

甘蔗种质材料的抗倒伏能力研究及其综合评价

俞华先^{1,2}, 刀静梅^{1,2}, 安汝东^{1,2}, 刘家勇^{1,2*}, 桃联安^{1,2}, 赵丽萍^{1,2*}, 咎逢刚^{1,2},
张 钰^{1,2}, 郎荣斌^{1,2}, 边 芯^{1,2}, 刘新龙^{1,2}, 赵培方^{1,2}, 冉茂勇^{1,2}

1. 热带作物生物育种全国重点实验室, 云南昆明 650205; 2. 云南省甘蔗遗传改良重点实验室/云南省农业科学院甘蔗研究所, 云南开远 661699

摘 要: 抗倒伏能力是当前甘蔗育种中备受关注的重要性状, 准确评价种质资源的抗倒伏特性对于培育抗倒伏品种具有重要意义。本研究以 16 份甘蔗种质为试验材料, 探讨农艺性状与蔗茎纤维组分对抗倒伏性的影响。通过灰色关联度分析明确了影响抗倒伏性的关键因素, 并综合运用隶属函数法和聚类分析法进行综合评价, 以筛选优良抗倒伏种质及其关键性状, 为甘蔗抗倒伏育种提供种质资源与理论参考。结果表明, 抗倒伏最强的甘蔗种质材料分别是云蔗 17501、桂柳 05136 和粤糖 93159, 其中, 茎粗、有效茎数、株高和纤维素含量是影响甘蔗抗倒伏能力的关键因子。

关键词: 甘蔗品系; 抗倒伏; 纤维组分; 农艺性状

中图分类号: S435.661

文献标志码: A

Lodging Resistance and Comprehensive Evaluation of Sugarcane Germplasm Materials

YU Huaxian^{1,2}, DAO Jingmei^{1,2}, AN Rudong^{1,2}, LIU Jiayong^{1,2*}, TAO Lian'an^{1,2}, ZHAO Liping^{1,2*}, ZAN fenggang^{1,2},
ZHANG Yu^{1,2}, LANG Rongbin^{1,2}, BIAN Xin^{1,2}, LIU Xinlong^{1,2}, ZHAO Peifang^{1,2}, RAN Maoyong^{1,2}

1. National Key Laboratory for Biological Breeding of Tropical Crops, Kunming, Yunnan 650205, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement / Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kaiyuan, Yunnan 661699, China

Abstract: Lodging resistance is an important trait in sugarcane breeding. Accurate evaluation of the lodging resistance of germplasm resources is of great significance for breeding lodging-resistant varieties. This study investigated the effects of agronomic traits and stalk fiber components on lodging resistance using 16 sugarcane germplasm materials. The key traits affecting lodging resistance were identified by grey correlation analysis, and the comprehensive evaluation was carried out by using membership function method and cluster analysis method to screen excellent lodging resistance germplasm and its key traits, so as to provide germplasm resources and theoretical reference for sugarcane lodging resistance breeding. The results showed that the sugarcane germplasm materials with the strongest lodging resistance were Yunzhe 17501, Guiliu 05136 and Yuetang 93159. Among them, stem diameter, effective stem number, plant height and cellulose content were the key factors affecting the lodging resistance of sugarcane.

Keywords: sugarcane strains; lodging resistance; fiber component; agronomic traits

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.010

甘蔗是全球第一大糖料作物, 其产业地位具有不可替代性, 全球食糖产量的 85% 以上源自甘

蔗^[1], 我国亦有约 90% 的食糖依赖于甘蔗生产^[2]。甘蔗产业的可持续发展直接关系到国家食糖安

收稿日期 2025-10-02; 接受日期 2025-11-17

基金项目 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFD2301100); 广西科技重大专项 (桂科 AA23073001); 国家糖料产业技术体系项目 (No. CARS-17)。

作者简介 俞华先 (1984—), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 甘蔗抗逆遗传育种。*通信作者 (Corresponding author): 赵丽萍 (ZHAO Liping), E-mail: zlp_alyma@126.com; 刘家勇 (LIU Jiayong), E-mail: lljyy1976@163.com。

全、农业增效、农民增收和区域经济发展。然而，甘蔗生长易受干旱、寒冻害、洪涝及台风、暴雨等气象灾害影响^[3]。作为全球产量最高的典型 C4 高秆作物之一，倒伏已成为制约我国糖料蔗生产的“瓶颈”问题。我国甘蔗主产区主要分布在广西、云南、广东和海南等地，其中广西产量约占全国的 70%左右^[4]。近年来，极端天气事件频发，尤其在台风和季风影响下，甘蔗倒伏普遍发生，严重限制了机械化收获的实现，阻碍节本增效目标的实现。台风是导致甘蔗大面积倒伏的首要因素，其关键生长期往往与主产区台风高发期重叠，产量越高通常倒伏损失也越严重^[5]。2024 年，台风“摩羯”致使海南甘蔗倒伏 7333.33 hm²，其中全倒 3600.00 hm²，半倒 3800.00 hm²，风折断尾约 1333.33 hm²，预计全省甘蔗减产 10%^[6]；2025 年 8 月 24 日，受第 13 号台风“剑鱼”影响，海南部分地区果蔗出现大面积倒伏、风折与淹水灾害；此时正值果蔗拔节盛期，该灾害严重影响了植株正常生长，最终导致产量与品质显著下降^[7]；2025 年 9 月 24 日，台风“桦加沙”在阳江海陵岛登陆后过境湛江蔗区。伴随 8~9 级阵风引发部分甘蔗倒伏，虽当前影响总体可控，但仍对正值植株较高的伸长中后期甘蔗构成潜在威胁，可能影响其正常生长及后期的产量与糖分积累^[8]。据前人研究显示，在台风影响较重年份，甘蔗倒伏比例可达 30%~40%，其中倾角小于 30°的约占 15%；即使在影响较轻年份，倒伏比例仍达 10%~20%。倒伏导致甘蔗减产 5%~20%，糖分下降约 10%^[9]，同时还阻碍机收^[10]、助长病害传播。台风后倒伏甘蔗的机收损失可达 7.5 t/hm²，约占产量的 8%~10%^[11]。可见，倒伏已成为限制甘蔗收获机械推广应用和制约甘蔗产业发展的关键因素^[12]，也是当前甘蔗生产中普遍存在且亟待解决的实际问题。

鉴定和培育抗倒伏能力强的品种对甘蔗生产具有重要意义。甘蔗抗倒伏是一个复杂的数量性状，受多个性状控制，包括蔗茎的农艺性状、力学性能以及纤维组分含量等。因此，如何有效提高甘蔗的抗倒伏能力已成为当前的研究热点。俞华先等^[13]基于 24 份大茎野生种 57NG208 与南涧果蔗正反交后代，对株高、基部茎径、中部茎径、锤度、重心高度、单茎质量、抗倒伏指数、基中部茎径比及茎秆折断力共 9 个指标进行抗倒伏性评价，发现抗倒伏指数与锤度、基部茎径、基中

部茎径比、重心高度、单茎质量及茎秆折断力均呈极显著正相关，而与株高和中部茎径呈负相关；刘富成等^[12]研究认为种植深度为 40 cm，种植密度为 6 芽/m²可以在保证中糖 3 号产量和产糖量的同时，提高甘蔗的倒伏抗性；沈银娟等^[14]对 117 份甘蔗品系的蔗茎机械强度进行精准评价，结果发现，茎皮纤维素含量是决定茎秆机械强度的关键内在因子；陆乔等^[15]则探讨了基因组编辑技术在甘蔗抗倒伏育种中的应用前景。

多年的生产实践表明，加强抗倒伏品种选育是降低倒伏发生率最有效的因素，当前的甘蔗大田生产普遍缺乏抗倒伏性强的优良品种。鉴于抗倒伏性状属于甘蔗的品种特性，开展系统性抗倒伏性能评价，有助于筛选出抗倒伏性优异的甘蔗种质，从而充分释放其生产潜力，提升产量与品质，推动蔗糖产业的可持续发展。本研究以大田生产推广应用的 8 个品种及 8 份割手密聚合体后代为材料，通过测定其株高、单茎质量、纤维组分、皮层厚度和茎粗等影响茎秆强度的性状，综合评价这 16 份甘蔗种质材料的倒伏规律、抗倒伏能力及生产性能，旨在为甘蔗抗倒伏品种选育与栽培实践提供种质材料和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料共 16 份，其中含 8 份云南省农业科学院甘蔗研究所创制的新种质材料（编号 1~8 为割手密聚合体）以及 8 份甘蔗新品种（编号 9~16），其编号和亲本信息见表 1。

1.2 方法

在云南省开远市云南省农业科学院甘蔗研究所第一科研基地（103°15'E, 23°42'N）开展田间试验。试验设 3 次重复，每个小区 5 行，行长 8.0 m，行距 1.2 m，小区面积 48.0 m²。新植于 2023 年 2 月 2 日种植，下芽量为 12 万芽/hm²，种植深度约 10 cm。田间管理与大田生产管理一致。于 2023 年 12 月在各小区随机选取 5 株近地面 50 cm 蔗茎，取近地面 20 cm 部分烘干、研磨混匀，用于蔗茎纤维组分含量测定。

倒伏角是指甘蔗头部和蔗茎基部连线与地面垂直线之间的夹角。参照郝文录等^[16]的方法基于倒伏角对甘蔗进行倒伏级数划分，即倒伏角 ≥ 60°，为 1 级；30° < 倒伏角 < 60°，为 2 级；倒伏角 ≤ 30°，为 3 级。

表 1 不同倒伏类型甘蔗种质材料的亲本及培育单位信息

Tab. 1 Information on parents and breeding organization of sugarcane germplasm materials with different lodging types

编号 No.	种质 Germplasm	亲本 Parents	培育单位 Breeding organization
1	云蔗 21-7	SSP2021-1×云蔗 05-51	云南省农业科学院甘蔗研究所
2	云蔗 25-3	云蔗 05-51×云南云蔗 25-7	云南省农业科学院甘蔗研究所
3	云蔗 26-5	SSP2021-2×CP94-1100	云南省农业科学院甘蔗研究所
4	云蔗 23-1201	05-51×B1×C1-1	云南省农业科学院甘蔗研究所
5	云蔗 26-11	SSP2021-2×CP94-1100	云南省农业科学院甘蔗研究所
6	云蔗 14-2	云蔗 05-51×B1×C1-3	云南省农业科学院甘蔗研究所
7	云蔗 25-6	CP94-1100×SSP2021-2	云南省农业科学院甘蔗研究所
8	云蔗 25-7	CP94-1100×SSP2021-2	云南省农业科学院甘蔗研究所
9	云蔗 0551	崖城 90-56×ROC23	云南省农业科学院甘蔗研究所
10	云蔗 17501	云瑞 05-292×云蔗 05-51	云南省农业科学院甘蔗研究所
11	桂柳 05136	CP81-1254×新台糖 22 号	柳城县甘蔗研究中心
12	云蔗 141010	CP94-1100×云瑞 11-92	云南省农业科学院甘蔗研究所
13	粤糖 93159	粤农 73-204×CP72-1210	中国轻工总会甘蔗糖业研究所
14	新台糖 22 号	ROC5×69-463	台湾糖业研究所
15	云蔗 081609	云蔗 94-343×粤糖 00-236	云南省农业科学院甘蔗研究所
16	云蔗 141313	新台糖 22 号×云蔗 94375	云南省农业科学院甘蔗研究所

注：B1 为越南云蔗 25-3×2017-12-165，C1 为 2017-41×云南八号。
Note: B1 is Vietnam's Yunzhe 25-3×2017-12-165, and C1 is 2017-41×Yunnan No. 8.

参照谢子四等^[17]和李朝生等^[18]的方法计算抗倒伏指数，其计算公式为：抗倒伏指数（LRI）=Σ(各级级别数×该级别株数)/调查株数。然后根据抗倒伏指数进行甘蔗抗倒伏评价（表 2）

表 2 甘蔗抗倒伏评价标准

Tab. 2 Sugarcane lodging resistance evaluation criteria

倒伏级别 Lodging grade	抗倒伏指数 Lodging resistance index	倒伏程度 Lodging level
1 级	1.0≤LRI≤1.6	全倒伏
2 级	1.6<LRI≤2.3	半倒伏（倾斜）
3 级	2.3<LRI≤3.0	直立

于甘蔗成熟期调查株高、茎粗、单茎质量、有效茎数和锤度等农艺性状。

依据标准 NYT 3494—2019^[19]的方法测定纤维组分含量。采用高效液相色谱法^[20]测定纤维素与半纤维素含量，通过紫外分光光度法结合重量法^[21]测定木质素含量。参考李直等^[22]和俞华先等^[23]的方法计算纤维素、半纤维素和木质素含量。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Excel 2009 软件对试验数据进行整理，采用 OriginPro 2024 软件制图，利用 DPS 软件进行方差分析和灰色关联度分析，其中方差分析中的多重比较采用 LSD 法。参照覃伟等^[24]

的方法进行隶属函数分析。

$$Z(X_j)=\frac{X-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}},j=1,2,3,\cdots,n\quad(1)$$

式中，Z(X_j)表示参试甘蔗种质材料第 j 个综合指标的隶属函数值，Z(X_j)越大，说明甘蔗种质材料的综合指标（CI）越好；反之，Z(X_j)越小，则表明甘蔗新品系的综合指标越差；X 表示所测综合指标的实际值；X_{min}、X_{max} 分别表示第 j 个综合指标的最小值和最大值。

$$W_i=P_i\div\sum p_i,i=1,2,3,\cdots,n\quad(2)$$

式中，i 表示各综合指标，W_i为第 i 个指标的权重，P_i 是参试甘蔗种质材料经主成分分析所得的第 i 个综合指标的贡献率。

$$D=\sum\left[Z\left(X_j\right) \times W_i\right], i=1,2,3, \cdots, n\quad(3)$$

式中，D 为综合评价值，是由各指标的隶属函数值 Z(X_j)及其权重（W_i）计算得到。

2 结果与分析

2.1 不同倒伏类型甘蔗种质材料农艺性状特征分析

从表 3 可见，16 份不同倒伏类型甘蔗种质材料的株高范围在 177.00~293.33 cm 之间，直立类型云蔗 17501 的株高最高，为 293.33 cm，其次是

表 3 不同倒伏类型甘蔗种质材料的农艺性状

Tab. 3 Agronomic traits of different lodging types of sugarcane germplasm materials

种质 Germplasm	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/cm	单茎质量 Single stem weight/kg	锤度 Brix/%	每公顷有效茎数 Effective stalk number per hectare	蔗茎单产 Cane yield/(t·hm ⁻²)	产糖量 Sugar yield/(t·hm ⁻²)
云蔗 21-7	284.67±14.88 ^{abcAB}	2.27±0.03 ^{cdDEF}	1.15±0.07 ^{defghCDE}	14.53±0.29 ^{dB}	72 226±5782.87 ^{efgEF}	83.62±11.54 ^{defBC}	7.59±1.08 ^{fgFGH}
云蔗 25-3	193.00±17.50 ^{ghFG}	1.87±0.03 ^{dFG}	0.53±0.06 ^{ijFG}	18.40±0.31 ^{bcA}	95 838±2891.43 ^{bcdABCD}	51.31±7.53 ^{fgCD}	6.62±0.85 ^{fgGH}
云蔗 26-5	253.33±17.26 ^{cdeABCD}	2.17±0.20 ^{dDEF}	0.94±0.14 ^{ghiDEF}	20.67±0.33 ^{aA}	80 559±5782.63 ^{defCDEF}	74.17±8.71 ^{efBCD}	11.28±1.12 ^{defCDEFG}
云蔗 23-1201	270.00±17.52 ^{abcdABC}	2.10±0.17 ^{dDEF}	0.93±0.11 ^{ghiDEF}	14.53±2.21 ^{dB}	40 280±3674.95 ^{hG}	37.39±5.27 ^{gD}	3.57±1.34 ^{gH}
云蔗 26-11	258.00±2.31 ^{bcdABCD}	2.23±0.03 ^{cdDEF}	1.01±0.04 ^{efghDEF}	19.67±0.44 ^{abcA}	116 672±7217.17 ^{aA}	118.48±11.73 ^{abcAB}	17.00±2.23 ^{abcABC}
云蔗 14-2	254.33±4.41 ^{cdeABCD}	1.33±0.03 ^{cG}	0.36±0.02 ^{jG}	15.20±0.51 ^{dB}	86 115±7217.17 ^{cdeBCDE}	30.81±4.09 ^{gD}	2.99±0.35 ^{gH}
云蔗 25-6	288.33±11.29 ^{abA}	2.07±0.13 ^{dEF}	0.97±0.13 ^{fghDEF}	14.77±0.39 ^{dB}	104 172±5258.67 ^{abAB}	101.75±15.66 ^{cdeAB}	9.37±1.09 ^{efEFGH}
云蔗 25-7	269.00±14.11 ^{abcdABCD}	1.90±0.00 ^{dF}	0.76±0.04 ^{hijEFG}	18.37±0.35 ^{cA}	100 005±8929.71 ^{bcABC}	76.04±7.21 ^{efBCD}	9.85±1.00 ^{efDEFGH}
桂柳 05136	241.67±6.01 ^{deBCDE}	3.02±0.10 ^{abABC}	1.73±0.15 ^{bb}	20.07±0.24 ^{abcA}	80 282±5694.94 ^{defCDEF}	140.17±18.35 ^{abA}	20.64±2.98 ^{abAB}
新台糖 22 号	268.33±10.14 ^{abcdABCD}	2.60±0.23 ^{bcCDE}	1.43±0.22 ^{bcdBCD}	19.30±0.17 ^{abcA}	70 837±6365.20 ^{fghEF}	101.61±17.21 ^{cdeAB}	14.17±2.55 ^{cdeBCDEF}
云蔗 081609	177.00±4.73 ^{hG}	3.00±0.15 ^{abABC}	1.25±0.10 ^{cdefgBCDE}	20.90±0.26 ^{aA}	83 559±1810.58 ^{cdefBCDE}	104.22±6.40 ^{cdeAB}	16.19±1.24 ^{bcdABCDE}
云蔗 141313	225.00±5.77 ^{efgDEF}	2.85±0.26 ^{abABC}	1.47±0.27 ^{bcdBCD}	20.87±0.58 ^{aA}	76 392±9248.14 ^{defDEF}	107.53±12.62 ^{bcdAB}	16.58±1.84 ^{bcABCD}
云蔗 141010	200.00±8.66 ^{fghEFG}	3.18±0.12 ^{aAB}	1.60±0.17 ^{bcBC}	20.57±0.47 ^{aA}	69 448±6263.35 ^{ghEF}	112.18±17.84 ^{abcdAB}	16.86±2.25 ^{abcABC}
云蔗 0551	251.67±11.67 ^{cdeABCD}	2.63±0.23 ^{bcBCD}	1.37±0.18 ^{bcdBCD}	20.37±0.58 ^{abA}	84 726±3674.63 ^{cdefBCDE}	114.89±11.14 ^{abcdAB}	17.33±2.28 ^{abcABC}
粤糖 93159	226.67±14.53 ^{efCDEF}	3.10±0.12 ^{aABC}	1.73±0.24 ^{bb}	20.93±0.72 ^{aA}	77 063±3536.97 ^{defgDEF}	131.88±12.77 ^{abcA}	20.67±2.81 ^{abAB}
云蔗 17501	293.33±1.67 ^{aA}	3.23±0.09 ^{aA}	2.41±0.14 ^{aA}	20.63±0.23 ^{aA}	59 782±1619.17 ^{gFG}	143.71±4.18 ^{aA}	21.88±0.37 ^{aA}

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）；同列不同大写字母表示差异极显著（ $P<0.01$ ）。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$); Different upper letters in the same column indicate extremely significant difference ($P<0.01$).

全倒伏类型云蔗 25-6（288.33 cm）和半倒伏类型云蔗 21-7（284.67 cm），这 3 份种质材料的株高间差异不显著；株高范围在 250.00~270.00 cm 之间的种质材料有 7 份，株高低于 200.00 cm 的甘蔗种质材料有 2 份，分别是云蔗 081609（177.00 cm）和云蔗 25-3（193.00 cm），其中云蔗 081609 的株高极显著低于大多数种质（ $P<0.01$ ）。供试甘蔗种质材料的茎粗范围在 1.33~3.23 cm 之间，茎粗在 3.00 cm 及以上的种质有 5 份，从大到小依次是云蔗 17501（3.23 cm）、云蔗 141010（3.18 cm）、粤糖 93159（3.10 cm）、桂柳 05136（3.02 cm）和云蔗 081609（3.00 cm），这 5 份种质材料的茎粗无显著差异；茎粗在 2.00~2.90 cm 之间的种质材料有 8 份，茎粗小于 2.00 cm 的种质有 3 份，分别为云蔗 25-3（1.87 cm）、云蔗 25-7（1.90 cm）和云蔗 14-2（1.33 cm），其中云蔗 14-2 的茎粗显著小于其他种质。供试甘蔗种质材料的单茎质量在 0.36~2.41 kg 之间，其中直立类型云蔗 17501 的单茎质量最重，为 2.41 kg，与其他种质呈极显著差异；有 9 份甘蔗种质材料的单茎质量在 1.00~1.73 kg 之间，其余种质材料的单茎质量低于 1.00 kg。供试材料的锤度范围为 14.53%~20.93%，锤度最高的

是粤糖 93159（20.93%）和云蔗 081609（20.90%）；锤度大于 20.00% 的种质材料有 8 份，有 4 份种质材料的锤度在 18.00%~20.00% 之间；锤度低于 16.00% 的种质材料有云蔗 21-7（14.53%）、云蔗 23-1201（14.53%）、云蔗 25-6（14.77%）和云蔗 14-2（15.20%），这 4 份种质的锤度均显著低于其他种质。供试种质材料的有效茎数在 40 280~116 672 条/hm² 之间，直立类型云蔗 26-11 的有效茎数最多，为 116 672 条/hm²，其次是云蔗 25-6（104 172 条/hm²）和云蔗 25-7（100 005 条/hm²），这 3 份种质材料的有效茎数均超过 100 000 条/hm²；云蔗 23-1201 的有效茎数最少，为 40 280 条/hm²，与其他种质呈极显著差异。供试种质材料的蔗茎单产范围为 30.81~143.71 t/hm²，云蔗 17501 的单产最高，为 143.71 t/hm²，显著高于其他种质材料；单产为 100.00~140.00 t/hm² 的甘蔗种质材料有 8 份，单产低于 100.00 t/hm² 的种质材料有 6 份；云蔗 14-2 的单产最低，为 30.81 t/hm²，极显著低于其他种质材料。供试甘蔗种质材料的产糖量为 2.99~21.88 t/hm²，云蔗 17501 的产糖量最高，为 21.88 t/hm²，其次是粤糖 93159（20.67 t/hm²）和桂柳 05136（20.64 t/hm²），这 3 份种质材料的产

糖量差异不显著,但均显著高于其他多数材料。供试种质的产糖量在 10.00~18.00 t/hm² 之间的种质材料有 7 份;产糖量低于 10.00 t/hm² 的种质材料有 6 份;云蔗 14-2 (2.99 t/hm²) 和云蔗 23-1201 (3.57 t/hm²) 的产糖量均较低,极显著低于其他种质材料。

2.2 不同倒伏类型甘蔗种质材料的皮厚、纤维组分及抗倒伏指数情况

从表 4 可以看出,不同倒伏类型的甘蔗种质的抗倒伏指数呈显著差异,且与田间表型调查结果一致。供试甘蔗种质材料的抗倒伏指数变幅在 1.05~3.00 之间,有 7 份种质材料(云蔗 26-5、云蔗 23-1201、云蔗 26-11、云蔗 25-7、桂柳 05136、粤糖 93159、云蔗 17501)的抗倒伏指数大于 2.50,且种质间差异不显著,但这些种质极显著高于抗倒伏指数较低的种质;抗倒伏指数为 1.68~2.25 的有 7 份种质材料;云蔗 25-6 (1.18) 和云蔗 14-2 (1.05) 的倒伏指数均极显著低于其他种质材料。

云蔗 25-6 (42.87%)、云蔗 21-7 (42.75%) 和云蔗 25-3 (41.37%) 的纤维素含量均高于 40.00%,其中云蔗 25-6 的纤维素含量最高为 42.87%,这 3 份甘蔗种质的纤维素含量极显著高

于其他材料;纤维素含量在 32.55%~39.44% 之间的有 13 份种质材料,其中,云蔗 141010 (32.55%) 和云蔗 141313 (32.89%) 的纤维素含量极显著低于其他材料。供试甘蔗种质材料的半纤维素含量为 18.17%~23.68%,其中云蔗 0551 (23.68%) 和云蔗 081609 (23.53%) 的半纤维素含量极显著高于其他材料;半纤维素含量为 20.99%~21.94% 的有 6 份种质材料;其余 7 份种质材料的半纤维素含量均低于 20.00%,云蔗 25-7 的半纤维素含量最低 (18.17%),显著低于其他种质材料。供试甘蔗种质材料的木质素含量为 3.99%~8.67%,云蔗 21-7 的木质素含量最高 (8.67%),极显著高于其他材料;木质素含量为 6.50%~8.18% 的种质材料有 13 份;低于 6.00% 的种质材料有 2 份,分别是云蔗 081609 (5.54%) 和云蔗 141010 (3.99%),二者间差异极显著,且极显著低于其他种质材料。供试甘蔗种质材料的皮厚为 0.17~0.27 cm,其中,云蔗 25-6、云蔗 081609 和云蔗 141313 的蔗皮最厚(均为 0.27 cm),与其他种质材料间存在显著差异;皮厚为 0.20~0.25 cm 的种质材料有 9 份;皮厚小于 0.20 cm 的甘蔗种质材料有 4 份,依次是新台糖 22 号 (0.17 cm)、云蔗 21-7 (0.18 cm)、云蔗 14-2 (0.18 cm) 和云蔗 0551 (0.18 cm)。

表 4 不同倒伏类型甘蔗种质材料的皮厚、纤维组分及抗倒伏指数

Tab. 4 Skin thickness, fiber composition and lodging resistance index of sugarcane germplasm materials with different lodging types

种质 Germplasm	纤维素含量 Cellulose content/%	半纤维素含量 Hemicellulose content/%	木质素含量 Lignin content/%	皮厚 skin fold/mm	抗倒伏指数 Lodging resistance index
云蔗 21-7	42.75±0.23 ^{aA}	19.74±0.08 ^{cdCDEF}	8.67±0.07 ^{aA}	0.18±0.02 ^{bcA}	1.68±0.27 ^{dC}
云蔗 25-3	41.37±0.04 ^{bA}	20.99±0.65 ^{bcBCDE}	8.01±0.27 ^{bAB}	0.20±0.00 ^{abcA}	1.71±0.03 ^{dC}
云蔗 26-5	38.06±0.46 ^{cfgBCD}	19.01±0.26 ^{deF}	8.12±0.13 ^{bAB}	0.25±0.03 ^{abA}	2.84±0.05 ^{aA}
云蔗 23-1201	37.64±0.21 ^{fgCD}	19.55±0.50 ^{cdCDEF}	7.71±0.26 ^{bcBCD}	0.20±0.00 ^{abcA}	2.71±0.05 ^{aA}
云蔗 26-11	39.33±0.21 ^{cdB}	21.96±1.01 ^{bAB}	6.93±0.11 ^{deEFG}	0.20±0.00 ^{abcA}	3.00±0.00 ^{aA}
云蔗 14-2	39.44±0.58 ^{cB}	19.10±0.20 ^{deEF}	6.96±0.03 ^{deEFG}	0.18±0.02 ^{bcA}	1.05±0.01 ^{eD}
云蔗 25-6	42.87±0.37 ^{aA}	19.49±0.34 ^{deDEF}	7.94±0.21 ^{bBC}	0.27±0.02 ^{aA}	1.18±0.05 ^{eD}
云蔗 25-7	38.93±0.16 ^{cdeBC}	18.17±0.45 ^{eF}	7.23±0.16 ^{cdDE}	0.25±0.03 ^{abA}	3.00±0.00 ^{aA}
桂柳 05136	38.76±0.81 ^{cdeBc}	19.43±0.91 ^{deDEF}	7.30±0.12 ^{cdCDE}	0.22±0.04 ^{abcA}	3.00±0.00 ^{aA}
新台糖 22 号	35.69±0.09 ^{hF}	21.72±0.07 ^{bAB}	6.54±0.08 ^{efG}	0.17±0.03 ^{cA}	2.13±0.05 ^{bcBC}
云蔗 081609	35.69±0.23 ^{hF}	23.53±0.83 ^{aA}	5.54±0.10 ^{hI}	0.27±0.02 ^{aA}	2.25±0.22 ^{bB}
云蔗 141313	32.89±0.14 ^{iG}	21.94±0.14 ^{bAB}	7.19±0.29 ^{dDEF}	0.27±0.03 ^{aA}	2.16±0.07 ^{bcB}
云蔗 141010	32.55±0.40 ^{iG}	21.56±0.48 ^{bBC}	3.99±0.23 ^{gl}	0.20±0.00 ^{abcA}	1.88±0.28 ^{cdBC}
云蔗 0551	38.26±0.12 ^{defgBCD}	23.68±0.18 ^{aA}	8.18±0.12 ^{abAB}	0.18±0.04 ^{bcA}	2.07±0.01 ^{bcBC}
粤糖 93159	37.24±0.48 ^{dE}	21.21±0.33 ^{bBCD}	7.07±0.09 ^{dDEFG}	0.20±0.06 ^{abcA}	3.00±0.00 ^{aA}
云蔗 17501	36.09±0.66 ^{hEF}	21.20±0.21 ^{bBCD}	6.50±0.18 ^{eG}	0.20±0.00 ^{abcA}	3.00±0.00 ^{aA}

注:同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$);同列不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$); Different upper letters in the same column indicate extremely significant difference ($P<0.01$).

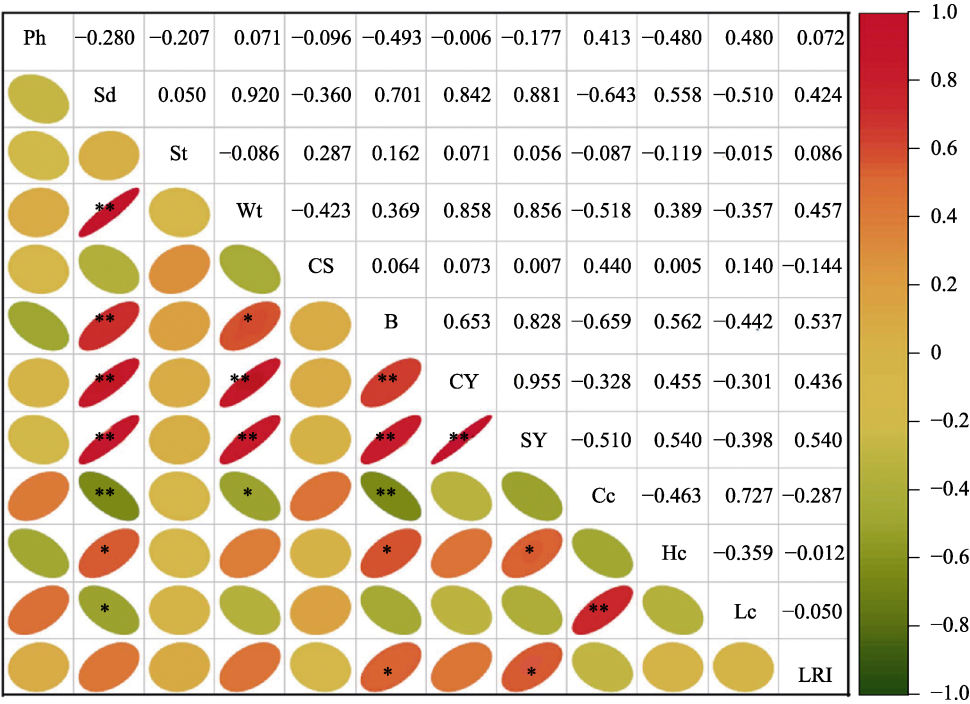
2.3 甘蔗种质材料农艺性状、纤维组分指标与抗倒伏指数之间的相关性分析

16 份甘蔗种质材料农艺性状、纤维组分指标与抗倒伏指数之间具有一定相关性(图 1)。锤度、糖产量与抗倒伏指数呈显著正相关 ($P<0.05$), 纤维素、半纤维素、木质素含量与抗倒伏指数呈负相关, 株高、茎粗、皮厚、单茎质量、单产与抗倒伏指数呈正相关, 有效茎数与抗倒伏指数呈负相关, 这说明有效茎数越多, 植株越容易倒伏, 与大田实际生产一致。茎粗与单茎质量、锤度、单产、糖产量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与半纤维素含量呈显著正相关 ($P<0.05$), 与纤维素、木质素含量呈显著负相关 ($P<0.05$)。单产、糖产量分别与茎粗、单茎质量和锤度呈极显著正相关 ($P<0.01$), 单产与糖产量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 糖产量与半纤维素含量呈显著正相关 ($P<0.05$), 与纤维素含量呈显著负相关 ($P<0.05$); 木质素与纤维素含量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与茎粗呈显著负相关 ($P<0.05$)。

2.4 倒伏相关指标的主成分分析

利用 12 个倒伏相关指标进行主成分分析, 参

照覃伟等^[24]的方法, 选取 $\lambda \geq 1$ 或累计贡献率达 80.000% 的主成分个数。由表 5 可见, 前 4 个特征值的累积贡献率为 84.6590%, 特征向量的总和为 10.1591, 说明前 4 个主成分可以代表这 16 份甘蔗种质材料 12 个倒伏相关指标的情况。主成分 1 的特征值为 5.6818, 贡献率为 47.3485%, 在该主成分的特征向量中, 特征向量值从大到小依次是茎粗 (0.3984)、糖产量 (0.3919)、锤度 (0.3604)、蔗茎单产 (0.3504)、半纤维素含量 (0.2639) 和皮厚 (0.0248), 因此主成分 1 为茎粗产糖量因子。主成分 2 为株高单茎质量因子, 其特征值为 1.8374, 贡献率为 15.3117%, 特征向量值前 4 个性状指标依次是株高 (0.6110)、单茎质量 (0.3222)、木质素含量 (0.3405) 和纤维素含量 (0.2186)。主成分 3 为茎数皮厚因子, 特征向量值前 4 个性状指标依次是有效茎数 (0.6686)、皮厚 (0.4427)、纤维素含量 (0.3127) 和木质素含量 (0.2485)。主成分 4 为纤维组分因子, 其特征向量值依次是半纤维素含量 (0.4993)、纤维素含量 (0.2911)、有效茎数 (0.2634)、蔗茎单产 (0.2043)、糖产量 (0.1180) 和木质素含量 (0.0983)。



Ph: 株高; Sd: 茎径; St: 皮厚; B: 锤度; Wt: 单茎质量; CS: 每公顷有效茎数; CY: 蔗茎产量; SY: 糖产量; Cc: 纤维素含量; Hc: 半纤维素含量; Lc: 木质素含量; LRI: 抗倒伏指数。*表示显著相关 ($P<0.05$); **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Ph: Plant height; Sd: Stalk diameter; St: Skin thickness; B: Brix; Wt: Weight of single stalk; CS: Effective stems number per hectare; CY: Cane yield; SY: Sugar yield; Cc: Cellulose content; Hc: Hemicellulose content; Lc: Lignin content; LRI: Lodging resistance index. * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

图 1 甘蔗种质材料农艺性状、纤维组分含量与抗倒伏指数之间的相关性

Fig. 1 Correlation between agronomic traits, fiber component content and lodging resistance index of sugarcane germplasm materials

表 5 甘蔗种质材料性状指标的主成分分析

Tab. 5 Principal component analysis of trait indicators of sugarcane germplasm materials

性状 Trait	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3	主成分 4 PC4
株高	-0.1478	0.6110	-0.0020	0.0259
茎粗	0.3984	0.0889	-0.0701	0.0163
皮厚	0.0248	-0.2105	0.4427	-0.5808
单茎质量	0.3598	0.3222	-0.0983	0.0495
每公顷有效茎数	-0.0909	-0.2162	0.6686	0.2634
锤度	0.3604	-0.1423	0.1984	-0.0681
蔗茎单产	0.3504	0.2299	0.2624	0.2043
糖产量	0.3919	0.1340	0.2073	0.1180
纤维素含量	-0.3125	0.2186	0.3127	0.2911
半纤维素含量	0.2639	-0.2669	-0.0352	0.4993
木质素含量	-0.2496	0.3405	0.2485	0.0983
抗倒伏指数	0.2126	0.3127	0.1747	-0.4312
特征值	5.6818	1.8374	1.5603	1.0796
贡献率/%	47.3485	15.3117	13.0023	8.9965
累积贡献率/%	47.3485	62.6602	75.6624	84.6590

2.5 综合评价

参考俞华先等^[13]的方法，基于主成分得分利用公式（1）~（3）求综合评价值（*D*），*D* 值综合表征了 16 份甘蔗种质材料农艺性状对抗倒伏能力的整体表现，*D* 值越大，表明材料的抗倒伏性能越优。从表 6 可知，16 份甘蔗种质材料中，

0.4000<*D*<0.5000 的种质有云蔗 26-5、云蔗 25-7、云蔗 25-6 和云蔗 21-7；0.6000<*D*<0.7000 的有云蔗 0551、云蔗 26-11、云蔗 141010、云蔗 141313、云蔗 081609 和新台糖 22 号共 6 份种质材料；0.7500<*D*<0.8600 的有云蔗 17501、桂柳 05136 和粤糖 93159 共 3 份种质材料，是比较好的抗倒伏种质材料。其中，云蔗 17501 的综合评价价值最大，为 0.8540，该种质材料是供试种质中抗倒伏性能最优的材料，要加强利用。

2.6 不同倒伏类型甘蔗种质材料的聚类分析

基于抗倒伏指数，采用卡方距离和离差平方和法对 16 份供试甘蔗种质材料进行系统聚类分析。由图 2 可知，在卡方距离为 1.00 处将 16 份甘蔗种质材料分为 3 大类型，第 I 类包含粤糖 93159、桂柳 05136、云蔗 17501、云蔗 25-7、云蔗 26-11、云蔗 23-1201 和云蔗 26-5 共 7 份甘蔗种质材料，其抗倒伏指数在 2.40~3.00 之间，属于直立类型；第 II 类包含云蔗 25-6 和云蔗 14-2 两份甘蔗种质材料，其抗倒伏指数在 1.00~1.20 之间，属于全倒伏类型；第 III 类包含云蔗 081609、云蔗 141313、新台糖 22 号、云蔗 0551、云蔗 141010、云蔗 25-3 和云蔗 21-7 共 7 份材料，占 43.75%，其抗倒伏指数在 1.60~2.30 之间，属于半倒伏类型。

表 6 甘蔗种质材料的综合评价结果

Tab. 6 Comprehensive valuation results of sugarcane germplasm materials

种质 Germplasm	CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄	Z(X ₁)	Z(X ₂)	Z(X ₃)	Z(X ₄)	<i>D</i>	排序 Order
云蔗 21-7	-2.6365	1.6123	-0.6166	1.0298	0.2021	0.8477	0.4321	0.7548	0.4130	13
云蔗 25-3	-2.4038	-1.7940	0.3676	0.8060	0.2339	0.1637	0.6605	0.6929	0.3355	14
云蔗 26-5	-0.8320	0.2167	0.8657	-1.6679	0.4481	0.5675	0.7761	0.0096	0.4735	10
云蔗 23-1201	-2.3649	0.9205	-2.4790	-1.4152	0.2392	0.7088	0.0000	0.0794	0.2704	15
云蔗 26-11	0.3677	0.0426	1.8308	0.9590	0.6116	0.5325	1.0000	0.7352	0.6701	5
云蔗 14-2	-4.1197	-1.1744	-1.2111	0.4225	0.0000	0.2881	0.2942	0.5870	0.1597	16
云蔗 25-6	-2.7334	0.3795	1.6606	0.3733	0.1889	0.6002	0.9605	0.5734	0.4227	12
云蔗 25-7	-1.6932	0.2318	1.3918	-1.7028	0.3307	0.5705	0.8981	0.0000	0.4261	11
桂柳 05136	1.7780	1.3536	0.8652	-0.3906	0.8038	0.7958	0.7760	0.3624	0.7512	3
新台糖 22 号	0.8321	0.4012	-1.3712	0.8751	0.6749	0.6045	0.2570	0.7120	0.6020	9
云蔗 081609	2.3246	-2.6089	0.3883	-0.3267	0.8783	0.0000	0.6653	0.3801	0.6338	8
云蔗 141313	1.8985	-1.0213	0.2122	-0.9112	0.8202	0.3188	0.6244	0.2186	0.6356	7
云蔗 141010	2.9322	-1.8210	-1.7617	-0.0704	0.9611	0.1582	0.1664	0.4509	0.6397	6
云蔗 0551	0.9875	0.2278	0.2311	1.9177	0.6961	0.5697	0.6288	1.0000	0.6952	4
粤糖 93159	2.4451	0.6633	0.2760	0.1482	0.8947	0.6571	0.6392	0.5113	0.7718	2
云蔗 17501	3.2177	2.3705	-0.6498	-0.0467	1.0000	1.0000	0.4244	0.4574	0.8540	1
权重					0.5593	0.1809	0.1536	0.1063		

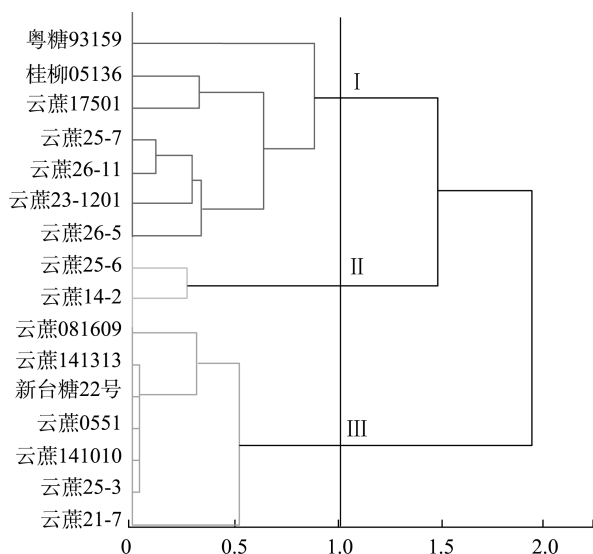


图 2 不同类型甘蔗种质材料的抗倒伏性系统聚类图

Fig. 2 Lodging resistance system cluster diagram of different types of sugarcane germplasm materials

2.7 灰色关联度分析

利用隶属函数法计算出 12 个指标的隶属函数值 $Z(X_i)$ ，以 16 份甘蔗种质材料的抗倒伏指数为母序列，以包含农艺性状、纤维组分含量的 12 个指标的隶属函数值为子序列进行灰色关联度分析。结果表明，各指标与抗倒伏指数的关联度不一致，其关联度大小依次为：茎粗>有效茎数>株高>纤维素含量>锤度>单产>皮厚>木质素含量>单茎质量>糖产量>半纤维素含量，关联度系数依次为：0.3997、0.3791、0.378、0.3582、0.3249、0.3201、0.3158、0.3133、0.2836、0.2769、0.2716。在 12 个农艺性状、纤维组分含量指标中，茎粗、有效茎数、株高、纤维素含量、锤度、单产、皮厚、木质素含量、单茎质量、糖产量和半纤维素含量与抗倒伏指数的关联度最高，其中，茎粗、有效茎数、株高和纤维素含量 4 个指标与抗倒伏指数的关联度系数均大于 0.3500，其关联性最强，是影响甘蔗抗倒伏能力的关键因子；单茎质量、糖产量和半纤维素含量与其关联度最低。

3 讨论

甘蔗倒伏是多因素共同作用的结果，除外部环境条件外，甘蔗种质材料自身形态学特征是决定倒伏的关键因素。李金才等^[25]和王勇等^[26]认为，茎秆形态特征是基于形态学鉴别和评价作物抗倒伏能力的重要依据。本研究基于甘蔗种质材料的农艺形状特征出发，结合田间实际倒伏程度的分级评价，分析蔗茎纤维组分含量差异，并引

入抗倒伏指数以综合反映其抗倒伏性能。抗倒伏指数越高，表明种质材料越不易倒伏，反之，则易倒伏。

对作物品种抗倒性评价有多种方法，所依据的数学原理也不同。其中，主成分分析作为一种多元统计方法，能够将多个相关性高的指标转化为少数相互独立的综合指标，有效保留原始信息^[27]。隶属函数法基于模糊数学的隶属度理论，将定性评价转化为定量评价，适用于多因素指标变化的综合定量评估^[28]。聚类分析则广泛用于种质资源的分类与亲缘关系研究^[29]。近年来，针对玉米^[30]、麦类^[31-32]和大豆^[33]等作物的抗倒伏研究采用主成分和聚类分析的报道较多。俞华先等^[13]也采用此评价方法对大茎野生种后代进行抗倒伏性资源的筛选。本研究通过隶属函数法与聚类分析将供试甘蔗种质划分为三类，其中第 I 类（7 份材料）抗倒伏性最强，第 III 类（7 份材料）为半倒伏，第 II 类（2 份材料）最易倒伏，并明确了茎粗、有效茎数、株高和纤维素含量为影响抗倒伏能力的关键指标。

茎秆形态特征是判断作物是否发生倒伏的关键表型性状，与作物抗倒伏能力密切相关，已成为当前抗倒伏领域研究的一个重要方向^[34]，茎秆形态结构是鉴别作物抗倒伏能力的主要形态学指标。刘明等^[35]研究表明，作物的形态特征是决定其受力状态的关键因素，直接影响倒伏发生。周蓉等^[36]提出，可将地上部分质量、株高和茎粗等形态参数作为抗倒伏能力的间接评价指标。姚金保等^[37]认为，小麦的茎秆重心高度，以及基部伸长节间的长度、粗度、秆壁厚度、节间质量、抗折力和穿刺强度等性状与其抗倒伏能力密切相关。已有研究表明，燕麦茎秆具有低矮、粗壮、韧性好、重心低及负荷小等特征，因而抗倒性较强^[38]。李召峰等^[39]对 40 份新疆小麦品种的研究表明，重心高度和地上部鲜质量是抗倒性的主要决定因素。在甘蔗抗倒伏评价方面，沈银娟^[40]和李翔^[41]提出，可采用茎秆折断力、穿刺强度、抗倒伏指数以及锤度、株高、基部茎径等指标综合评价其抗倒性。本研究表明，茎粗与抗倒伏指数呈正相关，但不显著，锤度与抗倒伏指数呈显著正相关，而有效茎数与抗倒伏指数则呈负相关，说明茎数增多可能增加倒伏风险。其中锤度与抗倒伏指数呈显著正相关，及茎粗与抗倒伏指数呈极显著正相关，与李翔^[41]的研究结论相符。

近年来,众多学者基于小麦^[42]、玉米^[43]、青稞^[44]和油菜^[45]等作物茎秆形态结构的差异,通过对其生理特性的分析,发现茎秆中木质素和纤维素含量越高,其刚性和机械强度越大,抗倒伏能力也相应增强。木质素是衡量作物抗倒伏能力的关键生理指标,主要分布于木质化的机械组织与输导组织的细胞壁中^[34],可增强细胞壁的硬度,有效维持细胞壁结构的稳定性与茎秆的机械性能。木质素含量直接影响植物茎秆的机械强度,因此与抗倒伏性能密切相关^[46]。MA^[47]研究表明,小麦茎秆基部第 2 节间的木质素含量及抗折强度与抗倒伏指数呈显著正相关,而与实际倒伏面积呈显著负相关,木质素含量的增加有助于提升茎秆抗折力^[48]。ZHENG 等^[49]提出,细胞壁木质素的积累程度可作为评估茎秆质量的可靠指标。黄杰恒^[50]在甘蓝型油菜中发现,茎秆木质素含量越高,其茎秆强度和抗折性能也越强。王凯等^[44]的研究进一步证实,大麦茎秆木质素含量与抗倒伏性之间存在显著相关性。本研究中,锤度与抗倒伏指数呈显著正相关,与李翔^[41]的研究结论一致;纤维素、半纤维素含量与抗倒伏指数呈负相关,与俞华先等^[23]对大茎野生种后代蔗茎纤维组分和力学性能差异分析的研究结论不一致,出现这种情况可能是评价体系 and 指标不同,另外本研究的供试甘蔗种质材料的血缘基础差别较大,既有割手密聚合体,也有大田品种种质材料。

作物抗倒伏性是多基因控制的数量性状,涉及多机制、多途径的调控,并在不同生育阶段通过多个指标体现。因此,在甘蔗种质材料蔗茎抗倒伏筛选的过程中,鉴定指标的确定至关重要。本研究以 16 份甘蔗种质材料,基于农艺性状与纤维组分含量等 12 个指标,结合多元分析方法系统评估其抗倒伏性。结果表明,不同指标对甘蔗茎秆抗倒伏能力的影响存在显著差异,与刘富成等^[12]、俞华先等^[13]、沈银娟等^[14]和李翔^[41]的研究结论一致。通过主成分分析,将 12 个单项指标转换成 4 个新的综合指标(茎粗产糖量因子、株高单茎质量因子、茎数皮厚因子和纤维组分因子)。另外,本研究进一步通过灰色关联度分析,得到各指标与抗倒伏指数的密切程度,结果表明,在农艺性状和纤维组分含量的 12 个指标中,茎粗、有效茎数、株高和纤维素含量 4 个指标与抗倒伏指数的关联度最高。因此,在甘蔗抗倒伏性评价中,可优先选择这些与抗倒伏性密切相关的指标。

4 结论

本文研究了甘蔗农艺性状和纤维组分含量与抗倒伏性的相关性,明确了茎粗、有效茎数、株高和纤维素含量是影响甘蔗抗倒伏能力的关键因素。同时,采用隶属函数法和聚类分析法将供试种质材料进行综合评价和归类,第 I 类包含粤糖 93159、桂柳 05136、云蔗 17501、云蔗 25-7、云蔗 26-11、云蔗 23-1201 和云蔗 26-5 共 7 份甘蔗种质材料,其抗倒伏指数在 2.40~3.00 之间,属于直立类型;第 II 类包含云蔗 25-6 和云蔗 14-2 两份甘蔗种质材料,其抗倒伏指数在 1.00~1.20 之间,属于全倒伏类型;第 III 类包含云蔗 081609、云蔗 141313、新台糖 22 号、云蔗 0551、云蔗 141010、云蔗 25-3 和云蔗 21-7 共 7 份材料,占 43.75%,其抗倒伏指数在 1.60~2.30 之间,属于半倒伏类型。抗倒伏能力从强到弱依次为第 I 类>第 III 类>第 II 类。

参考文献

- [1] 张跃彬,赵培方,胡朝晖,阙友雄. 近年我国甘蔗品种的育种成就与发展趋势[J]. 中国糖料, 2024, 46(1): 87-92.
ZHANG Y B, ZHAO P F, HU C H, QUE Y X. The recent achievements and development trends of sugarcane improvement in China[J]. Sugar Crops of China, 2024, 46(1): 87-92. (in Chinese)
- [2] LI Y R, YANG L T. Sugarcane agriculture and sugar industry in China[J]. Sugar Tech, 2015, 17(1): 1-8.
- [3] 孙明, 谢敏. 基于无人机低空遥感的广西甘蔗灾害监测应用研究[J]. 气象研究与应用, 2019, 40(1): 46-52.
SUN M, XIE M. Study on monitoring and application of sugarcane disaster in Guangxi based on UAV[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2019, 40(1): 46-52. (in Chinese)
- [4] 叶骏菲, 陈燕丽, 林奕桐, 黄璐, 刘永裕, 黄立宁. 基于气象因子的广西甘蔗锤度估算模型研究[J]. 甘蔗糖业, 2024, 53(6): 28-42.
YE J F, CHEN Y L, LIN Y T, HUANG L, LIU Y Y, HUANG L N. Research on estimation model of Brix of sugarcane based on meteorological factors in Guangxi[J]. Sugarcane and Canesugar, 2024, 53(6): 28-42. (in Chinese)
- [5] 农生平, 黄文武, 潘廷由, 罗芳媚. 甘蔗倒伏原因及其防止措施[J]. 农家之友, 2014(6): 59-60.
NONG S P, HUANG W W, PAN T Y, LUO F M. Causes of sugarcane lodging and its preventive measures[J]. Friends of Farmers, 2014(6): 59-60. (in Chinese)
- [6] 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 in sugarcane[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(3): 6095-6105.
- [7] 中国热带农业科学院. “剑鱼”台风灾害后果蔗田间管护措施[EB/OL]. (2025-08-27)[2025-08-29]. <https://mp.weixin.qq.com/s/mxxUmAnuZBr84aYldMBGsw>. Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences. Field management measures for sugarcane after “Kajiki” typhoon disaster[EB/OL]. (2025-08-27)[2025-08-29]. <https://mp.weixin.qq.com/s/mxxUmAnuZBr84aYldMBGsw>. (in Chinese)
- [8] 甘蔗糖业. 台风“桦加沙”后甘蔗恢复生产措施[EB/OL]. (2025-09-26)[2025-09-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/VTUZ147x7XU02beMUBBC6A>. Sugarcane and Canesugar. Measures for sugarcane production recovery after typhoon “Ragasa”[EB/OL]. (2025-09-26)[2025-09-28]. <https://mp.weixin.qq.com/s/VTUZ147x7XU02beMUBBC6A>. (in Chinese)
- [9] 马瑞升, 丁美花, 李晓征, 宫志宏, 匡昭敏. 基于“天空地”多源数据的“摩羯”台风甘蔗倒伏监测评估——以上思县为例[J]. 甘蔗糖业, 2025, 54(2): 41-52. MA R S, DING M H, LI X Z, GONG Z H, KUANG Z M. Monitoring and assessment of sugarcane lodging caused by typhoon “Yagi” using multi-source spaceborne-airborne-ground data: a case study of Shangsi county[J]. Sugarcane and Canesugar, 2025, 54(2): 41-52. (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): 25-26, 32. YANG W, YANG J, MO X M, YUAN F W, HUANG S C. Current status and development trends of sugarcane anti-lodging technology[J]. Guangxi Agricultural Mechanization, 2016(3): 25-26, 32. (in Chinese)
- [11] 杨瑶. 广西甘蔗机械化收获面临的问题及分析[J]. 农机科技推广, 2023(4): 24-26. YANG Y. Issues and analysis of mechanized harvesting of sugarcane in Guangxi[J]. Agricultural Machinery and Technology Promotion, 2023(4): 24-26. (in Chinese)
- [12] 刘富成, 李照杰, 蔡文伟, 吴伟. 种植密度和深度对甘蔗产量及抗倒伏的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(2): 330-339. LIU F C, LI Z J, CAI W W, WU W. Effects of planting density and depth on yield and lodging resistance in sugarcane[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(2): 330-339. (in Chinese)
- [13] 俞华先, 安汝东, 桃联安, 经艳芬, 郎荣斌, 边芯, 张钰, 刘家勇, 赵丽萍, 刘洪博, 张革民, 张保青. 57NG208 与南涧果蔗正反交后代的抗倒伏性评价[J]. 热带作物学报, 2025, 46(4): 914-923. YU H X, AN R D, TAO L A, JING Y F, LANG R B, BIAN X, ZHANG Y, LIU J Y, ZHAO L P, LIU H B, ZHANG G M, ZHANG B Q. Lodging resistance evaluation of reciprocal hybrids between 57NG208 and Nanjian chewing cane[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2025, 46(4): 914-923. (in Chinese)
- [14] 沈银娟, 马富民, 王茂瑶, 李欣茹, 张木清, 黄江锋. 蔗茎机械强度精准评价及机制解析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(1): 207-215. SHEN Y J, MA F M, WANG M Y, LI X R, ZHANG M Q, HUANG J F. Accurate evaluation and mechanism analysis of mechanical strength of sugarcane stalk[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(1): 207-215. (in Chinese)
- [15] 陆乔, 滕婉, 梁颖博, 王延鹏. 甘蔗基因组编辑与抗倒伏研究[J/OL]. 生物工程学报, 2025: 1-27. (2025-08-29)[2025-09-25]. <https://doi.org/10.13345/j.cjb.250555>. LU Q, TENG W, LIANG Y B, WANG Y P. Genome editing and lodging resistance in sugarcane[J/OL]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025: 1-27. (2025-08-29)[2025-08-30]. <https://doi.org/10.13345/j.cjb.250555>. (in Chinese)
- [16] 郝文录, 刘恒新, 朱良, 孟庆华. 农业机械试验条件测定方法的一般规定: GB/T 5262—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. HAO W L, LIU H X, ZHU L, MENG Q H. Agricultural machinery testing conditions-general rules for measuring methods: GB/T 5262—2008[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [17] 谢子四, 张欣, 陈业渊, 罗石荣, 魏守兴. 10 份香蕉种质对枯萎病的抗性评价(简报)[J]. 热带作物学报, 2009, 30(3): 362-364. XIE Z S, ZHANG X, CHEN Y Y, LUO S R, WEI S X. Assessment of banana germplasm for resistance to *Fusarium wilt*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2009, 30(3): 362-364. (in Chinese)
- [18] 李朝生, 霍秀娟, 韦绍龙, 韦弟, 韦华芳, 黄素梅. 5 份香蕉种质对枯萎病的抗性评价[J]. 南方农业学报, 2012, 43(4): 449-453. LI C S, HUO X J, WEI S L, WEI D, WEI H F, HUANG S M. Evaluation of 5 banana varieties for resistance to *Fusarium wilt* (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*)[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(4): 449-453. (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国农业农村部. 农业生物质原料 纤维素、半纤维素、木质素测定: NY/T 3949—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Determination of cellulose, hemicellulose and lignin in agricultural biomass raw materials: NY/T 3949—2019[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2019. (in Chinese)
- [20] BALOCH S, YANG Y. Review on methods and applications of high-performance liquid chromatography[J]. Journal of Food Processing & Technology, 2021, 12(1): 1-5.

- [21] MARCELO G W, JUHA A, OUTO M, KANTOLA A M, KOMPULAINEN S, TELKKI V V, TANSKANEN J. Determination of phenolichydroxyl groups in technical lignins by ionization difference ultra-violet spectrophotometry (As-DUS method)[J]. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 2016, 61(2): 93-101.
- [22] 李直, 林兆里, 罗俊, 张华. 不同甘蔗品种蔗茎纤维组分和力学性能差异分析[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(10): 2405-2412.
LI Z, LIN Z L, LUO J, ZHANG H. Differences in fiber components and mechanical properties of sugarcane stems among different sugarcane varieties[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(10): 2405-2412. (in Chinese)
- [23] 俞华先, 赵培方, 安汝东, 桃联安, 经艳芬, 郎荣斌, 边芯, 张钰, 张革民, 张保青, 杨翠芳. 大茎野生种正反交后代的蔗茎纤维组分和力学性能差异分析[J]. *中国农学通报*, 2025, 41(17): 31-37.
YU H X, ZHAO P F, AN R D, TAO L A, JING Y F, LANG R B, BIAN X, ZHANG Y, ZHANG G M, ZHANG B Q, YANG C F. Variations analysis of sugarcane stalk fiber components and mechanical properties in progeny of *Saccharum robustum* reciprocal crosses[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2025, 41(17): 31-37. (in Chinese)
- [24] 覃伟, 张保青, 黄玉新, 周珊, 赵丽萍, 李纯佳, 李旭娟, 张静, 李傲梅, 任生林, 黄东亮, 刘新龙. 甘蔗宿根关键性状及其在宿根性快速评价中的应用[J]. *植物遗传资源学报*, 2024, 25(3): 399-412.
QIN W, ZHANG B Q, HUANG Y X, ZHOU S, ZHAO L P, LI C J, LI X J, ZHANG J, LI A M, REN S L, HUANG D L, LIU X L. Identification of key factors applicable in rapid evaluation of sugarcane ratooning ability[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2024, 25(3): 399-412. (in Chinese)
- [25] 李金才, 尹钧, 魏凤珍. 播种密度对冬小麦茎秆形态特征和抗倒指数的影响[J]. *作物学报*, 2005, 31(5): 662-666.
LI J C, YIN J, WEI F Z. Effects of planting density on characters of culm and culm lodging resistant index in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(5): 662-666. (in Chinese)
- [26] 王勇, 李晴祺. 小麦品种抗倒性评价方法的研究[J]. *华北农学报*, 1995, 10(3): 84-88.
WANG Y, LI Q Q. Evaluation method of stem lodging resistance in wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1995, 10(3): 84-88. (in Chinese)
- [27] 王秀秀, 邢爱双, 杨茹, 何守朴, 贾银华, 潘兆娥, 王立如, 杜雄明, 宋宪亮. 陆地棉种质资源表型性状综合评价[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(6): 1082-1094.
WANG X X, XING A S, YANG R, HE S P, JIA Y H, PAN Z E, WANG L R, DU X M, SONG X L. Comprehensive evaluation of phenotypic characters of nature population in upland cotton[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(6): 1082-1094. (in Chinese)
- [28] 高雪, 朱林, 苏莹. 基于隶属函数法的甜高粱孕穗期耐盐性综合评价[J]. *南方农业学报*, 2018, 49(9): 1736-1744.
GAO X, ZHU L, SU Y. Comprehensive evaluation on salt tolerance of sorghum bicolor at booting stage by membership function method[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(9): 1736-1744. (in Chinese)
- [29] 沈国军, 徐琳娜, 黄伟忠, 陈海敏, 郑琪. 基于 SSR 标记的吊瓜品种(系)DNA 指纹图谱库的构建[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(10): 3349-3355.
SHEN G J, XU L N, HUANG W Z, CHEN H M, ZHENG Q. Construction of DNA fingerprint library of cantaloupe cultivars (lines) based on SSR markers[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(10): 3349-3355. (in Chinese)
- [30] 张书宁, 唐雪文, 李文龙, 许春锋, 高树仁. 玉米自交系茎秆抗倒伏综合评价[J]. *玉米科学*, 2025, 33(7): 11-20.
ZHANG S N, TANG X W, LI W L, XU C F, GAO S R. Comprehensive evaluation of stem lodging resistance in maize inbred lines[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2025, 33(7): 11-20. (in Chinese)
- [31] 张永康, 王树彦, 张锦豪, 李佳娜, 邢路虹, 刘瑞香, 郭占斌. 藜麦种质资源的茎秆性状评价[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 44(4): 1-9.
ZHANG Y K, WANG S Y, ZHANG J H, LI J N, XING L H, LIU R X, GUO Z B. Evaluation of stem traits in quinoa germplasm resources[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2024, 44(4): 1-9. (in Chinese)
- [32] 杨冰, 王玉婷, 刘金龙, 韩旭, 李跃, 孙彦. 不同燕麦品种茎秆抗倒性的综合评价及筛选[J]. *草地学报*, 2025, 33(5): 1408-1417.
YANG B, WANG Y T, LIU J L, HAN X, LI Y, SUN Y. Comprehensive evaluation and screening of lodging resistance of different oat varieties[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(5): 1408-1417. (in Chinese)
- [33] 王金生, 张瑞萍, 马力, 蒲国锋, 王家军, 王君, 吴俊江, 王冠, 孙明明. 基于抗倒伏性的大豆耐密性资源评价与筛选[J]. *大豆科学*, 2024, 43(6): 743-748.
WANG J S, ZHANG R P, MA L, PU G F, WANG J J, WANG J, WU J J, WANG G, SUN M M. Evaluation and screening of soybean density tolerance resources based on lodging resistance[J]. *Soybean Science*, 2024, 43(6): 743-748. (in Chinese)
- [34] 南铭, 李晶, 赵桂琴, 柴继宽, 刘彦明. 茎秆基部节间特性和木质素合成与燕麦抗倒伏的关系[J]. *草业学报*, 2022, 31(11): 172-180.
NAN M, LI J, ZHAO G Q, CHAI J K, LIU Y M. Relationship between lodging resistance of oats and the basal internode stem characteristics and lignin synthesis[J]. *Acta Pra-*

- taaculturae Sinica, 2022, 31(11): 172-180. (in Chinese)
- [35] 刘明, 王贞杰, 孙亚男, 赵彩桐, 韩德志, 李文滨, 姜振峰. 基于主茎力学特性的大豆种质资源抗倒伏性分析[J]. 大豆科学, 2023, 42(1): 23-31.
LIU M, WANG Z J, SUN Y N, ZHAO C T, HAN D Z, LI W B, JIANG Z F. Analysis of lodging resistance of soybean germplasm resources based on mechanical properties of main stem[J]. Soybean Science, 2023, 42(1): 23-31. (in Chinese)
- [36] 周蓉, 王贤智, 张晓娟, 沙爱华, 吴学军, 涂赣英, 邱德珍, 周新安. 大豆种质倒伏抗性评价方法研究[J]. 大豆科学, 2007(4): 484-489.
ZHOU R, WANG X Z, ZHANG X J, SHA A H, WU X J, TU G Y, QIU D Z, ZHOU X A. Evaluation method of lodging resistance in soybean germplasm[J]. Soybean Science, 2007, 26(4): 484-489. (in Chinese)
- [37] 姚金保, 马鸿翔, 姚国才, 杨学明, 周森平, 张平平, 张鹏. 小麦抗倒性研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(2): 208-213.
YAO J B, MA H X, YAO G C, YANG X M, ZHOU M P, ZHANG P P, ZHANG P. Research progress on lodging resistance in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2013, 14(2): 208-213. (in Chinese)
- [38] 内蒙古农研所粮作室莜麦专业课题组. 莜麦抗倒伏品种形态特征的初步研究[J]. 内蒙古农业科技, 1978(2): 19-21.
Oat Professional Research Group, Food Crops Laboratory, Inner Mongolia Institute of Agricultural Research. Preliminary study on morphological characteristics of lodging-resistant oat varieties[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 1978(2): 19-21. (in Chinese)
- [39] 李召锋, 黄润, 刘晓欢, 柴亚茹. 新疆春小麦资源茎秆形态特征与抗倒性的关系[J]. 西南农业学报, 2017, 30(4): 717-721.
LI Z F, HUANG R, LIU X H, CHAI Y R. Relationship between characters of culm and culm lodging resistance in Xinjiang spring wheat germplasm resources[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(4): 717-721. (in Chinese)
- [40] 沈银娟. 甘蔗茎秆机械强度的精准评价及机制解析[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
SHEN Y J. Accurate evaluation and mechanism analysis of mechanical strength of sugarcane stalk[D]. Nanning: Guangxi University, 2022. (in Chinese)
- [41] 李翔. 甘蔗抗倒伏性评价及抗性机制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
LI X. Evaluation on lodging resistance and mechanism of lodging resistance in sugarcane[D]. Nanning: Guangxi University, 2019. (in Chinese)
- [42] 陈晓光, 史春余, 尹燕桦, 王振林, 石玉华, 彭佃亮, 倪英丽, 蔡铁. 小麦茎秆木质素代谢及其与抗倒性的关系[J]. 作物学报, 2011, 37(9): 1616-1622.
CHEN X G, SHI C Y, YIN Y P, WANG Z L, SHI Y H, PENG D L, NI Y L, CAI T. Relationship between lignin metabolism and lodging resistance in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(9): 1616-1622. (in Chinese)
- [43] 马延华, 王庆祥. 玉米茎秆性状与抗倒伏关系研究进展[J]. 作物杂志, 2012(2): 10-15.
MA Y H, WANG Q X. Research progress on the relationship between stalk traits and lodging resistance in maize[J]. Crops, 2012(2): 10-15. (in Chinese)
- [44] 王凯, 赵小红, 姚晓华, 姚有华, 白羿雄, 吴昆仑. 茎秆特性和木质素合成与青稞抗倒伏关系[J]. 作物学报, 2019, 45(4): 621-627.
WANG K, ZHAO X H, YAO X H, YAO Y H, BAI Y X, WU K L. Relationship of stem characteristics and lignin synthesis with lodging resistance of hulless barley[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(4): 621-627. (in Chinese)
- [45] 黄杰恒, 李威, 曲存民, 刘列钊, 徐新福, 王瑞, 李加纳. 甘蓝型油菜不同抗倒性材料中木质素代谢途径关键基因表达特点[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1339-1344.
HUANG J H, LI W, QU C M, LIU L Z, XU X F, WANG R, LI J N. Expression characteristics of key genes in lignin pathway among different lodging resistance lines of *Brassica napus* L.[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(8): 1339-1344. (in Chinese)
- [46] ZHAO D Q, LUAN Y T, XIA X, SHI W B, TANG Y H, TAO J. Lignin provides mechanical support to herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) stems[J]. Horticulture Research, 2020, 7(1): 213.
- [47] MA Q H. Functional analysis of a cinnamyl alcohol dehydrogenase involved in lignin biosynthesis in wheat[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(10): 2735-2744.
- [48] PENG D L, CHEN X G, YIN Y P, LU K L, YANG W B, TANG Y H, WANG Z L. Lodging resistance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): lignin accumulation and its related enzymes activities due to the application of paclobutrazol or gibberellin acid[J]. Field Crops Research, 2014, 157: 1-7.
- [49] ZHENG M J, CHEN J, SHI Y H, LI Y X, YIN Y P, YANG D Q, LUO Y L, PANG D W, XU X, LI W Q, NI J, WANG Y Y, WANG Z L, LI Y. Manipulation of lignin metabolism by plant densities and its relationship with lodging resistance in wheat[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41805.
- [50] 黄杰恒. 干旱胁迫下油菜抗倒伏相关性状动态变化及木质素关键基因表达特性分析[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
HUANG J H. Lodging resistant traits and lignin related gene analysis in *B. napus* under drought stress[D]. Chongqing: Southwest University, 2013. (in Chinese)