

种植密度和深度对甘蔗产量及抗倒伏的影响

刘富成¹, 李照杰¹, 蔡文伟², 吴 伟^{1*}

1. 海南大学热带作物学院/海南省耐盐作物生物技术重点实验室, 海南海口 570228; 2. 中国热带农业科学院热带生物技术研究, 海南海口 571101

摘 要: 为进一步提高甘蔗单位面积产量, 合理的种植密度和深度一直是常用的栽培技术手段。但在增加产量的同时, 往往忽略了对甘蔗倒伏的影响。为确定不同种植密度和深度对甘蔗产量及倒伏的影响, 以甘蔗品种中糖 3 号为试验材料进行研究, 试验共设计 3.0、4.5、6.0、7.5 芽/m² 四个种植密度梯度及浅植 (30 cm)、深植 (40 cm) 2 种植深度, 对甘蔗的农艺性状、倒伏相关指数 (根系倒伏与茎秆倒伏) 和产量等进行测定。结果表明: 随着甘蔗生育期不断推进, 甘蔗根系和茎秆安全系数逐渐降低, 在下种后 180 d 甘蔗根系倒伏和茎秆倒伏风险较大, 处于敏感时期。种植密度从 3 芽/m² 增加至 6 芽/m², 甘蔗产糖量 (+32%) 和产量 (+36%) 显著增加, 同时甘蔗的茎秆倒伏抗性也随之增加。但进一步增加种植密度到 7.5 芽/m² 时, 产糖量和产量没有进一步显著增加, 但增加了甘蔗的根倒伏风险。与种植深度 30 cm 相比, 种植深度 40 cm 具有增加甘蔗产糖量 (+2.8%) 和产量 (+4.8%) 的趋势, 二者差异不显著。因此, 综合甘蔗产糖量、产量及抗倒伏等多个性状, 认为种植深度 40 cm, 种植密度为 6 芽/m² 可以在保证产量和产糖量的同时, 提高甘蔗的倒伏抗性。

关键词: 甘蔗; 种植深度; 种植密度; 倒伏; 产量

中图分类号: S566.1 文献标识码: A

Effects of Planting Density and Depth on Yield and Lodging Resistance in Sugarcane

LIU Fucheng¹, LI Zhaojie¹, CAI Wenwei², WU Wei^{1*}

1. College of Tropical Crops, Hainan University / Key Laboratory of Biotechnology of Salt Tolerant Crops of Hainan Provincial, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: Reasonable planting density and depth are the common cultivation techniques to increase sugarcane yield per unit area. However, the effect on sugarcane lodging is often neglected when the yield is increased. Sugarcane variety Zhongtang 3 was used as the experimental material to determine the effect of different planting density and depth on the yield and lodging. Four planting density 3.0, 4.5, 6.0 and 7.5 buds/m² and two planting depth of shallow planting (30 cm) and deep planting (40 cm) were designed in the experiment. The agronomic characters, lodging related index (root lodging and stalk lodging) and yield of sugarcane were measured. The results showed that as the growth period of sugarcane continued to advance, the safety factor of sugarcane root and stem gradually decreased, and the risk of root lodging and stem lodging of sugarcane was higher at 180 days after planting, which was in a sensitive period. When the planting density increased from 3 buds/m² to 6 buds/m², sugar yield (+32%) and yield (+36%) of sugarcane were significantly increased, and the stem lodging resistance of sugarcane was also increased. However, when the planting density was further increased to 7.5 buds/m², the sugar yield and yield did not increase significantly, but the risk of root lodging was increased. Compared with planting depth of 30 cm, planting depth of 40 cm had a tendency to increase sugar yield (+2.8%) and yield (+4.8%), although there was no significant difference between them. Therefore,

收稿日期 2022-09-07; 修回日期 2022-11-07

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32060442)。

作者简介 刘富成 (1995—), 男, 硕士, 研究方向: 作物栽培。*通信作者 (Corresponding author): 吴 伟 (WU Wei), E-mail: weiwu@hainanu.edu.cn。

considering sugar yield, yield and lodging resistance of sugarcane, we believe that planting depth of 40 cm and planting density of 6 buds/m² can improve lodging resistance of sugarcane while ensuring yield and sugar yield.

Keywords: sugarcane; planting depth; planting density; lodging; production

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.02.013

甘蔗是我国重要的经济作物和糖料作物,甘蔗糖占我国食糖总量的 90%以上,保障甘蔗产量对维护我国食糖安全,社会平稳运作至关重要^[1-2]。随着耕地面积的不断减少,很难通过增加种植面积来提高我国甘蔗总产量,越来越多的农业科学家更加关注于通过增加甘蔗单位面积产量来提高甘蔗总产量^[3]。在常规栽培措施管理中,增加种植密度是提高甘蔗产量的有效措施之一^[4]。大量研究表明,增加种植密度可以通过个体与群体之间的补偿关系来提高其产量^[5]。同时作物的倒伏抗性也随种植密度的改变而发生改变^[6]。

作物倒伏是发挥作物高产的主要限制因素之一^[7]。倒伏发生后,会影响养分和水分的运输以及光合产量的积累^[8]。倒伏还会增加叶面病害的发生以及降低甘蔗的品质。此外,倒伏降低了甘蔗的冠层高度,增加了甘蔗的机械收获难度及生产成本^[9]。据统计,我国常年发生不同程度倒伏的甘蔗面积约占总种植面积的 30%以上,即使在台风和季风影响轻微的年份,倒伏发生率也占 20%左右^[10]。可见,提高甘蔗倒伏抗性对提高甘蔗产量,推进甘蔗机械化收获的实施至关重要。

倒伏一般分为茎秆倒伏与根系倒伏^[11]。茎秆倒伏是指甘蔗的茎基部不能承受地上部鲜重,导致茎秆出现弯曲甚至折断的现象^[12]。根系倒伏是指甘蔗的根土锚固系统不能支持地上部力矩而出现整株倾斜的现象^[13]。尽管 2 种倒伏形式在实际倒伏中会同时发生,但不同种植密度对二者的影响机制并不一致。茎秆倒伏主要与茎秆基部的抗折力、杨氏模量、弯曲刚度及结构性碳水化合物有关^[14]。根系倒伏主要受根系大小、立体构型、力学特征及土壤的质地及水分状况有关^[15]。目前,大多数研究只关注甘蔗的茎秆倒伏,而对根系倒伏研究较少。此外,很少研究同时评价不同种植密度对茎秆倒伏和根系倒伏的影响。分别评价茎秆倒伏与根系倒伏,对更好地降低甘蔗倒伏风险非常必要。

提高种植深度是保证产量和倒伏抗性的有效栽培手段^[16]。前人研究表明,种植深度促进甘蔗根系的发育,增加根系的根尖数、总根长及根粗,

促进根系对养分的吸收^[17]。假设在高密度群体下,通过提高种植深度可以促进根系生长和植株对养分的吸收,从而提高单株产量。同时,提高种植深度还能增加根土锚固强度,降低倒伏风险。但目前关于种植密度与深度的交互作用对甘蔗产量及倒伏抗性的影响鲜有报道。因此,本研究以中糖 3 号为试验品种,探讨不同密度及深度对甘蔗产量及倒伏抗性之间的关系,以期为同时提高甘蔗产量和抗倒伏能力提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2021 年 3 月至 2022 年 1 月在海南省临高县皇桐镇中国热带农业科学院热带生物技术研究甘蔗试验基地进行,该基地属于热带季风气候,雨热同期,年平均气温 25 ℃ 以上,土壤类型为砖红壤。

供试材料为甘蔗品种中糖 3 号,由中国热带农业科学院热带生物技术研究培育,已获得品种登记[GPD 甘蔗(2020)460042],并且该品种已培育健康种苗(种茎)在广西扶绥、来宾,云南耿马,广东湛江以及海南等蔗区进行推广示范,但目前还未形成大规模生产种植。该品种主要生长特征和特性:中晚熟高产高糖品种,株型紧凑,植株高大,节间较长,脱叶性好;中至大茎,蔗茎直立均匀,内容充实,不易倒伏;新植出苗整齐,宿根萌芽率高,有效茎数多,宿根性较好,高产;中后期蔗糖分较高;中抗黑穗病,高抗花叶病。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验采用裂区设计。主区为 2 个不同的种植深度,分别为 30 cm 和 40 cm。副区为 4 个种植密度,分别为 3.0、4.5、6.0、7.5 芽/m²。每处理重复 3 次,共 24 个小区,各小区面积 24 m²,行距 120 cm,在苗期通过人工定苗的方式确定种植密度。深度处理采用在常规起垄深度(30 cm)基础上进行人工再挖深 10 cm。基肥施用复合肥(N:P:K=18:22:5),用量为 300 kg/hm²,后期追施氮肥为纯氮 240 kg/hm²,分

别于苗期、分蘖期、伸长初期、伸长中期施用,施用比例为 2:2:3:3。整个甘蔗生育期的管理与常规大田生产管理一致。

1.2.2 项目测定 (1) 测定时期。甘蔗下种于 2021 年 3 月 5 日,为确定整个生育时期甘蔗的倒伏抗性变化,分别在下种后 90 d (6 月 30 日)、120 d (7 月 30 日)、150 d (8 月 30 日)、180 d (9 月 30 日)、210 d (10 月 30 日)、240 d (11 月 30 日) 及 270 d (12 月 30 日) 对甘蔗进行根倒伏及茎倒伏测定。

(2) 人工根系倒伏模拟。根锚固强度 S_r (Nm) 是根系与土壤结合强度和对植株支撑的条件。参照 WU 等^[18]和 DELDEN 等^[19]的方法,在每个小区随机选择 3 株具有代表性的甘蔗植株,剪去基茎 40 cm 以上部分,使用测力计 (Mecmesin, Slinfold, UK; reading up to 1.5 Nm in 0.0001 Nm intervals) 在基茎距地面 35 cm (L_r) 处测定基茎与地面垂直方向成倾斜 30°时的根锚固力 (F_{30°)。根锚固强度计算公式为: $S_r = F_{30^\circ} \times L_r$ 。再在每个小区随机选取 3 株具有代表性的甘蔗植株,测量整株的株高、重心高度 (h_r) 及鲜重 (m_r)。重心高度 (h_r) 的测定使用一条细小圆滑的钢管将甘蔗植株放置上面,直至头尾达到平衡,即平衡点到头部为重心高度。然后分别将地上部分 (不含 40 cm 茎秆) 与 40 cm 茎秆用吊牌一一对应标记,并带回实验室进行其他指标的测定。

(3) 人工茎秆倒伏模拟。茎秆倒伏与根系倒伏在同一天完成。分别记录地上部分 (不含 40 cm 茎秆) 的株高、重心高度 (h_s) 及鲜重 (m_s)。在本研究中,仅考虑甘蔗自身的倒伏抗性。因此,在茎秆倒伏中,仅考虑不包含 40 cm 茎秆部分的自重与茎秆抗折力的关系;在根系倒伏中,考虑整个植株的自重与根系锚固强度的关系。用立式 MultiTest 2.5-d 仪,采用三点弯曲实验测定茎秆的茎秆抗折力。将 40 cm 茎秆水平放置于 2 个支点上,在茎秆中心位置持续施加相同的力,直至茎秆断裂,2 个支点的距离为 30 cm (L_s)。通过与立式 MultiTest 2.5-d 仪连接的电脑软件 (EmperorTM Force and Torque Testing Software) 计算茎秆最大弯曲力 ($F_{\max}$) 和弯曲力与位移的最大斜率 (dF/dY)。由于基茎近似圆柱型,因此茎弯曲强度 S_s (Nm) 计算公式为: $S_s = F_{\max} \times L_s / 4$ ^[20]。使用游标卡尺测量 40 cm 基茎的折断位置的最大直径 (a) 与最小直径 (b),二者的平均值作为甘蔗的

茎粗。后将甘蔗基茎装入信封袋,于 95 °C 烘箱中烘干 72 h 至恒重并记录干重 (g),其中,茎秆充实度 (g/cm) = 茎秆干重 / 40 cm。

(4) 倒伏“安全系数”的计算。采用“安全系数”来评价甘蔗的倒伏抗性,即安全系数越高,甘蔗抗倒伏能力越强。根据 WU 等^[18]的方法,茎秆安全系数 (SF_s) 和根系安全系数 (SF_r) 计算公式如下:

$$SF_s = S_s / M_s$$

$$SF_r = S_r / M_r$$

式中, S_s 和 S_r 分别为茎弯曲强度和根锚固强度,其中 M_s 和 M_r 分别为茎 (除 40 cm 基茎外) 和整个植株在 θ° 时的重力矩,计算公式如下:

$$M_s = \sin \theta \times h_s \times m_s \times g$$

$$M_r = \sin \theta \times h_r \times m_r \times g$$

式中, θ 表示植株与地面垂直方向的倾斜角; h_s 和 h_r 分别表示茎 (除 40 cm 基茎外) 和整株的重心高度 (cm); m_s 和 m_r 分别表示茎 (除 40 cm 基茎外) 和整株的鲜重 (g); g 表示重力加速度 (N/kg)。

此外,茎秆的力学特性,包括茎秆弯曲刚度 (EI)、弹性杨氏模量 (E) 和界面惯性距 (I),具体计算公式如下:

$$EI = L_s^3 (dF/dY) / 48$$

$$I = \pi \times a^3 \times b / 4$$

$$E = EI / I$$

式中, L_s 和 dF/dY 分别为测定基茎抗折力时立式 MultiTest 2.5-d 仪 2 个支撑点的距离及弯曲力与位移的最大斜率; a 和 b 分别表示甘蔗直径横截面中的长轴和短轴。

(5) 甘蔗产量及含糖率的测定。成熟期时,在每个小区随机选取面积为 3.6 m² (3.0 m × 1.2 m) 的区域测定甘蔗产量 (t/hm²)。同时选取 3 株甘蔗测定含糖率,分别在甘蔗的基部、中部及尾部使用糖度计测定含糖率,最终 3 个点含糖率的平均值作为甘蔗的含糖率 (%)。甘蔗产糖量计算公式如下: 产糖量 (t/hm²) = 总产量 × 含糖率。

1.3 数据处理

利用 WPS Office 2020 软件进行数据处理,利用 DPS 系统进行数据显著性分析,采用 LSD 法进行多重比较方差分析,采用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 甘蔗不同时期倒伏风险的变化

不同生育时期的 SF_s 与 SF_r 如图 1A 所示,随

着生育进程的推进, SF_r 和 SF_s 呈先下降后逐渐平稳的趋势, 下种后 180 d, SF_s 与 SF_r 变化趋势不明显, 说明此时期后的甘蔗一直存在较大的倒伏风险。与下种后 90 d 相比, 下种后 180 d 的 SF_r 和 SF_s 分别下降了 138% 与 342%, 下种后 210 d 的 SF_r 和 SF_s 分别下降了 127% 与 346%。随着生

育进程的推进, M_s 与 M_r 呈逐渐上升的趋势, S_r 和 S_s 从下种后 180 d 至 270 d 先呈逐渐上升后下降的趋势。基于以上结果, 为深入了解不同种植密度及深度对甘蔗根系倒伏与茎秆倒伏的影响, 对下种后 180 d 与下种后 210 d 的甘蔗倒伏相关性状进行深入分析。

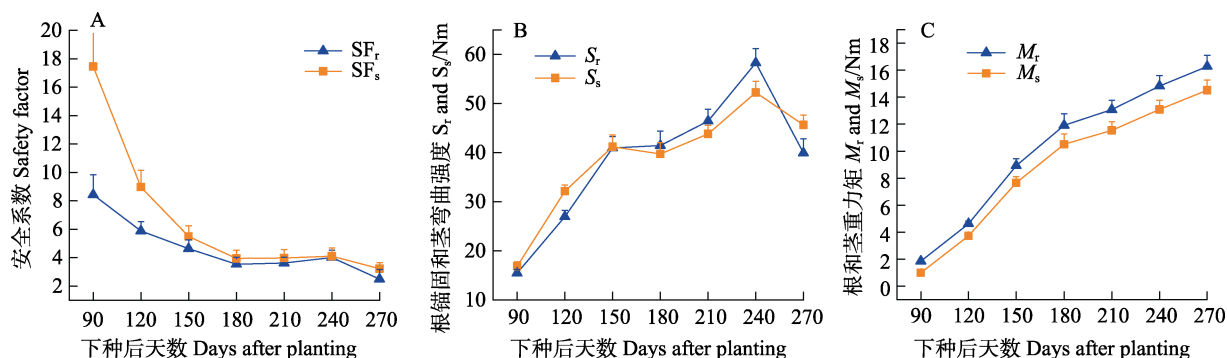


图1 不同时期甘蔗安全系数 (A)、根锚固和茎弯曲强度 (B) 及重力矩 (C) 的变化
Fig. 1 Changes of stem and root safety factor (A), root anchorage, stem bending strength (B) and bending moment (C) in different crop growth periods

2.2 种植深度和密度对甘蔗农艺性状的影响

由方差分析可知, 种植密度对甘蔗株高、重心高度、鲜重、茎粗及茎秆充实度均有显著影响, 种植深度与密度交互对上述农艺性状无显著影响。由表1可知, 下种后 180 d, 种植深度 30 cm 中, 甘蔗鲜重、茎粗随着种植密度的增加而降低, 与种植密度 3.0 芽/ m^2 相比, 在 7.5 芽/ m^2 时分别降低 82.3% 和 25.1%; 种植深度 40 cm 中, 甘蔗鲜重、茎粗及茎秆充实度随着种植密度的增加而降低, 与 3.0 芽/ m^2 相比, 在 7.5 芽/ m^2 时分别降低 128%、35.8% 和 94.6%。

下种后 210 d, 种植深度 30 cm 中, 随着种植密度的增加, 甘蔗鲜重和茎粗呈降低趋势, 7.5 芽/ m^2 处理较 3.0 芽/ m^2 相比分别降低 96.8% 和 39.9%; 在种植深度 40 cm 中, 株高和茎粗也随着种植密度的增加而降低, 与 3.0 芽/ m^2 相比, 在 7.5 芽/ m^2 时分别降低 14.6% 和 29.4%。

由表2可知, 在下种后 180 d 时, 甘蔗茎相关指数 I 随着种植密度的增加而降低, 与 3.0 芽/ m^2 相比, 在 7.5 芽/ m^2 时种植深度 30 cm 中降低 141%, 在 40 cm 中降低 244.4%, EI 在 40 cm 中也随着密度的增加而降低。在下种后 210 d 时, 在种植深度 30 cm 中 EI 和 I 均随着种植密度的增加而降低, 而 E 随着种植密度增加而增加, 与 3.0 芽/ m^2 相比,

EI 和 I 在 7.5 芽/ m^2 时分别降低 73.7% 和 300%, E 在 7.5 芽/ m^2 时提高 110%; 而在 40 cm 中, EI 、 E 和 I 随着种植密度增加无显著性变化趋势。

2.3 种植深度和密度对甘蔗倒伏相关指数的影响

不同种植密度对甘蔗 SF_s 、 S_s 、 S_r 、 M_s 及 M_r 均具有显著影响, 而不同种植深度以及种植密度×种植深度交互对甘蔗倒伏相关指数无显著影响 (表3)。由图2可知, 下种后 180 d, 种植深度 30 cm 中, SF_s 和 SF_r 随着种植密度的增加具有增加的趋势, 而在 40 cm 中呈先增加后降低的变化趋势, 在 6.0 芽/ m^2 时最高。在种植深度 30 cm 中, S_s 、 M_s 及 M_r 随着种植密度的增加而降低, 种植深度 40 cm 中, S_s 、 S_r 、 M_s 及 M_r 随着种植密度增加而降低, 种植深度 30 cm 中, 与 3.0 芽/ m^2 相比, 7.5 芽/ m^2 处理下 S_s 、 M_s 及 M_r 分别降低 61.1%、93.7% 和 91.6%。

由图3可知, 下种后 210 d, 种植深度 30 cm 中, SF_s 在 6.0、7.5 芽/ m^2 时高于 3.0、4.5 芽/ m^2 , SF_r 在 6.0 芽/ m^2 时最高, 种植深度 40 cm 中, SF_s 和 SF_r 与下种后 180 d 时具有类似的变化趋势, 在 6.0 芽/ m^2 时最高。在下种后 180 d 与下种后 210 d 中, SF_s 比 SF_r 总体分别提高 11.6% 和 9.6%, 因此可知甘蔗茎抗倒伏比根抗倒伏能力强。

表 1 不同种植深度和密度下的甘蔗农艺性状
Tab. 1 Agronomic characters of sugarcane under different planting depths and densities

下种后天数 Days after planting	种植深度 Planting depth/cm	种植密度 Planting density/ (buds·m ⁻²)	株高 Plant height/cm	重心高度 Centre of gravity/cm	鲜重 Fresh weight/g	茎粗 Stem diameter/mm	茎秆充实度 Stem unit weight/(g·cm ⁻¹)
180	30	3.0	397 ^a	159 ^a	2149 ^a	24.65 ^a	1.67 ^a
		4.5	393 ^a	156 ^a	1853 ^b	23.37 ^b	1.63 ^a
		6.0	380 ^a	150 ^a	1393 ^c	21.17 ^c	1.15 ^b
		7.5	358 ^b	148 ^a	1179 ^d	19.71 ^d	1.16 ^b
		均值	382 ^A	153 ^A	1643 ^A	22.23 ^A	1.40 ^A
	40	3.0	394 ^a	160 ^a	2216 ^a	24.71 ^a	1.79 ^a
		4.5	384 ^a	157 ^{ab}	1701 ^b	22.08 ^b	1.39 ^b
		6.0	357 ^b	144 ^b ^c	1064 ^c	20.37 ^{bc}	1.05 ^c
		7.5	356 ^b	142 ^c	974 ^c	18.19 ^c	0.92 ^c
		均值	373 ^A	151 ^A	1489 ^A	21.34 ^A	1.29 ^A
210	30	3.0	397 ^a	158 ^{ab}	2185 ^a	27.20 ^a	1.79 ^a
		4.5	385 ^a	159 ^a	1925 ^a	24.10 ^b	3.01 ^a
		6.0	383 ^a	164 ^a	1451 ^b	22.60 ^b	1.42 ^a
		7.5	339 ^b	148 ^b	1110 ^c	19.43 ^c	1.14 ^a
		均值	376 ^A	157 ^A	1668 ^A	23.33 ^A	1.84 ^A
	40	3.0	401 ^a	158 ^a	2186 ^a	25.53 ^a	4.43 ^a
		4.5	392 ^{ab}	155 ^a	1902 ^a	24.30 ^{ab}	1.77 ^b
		6.0	379 ^b	156 ^a	1509 ^b	22.77 ^b	1.50 ^b
		7.5	350 ^c	156 ^a	1263 ^b	19.73 ^c	1.25 ^b
		均值	380 ^A	156 ^A	1715 ^A	23.08 ^A	2.24 ^A

注：同列不同小写字母表示不同种植密度间差异显著（ $P<0.05$ ），同列不同大写字母表示种植深度间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between different planting density ($P<0.05$), and different uppercase letters in the same column indicate significant difference between planting depth ($P<0.05$).

表 2 不同种植深度和密度下的甘蔗农艺性状相关指数
Tab. 2 Correlation indices of sugarcane agronomic traits under different planting depths and densities

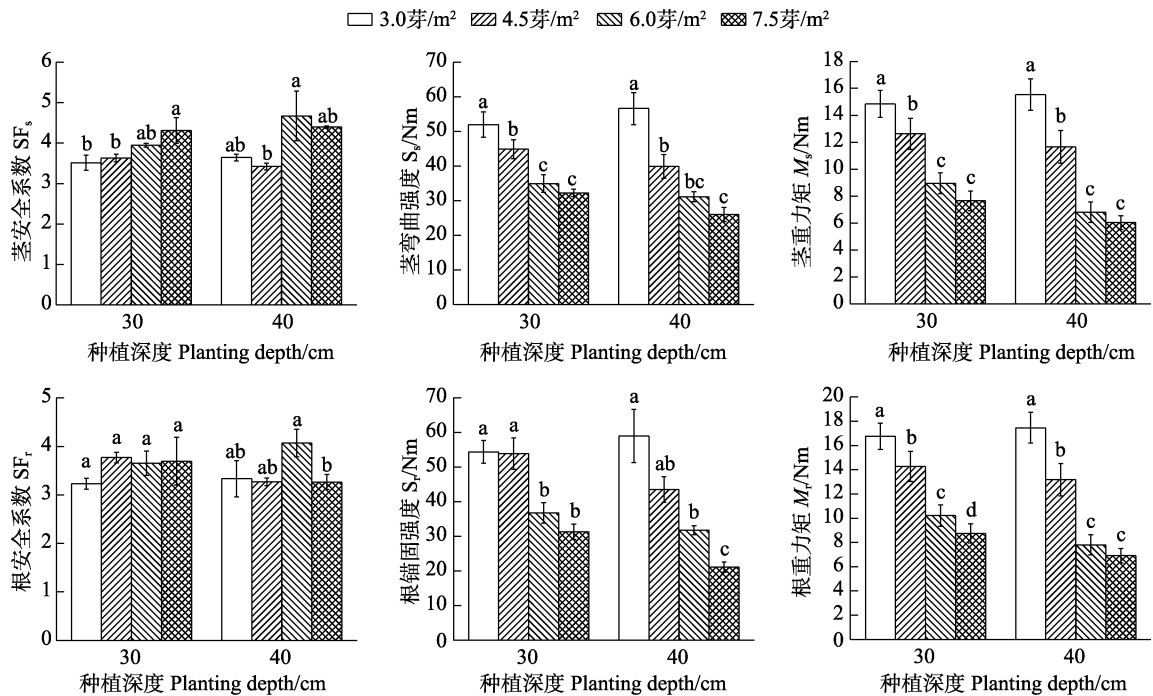
下种后天数 Days after planting	种植深度 Planting depth/cm	种植密度 Planting density/ (buds·m ⁻²)	弯曲刚度 EI/Nm ²	弹性杨 氏模量 E/Nm ²	界面 刚性距 I/m ⁴	下种后天数 Days after planting	种植深度 Planting depth/cm	种植密度 Planting density/ (buds·m ⁻²)	弯曲刚度 EI/Nm ²	弹性杨 氏模量 E/Nm ²	界面 刚性距 I/m ⁴
180	30	3.0	23.86 ^a	1.41E+9 ^b	1.88E-8 ^a	210	30	3.0	22.53 ^a	0.89E+9 ^c	2.88E-8 ^a
		4.5	19.41 ^b	1.39E+9 ^b	1.50E-8 ^b			4.5	19.63 ^b	1.22E+9 ^{bc}	1.69E-8 ^b
		6.0	16.02 ^{bc}	1.66E+9 ^b	1.05E-8 ^c			6.0	19.47 ^b	1.53E+9 ^{ab}	1.31E-8 ^{bc}
		7.5	14.78 ^b	2.05E+9 ^a	0.78E-8 ^c			7.5	12.97 ^c	1.87E+9 ^a	0.72E-8 ^c
		均值	18.52 ^A	1.63E+9 ^A	1.30E-8 ^A			均值	18.65 ^A	1.38E+9 ^A	1.65E-8 ^A
	40	3.0	26.93 ^a	1.49E+9 ^b	1.86E-8 ^a		40	3.0	20.87 ^a	1.00E+9 ^b	2.14E-8 ^a
		4.5	18.76 ^b	1.61E+9 ^b	1.23E-8 ^b			4.5	20.37 ^a	1.26E+9 ^b	1.78E-8 ^a
		6.0	14.67 ^{bc}	1.75E+9 ^{ab}	0.89E-8 ^{bc}			6.0	15.63 ^b	1.23E+9 ^b	1.36E-8 ^{ab}
		7.5	11.75 ^c	2.17E+9 ^a	0.54E-8 ^c			7.5	14.10 ^b	2.01E+9 ^a	0.78E-8 ^b
		均值	18.03 ^A	1.76E+9 ^A	1.13E-8 ^A			均值	17.74 ^A	1.37E+9 ^A	1.52E-8 ^A

注：同列不同小写字母表示不同种植密度间差异显著（ $P<0.05$ ），同列不同大写字母表示不同种植深度间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between different planting density ($P<0.05$), and different uppercase letters in the same column indicate significant difference between planting depth ($P<0.05$).

表 3 方差分析
Tab. 3 ANOVA table

指标 Index	月份 Month	种植密度 Planting density	种植深度 Planting depth	月份× 种植深度 Month×Planting depth	月份× 种植密度 Month×Planting density	种植密度× 种植深度 Planting density× Planting depth	月份×种植密度× 种植深度 Month×Planting density×Planting depth
根系安全系数 SF_r	0.58	2.78	0.41	0.05	0.22	0.66	1.20
茎秆安全系数 SF_s	0.09	12.87**	0.09	3.24	0.52	0.17	3.35*
锚固强度 S_r	5.65*	35.95**	1.31	1.83	0.88	0.87	0.87
茎秆抗折力 S_s	9.48**	50.53**	3.39	0.01	3.25*	1.08	3.11*
根系地上部力矩 M_r	7.71**	87.28**	1.39	2.48	1.86	0.59	1.17
茎秆地上部力矩 M_s	7.25*	84.59**	1.29	2.28	1.93	0.65	1.11
弯曲刚度 EI	0.01	43.09**	1.12	0.10	3.75	1.26	2.32
弹性杨氏模量 E	19.13**	24.31**	0.75	0.83	0.94	0.64	0.46
界面刚性距 I	12.84**	37.40**	2.19	0.04	1.23	0.56	1.54
株高	81.66**	21.90**	0.29	2.53	1.45	0.79	0.10
重心高度	6.31*	6.46**	1.30	0.01	4.13*	1.01	0.99
鲜重	9.36**	134.35**	1.68	6.11*	1.71	0.69	1.72
茎粗	19.53**	67.55**	3.08	0.96	0.75	0.09	1.56
茎秆充实度	10.33**	7.62**	0.44	1.35	1.66	4.27*	2.74
产糖量		12.59**	0.84			0.78	
产量		32.30**	5.13			0.18	
含糖率		1.61	0.76			1.41	

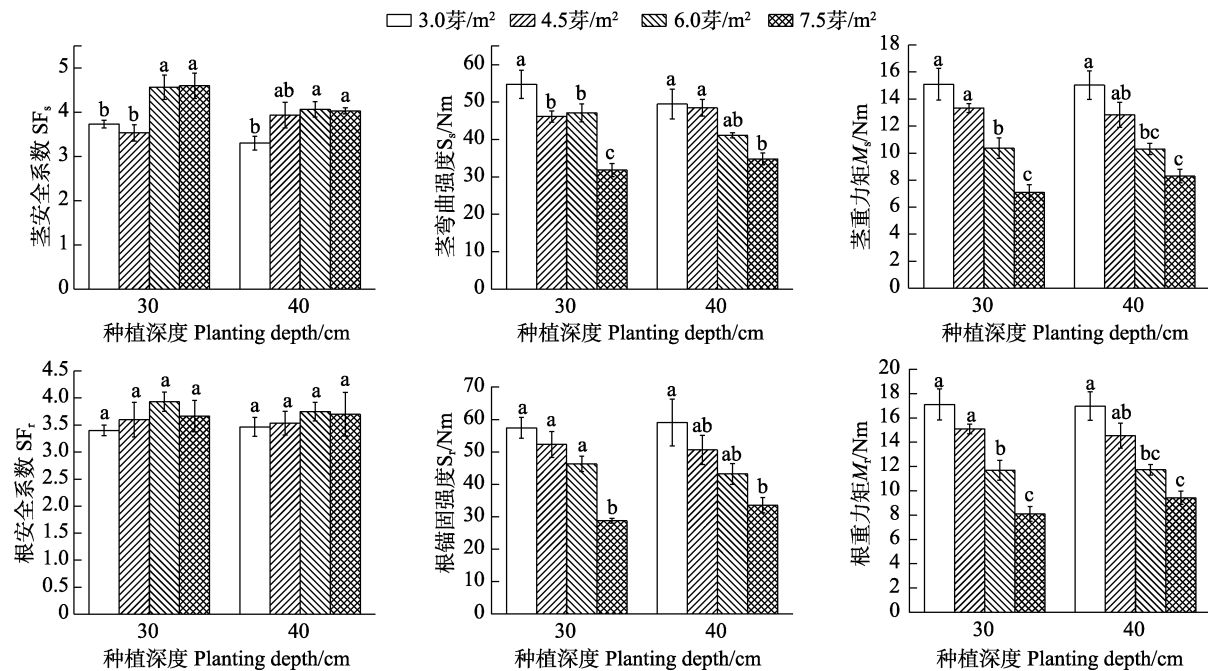
注：*表示处理间差异显著 ($P<0.05$)，**表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)。
Note: * indicates significant difference among treatments ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).



不同小写字母表示种植密度间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among the planting density ($P<0.05$).

图 2 下种后 180 d 不同种植深度和密度下的甘蔗倒伏相关指标

Fig. 2 Lodging related indicators of sugarcane at different planting depth and density 180 d after planting



不同小写字母表示种植密度间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among the planting density ($P<0.05$).
图 3 下种后 210 d 不同种植深度和密度下的甘蔗倒伏相关指标

Fig. 3 Lodging related indexes of sugarcane at different planting depth and density 210 d after planting

2.4 种植深度和密度对甘蔗产糖量、含糖率、产量的影响

由表 4 可知, 种植密度对甘蔗产糖量和产量有显著影响, 而对含糖率无显著影响, 种植深度以及与密度互作对产量、产糖量和含糖率均无显著影响 (表 3)。在种植深度 30 cm 和 40 cm 中, 产量分别在 7.5 芽/m² 和 6.0 芽/m² 最高, 分别达到 66.4、68.9 t/hm², 而产糖量分别在 4.5、7.5 芽/m² 时最高, 分别达到 11.6、12.1 t/hm²。在不考虑种植深度时, 与 3.0 芽/m² 相比, 4.5、6.0 芽/m² 处理的产糖量分别提高 34.9%和 32.6%, 产量分别提高 38.2%, 36.3%。虽然种植深度间产糖量和产量无显著性差异, 但相对种植深度 30 cm 而言, 种植深度 40 cm 具有提高产糖量 (2.8%) 和产量 (4.8%) 的趋势。

3 讨论

3.1 下种 180 d 后是甘蔗群体的倒伏敏感期

倒伏是制约甘蔗产量提高的主要限制因子, 明确不同生育时期的倒伏变化对提高甘蔗产量和倒伏抗性至关重要^[21]。本研究表明, 随着甘蔗生育期不断推进, 在下种 180 d 后甘蔗的倒伏风险达到最大, 之后基本不再发生明显变化。这主要

表 4 不同种植深度和密度下的甘蔗产糖量、产量及含糖率
Tab. 4 Sugar yield, yield and sugar content of sugarcane under different planting depth and density

种植深度 Planting Depth/cm	种植密度 Planting density/ (buds·m ⁻²)	产糖量 Sugar yield/ (t·hm ⁻²)	产量 Sugarcane yield/ (t·hm ⁻²)	含糖率 Sugar content/%
30	3.0	8.6 ^b	47.4 ^b	18.1 ^a
	4.5	11.6 ^a	65.5 ^a	17.8 ^{ab}
	6.0	11.4 ^a	64.6 ^a	17.6 ^{ab}
	7.5	10.8 ^a	66.4 ^a	16.2 ^b
	均值	10.6 ^A	61.0 ^A	17.4 ^A
40	3.0	8.9 ^b	51.5 ^b	17.3 ^a
	4.5	10.9 ^{ab}	67.4 ^a	16.2 ^a
	6.0	11.5 ^a	68.9 ^a	16.7 ^a
	7.5	12.1 ^a	67.9 ^a	17.9 ^a
	均值	10.9 ^A	63.9 ^A	17.0 ^A

注: 同列不同小写字母表示不同种植密度间差异显著 ($P<0.05$), 同列不同大写字母表示种植深度间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different planting densities ($P<0.05$), and different uppercase letters in the same column indicated significant difference between planting depths ($P<0.05$).

是因为株高和鲜重不断增加, 增加了 M_s 与 M_r , 增大了甘蔗的倒伏风险, SF_s 和 SF_r 在下种 180 d 后出现变化平缓是由于 M_s 和 M_r 的增加在下种 180 d 之后的变化比下种 180 d 之前小, 同时也说

明甘蔗在下种后 180 d 之前比之后生长更快。吴炫柯等^[22]研究表明甘蔗在伸长期处于产量形成的关键时期, 倒伏会显著影响甘蔗的光合能力及干物质积累, 降低甘蔗产量。此外, 在海南地区, 此时期处于台风及极端天气频发的季节, 不利的环境因子也进一步增加了甘蔗的倒伏风险^[23]。因此, 在甘蔗下种后 180 d 时(9月)及之后应采取农学管理措施来降低甘蔗的倒伏风险, 比如合理的肥水管理等。

3.2 种植深度和密度对甘蔗产量及倒伏的影响

本研究表明, 当种植密度从 3 芽/m² 增加至 6 芽/m², 甘蔗的产糖量显著增加。这主要是因为增加种植密度, 增加了单位面积产量, 而对含糖率无显著影响。林良文等^[5]研究也发现增加种植密度可以优化甘蔗的群体结构, 增加群体之间的透光率, 提升群体光合能力, 最终提高产量。此外, 甘蔗的茎秆倒伏抗性也随之增加。与 3 芽/m² 相比, 尽管 6 芽/m² 处理显著降低了甘蔗的茎粗、茎秆充实度、茎秆弯曲刚度及界面惯性距, 但也降低了甘蔗的重心高度、单株鲜重及 M_s 。种植密度对前者的影响程度小于后者, 因此增加种植密度到 6 芽/m² 会增加甘蔗的茎秆倒伏抗性。但进一步增加种植密度至 7.5 芽/m² 时, 产糖量没有进一步显著增加, 但提高了甘蔗的根倒伏风险。因此, 本研究认为 6 芽/m² 是甘蔗的最佳种植密度, 可以在保证产量、产糖量的同时, 提高甘蔗的倒伏抗性。

研究还表明, 增加种植深度也能提高甘蔗的产糖量和产量, 尽管差异并不显著。前人研究表明, 增加种植深度可以促进根系的发育, 提高甘蔗吸收土壤中水分和养分的能力, 最终提高产量及产糖量^[24]。廖青等^[25]研究发现增加种植深度显著增加了甘蔗的发株率、分蘖率及产量相关性状, 例如株高、茎粗等。谭琴^[26]的研究也表明, 深耕深松种植甘蔗较常规种植的甘蔗产量增加了 10.5%, 增产效果明显, 与本研究结果一致。与种植深度 30 cm 相比, 增加种植深度至 40 cm 未增加甘蔗的倒伏风险, 这主要是因为甘蔗的 S_5 和 S_7 基本保持一致。杨惠淳^[17]的研究发现增加种植深度可以降低甘蔗的倒伏发生率。与本研究结果不一致的原因可能是 2 个试验的深度处理不同所致。因此, 种植深度 40 cm 可以在不影响倒伏的前提下提高甘蔗的产糖量及产量。

4 结论

本研究表明, 下种 180 d 后甘蔗一直处于倒伏敏感期, 倒伏风险相对较高。种植密度从 3 芽/m² 增加至 6 芽/m², 甘蔗的产糖量(+32%)和产量(+36%)显著增加。这主要是因为增加种植密度, 增加了单位面积群体数量从而增加产量, 另外, 甘蔗的茎秆倒伏抗性也随之增加。但进一步增加种植密度到 7.5 芽/m² 时, 产糖量和产量没有进一步显著增加, 但增加了甘蔗的根倒伏风险。由方差分析可知, 种植深度间倒伏相关指数、产糖量及产量无显著差异, 但对于种植深度 30 cm 而言, 种植深度 40 cm 能促进甘蔗产糖量(+2.8%)和产量(+4.8%)的提高。因此, 根据产量、产糖量及倒伏抗性综合考虑, 认为种植深度 40 cm, 种植密度为 6 芽/m² 可以在保证产量、产糖量的同时, 提高甘蔗的倒伏抗性。

参考文献

- [1] 邹晓蔓, 傅漫琪, 王小慧, 陈阜. 1985—2018 年中国甘蔗生产时空变化及区域优势分析[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(6): 120-131.
ZOU X M, FU M Q, WANG X H, CHEN F. Spatial-temporal changes and regional advantages of sugarcane production in China from 1985 to 2018[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(6): 120-131. (in Chinese)
- [2] 李杨瑞, 杨丽涛. 20 世纪 90 年代以来我国甘蔗产业和科技的新发展[J]. 西南农业学报, 2009, 22(5): 1469-1476.
LI Y R, YANG L T. New development of sugarcane industry and science and technology in China since the 1990s[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2009, 22(5): 1469-1476. (in Chinese)
- [3] 胡朝晖, 潘永保, WERAPON P. 蔗糖主产国甘蔗单产及产糖率改良进展[J]. 中国糖料, 2021, 43(4): 75-80.
HU Z H, PAN Y B, WERAPON P. Improvement of sugarcane yield per unit area and sugar yield in major sugarcane producing countries[J]. China Sugar, 2021, 43(4): 75-80. (in Chinese)
- [4] 丘立杭, 范业赓, 周慧文, 陈荣发, 黄杏, 罗含敏, 杨荣仲, 段维兴, 刘俊仙, 吴建明. 合理密植下强分蘖甘蔗品种性状及产量分析[J]. 热带作物学报, 2019, 40(6): 1075-1082.
QIU L H, FAN Y G, ZHOU H W, CHEN R F, HUANG X, LUO H M, YANG R Z, DUAN W X, LIU J X, WU J M. Analysis of cultivar characters and yield of sugarcane with strong tillers under reasonable dense planting[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(6): 1075-1082. (in Chinese)
- [5] 林良文, 谭青山, 叶燕萍, 孟丽萍, 申章佑, 蒋洪涛. 不同

- 下种方式和种植密度对新台糖 22 号群体结构及经济性状的影响试验[J]. 广西农业科学, 2010, 41(1): 11-13.
- LIN L W, TAN Q S, YE Y P, MENG L P, SHEN Z Y, JIANG H T. Effects of different cropping patterns and planting densities on population structure and economic traits of Xintaitang 22[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2010, 41(1): 11-13. (in Chinese)
- [6] 门洪文, 郭守鹏, 黄昌见, 于金友, 康振强, 王宝国. 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]. 农学学报, 2021, 11(7): 1-6.
- MEN H W, GUO S P, HUANG C J, YU J Y, KANG Z Q, WANG B G. Effects of planting density on agronomic traits, yield and lodging resistance of maize[J]. Chinese Journal of Agricultural Science, 2021, 11(7): 1-6. (in Chinese)
- [7] 孙传波, 桑建, 侯佳贤, 曹庆军, 刘洪霞. 玉米抗倒伏性研究进展[J]. 农业与技术, 2022, 42(14): 14-17.
- SUN C B, SANG J, HOU J X, CAO Q J, LIU H X. Research progress on lodging resistance of maize[J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(14): 14-17. (in Chinese)
- [8] LI X, LIN S H, HUANG Q Y, LIANG Q, LI Y J, YANG L T, LI Y R. Advances in research of lodging and evaluation sugarcane[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(3): 6095-6105.
- [9] 黄勇, 黄敏初. 甘蔗高效节本增效技术生产实践与发展思路[J]. 广西农业科学, 2009, 40(4): 431-437.
- HUANG Y, HUANG M C. Production practice and development ideas of sugarcane high-efficiency and cost-saving technology[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2009, 40(4): 431-437. (in Chinese)
- [10] 杨望, 杨坚, 莫兴漫, 袁付伟, 黄深闯. 甘蔗抗倒伏技术研究现状及发展趋势[J]. 广西农业机械化, 2016(3): 25-27.
- YANG W, YANG J, MO X M, YUAN F W, HUANG S C. Research status and development trend of sugarcane lodging resistance technology[J]. Guangxi Agricultural Mechanization, 2016(3): 25-27. (in Chinese)
- [11] JUN X, GOU L, ZHAO Y S, YAO M N, YAO H S, TIAN J S, ZHANG W F. Effects of light intensity within the canopy on maize lodging[J]. Field Crops Research, 2016, 188: 133-141.
- [12] BERRY P M, SPINK J H, GAY A P, CRAIGON J. Comparison of root and stem lodging risks among winter wheat cultivars[J]. Journal of Agricultural Science, 2003, 141(2): 191-202.
- [13] 李永贤, 周世永, 吴伯志. 耕作方式对玉米根系构型及抗根倒伏能力的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(2): 112-120.
- LI Y X, ZHOU S Y, WU B Z. Effects of tillage on root architecture and root lodging resistance of maize[J]. Journal of Maize Science, 2022, 30(2): 112-120. (in Chinese)
- [14] 董荷荷. 施氮时期对小麦茎秆抗倒伏性能及木质素积累的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- DONG H H. Effects of nitrogen application period on lodging resistance and lignin accumulation in wheat stem[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [15] 王振西. 种植密度对玉米根系形态的影响[J]. 农业与技术, 2019, 39(17): 107-108.
- WANG Z X. Effect of planting density on maize root morphology[J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(17): 107-108. (in Chinese)
- [16] 伍浩天, 聂蛟, 杨文娟, 张智勇, 吴康红, 李晓瑜, 方小梅, 阮仁武, 易泽林. 机播深度、播种量和施肥量对苦荞倒伏及产量的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(12): 61-72.
- WU H T, NIE J, YANG W J, ZHANG Z Y, WU K H, LI X Y, FANG X M, RUAN R W, YI Z L. Effects of sowing depth, sowing rate and fertilizer application rate on Tartary buckwheat lodging and yield[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(12): 61-72. (in Chinese)
- [17] 杨惠淳. 种植深度对甘蔗根系发育及根际微生物群落的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- YANG H C. Effect of planting depth on root development and rhizosphere microbial community of sugarcane[D]. Nanning: Guangxi University, 2021. (in Chinese)
- [18] WU W, MA B L. Assessment of canola crop lodging under elevated temperatures for adaptation to climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 248: 329-338.
- [19] DELDEN S H, VOS J, ENNOS A R, STOMPH T J. Analysing lodging of the panicle bearing cereal teff. (*Eragrostis tef*)[J]. New Phytologist, 2010, 186: 696-707.
- [20] GOODMAN A M, CROOK M J, ENNOS A R. Anchorage mechanics of the tap root system of winter-sown oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. Annals of Botany, 2001, 87: 397-404.
- [21] 罗含敏, 周慧文, 闫海锋, 周忠凤, 范业赓, 罗霆, 陈荣发, 段维兴, 刘俊仙, 丘立杭, 吴建明. 甘蔗产量形成的要素及其化控措施[J]. 广西糖业, 2020(4): 8-14.
- LUO H M, ZHOU H W, YAN H F, ZHOU Z F, FAN Y G, LOU T, CHEN R F, DUAN W X, LIU J X, QIU L H, WU J M. Factors of sugarcane yield formation and its chemical control measures[J]. Guangxi Sugar Industry, 2020(4): 8-14. (in Chinese)
- [22] 吴炫柯, 汪仁军, 马冬晨, 安佳君, 黄维, 刘永裕, 刘志平, 姚裕群. 甘蔗一个生产周期株高生长量与气象因子的关系[J]. 中国农学通报, 2021, 37(33): 36-40.
- WU X K, WANG R J, MA D C, AN J J, HUANG W, LIU Y Y, LIU Z P, YAO Y Q. Relationship between plant height growth and meteorological factors in sugarcane during one production cycle[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(33): 36-40. (in Chinese)

- [23] 莫小燕, 赵军. 龙州蔗区台风灾害的调研及防御措施[J]. 农业研究与应用, 2015(2): 66-67, 70.
MO X Y, ZHAO J. Investigation and prevention measures of typhoon disaster in Yeshe district of Longzhou[J]. Agricultural Research and Application, 2015(2): 66-67, 70. (in Chinese)
- [24] 樊仙, 杨绍林, 李如丹, 全怡吉, 邓军, 张跃彬. 不同铲耨深度对甘蔗根系形态和生理特性的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(9): 1671-1676.
FAN X, YANG S L, LI R D, QUAN Y J, DENG J, ZHANG Y B. Effects of different shovel stump depth on morphology and physiological characteristics of sugarcane roots[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(9): 1671-1676. (in Chinese)
- [25] 廖青, 韦广泼, 刘斌, 陈桂芬, 黄东亮, 李杨瑞. 机械化深耕深松栽培对甘蔗生长及产量的影响[J]. 广西农业科学, 2010, 41(6): 542-544.
LIAO Q, WEI G P, LIU B, CHEN G F, HUANG D L, LI Y R. Effects of mechanized deep tillage and deep pine cultivation on sugarcane growth and yield[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2010, 41(6): 542-544. (in Chinese)
- [26] 谭琴. 机械化深耕深松技术对甘蔗产量的影响[J]. 农技服务, 2016, 33(4): 172.
TAN Q. Effect of mechanized deep tillage and deep cutting technology on sugarcane yield[J]. Agricultural Technology Services, 2016, 33(4): 172. (in Chinese)