spring maize after physiological maturity

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(5): 855–869

基于扩散理论的华北春玉米生理成熟后籽粒脱水过程分析

Analysis of kernel dry down process after physiological maturity of spring maize based on diffusion theory in the North China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 545–557

乙烯利和激动素对玉米茎秆抗倒伏和产量的影响

Effects of ethephon and kinetin on lodging–resistance and yield of maize

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(9): 1326–1334

种植密度对川中丘陵夏玉米茎秆性状及产量的影响

Effect of planting density on stem characteristics and yield of summer maize in the Hilly Central Sichuan Basin, China

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(3): 356–364

四川省夏玉米机械粒收适宜品种筛选与影响因素分析

Variety screening of mechanical grain harvest and analysis of influencing factors of summer maize in Sichuan Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 835–842

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 9 月 第 29 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2021, 29(9): 1524−1532

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210044

陈祥, 李小龙, 杜霞, 刘佳媛, 刘倩倩, 袁继超, 孔凡磊. 四川玉米生理成熟后抗倒性能变化及其影响因素 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(9): 1524−1532

CHEN X, LI X L, DU X, LIU J Y, LIU Q Q, YUAN J C, KONG F L. Changes of maize lodging resistance after physiological maturity and its influencing factors in Sichuan[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1524−1532

四川玉米生理成熟后抗倒性能变化及其影响因素*

陈 祥, 李小龙, 杜 霞, 刘佳媛, 刘倩倩, 袁继超, 孔凡磊**

(四川农业大学农学院/农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室/作物生理生态及栽培四川省重点实验室 成都 611130)

摘 要: 玉米茎秆强度下降是造成生理成熟后玉米倒伏的重要因素。为明确玉米生理成熟后茎秆强度变化及影响因素, 本试验以玉米品种‘正红 6 号’为材料, 设置不同密度处理, 通过研究其生理成熟后茎秆强度、单位长度干重、含水率等变化规律, 分析影响生理成熟后茎秆强度的关键因素, 为机械粒收技术推广提供科学指导。结果表明, 玉米生理成熟后节间茎秆强度逐渐下降, 随着时间推移, 降低幅度逐渐减小; 生理成熟后玉米茎秆单位长度干重、含水率逐渐降低, 节间长粗比略有增加。不同密度间茎秆强度差异显著, 生理成熟后茎秆强度下降幅度不同, 在 4.5 万~10.5 万株·hm^{-2} 密度范围内, 随着密度增加, 茎秆强度下降幅度呈降低趋势, 低密度茎秆强度下降幅度大于高密度处理。种植密度增加导致玉米茎秆单位长度干重显著降低, 节间长粗比显著增加。本研究发现玉米生理成熟后茎秆单位长度干重降低是茎秆强度降低的主要原因; 种植密度增加显著降低了茎秆强度, 同时随着站秆时间的延长, 茎秆强度进一步降低, 增加了玉米倒伏风险。因此, 合理密植、适期收获能降低因生理成熟后站秆能力下降而导致倒伏的风险。

关键词: 玉米; 生理成熟; 茎秆含水率; 单位长度干重; 茎秆强度; 抗倒性能

中图分类号: S513 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Changes of maize lodging resistance after physiological maturity and its influencing factors in Sichuan*

CHEN Xiang, LI Xiaolong, DU Xia, LIU Jiayuan, LIU Qianqian, YUAN Jichao, KONG Fanlei**

(College of Agronomy, Sichuan Agricultural University / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture / Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 611130, China)

Abstract: Densification planting and delayed harvesting are important measures for the promotion and development of mechanized grain harvesting technology of maize, but they also reduce the lodging resistance of stalks and increase the risk of lodging. The appearance of maize lodging not only increases the difficulty of mechanical harvesting and reduces the speed of mechanical harvesting, but also increases the loss of ear caused by lodging and reduces the yield of mechanical grain harvest. Therefore, the purpose of this experiment was to explore the changing law of the lodging resistance ability of maize stalks after physiological maturity under different densities and to provide a scientific basis for the development of maize dense planting and high-yielding mechanical grain harvest technology. This experiment used ‘Zhenghong 6’ as the material and set 6 density treatments: 3.0×10^4 plants·hm^{-2} (B1), 4.5×10^4 plants·hm^{-2} (B2), 6.0×10^4 plants·hm^{-2} (B3), 7.5×10^4 plants·hm^{-2} (B4), 9.0×10^4 plants·hm^{-2} (B5), and 10.5×10^4 plants·hm^{-2} (B6). In the

* 国家重点研发计划项目 (2017YFD0301704, 2018YFD0301206, 2016YFD0300307) 和四川省玉米创新团队项目 (SCCXTD-2020-02) 资助

** 通信作者: 孔凡磊, 主要研究方向为玉米高产高效栽培。E-mail: kflstar@163.com

陈祥, 研究方向为玉米高产高效栽培。E-mail: scnydxcx@qq.com

收稿日期: 2021-01-21 接受日期: 2021-06-05

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0301704, 2018YFD0301206, 2016YFD0300307) and Sichuan Maize Innovation Team Program (SCCXTD-2020-02).

** Corresponding author, E-mail: kflstar@163.com

Received Jan. 21, 2021; accepted Jun. 5, 2021

physiological maturity period (August 6, A1), 11 d after physiological maturity (August 17, A2), 22 d after physiological maturity (August 28, A3), and 35 d after physiological maturity (September 10, A4), 5 plants in each plot were sampled and the changing laws of stalk strength, internode morphology, internode dry matter, moisture content, etc. were determined. The results showed that the internode stalk strength of maize decreased after physiological maturity, but the decreasing range gradually reduced with time. After physiological maturity, the dry weight per unit length and water content of stalk decreased, while the internode length-to-diameter ratio increased slightly. Stalk strength and it's change with time were significantly different among different densities after physiological maturation. In the density range of 4.5×10^4 plants·hm^{-2} to 10.5×10^4 plants·hm^{-2}, the decreased amplitude of stalk strength showed a decreasing trend with the increase of density, and that of stalk strength of low density was greater than that of high density. The increase in planting density resulted in a significant decrease in stalk dry weight per unit length and a significant increase in the internode length-to-diameter ratio. The results showed that the decrease of stalk dry weight per unit length after physiological maturity was the main reason for the decrease of stalk strength. The increase of planting density significantly reduced the stalk strength, and with the extension of standing time, the stalk strength further decreased. The stalk strength of different densities decreased differently, and the decrease rate of low density was greater, but the stalk strength of high density was still lower than that of low density treatment all the time. Therefore, properly dense planting and harvest at the right time can reduce the risk of lodging caused by the decline of the standing capacity of culms after physiological maturity of maize.

Keywords: Maize; Physiological maturity; Stalk moisture content; Dry weight per unit length; Stalk strength; Lodging resistance

玉米 (*Zea mays*) 全程机械化生产是我国现代玉米生产的主要发展方向, 而机械粒收是制约玉米全程机械化生产的关键环节[1]。收获时籽粒含水率偏高造成的籽粒破碎率偏高是玉米机械粒收遇到的关键性问题[2-3]。延迟收获、降低籽粒含水率可以降低籽粒破碎, 提高收获质量[4-6]。但随着收获时间的推迟, 玉米植株逐渐脱水衰老, 导致茎秆强度降低, 茎秆抗倒能力下降, 玉米发生倒伏的风险也随之增加[7-8], 增加了机械化收获难度。薛军等[7] 研究表明, 我国黄淮海地区玉米从 10 月 21 日至 12 月 6 日收获, 总倒伏率由 9.7% 提高到 27.1%, 茎折率由 0.5% 提高至 11.8%, 根倒率由 9.3% 提高至 15.3%。

西南地区玉米种植密度较低, 增密种植是提高西南玉米区产量的重要途径[9], 增密种植能最大程度发挥机械粒收潜力, 提高玉米生产效率和产量。但密度的增加导致玉米倒伏发生的风险上升[10]: 玉米种植密度增加导致营养生长后期上部冠层形成荫蔽的时期提早, 下部叶片获得的有效光合辐射降低[11], 用于基部节间发育的光合产物减少, 加上植株之间对营养物质的竞争, 最终导致茎秆基部节间充实度不足, 茎粗减小[12], 抗倒伏能力下降[13-14]。高密度种植的玉米收获期茎秆质量变差, 易发生倒伏[15-16]。玉米倒伏不仅增加机械收获的难度, 降低机械收获速度, 同时增加了因倒伏而造成的落穗损失, 降低机械收获产量[17-18]。

国内就增密种植以及站秆时间对玉米抗倒性能分别进行过研究, 玉米抗倒性能随着种植密度的增加和站秆时间的延长而逐渐降低, 但玉米抗倒性能对站秆时间的响应是否因种植密度不同而不同, 目前尚未清楚。因此, 本试验探讨了四川地区不同密度下玉米生理成熟后茎秆抗倒伏能力的变化规律, 以期为玉米密植高产机械收获技术发展提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2020 年在四川省德阳市中江县辑庆镇新建村 (31°N, 104°E) 试验基地进行, 该地区属于亚热带季风性湿润气候, 年降水量 882.5 mm, 年均气温 16.7 ℃, 年无霜期 286 d。玉米生理成熟后取样时间段内的主要气象因子日变化情况如图 1 所示。

1.2　试验设计

本试验参试玉米品种为'正红 6 号' (由四川农业大学正红生物技术有限责任公司提供) 为材料, 3 月 24 日播种, 设 6 个密度: 3.0 万株·hm^{-2} (B1)、4.5 万株·hm^{-2} (B2)、6.0 万株·hm^{-2} (B3)、7.5 万株·hm^{-2} (B4)、9.0 万株·hm^{-2} (B5) 和 10.5 万株·hm^{-2} (B6), 每个处理重复 3 次, 随机排列。每个小区 (宽 4.8 m, 长 5.5 m) 宽窄行种植, 宽行 110 cm, 窄行 50 cm。施肥以及管理措施按当地高产要求进行。于吐丝期选取吐丝时间一致、长势一致的植株挂牌标记, 方便之后取样测定。分别于生理成熟期 (8 月 6 日, A1)、生理成熟后 11 d (8 月 17 日, A2)、生理成熟后 22 d (8 月 28 日, A3) 和生理成熟后 35 d (9 月 10 日, A4) 取样, 从各小区间选取长势一致、具有代表性的挂牌植株 5 株, 从地面水平截断后, 做好标记带回室内测定性状指标。

1.3　测定项目及方法

1.3.1　基部节间形态性状

将取回来的植株, 从穗位节剪断, 将穗下部分叶片以及叶鞘部分剥离, 选取生产中易发生倒折的基

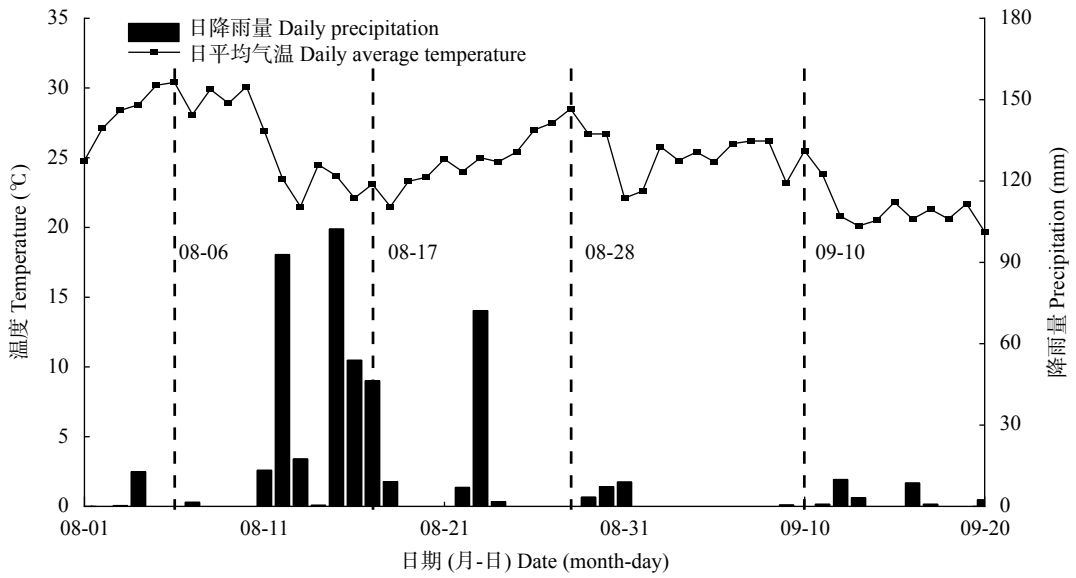

图 1 研究区玉米取样期间部分气象资料

Fig. 1 Partial meteorological data during the sampling period of maize in the study area

部第 3 节间 (S_3)、第 4 节间 (S_4)[19], 以及直接承担果穗重量的穗下第 1 节间 (S_X) 作为测量目标, 用直尺测量其节间长, 用游标卡尺测定其节间粗 (大小直径取平均), 计算节间长粗比。

$$长粗比 = 节间长(cm)/节间粗(cm) \quad (1)$$

1.3.2 茎秆力学强度

将测完形态指标的茎秆用浙江拓普仪器生产的 YYD-1 茎秆强度测量仪器测定基部节间茎秆强度: 基部第 3 节间测定穿刺强度, 第 4 节间测量弯曲强度, 穗下第 1 节间在测量穿刺强度之后, 再次测量弯曲强度。

穿刺强度 (RPS): 参考勾玲的测量方法[13]。用 1 mm^2 的探头在节间中部以垂直长轴直径的方向匀速缓慢插入, 读取穿透茎秆表皮的最大值, 即为穿刺强度。

弯曲强度 (BS): 将茎秆放置于间距 10 cm 的支撑架凹槽, 然后将横截面积为 0.5 cm^2 的 Y 型探测头于茎秆中部以垂直茎秆长轴直径的方向匀速缓慢向下压, 直至茎秆折断为止, 读取最大值即为该茎的弯曲强度。

1.3.3 节间茎秆重量与含水率

及时将测定完茎秆强度基部第 3、第 4 节间、穗下第 1 节分别截取下来, 称取鲜重, 即为各节间鲜重; 置于 105 ℃ 的烘箱中杀青 30 min, 之后于 80 ℃ 的烘箱内烘干至恒重, 称重, 即为各节间干重。计算单位长度干重 (DWUL) 和茎秆含水率。

$$单位长度干重(g\cdot cm^{-1}) = 节间干重(g)/节间长度(cm) \quad (2)$$

$$茎秆含水率(\%) = (节间鲜重 - 节间干重)/节间鲜重 \times 100\% \quad (3)$$

1.4 数据整理与分析

采用 Excel 2016 处理数据, SPSS Statistics 27 进行统计分析, 运用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 玉米生理成熟后不同时间茎秆节间机械强度变化

田间站秆时间与种植密度对玉米茎秆强度的影响均达极显著水平 (表 1), 两者的互作效应也达极显著水平 (P<0.01)。生理成熟后茎秆强度均随时间呈降低的变化趋势, 其中 8 月 6 日、8 月 17 日和 8 月 28 日 3 个测定时期间差异达显著水平 (P<0.05); 8 月 28 日与 9 月 10 日除 S_X 弯曲强度差异显著外, 其他节间茎秆强度差异均不显著。S_3 穿刺强度、S_4 弯曲强度、S_X 穿刺强度、S_X 弯曲强度从 8 月 6 日的 48.98 N、206.70 N、26.30 N 和 85.72 N 下降到 9 月 10 日的 36.83 N、102.71 N、18.01 N 和 53.08 N, 下降幅度分别为 24.81%、50.31%、31.48% 和 38.08%。不同取样时期, 密度间的茎秆强度变化趋势存在差异, 8 月 6 日中 S_3 穿刺强度、S_4 弯曲强度随密度增加呈先增加后降低的趋势, 其中 B2 密度的茎秆强度最大; 其余时期的茎秆强度变化趋势为随密度增加茎秆强度逐渐降低。各时期平均茎秆强度随密度增加呈降低趋势, B2、B3、B4、B5 和 B6 相较于 B1 密度处理, S_3 穿刺强度分别降低 14.49%、19.39%、36.71%、37.71% 和 45.41%, S_4 弯曲强度分别降低

表 1　不同密度玉米生理成熟后不同时间不同节间茎秆强度

Table 1　Strength of basal internodes of maize with different densities after physiological maturity

取样日期(月-日) Sampling date (month-day)	密度 Density ($\times10^4$ plants·hm^{-2})	穿刺强度 Rind penetration strength (N)		弯曲强度 Bending strength (N)	
		S_3	S_X	S_4	S_X
08-06 (生理成熟期 Physiological maturity date)	3.0	57.80±5.0ab	32.50±2.6a	310.04±55.4b	128.56±10.5a
	4.5	63.24±4.0a	29.64±1.8a	360.62±68.7a	135.72±13.5a
	6.0	50.24±7.1bc	28.12±2.4a	222.66±55.8c	83.82±15.8b
	7.5	44.76±4.8c	22.04±1.8b	139.18±33.8d	53.76±12.0cd
	9.0	44.12±1.9c	22.80±3.7b	123.38±7.1de	69.92±23.0bc
	10.5	33.72±4.5d	22.68±2.6b	84.32±11.7e	42.53±8.0d
	平均 Average	48.98±10.7a	26.30±4.7a	206.70±110.6a	85.72±38.0a
08-17	3.0	54.98±7.5a	22.12±4.4a	279.58±63.2a	91.64±17.5a
	4.5	47.98±5.3a	22.32±3.1a	211.12±28.7b	79.76±16.5a
	6.0	54.36±8.2a	24.26±3.7a	202.16±69.5b	73.34±15.2a
	7.5	37.76±13.0b	22.76±3.5a	103.28±26.6c	49.58±13.1b
	9.0	35.28±4.0b	22.20±4.9a	113.86±19.7c	50.42±15.3b
	10.5	37.70±7.2b	21.94±4.3a	111.76±28.8c	51.50±9.1b
	平均 Average	44.68±11.0b	22.60±3.7b	170.29±77.7b	66.04±21.4b
08-28	3.0	56.48±5.3a	20.26±2.5ab	246.58±22.6a	59.33±3.6a
	4.5	49.30±5.2a	18.90±3.0abc	175.44±41.0b	72.53±10.2a
	6.0	37.78±5.2b	21.12±4.6a	96.36±31.5c	37.86±13.7b
	7.5	32.08±5.8bc	16.50±2.5abc	64.16±16.6c	28.83±7.8b
	9.0	30.44±7.3bc	16.15±4.0bc	71.60±15.0c	38.32±12.2b
	10.5	24.72±2.0c	15.12±4.7c	65.12±12.4c	31.88±6.8b
	平均 Average	38.47±12.3c	18.01±4.0c	119.88±73.3c	44.79±18.0d
09-10	3.0	57.88±9.5a	23.30±6.5a	201.48±43.8a	98.40±31.4a
	4.5	33.70±4.1bc	17.88±1.8bc	83.06±22.8bc	44.20±12.8c
	6.0	40.72±6.6b	18.60±3.6bc	120.04±21.2b	63.10±9.4b
	7.5	29.16±5.7c	19.08±1.5ab	71.30±17.8bc	35.32±12.1c
	9.0	31.64±11.0c	15.30±2.1bc	82.38±9.7bc	43.96±6.8c
	10.5	27.86±2.7c	13.94±2.6c	58.00±5.2c	33.50±6.4c
	平均 Average	36.83±12.3c	18.01±4.4c	102.71±53.3c	53.08±26.9c
F	取样日期 Sampling date (A)	24.504**	39.723**	51.819**	49.696**
	密度 Density (B)	49.279**	9.479**	79.988**	52.675**
	A×B	3.570**	1.865*	6.197**	6.067**

S_3、S_4和S_X分别为基部第3、第4节间和穗下第1节间。表中不同小写字母表示同一取样时期不同密度在$P<0.05$水平差异显著; 平均值后的不同小写字母表示不同取样时期在$P<0.05$水平差异显著。*表示$P<0.05$水平影响显著, **表示$P<0.01$水平影响显著。S_3 and S_4 are the third and fourth internodes from the stem base; and S_X is the first internode below the ear. Different lowercase letters in the table indicate significant differences among different densities at $P<0.05$ in the same sampling date. Different lowercase letters after the averages indicate significant differences at $P<0.05$ among different sampling dates. * and ** indicate significant effects at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

19.99%、38.21%、63.58%、62.3% 和 69.24%。

通过对各密度不同节间茎秆强度与生理成熟后站秆时间进行函数拟合, 茎秆强度 (y) 与生理成熟后时间 (x) 符合一次函数关系 $y=a+bx$, 拟合结果如表 2 所示。除 B1 密度的 S_3 穿刺强度、S_X 弯曲强度拟合结果不显著, 其他拟合函数均达到显著 ($P<0.05$) 或极显著水平 ($P<0.01$)。B2−B6 密度随着密度的增加, S_3 穿刺强度、S_4 弯曲强度、S_X 弯曲强度拟合函数的斜率 (表 2 中参数 b 为一次函数的斜率) 呈增加的趋势, 说明随着密度的增加, S_3 穿刺强度、S_4 弯曲强度、S_X 弯曲强度下降的趋势逐渐减缓。

2.2　玉米生理成熟后不同时间茎秆节间干物质与含水率变化

玉米生理成熟后茎秆基部 S_3、S_4、S_X 单位长度干重逐渐下降 (图 2); S_3、S_4、S_X 单位长度干重从 8 月 6 日的 0.573 g·cm^{-1}、0.461 g·cm^{-1} 和 0.285 g·cm^{-1} 降至 9 月 10 日的 0.388 g·cm^{-1}、0.316 g·cm^{-1} 和 0.224 g·cm^{-1}。S_3、S_4、S_X 单位长度干重 8 月 28 日至 9 月 10 日降低幅度仅为 1.64%、2.47% 和−3.43%, 说明单位长度干重在后期降低趋势逐渐趋于平缓。 其中 S_X 单位长度干重在后期增加, 主要原因是后期单位长度干重降低幅度不明显, 加上植株间差异导致的。

表 2 玉米不同密度下不同节间茎秆强度与生理成熟后站秆时间的拟合参数及结果

Table 2 Fitting parameters and results of stalk strength of different internodes and stalk standing time after physiological maturation in maize under different densities

密度 Density ($\times10^4$ plants·hm^{-2})	穿刺强度 Rind penetration strength (N)				弯曲强度 Bending strength (N)			
	S_3		S_X		S_4		S_X	
	b	R^2	b	R^2	b	R^2	b	R^2
3.0	0.0199	0.0015	−0.2395	0.2551*	−3.1807	0.4601**	−0.9407	0.1711
4.5	−0.7728	0.7540**	−0.3340	0.6796**	−7.6035	0.8023**	−2.4597	0.7793**
6.0	−0.3963	0.3023*	−0.2780	0.5279**	−3.5791	0.4353**	−0.8125	0.2392*
7.5	−0.4579	0.3855**	−0.1301	0.2460*	−2.0864	0.5084**	−0.6393	0.3311**
9.0	−0.3609	0.3098*	−0.2484	0.4481*	−1.4268	0.5345**	−0.7632	0.2791*
10.5	−0.2679	0.2720*	−0.2936	0.5085**	−1.1392	0.3140*	−0.4318	0.2730*

*和**分别表示在$P<0.05$和$P<0.01$水平相关显著。* and ** indicate significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

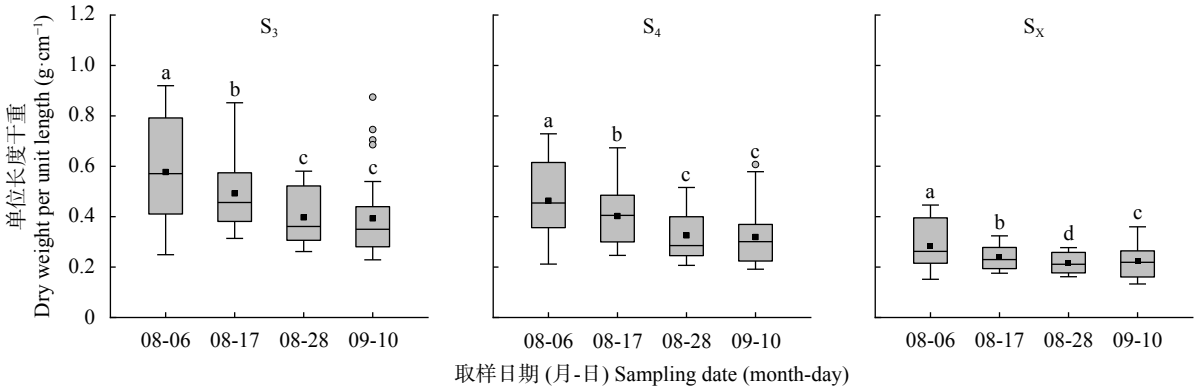

图 2 玉米生理成熟后不同时间不同茎秆节间的单位长度干重变化

Fig. 2 Changes in dry weight per unit length of different maize internodes in different times after physiological maturity

S_3、S_4 和 S_X 分别为基部第 3、第 4 节间和穗下第 1 节间。箱线图中箱体部分代表 50% 样本的分布区域, 即四分位区间 (IQR)。两端线为 Tukey 法判定的合理观测样本边界。箱体中实线为样本中位数, 实心点为样本均值, 空心点表示异常值。图中不同小写字母表示不同取样期在 $P<0.05$ 水平差异显著。S_3 and S_4 are the third and fourth internodes from the stem base; and S_X is the first internode below the ear. The main box called IQR contains fifty percent samples in Box-whisker Plot. The two sidelines mean the reasonable sample borders in Tukey method. The solid line in box positions the median sample. The solid point sthands for the average. The circle stands for the outlier. Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$ among different sampling dates.

随着种植密度增加, 玉米茎秆单位长度干重下降 (图 3), B2、B3、B4、B5 和 B6 相较于 B1 处理, S_3 单位长度干重平均降低 18.41%、29.21%、43.94%、50.77% 和 56.46%, S_4 平均降低 18.99%、26.78%、40.61%、51.01% 和 56.11%, S_X 平均降低 13.14%、21.08%、35.56%、42.17% 和 49.02%。

玉米茎秆生理成熟后基部节间含水率下降 (图 4), S_3、S_4 和 S_X 含水率由 76.71%、76.95%、73.84% 下降至 67.1%、58.64% 和 34.86%, 脱水速率分别为 0.27 %·d^{-1}、0.52 %·d^{-1} 和 1.11 %·d^{-1}, 玉米茎秆由下向上各节间脱水速率逐渐增加。8 月 6 日至 8 月 17 日由于降雨增多, 温度较低 (图 1), 节间含水率降低不显著, 8 月 17 日至 9 月 10 日, 降雨相对较少, 温度回升, 节间含水率显著降低 ($P<0.05$)。不同密度间茎秆含水率变化规律不明显。

2.3 玉米生理成熟后不同时间茎秆形态性状变化

生理成熟后各节间长粗比略有上升, S_3 中 9 月 10 日与 8 月 6 日差异显著 ($P<0.05$), S_4、S_X 中 8 月 28 日、9 月 10 日与 8 月 6 日差异显著 ($P<0.05$)。各节间长粗比从 8 月 6 日的 4.31、6.01 和 8.69 增加至 9 月 10 日的 4.82、6.46 和 9.54, 增长幅度分别为 11.83%、7.49% 和 9.78% (图 5)。

密度增加, 各节间长粗比呈上升的趋势。B2、B3、B4、B5 和 B6 相较于 B1 密度处理, 3 个节间平均长粗比分别增加 15.63%、15.82%、28.18%、40.36% 和 37.45% (图 6)。

2.4 玉米生理成熟后茎秆节间抗倒能力影响因素分析

相关性分析表明 (表 3), 玉米茎秆强度与单位长度干重呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与含水率呈显著正

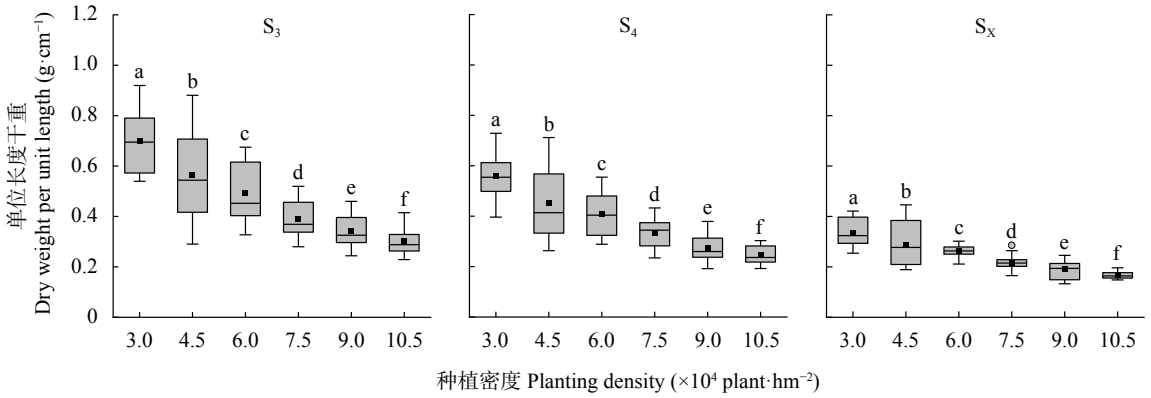

图 3　不同密度玉米不同茎秆节间的单位长度干重变化

Fig. 3　Changes in dry weight per unit length of different maize internodes with different densities

S_3、S_4 和 S_X 分别为基部第 3、第 4 节间和穗下第 1 节间。箱线图中箱体部分代表 50% 样本的分布区域, 即四分位区间 (IQR)。两端线为 Tukey 法判定的合理观测样本边界。箱体中实线为样本中位数, 实心点为样本均值, 空心点表示异常值。图中不同小写字母分别表示不同密度在 P<0.05 水平差异显著。S_3 and S_4 are the third and fourth internodes from the stem base; and S_X is the first internode below the ear. The main box called IQR contains fifty percent samples in Box-whisker Plot. The two sidelines mean the reasonable sample borders in Tukey method. The solid line in box positions the median sample. The solid point stands for the average. The circle stands for the outlier. Different lowercase letters indicate significant differences at P<0.05 among different densities.

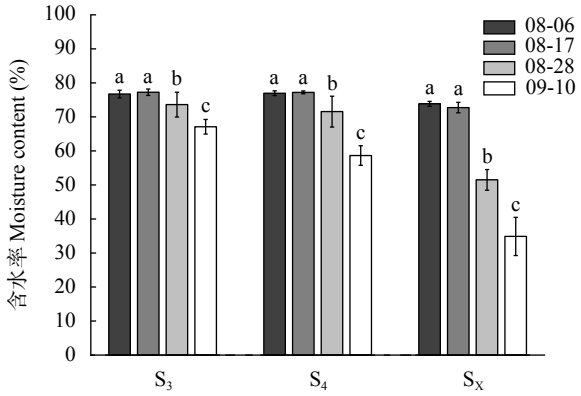

图 4　玉米生理成熟后不同时间 (月-日) 不同茎秆节间含水率变化

Fig. 4　Changes in moisture content of different maize internodes in different times (month-day) after physiological maturity

S_3、S_4 和 S_X 分别为基部第 3、第 4 节间和穗下第 1 节间。图中不同小写字母分别表示不同取样期在 P<0.05 水平下差异显著。S_3 and S_4 are the third and fourth internodes from the stem base; and S_X is the first internode below the ear. Different lowercase letters indicate significant differences at P<0.05 among different sampling dates.

相关 (P<0.05), 与节间长粗比呈极显著负相关 (P<0.01)。其中单位长度干重与茎秆强度相关系数最高, 与 S_3 穿刺强度、S_4 弯曲强度的相关系数分别为 0.934 和 0.968。

S_3 穿刺强度 (y) 与单位长度干物质 (x_1)、长粗比 (x_2)、含水率 (x_3) 的回归方程为 y=43.6496x_1−4.484 41x_2+0.276 36x_3+21.966 84 (R^2=0.9174**)。

S_4 弯曲强度 (y) 与单位长度干物质 (x_1)、长粗比 (x_2)、含水率 (x_3) 的回归方程为 y=593.500 39x_1+0.4681x_2+1.033 13x_3−148.985 24 (R^2=0.951**)。

3　讨论

玉米抗倒伏能力与茎秆强度有关, 茎秆弯曲强度、茎秆外皮穿刺强度以及压碎强度等均影响倒伏的发生[20-22]。而茎秆强度的大小取决于茎秆本身的性质, 其中茎秆干物质是增加茎秆充实度的重要组成部分, 干物质在茎秆中以总碳水化合物和结构碳水化合物增加的形式积累, 最终导致茎秆强度增加[23]。茎秆中水形成的膨压对茎秆强度具有正效应, 茎秆强度随含水量的下降而降低[24]。茎秆强度与茎秆形态有关, 茎秆强度与茎秆节间长粗比呈显著或极显著负相关关系[25]。本试验中, 玉米生理成熟后各节间茎秆强度逐渐降低。相关性分析表明, 茎秆强度与节间含水率呈显著正相关, 与单位长度干重呈极显著正相关, 与节间长粗比呈极显著负相关, 其中茎秆强度与单位长度干重相关系数最高。生理成熟后各节间单位长度干重逐渐降低, 含水率逐渐降低, 长粗比略有增加。进一步对这 3 个影响茎秆强度的因素分析可知, 生理成熟后单位长度干重变化幅度最大, 含水率次之, 而节间长粗比只是略有变化, 说明生理成熟后茎秆形态性状的变化并不是引起茎秆强度下降的主要因素。综上所述, 生理成熟后茎秆单位长度干重下降是茎秆强度降低的首要原因, 节间含水率下降也是茎秆强度降低的原因之一。田间站秆后期出现茎秆节间单位长度干重与茎秆强度降低幅度逐渐减缓的现象, 可能由于站秆前期茎秆中非结构

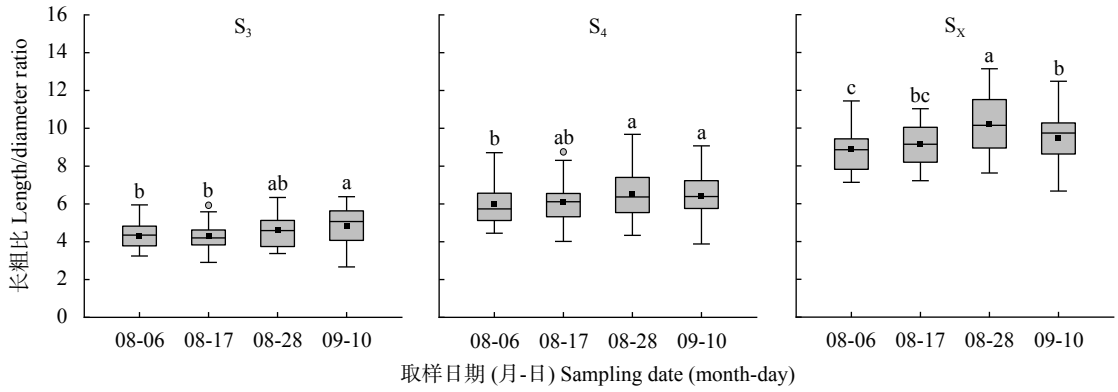

图 5 玉米生理成熟后不同时间不同茎秆节间的长粗比变化

Fig. 5 Changes in length/diameter ratio of different maize internodes in different times after physiological maturity

S_3、S_4 和 S_X 分别为基部第 3、第 4 节间和穗下第 1 节间。箱线图中箱体部分代表 50% 样本的分布区域, 即四分位区间 (IQR)。两端线为 Tukey 法判定的合理观测样本边界。箱体中实线为样本中位数, 实心点为样本均值, 空心点表示异常值。图中不同小写字母分别表示不同取样期在 $P<0.05$ 水平差异显著。S_3 and S_4 are the third and fourth internodes from the stem base; and S_X is the first internode below the ear. The main box called IQR contains fifty percent samples in Box-whisker Plot. The two sidelines mean the reasonable sample borders in Tukey method. The solid line in box positions the median sample. The solid point stands for the average. The circle stands for the outlier. Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$ among different sampling dates.

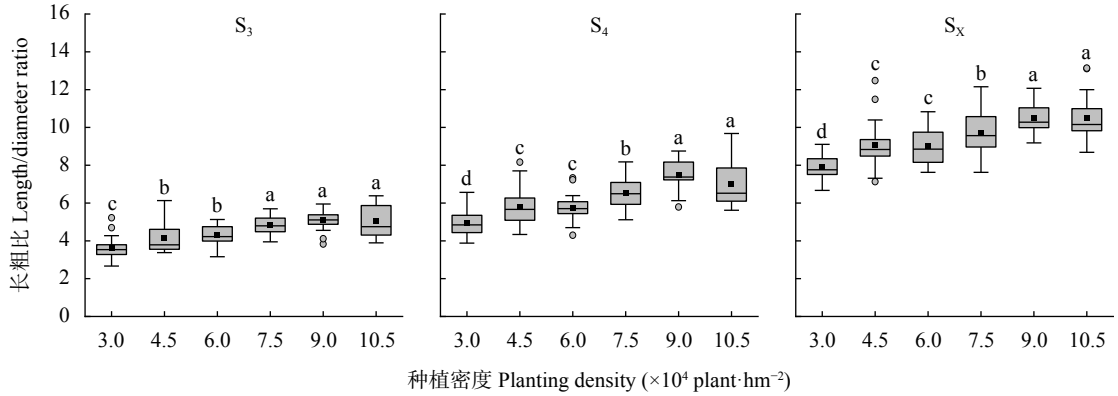

图 6 不同密度玉米不同茎秆节间的长粗比变化

Fig. 6 Changes in length/diameter ratio of different maize internodes with different densities

S_3、S_4 和 S_X 分别为基部第 3、第 4 节间和穗下第 1 节间。箱线图中箱体部分代表 50% 样本的分布区域, 即四分位区间 (IQR)。两端线为 Tukey 法判定的合理观测样本边界。箱体中实线为样本中位数, 实心点为样本均值, 空心点表示异常值。图中不同小写字母表示不同密度在 $P<0.05$ 水平差异显著。S_3 and S_4 are the third and fourth internodes from the stem base; and S_X is the first internode below the ear. The main box called IQR contains fifty percent samples in Box-whisker Plot. The two sidelines mean the reasonable sample borders in Tukey method. The solid line in box positions the median sample. The solid point stands for the average. The circle stands for the outlier. Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$ among different densities.

表 3 生理成熟后玉米茎秆强度与茎秆性状的相关性

Table 3 Correlation between stalk strength and stalk traits of maize after physiological maturity

指标 Index	穿刺强度 Rind penetration strength	含水率 Moisture content	单位长度干重 Dry weight per unit length	长粗比 Length/diameter ratio
弯曲强度 Bending strength		0.503*	0.968**	−0.767**
含水率 Moisture content	0.489*		0.438*	−0.329
单位长度干重 Dry weight per unit length	0.934**	0.385		−0.797**
长粗比 Length/diameter ratio	−0.867**	−0.432*	−0.812**	

表格左下角数据为第3节间穿刺强度与茎秆性状的相关性, 右上角为第4节间弯曲强度与茎秆性状的相关性。*和**分别表示$P<0.05$和$P<0.01$水平相关显著。The data in the lower left corner of the table is the correlation coefficients between the rind penetration strength of the third internode and the stem traits; the data in the upper right corner is the correlation coefficients between the bending strength of the fourth internode and the stem traits. * and ** mean significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

性碳水化合物降解速率较快, 结构性碳水化合物降解速率慢, 在站秆后期非结构性碳水化合物基本被消耗殆尽, 剩下由结构性碳水化合物构成干物质的主要组成部分, 因此茎秆单位长度干重的降低幅度逐渐减小, 茎秆强度的降低幅度也随之减小。

种植密度的提高带来了玉米植株间的竞争压力, 营养生长后期上部冠层形成荫蔽的时期提早, 造成中下部冠层内光照不良, 影响玉米茎秆形态建成、碳水化合物积累与分配、茎秆强度等[26-27], 增大倒伏的风险。高密度种植缩短了植株的干物质积累的持续时间, 导致茎秆单位长度干重下降[23]。在本试验中, 密度对玉米茎秆强度的影响达极显著水平, 除 8 月 6 日外, 各时期的茎秆强度均随密度增加而逐渐降低。相关性分析表明, 茎秆强度与茎秆长粗比呈极显著负相关, 与单位长度干重呈极显著正相关, 而种植密度提高后, 茎秆长粗比显著增加, 单位长度干重显著降低。由此可知, 种植密度增加使茎秆长粗比增加、单位长度干重降低, 最终导致茎秆强度降低。

本试验结果表明, 种植密度与玉米生理成熟后站秆时间均会影响茎秆强度。种植密度增加, 茎秆节间伸长、变细, 干物质积累下降, 茎秆强度下降, 生理成熟后由于植株衰老, 茎秆含水率下降, 干物质被分解, 进一步降低了茎秆强度, 增加倒伏风险。生理成熟后不同密度的茎秆强度降低趋势存在差异, 生理成熟后茎秆强度降低趋势随着种植密度的增加而逐渐减缓, 换句话说, 低密度茎秆强度的降低速率大于高密度的降低速率。出现这种现象的原因可能是由于延迟收获对茎秆强度的影响随着密度增加逐渐被密度效应所掩盖, 导致生理成熟后高密度玉米茎秆强度降低幅度较低。

4　结论

玉米生理成熟后, 茎秆含水率逐渐下降, 干物质降低, 茎秆强度减弱, 抗倒能力降低, 其中单位长度干重下降是其茎秆强度降低的主要因素; 密度增加, 茎秆强度降低, 并且随着站秆时间的延长茎秆强度会进一步下降。因此, 合理密植、适期收获能降低因生理成熟后站秆能力下降而导致倒伏的风险。

参考文献　References

[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): 1941−1959
LI S K, ZHAO J R, DONG S T, et al. Advances and prospects of maize cultivation in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11): 1941−1959

[2] 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
LI L L, XUE J, XIE R Z, et al. Effects of grain moisture content on mechanical grain harvesting quality of summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(12): 1747−1754

[3] 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
KONG F L, ZHAO B, ZHAN X X, et al. Variety screening of mechanical grain harvest and analysis of influencing factors of summer maize in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 835−842

[4] 赵波, 李小龙, 周茂林, 等. 西南玉米机械粒收籽粒破碎率现状及影响因素分析[J]. 作物学报, 2020, 46(1): 74−83
ZHAO B, LI X L, ZHOU M L, et al. Current status and influencing factors of broken rate in mechanical grain harvesting of maize in Southwest China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(1): 74−83

[5] 赵波, 詹小旭, 李小龙, 等. 四川省夏玉米机械化籽粒收获质量及其影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(4): 31−40
ZHAO B, ZHAN X X, LI X L, et al. Mechanical grain harvesting quality of summer maize in Sichuan and its influencing factors[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(4): 31−40

[6] 孔凡磊, 赵波, 吴雅薇, 等. 收获时期对四川春玉米机械粒收质量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(1): 50−56
KONG F L, ZHAO B, WU Y W, et al. Effects of harvesting date on mechanical grain-harvesting quality of spring maize in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(1): 50−56

[7] 薛军, 王群, 李璐璐, 等. 玉米生理成熟后倒伏变化及其影响因素[J]. 作物学报, 2018, 44(12): 1782−1792
XUE J, WANG Q, LI L L, et al. Changes of maize lodging after physiological maturity and its influencing factors[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(12): 1782−1792

[8] 赵波, 吴雅薇, 李小龙, 等. 四川春玉米生理成熟后穗下茎秆倒折的影响因素[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2020, 46(3): 278−284
ZHAO B, WU Y W, LI X L, et al. The influencing factors of the stalk lodging under ear after physiological maturity of spring maize in Sichuan[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2020, 46(3): 278−284

[9] 李少昆, 王克如, 谢瑞芝, 等. 实施密植高产机械化生产实现玉米高产高效协同[J]. 作物杂志, 2016, (4): 1−6
LI S K, WANG K R, XIE R Z, et al. Implementing higher population and full mechanization technologies to achieve high yield and high efficiency in maize production[J]. Crops, 2016, (4): 1−6

[10] STANGER T F, LAUER J G. Corn stalk response to plant population and the bt-European corn borer trait[J]. Agronomy Journal, 2007, 99(3): 657−664

[11] TETIO-KAGHO F, GARDNER F P. Responses of maize to plant population density. I. canopy development, light

relationships, and vegetative growth[J]. Agronomy Journal, 1988, 80(6): 930−935

[12] VAN ROEKEL R J, COULTER J A. Agronomic responses of corn to planting date and plant density[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(5): 1414−1422

[13] 勾玲, 黄建军, 张宾, 等. 群体密度对玉米茎秆抗倒力学和农艺性状的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(10): 1688−1695
GOU L, HUANG J J, ZHANG B, et al. Effects of population density on stalk lodging resistant mechanism and agronomic characteristics of maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(10): 1688−1695

[14] 刘海, 段宏凯, 郑丽萍, 等. 玉米品种与密度对植株性状的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(13): 21−25
LIU H, DUAN H K, ZHENG L P, et al. Effects of maize variety and planting density on plant characters[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(13): 21−25

[15] THOMISON P R, MULLEN R W, LIPPS P E, et al. Corn response to harvest date as affected by plant population and hybrid[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(6): 1765−1772

[16] XUE J, XIE R Z, ZHANG W F, et al. Research progress on reduced lodging of high-yield and -density maize[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(12): 2717−2725

[17] 薛军, 董朋飞, 胡树平, 等. 玉米倒伏对机械粒收损失的影响及倒伏减损收获技术[J]. 玉米科学, 2020, 28(6): 116−120, 126
XUE J, DONG P F, HU S P, et al. Effect of lodging on maize grain loss and loss reduction technology in mechanical grain harvest[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(6): 116−120, 126

[18] 薛军, 李璐璐, 谢瑞芝, 等. 倒伏对玉米机械粒收田间损失和收获效率的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(12): 1774−1781
XUE J, LI L L, XIE R Z, et al. Effect of lodging on maize grain losing and harvest efficiency in mechanical grain harvest[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(12): 1774−1781

[19] 赵波, 吴雅薇, 袁继超, 等. 四川省夏玉米生理成熟后穗下茎秆倒折位置分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(1): 18−25
ZHAO B, WU Y W, YUAN J C, et al. Analysis of the position of the stalk lodging under ear after physiological maturity of Sichuan summer maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(1): 18−25

[20] ROBERTSON D, SMITH S, GARDUNIA B, et al. An improved method for accurate phenotyping of corn stalk strength[J]. Crop Science, 2014, 54(5): 2038−2044

[21] JAMPATONG S, DARRAH L L, KRAUSE G F, et al. Effect of one- and two-eared selection on stalk strength and other characters in maize[J]. Crop Science, 2000, 40(3): 605−611

[22] 丰光, 刘志芳, 吴宇锦, 等. 玉米抗倒性与茎秆穿刺力和拉力关系的初步研究[J]. 玉米科学, 2010, 18(6): 19−23
FENG G, LIU Z F, WU Y J, et al. Primary study on correlation between corn variety lodging resistances and its stem puncture-pull strength[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(6): 19−23

[23] XUE J, ZHAO Y S, GOU L, et al. How high plant density of maize affects basal internode development and strength formation[J]. Crop Science, 2016, 56(6): 3295−3306

[24] ANDERSON B. Evaluation of methods for identification of corn genotypes with stalk rot and lodging resistance[J]. Plant Disease, 1994, 78(6): 590

[25] 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
LIU X L, MA X J, DOU P, et al. Effect of planting density on stem characteristics and yield of summer maize in the Hilly Central Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 356−364

[26] 姚敏娜, 施志国, 薛军, 等. 种植密度对玉米茎秆皮层结构及抗倒伏能力的影响[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(11): 2006−2014
YAO M N, SHI Z G, XUE J, et al. The effects of different planting densities on the cortex structure of steam and lodging resistance in maize[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(11): 2006−2014

[27] 程云, 王杧刘, 杨静, 等. 种植密度对夏玉米基部节间性状与倒伏的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(5): 112−116
CHENG Y, WANG T L, YANG J, et al. Effects of planting density on characteristics of basal internodes and lodging in summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(5): 112−116