

甘蔗 71 个杂交组合的配合力分析与优质亲本筛选

唐思琪^{1,2}, 刘家勇^{1,2}, 赵培方^{1,2}, 咎逢刚^{1,2}, 姚 丽^{1,2}, 赵丽萍^{1,2*}

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

摘 要: 甘蔗 (*Saccharum* spp.) 是全球最主要的糖料作物, 承担着约 80% 的世界食糖生产任务。为满足现代糖业对高产高糖甘蔗品种的迫切需求, 本研究以 71 个甘蔗杂交组合的实生苗为材料, 开展了株高、茎径、锤度、有效茎、蔗产量和糖产量 6 个农艺性状的遗传变异分析, 并应用 R 软件对一般配合力 (GCA) 和特殊配合力 (SCA) 进行估算, 同时基于蔗产量和锤度 GCA 与 SCA 进行聚类分析。结果表明: 各组合在 6 个性状上均表现出丰富的遗传多样性, 尤其在产量相关性状 (有效茎、蔗产量和糖产量) 上变异系数超过 39.00%, 展现出较大的选育潜力, 糖分性状锤度的变异系数最低 (8.05%), 说明其受遗传控制较强, 稳定性较高。筛选出优良父本 HoCP05-902、桂糖 96-211、粤糖 93-124、粤糖 93-159、桂糖 00-122 及云瑞 05-704, 优良母本包括桂糖 94-119、CP72-1210 和 Eros 等; 组合 CP72-1210 × 桂糖 96-211 与桂糖 94-119 × 粤糖 93-159 在 6 个性状上均表现优异, 兼具高产与高糖特性, 是育种应用的核心组合。GCA/SCA 比值分析指出, 蔗产量的加性遗传效应主要由父本主导。本研究筛选出一批优质亲本和优势组合, 为甘蔗高产高糖育种提供理论基础和实践路径, 具有重要的应用前景。

关键词: 甘蔗; 杂交组合; 配合力; 聚类分析

中图分类号: S566.1 文献标志码: A

Combining Ability Analysis of 71 Sugarcane Hybrid Combinations and the Screening of Key Parental Lines

TANG Siqu^{1,2}, LIU Jiayong^{1,2}, ZHAO Peifang^{1,2}, ZAN Fenggang^{1,2}, YAO Li^{1,2}, ZHAO Liping^{1,2*}

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

Abstract: Sugarcane (*Saccharum* spp.) is the most significant global sugar crop, contributing approximately 80% of total sugar production worldwide. Developing high-yielding and high-sugar-content varieties is critical for enhancing sugar industry sustainability. To support this goal and optimize hybrid breeding strategies, this study evaluated 71 sugarcane hybrid combinations derived from 75 parental lines, using six key agronomic traits: plant height, stalk diameter, brix (juice sugar content), number of effective stalks, cane yield and sugar yield. The main objective was to assess general combining ability (GCA) and specific combining ability (SCA), to identify superior parental lines and hybrid combinations for sugarcane breeding programs. The GCA/SCA analyses were performed using the R software. Clustering analyses were conducted based on combining ability values to classify parental materials and hybrid combinations into distinct genetic performance groups. Results showed substantial genetic variation across hybrids, particularly in yield-related traits, with coefficients of variation exceeding 39.00% for effective stalks, cane yield and sugar yield, highlighting significant breeding potential. Conversely, brix exhibited the lowest variation (8.05%), indicating high genetic stability for sugar content traits. Notably, HoCP05-902, GT96-211, YT93-124, YT93-159, GT00-122 and YR05-704 were identified as elite male parents, while GT94-119, CP72-1210 and Eros were outstanding female lines.

收稿日期 2025-08-07; 接受日期 2025-09-04

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); 云南省科技计划项目 (No. 202404BP090025)。

作者简介 唐思琪 (1997—), 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 甘蔗育种。*通信作者 (Corresponding author): 赵丽萍 (ZHAO Liping), E-mail: zlp_alyma@126.com。

Two combinations, CP72-1210×GT96-211 and GT94-119×YT93-159, exhibited superior GCA and SCA values, achieving excellent performance in both yield and sugar content. Additionally, GCA/SCA ratio analysis revealed that cane yield exhibited significant additive effects primarily inherited from the male parent. In conclusion, this research provides valuable theoretical guidance and genetic resources for sugarcane breeding, highlighting key parental lines and hybrid combinations that can serve as core materials in developing next-generation high-yield, high-sugar sugarcane cultivars.

Keywords: sugarcane; hybrid combinations; combining ability; cluster analysis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.007

甘蔗 (*Saccharum* spp.) 是全球最主要的糖料作物, 贡献了约 80 % 的世界食糖产量, 因此甘蔗育种研究对于支撑糖业可持续发展具有核心意义^[1]。随着对高产高糖甘蔗品种的需求不断增加, 优化杂交育种策略已成为提升糖业生产效率的关键, 一般配合力 (general combining ability, GCA) 与特殊配合力 (specific combining ability, SCA) 分析是评估亲本遗传潜力的关键工具, 可用于筛选优良组合和指导亲本选配, 能为构建优良杂交组合提供理论基础^[2-3]。此外, 聚类分析作为多变量综合评价方法, 在亲本类型划分与组合优选中亦具有重要价值, 可结合产量、糖分及形态等多个指标对亲本进行系统分类, 从而为杂交组合设计提供参考^[4]。

近年来, 多位学者通过配合力与聚类方法对甘蔗杂交组合进行了深入研究, 谭芳等^[4]利用甘蔗配合力与聚类分析方法研究了 146 个组合及 126 个亲本, 筛选出适合作母本和父本的高糖高产类亲本以及高糖高产类杂交组合, 为甘蔗亲本及组合选配提供了有力参考。陈勇生等^[5]对 30 个常用甘蔗亲本的锤度、茎径、株高和分蘖率等性状进行分析, 通过聚类分析将亲本分为 6 类, 不同类别在锤度、茎径、株高等性状上各有优势, 该研究还表明引进的美国甘蔗品种多为早熟高糖材料, 而多数自育亲本在产量性状上表现较好。吴嘉云等^[6]对 12 个美国 HoCP 系列甘蔗亲本及其 73 个杂交组合进行了配合力和经济育种值评估。筛选出高配合力的父本和母本, 为 HoCP 系列甘蔗亲本在杂交组合中的选配提供了参考。经艳芬等^[7]比较了 R 软件分析、灰色接近度评估、同异分析和模糊综合评判 4 种方法在评价甘蔗杂交组合优劣方面的应用, 这 4 种方法在评价结果上具有一致性, 能够有效区分组合的优劣, 并且评价等级与杂种圃材料入选率基本吻合, 研究建议将多种方法结合起来, 构建甘蔗杂交组合评价的技

术方法体系, 以科学评价含云南甘蔗野生种血缘的创新亲本和组合, 为甘蔗育种提供科学依据。黄玉新等^[8]对 138 份国外引进甘蔗品种 (系) 的宿根性进行了评价, 通过聚类分析, 将参试材料分为 3 个大类群, 挖掘出潜在的亲本材料, 对不同种质在育种工作中的应用提出了建议。甘蔗杂交组合的配合力分析对于甘蔗育种具有重要意义。通过深入研究配合力的遗传机制和环境影响, 可以为甘蔗杂交育种提供更科学的指导, 从而推动甘蔗产业的发展。

本研究以 71 个甘蔗杂交组合为材料, 通过分析其主要农艺性状的配合力效应, 旨在明确各亲本材料在不同性状 GCA 和 SCA 效应, 筛选出遗传潜力优良的亲本及表现突出的组合, 揭示主要性状的遗传变异模式, 为甘蔗高产优质育种提供理论依据和优良材料基础。以上研究不仅有助于拓宽甘蔗遗传基础, 也对构建高产优质抗逆的甘蔗新品种体系具有重要实践意义。

1 材料与方法

1.1 材料

研究以 71 份甘蔗杂交组合为试验材料, 组合共包含 75 个亲本, 其中只作母本的亲本有 42 个, 只作父本的亲本有 22 个, 既作母本又作父本的亲本有 11 个, 包括 17 个云南自育甘蔗品种云蔗、云瑞、云开和德蔗等系列, 46 个新台糖、福农、桂糖、柳城、内江、崖城、粤糖、粤农和湛蔗等其他国内亲本, 以及 12 个 CP 和 HoCP 等国外引进亲本品种。详细杂交组合情况见表 1。

1.2 方法

71 个甘蔗杂交组合于 2022 年 11 月播种, 2023 年 4 月按随机区组设计种植于云南省农业科学院甘蔗研究所第一试验基地, 行长 6.0 m, 行距 1.1 m, 重复 3 次。田间栽培管理按常规大田管理进行。

表 1 试验材料
Tab. 1 Test materials

序号 No.	组合 Combination	序号 No.	组合 Combination	序号 No.	组合 Combination
1	CP72-1210×桂糖 96-211	25	桂糖 89-5×ROC22	49	粤糖 93-159×ROC22
2	Eros×云瑞 03-315	26	桂糖 92-66×ROC22	50	粤糖 93-159×桂糖 94-119
3	FR96-29×云瑞 10-336	27	桂糖 94-119×ROC22	51	粤糖 94-128×ROC22
4	Pma98-44×云瑞 06-4806	28	桂糖 94-119×粤糖 93-159	52	粤糖 96-86×ROC22
5	Q72×云瑞 05-704	29	桂糖 97-40×云瑞 03-315	53	粤糖 96-86×粤糖 89-113
6	RB72-454×ROC16	30	柳城 05-291×粤糖 01-71	54	粤糖 99-66×ROC22
7	ROC22×桂糖 00-122	31	内江 03-218×HoCP01-517	55	粤糖 99-66×福农 95-1702
8	ROC22×崖城 07-71	32	内江 03-218×HoCP05-902	56	云开 03-206×云瑞 05-704
9	ROC22×粤糖 91-976	33	内江 86-117×粤糖 91-976	57	云开 07-49×云瑞 11-111
10	ROC24×云蔗 89-351	34	崖城 05-164×ROC22	58	云瑞 09-28×云蔗 03-422
11	ROC25×崖城 97-24	35	崖城 07-71×HoCP01-517	59	云瑞 09-44×云瑞 03-315
12	ROC25×粤糖 93-124	36	崖城 07-71×ROC22	60	云瑞 09-44×云蔗 03-422
13	ROC26×粤糖 91-976	37	崖城 07-71×桂糖 96-211	61	云瑞 11-76×云蔗 03-422
14	ROC28×粤糖 89-113	38	崖城 93-25×云瑞 06-4806	62	云蔗 00-45×云瑞 06-4806
15	TC7×云瑞 06-4806	39	粤甘 34×云瑞 11-111	63	云蔗 02-588×ROC22
16	UT1×云瑞 10-336	40	粤农 73-204×德蔗 93-88	64	云蔗 02-588×桂糖 02-901
17	德蔗 93-88×ROC22	41	粤农 73-204×桂糖 02-901	65	云蔗 03-194×云瑞 11-111
18	福农 02-3924×福农 91-4621	42	粤糖 00-236×ROC22	66	云蔗 94-375×HoCP05-902
19	福农 94-0403×粤糖 93-159	43	粤糖 00-318×柳城 03-182	67	云蔗 94-375×粤糖 93-159
20	福农 95-1702×ROC22	44	粤糖 00-319×CP72-1210	68	云蔗 99-601×ROC22
21	福农 95-1702×湛蔗 74-141	45	粤糖 03-373×柳城 05-291	69	湛蔗 90-76×ROC22
22	桂糖 00-122×粤糖 89-113	46	粤糖 85-177×桂糖 96-211	70	湛蔗 90-76×桂糖 73-167
23	桂糖 02-901×ROC22	47	粤糖 91-976×CP84-1198	71	湛蔗 92-126×CP72-1210
24	桂糖 02-901×科 5	48	粤糖 93-159×ROC10		

2023 年 11 月调查每个杂交组合后代的株高 (cm)、茎径 (cm)、锤度 (%)、有效茎 (条/hm²)、蔗产量 (t/hm²) 和糖产量 (t/hm²) 等性状。选取每丛中代表性单株测量株高、茎径和锤度, 从每株甘蔗茎秆的中间部位提取甘蔗汁, 测量锤度。按照陈如凯等^[9]所述方法计算有效茎、蔗产量和糖产量。单茎质量=株高×茎径²×0.785/1000; 每公顷有效茎数 (条/hm²)=[样点有效茎数 (条)/样点面积 (m²)]×666.7×15; 样点单产 (t/hm²)=样点产量 (kg)/样点有效株数 (条)×每公顷有效茎数 (条/hm²)/1000; 蔗糖分 (%) =锤度×1.0825-7.703; 每公顷产蔗糖量 (kg/hm²)=每公顷蔗产量 (kg/hm²)×甘蔗蔗糖分。

1.3 数据处理

通过 Excel 2019 软件计算杂交组合的标准差和变异系数; 通过 R 软件 lme4 软件包, 按照

线型模型 $X=\text{block}+(1 \mid \text{female})+(1 \mid \text{male})+(1 \mid \text{female}:\text{male})$ 估算亲本一般配合力和组合特殊配合力; 通过 IBM SPSS Statistics 26 软件进行聚类分析; 通过 Origin 2022 软件绘制三维散点图。

2 结果与分析

2.1 性状的遗传变异分析

对 71 个杂交组合实生苗的 6 个性状进行分析 (表 2), 在株高方面, 其数值范围为 130.00~275.00 cm, 总平均水平为 196.17 cm。在茎径方面, 测量值介于 1.60~3.30 cm 之间, 总平均水平为 2.56 cm。锤度则在 14.10%~23.30%之间波动, 总平均锤度为 19.96%。有效茎的数量在 11.25×10³~151.25×10³ 条/hm² 之间变化, 总平均值为 64.30×10³ 条/hm²。蔗产量的范围为 1.56~162.75 t/hm², 总平均值为 66.46 t/hm²。糖产量的范

围为 0.27~25.15 t/hm², 总平均糖产量为 9.17 t/hm²。在所有测量的性状中, 均存在广泛的遗传变异, 其中, 产量相关性状表现出极高的相对变异程度: 有效茎数、蔗产量和糖产量的变异系数 (CV) 分别高达 39.81%、49.07%和 49.49%, 表明不同组合后代间在这些关键经济性状上存在较大差异, 蕴含着较大的遗传改良潜力, 为高强度选择高产、高糖基因型提供了充分的空间。相比之下, 株高 (CV 为 13.78%) 和茎径 (CV 为 12.32%) 的变异

程度较低, 性状表现相对稳定。衡量蔗糖分的关键品质性状锤度的变异系数最低 (CV 为 8.05%), 表现出群体内的高度稳定性, 且其平均值 (19.96%) 处于较好水平。这表明在追求高产的同时, 这些杂交群体能较好地维持较高的糖分基础, 降低了高产低糖的风险。综上所述, 这 71 个杂交组合具有遗传多样性, 尤其是在蔗产量和糖产量上极高的变异系数, 为选育兼具高产潜力与稳定高糖特性的甘蔗新品种奠定良好基础。

表 2 71 个甘蔗杂交组合 6 个性状的遗传变异分析
Tab. 2 Genetic variation analysis of 6 traits in 71 sugarcane hybrids

组合 Combination	株高 Plant height/cm	茎径 Stem diameter/cm	锤度 Brix/%	每公顷有效茎数 Number of effective stalk per hm ²	蔗产量 Cane yield/(t·hm ⁻²)	糖产量 Sugar yield/(t·hm ⁻²)
最小值	130.00	1.60	14.10	11.25×10 ³	1.56	0.27
最大值	275.00	3.30	23.30	151.25×10 ³	162.75	25.15
平均值	196.17	2.56	19.96	64.30×10 ³	66.46	9.17
标准差	27.03	0.32	1.61	25.60×10 ³	32.61	4.54
变异系数/%	13.78	12.32	8.05	39.81	49.07	49.49

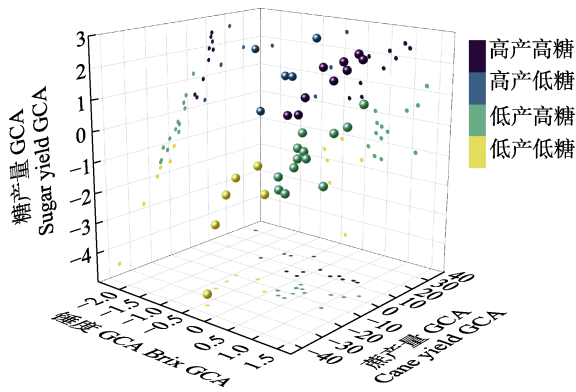
2.2 父本的一般配合力分析

基于锤度和蔗产量的一般配合力 (GCA) 进行聚类分析, 将 33 个父本分为 4 类特征显著的组群 (图 1)。

类父本其他性状 GCA 的平均值也为负值, 株高 GCA 为-4.85, 茎径 GCA 为-0.07, 有效茎 GCA 为-15.41, 糖产量 GCA 为-2.36。其中粤糖 01-71 和粤糖 91-976 蔗产量 GCA 极低, 云瑞 10-336 锤度 GCA 仅为-0.93。该类父本不宜直接用于高产高糖育种, 但可作为对照材料, 用于研究性状衰退的遗传机制。

聚类 2 为低产高糖型, 包含 13 个父本, 其蔗产量 GCA 的平均值为-6.41, 但锤度 GCA 的平均值为 0.52, 符合低产高糖特征。其他性状 GCA 的平均值也为负值: 株高 GCA 为-2.81, 有效茎 GCA 为-3.36, 均较低, 茎径 GCA 为-0.02, 接近中性。代表父本如 CP72-1210 (锤度 GCA=1.07)、ROC10 (锤度 GCA=1.25) 和福农 91-4621 (锤度 GCA=1.08) 等, 此类父本适用于高糖导向的杂交设计, 尤其在与高产母本配组时, 有望实现产量与糖分的互补。

聚类 3 为高产低糖型, 该聚类有 5 个父本, 其蔗产量 GCA 极高, 平均值为 19.41, 但锤度 GCA 低, 为-1.12, 糖产量 GCA 较高, 为 1.39。代表父本如德蔗 93-88 (蔗产量 GCA=8.84)、科 5 (蔗产量 GCA=22.57) 和云瑞 03-315 (蔗产量 GCA=30.23) 等, 其株高 GCA (4.88)、有效茎 GCA (19.06) 较高, 适用于高产育种, 需与高糖亲本



每个球体代表 1 个父本, 不同颜色代表不同聚类结果。
Each sphere represents a male parent, different colors indicate different clustering results.

图 1 基于父本锤度和蔗产量一般配合力的
聚类三维散点图

Fig. 1 3D scatter plot of clustering based on general combining ability of brix and cane yield for male parents

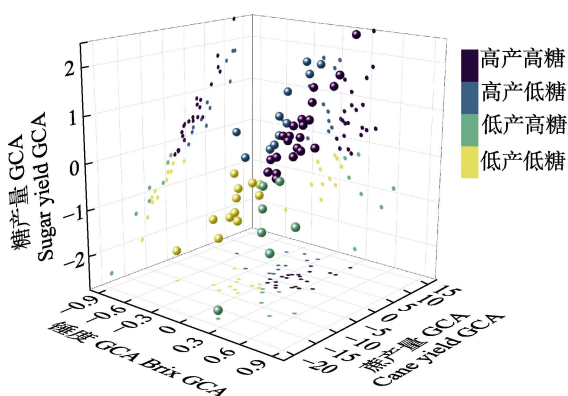
聚类 1 为低产低糖型, 包含 6 个父本, 其蔗产量 GCA 和锤度 GCA 均显著低于其他聚类, 平均值分别为-17.55 和-0.60, 表现出强负效应, 该

杂交以改善糖分表现。

聚类4为高产高糖型,该聚类包括9个父本,其蔗产量GCA的平均值为10.17,糖产量GCA的平均值为1.53,锤度GCA为0.27,有效平衡了产量与糖分,符合高产高糖特性。株高GCA为4.58,茎径GCA为0.05,有效茎GCA为4.54。云瑞05-704除茎径较细其他性状均较好,综合优良父本包括HoCP05-902、桂糖96-211、粤糖93-124、粤糖93-159和桂糖00-122等,它们在高产高糖性状上表现均衡,可作为核心亲本用于综合性状改良计划。

2.3 母本的一般配合力分析

基于锤度和蔗产量的一般配合力进行聚类分析,将53个母本分为4类组群(图2)。



每个球体代表1个母本,不同颜色代表不同聚类结果。
Each sphere represents a female parent, different colors indicate different clustering results.

图2 基于母本锤度和蔗产量一般配合力的聚类三维散点图

Fig. 2 3D scatter plot of clustering based on general combining ability of brix and cane yield for female parents

聚类1为低产低糖型,共12个母本,该组母本蔗产量GCA的平均值为-5.99,锤度GCA的平均值为-0.20,其株高GCA(-4.08)和有效茎GCA(-4.03)表现出显著的负向效应。代表母本如UT1(蔗产量GCA为-8.22)和柳城05-291(蔗产量GCA为-9.39)等。该类母本不宜直接用于育种,但可作为低糖机制研究的材料。

聚类2为低产高糖型,包括云蔗02-588、湛蔗90-76等7个母本,蔗产量GCA的平均值为-8.72,但锤度GCA的平均值为0.25,是4个聚类中锤度GCA最高的组群。有效茎GCA(-6.39)和株高GCA(-6.29)严重抑制产量,但锤度正向

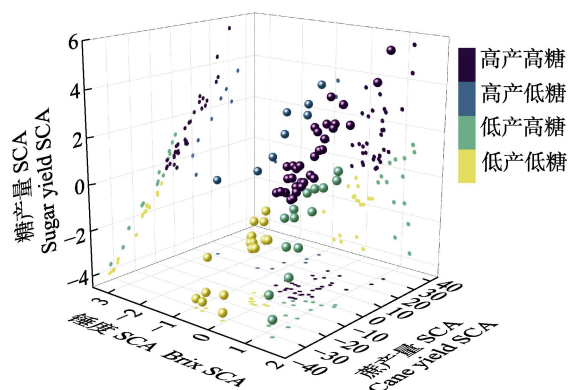
效应突出,代表母本如云蔗02-588(锤度GCA=0.559)、桂糖02-901(锤度GCA为0.44)和云蔗00-45(锤度GCA为0.19)等,高产性状受抑制,但糖分积累能力突出。此类母本适用于高糖育种,与高产父本杂交实现糖分性状改良。

聚类3为高产低糖型,含11个母本,该组母本蔗产量GCA的平均值为6.60,但锤度GCA的平均值为-0.21,表现出高产低糖特征,其有效茎GCA(4.31)和株高GCA(2.82)表现出显著的正向效应。代表母本如桂糖92-66(蔗产量GCA为10.58)、粤糖00-236(蔗产量GCA为12.27)和ROC25(蔗产量GCA为12.84)等,具备强大的生长势和茎秆发育能力,但糖分积累能力不足。此类母本适用于高产育种,需与高糖父本杂交以克服糖分缺陷。

聚类4为高产高糖型,包括23个母本,蔗产量GCA(2.62)与糖产量GCA(0.53)双高,锤度GCA为0.13。茎径GCA(0.01)和有效茎GCA(1.98)协调,实现产量和糖分的平衡。核心母本包括桂糖94-119(蔗产量GCA为8.33,锤度GCA为0.31)、CP72-1210(蔗产量GCA为12.61,锤度GCA为0.31)、Eros(蔗产量GCA为8.41,锤度GCA为0.26)等。

2.4 组合的特殊配合力分析

71个杂交组合基于锤度和蔗产量的特殊配合力(SCA)值被划分为4类(图3),各类群遗传效应差异显著,育种利用价值明确。



每个球体代表1个杂交组合,不同颜色代表不同聚类结果。
Each sphere represents a hybrid combination, different colors indicate different clustering results.

图3 基于甘蔗杂交组合锤度和蔗产量特殊配合力的聚类三维散点图

Fig. 3 3D scatter plot of clustering based on specific combining ability of brix and cane yield for sugarcane hybrids

聚类 1 为低产低糖型, 有 17 个组合, 聚类 1 所有组合的各性状 SCA 均为负值。代表组合如 ROC22×粤糖 91-976 (蔗产量 SCA 为-27.96, 糖产量 SCA 为-3.68), 其父本 GCA 分析聚类属于低产低糖型。此类组合不宜用于育种, 可为研究性状衰退提供材料。

聚类 2 为低产高糖型, 共 14 个组合, 该组组合蔗产量 SCA 的平均值为-10.19, 但锤度 SCA 的平均值为 0.85, 这类组合在产量受限的情况下, 糖分积累能力突出, 可能因父本或母本携带高糖基因, 且其遗传效应在此类组合中得到较好发挥。组合粤糖 93-159×ROC10, 锤度 SCA 为 1.20, 蔗产量 SCA 仅为 1.44, 体现了高糖父本 ROC10 (锤度 GCA 为 1.25) 与母本 (锤度 GCA 为-0.06) 的超亲配合效应, 说明在特定组合中, 亲本的高糖特性能够克服部分产量缺陷, 实现糖分性状的显著提升。这类组合在高糖育种项目中具有重要价值, 可作为选育高糖品种的重点对象。

聚类 3 为高产低糖型, 8 个组合蔗产量 SCA 的平均值为 22.22, 锤度 SCA 的平均值为-1.40, 这类组合在产量性状上表现出显著优势, 但糖分积累能力不足, 可能是因为父本和母本在产量相关性状上的优势基因叠加, 导致产量极高, 而糖分相关基因未得到协同表达。极端组合如 Eros×云瑞 03-315 和桂糖 97-40×云瑞 03-315 的蔗产量 SCA 分别为 35.39、31.74, 但锤度 SCA 均很低, 证实父本云瑞 03-315 (锤度 GCA 为-2.21) 的强负向效应, 其低糖特性对组合的糖分积累产生了主导作用。这类组合在高产育种中具有一定的利用价值, 但需要与高糖亲本进行合理搭配, 以改善糖分表现。

聚类 4 为高产高糖型, 包括 32 个组合, 6 个性状 SCA 的平均值均为正值, 这类组合在产量和糖分性状上均表现出较好的配合力, 可能是由于父本和母本在产量和糖分相关基因上的优势互补, 使得后代在 2 个重要经济性性状上均得到了较好的表达。最佳组合如 CP72-1210×桂糖 96-211, 其父本桂糖 96-211 为高产高糖型, 母本 CP72-1210 为高产高糖型, 表现出双高亲本的协同效应。另一亮点组合如桂糖 94-119×粤糖 93-159, 其母本桂糖 94-119 和父本粤糖 93-159 均为高产高糖型, 表现出显著的杂种优势。此类组合是甘蔗高产高糖育种的核心材料, 具有广阔的应用前景, 可直接用于品种选育。

2.5 GCA/SCA 比值分析

对 6 个性状的 GCA/SCA 比值进行独立样本 *t* 检验发现, 仅蔗产量在父本中的比值显著高于母本 ($P<0.05$), 其余性状包括株高、茎径、锤度和有效茎数的母本与父本 GCA/SCA 比值差异均不显著 (图 4)。结果表明, 蔗产量的加性遗传效应主要由父本贡献, 父本在遗传上对产量性状的稳定传递能力较强, 可能携带有关键的主效基因或数量性状位点。而母本在该性状中的表现相对不稳定, 遗传贡献较为分散。此外, 其他性状因更易受非加性效应影响, 或亲本间表型变异较大, 未能在统计检验中体现出显著性差异。因此, 在产量性状的改良中, 可优先考虑选择 GCA 效应显著的优良父本材料。

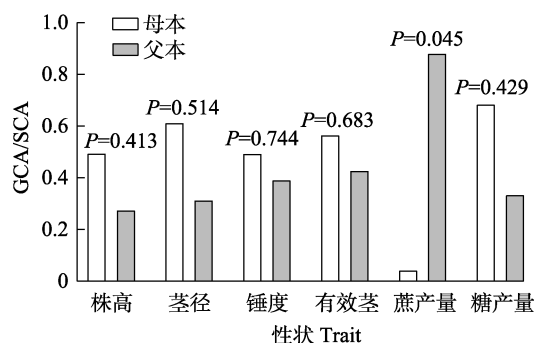


图 4 6 个性状亲本 GCA 与 SCA 比值分析

Fig. 4 Analysis of GCA to SCA ratio for six traits in parental lines

3 讨论

遗传多样性与主要性状变异特征分析将为亲本选择和性状定向改良提供丰富的遗传基础。本研究对 71 个甘蔗杂交组合的田间表现进行了系统评估, 结果表明材料间存在丰富的遗传多样性, 尤其在蔗产量和糖产量等农艺性状上表现出极高的变异系数, 显示出强烈的表型分化潜力。与此不同, 蔗糖分性状即锤度的变异系数相对较低, 表现出较强的遗传稳定性。根据刘家勇等^[10]对 292 份国内外甘蔗种质资源的研究, 蔗糖分具有较高的遗传力, 且受环境影响较小。这一现象在本研究中得到进一步验证, 说明蔗糖分性状更多地受到基因控制, 因此在不同环境下表现较为一致, 变异幅度较小。此外, 还强调了 11 月作为选择的关键时期, 这为在育种过程中优化选择策略提供了重要参考。在实际育种工作中, 可在 11 月

对蔗糖分性状进行重点选择，以提高选择效率。同时，对于蔗产量和糖产量等受环境影响较大的性状，需要在多个环境条件下进行评估，以确保选择出的组合具有广泛的适应性和高产高糖的稳定性。综合考虑多个性状的变异特点和遗传规律，有助于制定更为科学的甘蔗育种方案。

甘蔗育种中常面临产量与糖分含量难以同步提高的问题。已有研究指出，二者之间存在一定程度的权衡关系^[11]，本研究材料也表现出类似趋势。不同类型材料在生长势、茎秆结构和糖分积累机制上存在显著差异。低产低糖型材料通常由于生长势弱，茎秆发育受限，从而导致后代生物量形成不足。这种抑制性的生长状态不仅限制了光合产物的积累，也阻碍了糖分的有效转运与积累，最终表现为糖分积累能力的普遍偏低^[12]。与之相比，低产高糖型材料虽在产量方面受制于有限的茎秆结构及营养积累能力，但其糖分积累机制较为高效，表现出较高的糖分含量。这类材料通常在单位生物量中的糖浓度较高，是甜度改良的重要材料来源^[13]。相反，高产低糖型材料具有旺盛的生长势和强大的茎秆发育潜力，可形成较大的生物量，但由于糖分在快速增长的组织中被稀释，导致单位质量中的糖含量相对较低，即“产量稀释效应”^[14-15]。最具育种潜力的是高产高糖型材料。这类材料兼具稳健的生长性能和优化的茎秆结构，在保证高产的同时也维持了优良的糖分积累效率。其茎径与有效茎数的协调发育有助于促进光合产物的合理分配与高效转运，避免高产所带来的糖分稀释现象^[16-17]。因此，这类材料是甘蔗育种过程中兼顾产量与品质提升的理想类型。

刘少谋等^[18]提出锤度主要受母本加性基因效应控制，在本研究中，锤度 GCA 值前十的高糖母本为德蔗 93-88、福农 02-3924、桂糖 02-901、粤糖 00-319、云蔗 02-588、云蔗 03-194、Eros、CP72-1210、桂糖 02-901 和桂糖 94-119，其杂交后代除 Eros×云瑞 03-315 属于低糖外，其他表现较好，均为高糖类，说明高糖母本能稳定传递糖分优势，进一步证实了刘少谋等提出的观点。蔗产量 GCA 值前十的高产父本为云瑞 03-315、崖城 97-24、湛蔗 74-141、桂糖 96-211、云瑞 05-704、桂糖 00-122、粤糖 93-124、粤糖 93-159、科 5、HoCP05-902，其后代聚类均为高产类，其中 Eros×云瑞 03-315 和 CP72-1210×桂糖 96-211 蔗产量

SCA 分别为 35.39 和 30.76，Eros×云瑞 03-315 和云瑞 09-44×云瑞 03-315 有效茎 SCA 分别为 55.39 和 45.81，父本云瑞 03-315 具有极端生物量遗传力，以上结果说明父本主导生物量性状的遗传传递，与前人提出的观点父本对株高、茎径等生物量性状贡献显著^[18-19]一致，俞华先等^[20]也指出云瑞系列亲本更适合用作父本。本研究证明，CP72-1210、CP84-1198、HoCP01-517 和 HoCP05-902 等 CP 系列亲本作父本时，其后代聚类均为高糖组父本，而 CP72-1210 作母本时，组合 CP72-1210×桂糖 96-211 的 6 个性状 SCA 值也均居前列，这与姚丽等^[21]提出的 CP 系列甘蔗更适合作父本但 CP72-1210 也适合作母本的观点一致。本研究筛选出高产高糖组合桂糖 94-119×粤糖 93-159 和 CP72-1210×桂糖 96-211，其双亲均属高产高糖型，该结果支持当母本与父本均具备高配合力时，后代可实现产量和糖分协同改良^[18, 20]这一观点。同时，本研究的 GCA 和 SCA 分析结果与前人研究结果高度一致，进一步验证了配合力分析在甘蔗亲本筛选中的科学性与有效性。

综上所述，本研究为甘蔗育种实践提供了科学依据，能更精准地选择和利用亲本资源，提高育种效率，加速选育出符合生产需求的高产高糖甘蔗新品种。然而，本研究的试验设计为单一年份和单一地点，因此结果可能受到特定环境条件的影响。未来，通过多年多点区域试验，结合更多环境和遗传背景的深入研究，将进一步优化甘蔗育种策略，为甘蔗产业的可持续发展提供强有力的支持。

参考文献

- [1] LU G L, LIU P R, WU Q B, ZHANG S Z, ZHAO P F, ZHANG Y B, QUE Y X. Sugarcane breeding: a fantastic past and promising future driven by technology and methods[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1375934.
- [2] SANTANA P N D, REIS A J D S, CHAVES L J. Combining ability of sugarcane genotypes based on the selection rates of single cross families[J]. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2017, 17(1): 47-53.
- [3] ALARMELU S, HEMAPRABHA G, NAGARAJAN R, SHANTHI R M. Combining ability for yield and quality in sugarcane[J]. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 2010, 1: 742-746.
- [4] 谭芳, 杨荣仲, 经艳, 雷敬超, 王伦旺, 周会. 基于配合力分析筛选甘蔗杂交亲本组合[J]. *热带作物学报*, 2021,

- 42(4): 958-965.
- TAN F, YANG R Z, JING Y, LEI J C, WANG L W, ZHOU H. Screening of sugarcane parents and crosses by combining ability analysis[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(4): 958-965. (in Chinese)
- [5] 陈勇生, 黄俊坚, 吴嘉云, 齐永文. 30 个常用甘蔗亲本资源初步评价分析[J]. 广东农业科学, 2021, 48(3): 26-32.
- CHEN Y S, HUANG J J, WU J Y, QI Y W. Preliminary evaluation and analysis of 30 frequently-used parents in sugarcane germplasm resources[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2021, 48(3): 26-32. (in Chinese)
- [6] 吴嘉云, 曾巧英, 陈勇生, 刘睿, 黄咏虹, 高小宁. HoCP 系列美国甘蔗种质资源育种价值评价[J]. 热带作物学报, 2023, 44(2): 273-281.
- WU J Y, ZENG Q Y, CHEN Y S, LIU R, HUANG Y H, GAO X N. Assessment on breeding value of HoCP series sugarcane germplasms introduced from USA[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(2): 273-281. (in Chinese)
- [7] 经艳芬, 边芯, 郎荣斌, 桃联安, 董立华, 朱建荣, 周清明, 安汝东, 杨李和, 孙有芳. 4 种方法评价甘蔗杂交组合优劣的比较[J]. 西南农业学报, 2016, 29(7): 1514-1520.
- JING Y F, BIAN X, LANG R B, TAO L A, DONG L H, ZHU J R, ZHOU Q M, AN R D, YANG L H, SUN Y F. Comparison of four methods for evaluation of sugarcane hybrid combinations[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(7): 1514-1520. (in Chinese)
- [8] 黄玉新, 段维兴, 张保青, 杨翠芳, 高轶静, 周珊, 张革民, 李翔. 138 份国外引进甘蔗品种(系)宿根性评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(4): 564-570.
- HUANG Y X, DUAN W X, ZHANG B Q, YANG C F, GAO Y J, ZHOU S, ZHANG G M, LI X. Evaluation of ratoon characteristics of 138 exotic sugarcane germplasm[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2019, 34(4): 564-570. (in Chinese)
- [9] 陈如凯, 许莉萍, 林彦铨, 邓祖湖, 张木清, 罗俊, 张华, 高三基, 徐景升, 徐良年, 阙友雄, 陈平华, 袁照年, 林国栋. 现代甘蔗遗传育种[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- CHEN R K, XU L P, LIN Y Q, DENG Z H, ZHANG M Q, LUO J, ZHANG H, GAO S J, XU J S, XU L N, QUE Y X, CHEN P H, YUAN Z N, LIN G D. Modern sugarcane genetic breeding[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011. (in Chinese)
- [10] 刘家勇, 咎逢刚, 赵培方, 赵丽萍, 姚丽, 赵俊, 赵勇, 胡鑫, 夏红明, 覃伟, 吴才文, 张跃彬, 杨昆. 甘蔗种质资源蔗糖分性状遗传变异分析及高糖种质发掘[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(3): 746-754.
- LIU J Y, ZAN F G, ZHAO P F, ZHAO L P, YAO L, ZHAO J, ZHAO Y, HU X, XIA H M, QIN W, WU C W, ZHANG Y B, YANG K. Genetic variation of sucrose content and exploration of high sugar genotypes in sugarcane germplasm[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(3): 746-754. (in Chinese)
- [11] MAHADEVAIAH C, APPUNU C, AITKEN K, SURESHA G S, VIGNESH P, MAHADEVA SWAMY H K, VALARMATHI R, HEMAPRABHA G, ALAGARASAN G, RAM B. Genomic selection in sugarcane: current status and future prospects[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 708233.
- [12] SUKHCHAIN, SANDHU D, SAINI G S. Inter-relationships among cane yield and commercial cane sugar and their component traits in autumn plant crop of sugarcane[J]. Euphytica, 1997, 95(1): 109-113.
- [13] ZHAO Y, LIU J Y, HUANG H R, ZAN F G, ZHAO P F, ZHAO J, DENG J, WU C W. Genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.) contributed to high sucrose content in China based on an analysis of newly developed varieties[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1789.
- [14] JACKSON P A. Breeding for improved sugar content in sugarcane[J]. Field Crops Research, 2005, 92(2/3): 277-290.
- [15] BOSCHIERO B N, CASTRO S G Q D, DA CRUZ L P, CARVALHO J L N, SILVA S R, BRESSIANI J A, KOLLN O T. Biomass yield, nutrient removal, and chemical composition of energy cane genotypes in southeast Brazil[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 191: 379-391.
- [16] WU Q B, LI A, ZHAO P F, XIA H M, ZHANG Y B, QUE Y X. Theory to practice: a success in breeding sugarcane variety YZ08-1609 known as the King of Sugar[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1413108.
- [17] WU Q B, LI A, LIU J Y, ZHAO Y, ZHAO P F, ZHANG Y B, QUE Y X. Sugarcane variety YZ05-51 with high yield and strong resistance: breeding and cultivation perspectives[J]. Tropical Plants, 2024, 3(1): e019.
- [18] 刘少谋, 王勤南, 符成, 张垂明, 周峰. 甘蔗常用亲本及杂交组合家系评价[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(2): 234-240.
- LIU S M, WANG Q N, FU C, ZHANG C M, ZHOU F. Family assessment of usual sugarcane parents and their cross combination[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12(2): 234-240. (in Chinese)
- [19] 曾巧英, 黄俊坚, 杨湛端, 陈勇生, 齐永文, 吴嘉云. 6 个粤糖甘蔗亲本及其杂交组合的育种价值评价[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(2): 209-215.
- ZENG Q Y, HUANG J J, YANG Z D, CHEN Y S, QI Y W, WU J Y. Assessment on breeding value of six Yuetang parents of sugarcane and their cross combinations[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2021, 29(2): 209-215. (in Chinese)

- [20] 俞华先, 安汝东, 郎荣斌, 周清明, 董立华, 桃联安, 孙有芳, 杨李和, 边芯, 田春艳, 刘家勇, 张钰, 经艳芬. 云瑞系列甘蔗创新亲本的遗传力和配合力分析[J]. 西南农业学报, 2022, 35(8): 1750-1757.
- YU H X, AN R D, LANG R B, ZHOU Q M, DONG L H, TAO L A, SUN Y F, YANG L H, BIAN X, TIAN C Y, LIU J Y, ZHANG Y, JING Y F. Heritability and combining ability analysis of innovated parents of sugarcane Yunrui series[J]. Southwest China Journal of Agricultural Science, 2022, 35(8): 1750-1757. (in Chinese)
- [21] 姚丽, 覃伟, 赵培方, 刘家勇, 赵俊, 武晋宇, 吴才文. CP 系列甘蔗亲本及杂交组合育种潜力分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版) 2017, 43(6): 590-596.
- YAO L, QIN W, ZHAO P F, LIU J Y, ZHAO J, WU J Y, WU C W. Analysis on breeding potential of series of CP parents and their cross combinations in sugarcane[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2017, 43(6): 590-596. (in Chinese)