

甘蔗不同亲本杂交组合的表型评价与比较分析

杨俊朋^{1,2,3}, 凌琪龙^{1,2,3}, 覃祖锋^{1,2,3}, 庞飞扬^{1,2,3}, 唐 宇^{1,2,3}, 黄晓莹^{1,2,3}, 王勤南⁴,
吴才文⁵, 暴怡雪^{1,2,3}, 余 凡^{1,2,3*}, 张木清^{1,2,3*}

1. 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 广西甘蔗生物学重点实验室, 广西南宁 530004; 3. 广西大学农学院, 广西南宁 530004; 4. 广东科学院南繁种业研究所, 海南三亚 572024; 5. 云南农业科学院甘蔗研究所, 云南开远 661600

摘 要: 甘蔗家系评价是筛选出优良的甘蔗杂交组合及评价亲本育种价值的关键技术手段。本研究以 86 个甘蔗杂交组合为材料进行家系评价, 通过连续多年调查产量性状(株高、分蘖、丛质量), 糖分性状(锤度)以及病虫害性状(黑穗病、梢腐病、枯心苗), 并计算各性状的遗传力、配合力、育种值及变异系数等关键性评价指标, 利用相关性分析、主成分分析、聚类分析及经济育种值估算, 从多维度综合评估各杂交组合的田间表现及亲本的遗传贡献。研究结果表明: 丛质量、株高、分蘖均呈显著性正相关($P<0.01$), 通过主成分分析筛选出桂糖 04-1545×中糖 12-02 等 5 个高产杂交组合, 同时发现母本 Q208、父本 XTT22 等亲本的一般配合力(GCA)表现突出, 具备优异的产量遗传能力。在病虫害性状方面, 黑穗病和梢腐病的发病率随年限呈逐年上升趋势, 而枯心苗发生率则逐年下降, 其中粤糖 03-373×CP84-1198 等 5 个杂交组合表现出较强的病虫害综合抗性。在糖分性状方面, 云蔗 05-51×桂糖 00-122 等 5 个杂交组合锤度值及特殊配合力(SCA)表现优异, 且母本云瑞 15-90、父本桂糖 04-1001 等亲本的高糖遗传特性显著, 是培育高糖品种的优良亲本材料。在综合性状评价中, 通过主成分分析与聚类分析的结果相互印证, 最终筛选出 LCP85-384×粤糖 94-128 等综合表现优良的杂交组合, 以及母本桂糖 04-1545、父本 XTT22 等综合性状优异的核心亲本。本研究结果可为甘蔗高产、高糖、抗病虫组合的定向选育以及杂交育种中亲本的科学选配提供重要参考依据。

关键词: 甘蔗; 家系评价; 聚类分析; 主成分分析; 高产; 高糖; 抗病虫

中图分类号: S566.1 文献标志码: A

Phenotypic Evaluation and Comparative Analysis of Hybrid Combinations from Different Sugarcane Parents

YANG Junpeng^{1,2,3}, LING Qilong^{1,2,3}, QIN Zufeng^{1,2,3}, PANG Feiyang^{1,2,3}, TANG Yu^{1,2,3}, HUANG Xiaoying^{1,2,3},
WANG Qinnan⁴, WU Caiwen⁵, BAO Yixue^{1,2,3}, YU Fan^{1,2,3*}, ZHANG Muqing^{1,2,3*}

1. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources, Nanning, Guangxi 530004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Biology, Nanning, Guangxi 530004, China; 3. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China; 4. Nanfan Seed Industry Research Institute, Guangdong Academy of Sciences, Sanya, Hainan 572024, China; 5. Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kaiyuan, Yunnan 661600, China

Abstract: Sugarcane family evaluation is a key technical method for screening excellent sugarcane hybrid combinations and assessing the breeding value of parents. In this study, 86 sugarcane hybrid combinations were used as the materials for family evaluation. Over consecutive years, investigations were carried out on yield-related traits (plant height, tillering and clump mass), sugar-content traits (brix), and disease/pest resistance traits (smut, top rot, and dead heart seedlings). Subsequently, key evaluation indicators for each trait, including heritability, combining ability, breeding value, and coefficient of variation, were calculated. By employing correlation analysis, principal component analysis,

收稿日期 2025-09-05; 接受日期 2025-10-18

基金项目 广西科技重大专项(桂科 AA22117001); 国家自然科学基金项目(No. 32401802)。

作者简介 杨俊朋(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 作物遗传育种。*通信作者(Corresponding author): 余 凡(YU Fan), E-mail: yufanky@163.com; 张木清(ZHANG Muqing), E-mail: zmuqing@163.com。

cluster analysis, and economic breeding value estimation, the field performance of each hybrid combination and the genetic contributions of the parents were comprehensively evaluated from multiple dimensions. For yield-related traits, cluster weight had an extremely significant positive correlation with both plant height and tiller number ($P<0.01$). Through principal component analysis, 5 high-yield hybrid combinations (Guitang 04-1545×Zhongtang 12-02) were screened out. Meanwhile, parents including female parent Q208 and male parent XTT22 exhibited outstanding GCA and possessed excellent genetic transmission capacity for yield. For disease and pest resistance traits, the incidence rates of smut and pokkah boeng disease showed an increasing trend year by year with the observation period, while the incidence rate of dead heart seedlings decreased annually. Among them, 5 hybrid combinations (Yuetang 03-373×CP84-1198) exhibited strong comprehensive disease resistance. For sugar-related traits, 5 hybrid combinations (Yunzhe 05-51×Guitang 00-122) performed excellently in brix value and specific combining ability (SCA). Additionally, parents including female parent Yunrui 15-90 and male parent Guitang 04-1001 showed significant high-sugar genetic characteristics, making them excellent parent materials for breeding high-sugar varieties. In the comprehensive trait evaluation, the results of principal component analysis and cluster analysis mutually verified each other. Finally, hybrid combinations with excellent comprehensive performance (LCP85-384×Yuetang 94-128) and core parents with outstanding comprehensive traits (including female parent Guitang 04-1545 and male parent XTT22) were screened out. The results of the study could provide important references for the directional breeding of specialized sugarcane varieties with high yield, high sugar content and disease resistance, as well as the scientific selection and matching of parents in hybrid breeding.

Keywords: sugarcane; family evaluation; cluster analysis; principal component analysis; high yield; high sugar content; disease and pest resistance

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.005

甘蔗 (*Saccharum* spp.) 是重要的糖能兼用作物, 其产业规模与生产水平直接关系到国家食糖安全与农业经济发展, 其产糖量占世界的 70%, 而我国 85% 以上的食糖来源于甘蔗^[1-2]。近年来随着甘蔗种植年限延长, 主栽品种种性退化等问题日益凸显^[3-4]。杂交育种作为甘蔗遗传改良的核心手段, 其育种效率依赖于亲本的遗传潜力与杂交组合的选配合理性, 亲本携带的优良基因越多, 配合力越高, 后代群体中筛选出优异单株的概率越高^[5]。因此, 系统评价甘蔗亲本的遗传特点, 量化其配合力与经济育种值, 为提高育种效率、缩短育种周期的关键途径^[6-7]。

甘蔗栽培种遗传背景复杂, 染色体条数多且多为异源多倍体, 其农艺性状 (株高、茎径、有效茎数) 与经济性状 (蔗糖分、蔗茎产量) 均属于数量性状, 受加性基因、非加性基因及环境因素共同调控^[5, 8]。传统育种中, 单株选择易受环境干扰导致效率低下, 而澳大利亚甘蔗试验总局 (BSES) 开发的家系选择技术通过整合家系水平的遗传效应分析, 有效剔除环境变异、突出遗传差异, 显著提高了亲本评价与后代选择的准确性^[9-10]。该技术引入我国后, 已被广泛应用于甘蔗配合力 [一般配合力 (GCA)、特殊配合力 (SCA)]、遗传力及经济育种值 (EBV) 的估算, 为优良亲本筛

选与组合选配提供有力支持^[1, 11-12]。

近年来, 国内学者围绕不同系列甘蔗亲本的育种价值开展了大量研究。曾巧英等^[5]以 6 个粤糖系列亲本为核心, 配置 55 个杂交组合, 发现粤糖 94-128 作为母本时蔗茎产量的 GCA 与 EBV 最高, 粤糖 93-159 作为父本时蔗糖分的 GCA 最高, 明确了粤糖系列在高产、高糖杂交育种中的重要地位。安汝东等^[6]对 9 个含云南野生血缘的云端创新亲本进行分析, 筛选出云端 04-48 和云端 03-393 等 EBV 较高的父本, 为拓宽甘蔗遗传背景提供了新资源。此外, 刘少谋等^[7]通过家系评价筛选出 CP88-2143、XTT10 等糖能兼用亲本及 CP88-2143×粤糖 00-319 等优良组合; 杨荣仲等^[13]则系统分析了甘蔗农艺性状的遗传力, 获得茎径广义遗传力为 0.85, 锤度遗传力为 0.82, 蔗茎产量遗传力为 0.80, 蔗糖产量遗传力为 0.78 等结果, 为亲本选择和性状选择压力的权衡方面提供理论依据。

尽管前人在甘蔗亲本评价与组合选配中取得了显著进展, 但在亲本选配方面仍有待扩充。比如针对云端系列高代创新亲本, 粤糖与桂糖系列组合的配合力与经济育种值的综合评价尚未见系统报道。本研究以 68 个甘蔗亲本 (如云蔗系列、粤糖系列、桂糖系列、CP 系列等) 及其配置的

86 个杂交组合 F_1 群体为研究对象, 借鉴澳大利亚家系选择技术, 采用混合线性模型估算株高、茎数、蔗糖分、蔗茎产量等关键性状的遗传效应、配合力及经济育种值^[9]。旨在明确供试亲本的遗传特点与育种潜力; 筛选高产高糖的优良杂交组合; 为甘蔗杂交育种的亲本选配与家系选择提供科学依据, 进而提高甘蔗遗传改良效率。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验材料共计 86 个杂交组合, 包含 68 份国内外亲本。参试材料的亲本主要包括国内的 XTT、桂糖、川糖、粤糖、福农、柳城、云蔗、云瑞、湛蔗、桂南亚、崖城、中糖等 57 个国内核心亲本; 国外亲本主要包括 CP 系列、POJ 系列、HoCP 系列等 11 个亲本。其中仅作母本的有 33 个, 仅作父本的有 17 个, 既作母本又作父本的材料有 18 个, 如表 1 所示。

1.2 方法

在 2022 年 5 月中旬将甘蔗花穗种子播种于广西崇左市扶绥县农科新城基地, 7 月初完成假植并移栽至大田, 试验采取完全随机种植的方式, 采用单行区, 行长为 154 m, 每行种植 3 个杂交组合, 每个杂交组合种植 100 株, 株距为 0.5 m, 不同杂交组合间距为 2 m, 行间距为 1.2 m, 共种植 29 行。种植地点为一个区域, 其他管理同常规大田管理。

株高性状调查方法: 每年在成熟期使用塔尺进行株高测量, 每一组合随机测量 30 丛, 每丛测 3 株。分蘖性状调查方法: 每年在甘蔗的分蘖期进行分蘖调查, 主要调查茎蘖数, 每一个品种随机调查 30 丛。病虫害发病率调查方法: 在甘蔗生长期调查, 每一杂交组合随机调查 30 丛, 发病率=发病总株数÷调查总株数。丛质量性状调查方法: 参考覃伟等^[14]的方法, 在甘蔗成熟后期, 每一组合随机选取 10 丛按原料蔗标准砍收, 分别称量每丛质量 (kg)。锤度性状: 参考马文清等^[8]的方法, 在甘蔗成熟后期使用便携式手持糖度计在甘蔗中部进行测量, 每一组合随机测量 30 丛, 每丛测 3 株。

1.3 数据处理

数据的基本处理以及不同性状的平均值、标准差和变异系数计算均采用 Excel 2023 软件。使用 SPSS 27.0 软件进行变异分析、相关性分析、主成

分分析、聚类分析, 主成分分析综合值计算参考俞华先等^[15]的方法。遗传力、配合力、育种值和经济遗传值计算参考邓祖湖等^[12]、徐良年^[16]的方法, 使用 R 4.3.1 软件进行分析和计算。利用 GraphPad Prism 8 软件和 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 产量性状

对与甘蔗产量相关的性状 (株高、分蘖、丛质量) 进行相关性分析, 结果表明, 这 3 个性状之间均存在显著性相关, 且丛质量分别与株高和分蘖 2 个性状存在极显著正相关 ($P<0.01$) (表 2)。通过分析不同亲本组合的新植和宿根 2 a 的 3 个性状的分布范围发现, 新植的株高、分蘖和丛质量性状均远低于宿根第 2 年 (图 1A)。通过对株高、分蘖和丛质量的变异分析发现, 株高的变异系数最小, 丛质量的变异系数最大, 分蘖的变异系数居中。通过计算不同亲本组合的不同性状的遗传力和特殊配合力 (SCA), 并进行变异分析发现, 不同性状间遗传力排名为株高>丛质量>分蘖, 并且株高遗传力的变异系数最大, 丛质量遗传力的变异系数最小 (图 1B)。SCA 分析结果显示, 丛质量的 SCA 最大, 株高的 SCA 最小, 但株高的 SCA 的变异系数最大 (图 1B)。对产量性状的平均值进行主成分分析 (PCA) 和聚类分析, 筛选出产量性状较好和较差的杂交组合。桂糖 04-1545×中糖 12-02、福农 0713×桂糖 04-1001、桂糖 92-66×福农 07-1110、LCP85-384×粤糖 94-128 和桂糖 04-1545×XTT22 共 5 个杂交组合在产量性状综合评价较好, 可作为产量性状较好的组合扩大实生苗群体数量。而桂糖 92-66×云蔗 07-49、HoCP00-1142×粤糖 93-159、HoCP01-517×粤引 11、粤糖 85-177×云蔗 16-1002 和崖城 09-13×福农 07-1110 共 5 个组合的产量综合评价较差, 因此这几个杂交组合不建议选为生产性组合 (图 1C、图 1D)。

此外, 通过计算产量性状 (株高、分蘖、丛质量) 各亲本的一般配合力 (GCA), 并对亲本的 GCA 进行主成分分析并计算综合值, 筛选出作产量性状较优的亲本 (图 1E、图 1F)。综合分析发现, 母本中 Q208、桂糖 04-1001、桂糖 04-1545、桂南亚 08-336 和 LCP85-384 等亲本的产量性状的 GCA 较好且为正效应, 因此筛选为产量性状的核心母本材料 (图 1C)。而 HoCP01-517、粤糖 85-177、云瑞 15-90、崖城 09-13 等母本的综合

表 1 供试甘蔗不同组合亲本
Tab. 1 Parents of different combinations of sugarcane

编号 No.	杂交组合 Cross combination	编号 No.	杂交组合 Cross combination
2122	桂糖 92-66×福农 07-1110	2158	粤糖 03-373×云蔗 05-51
2173	XTT28×云瑞 2017182-1	2140	福农 07-1110×桂糖 02-901
2118	柳城 05-136×CP94-1100	2110	福农 0712×粤糖 93-159
2199	HoCP01-517×粤糖 91-976	2161	Q208×柳城 03-1137
2125	粤糖 94-128×CP94-1100	2138	崖城 05-64×粤糖 93-159
2155	桂糖 02-467×CP72-1210	2106	柳城 15-39×桂糖 02-761
2142	福农 0712×XTT22	2156	云蔗 94-343×CP94-1100
2151	CP94-1100×粤糖 91-976	2190	福农 0713×桂糖 04-1001
2119	LCP85-384×桂糖 92-66	2108	柳城 03-1137×桂糖 00-122
2150	HoCP00-1142×桂糖 92-66	2154	福农 0713×桂糖 92-66
2126	桂糖 04-1545×中糖 12-02	2109	柳城 07-536×桂糖 92-66
2123	桂糖 04-1545×粤糖 00-236	2116	粤糖 93-159×桂糖 04-1001
2145	桂糖 04-1545×福农 07-1110	2177	福农 0712×桂糖 92-66
2127	LCP85-384×粤糖 94-128	2103	粤糖 85-177×云蔗 16-1002
2141	XTT26×粤糖 91-976	2114	粤糖 00-236×XTT22
2146	XTT26×CP94-1100	2185	湛蔗 50 号×德蔗 93-88
2120	桂糖 92-66×云蔗 07-49	2113	桂糖 00-122×柳城 03-1137
2144	CP72-1210×XTT22	2181	Q208×XTT22
2147	XTT11×粤糖 91-976	2178	福农 0717×粤糖 00-236
2130	LCP85-384×粤糖 94-128	2111	德蔗 09-78×云蔗 05-51
2129	中蔗 1 号×云瑞 14-178	2165	崖城 97-40×XTT 22
2148	Q208×粤糖 93-159	2112	福农 0717×粤糖 93-159
2101	江西丰城果蔗×XTT22	2139	桂糖 00-122×粤糖 91-976
2149	LCP85-384×XTT22	2163	福农 0717×XTT22
2143	桂糖 03-91×CP06-2422	2179	崖城 09-13×福农 07-1110
2117	桂糖 04-1545×XTT22	2136	崖城 07-65×XTT22
2172	云瑞 18-182×POJ3016	2191	云蔗 05-51×桂糖 04-1001
2167	云蔗 05-51×云蔗 16-1002	2192	桂糖 02-619×HoCP01-564
2193	德蔗 93-88×福农 0713	2102	云瑞 15-90×湛蔗 90-76
2164	福农 02-5707×桂糖 92-66	2187	粤糖 03-373×CP84-1198
2170	湛蔗 92-126×CP94-1100	2159	福农 0712×桂糖 04-1001
2196	云蔗 05-51×粤糖 99-66	2104	桂糖 04-1001×云蔗 05-51
2115	Q208×粤糖 00-236	2186	HoCP00-1142×粤糖 93-159
2153	福农 02-6427×桂糖 92-66	2132	云瑞 15-90×粤糖 85-177
2166	桂南亚 08-336×HoCP02-610	2189	HoCP01-517×粤引 11
2195	云蔗 05-51×云瑞 15-90	2135	崖城 05-64×粤糖 93-159
2168	湛蔗 50 号×桂糖 04-1001	2188	福农 0712×云蔗 05-51
2197	桂糖 92-66×福农 0712	21100	德蔗 93-88×柳城 03-1137
2160	桂糖 04-1545×福农 02-5707	2134	崖城 07-60×XTT22
2133	云瑞 15-55×湛蔗 90-76	2184	柳城 07-536×桂糖 00-122
2169	粤引 11×XTT22	2137	云蔗 05-51×桂糖 00-122
2157	桂糖 00-122×XTT22	2171	川糖 89-103×粤糖 93-159
2107	中糖 13-01×桂糖 92-66	2198	云瑞 15-90×福农 99-20169

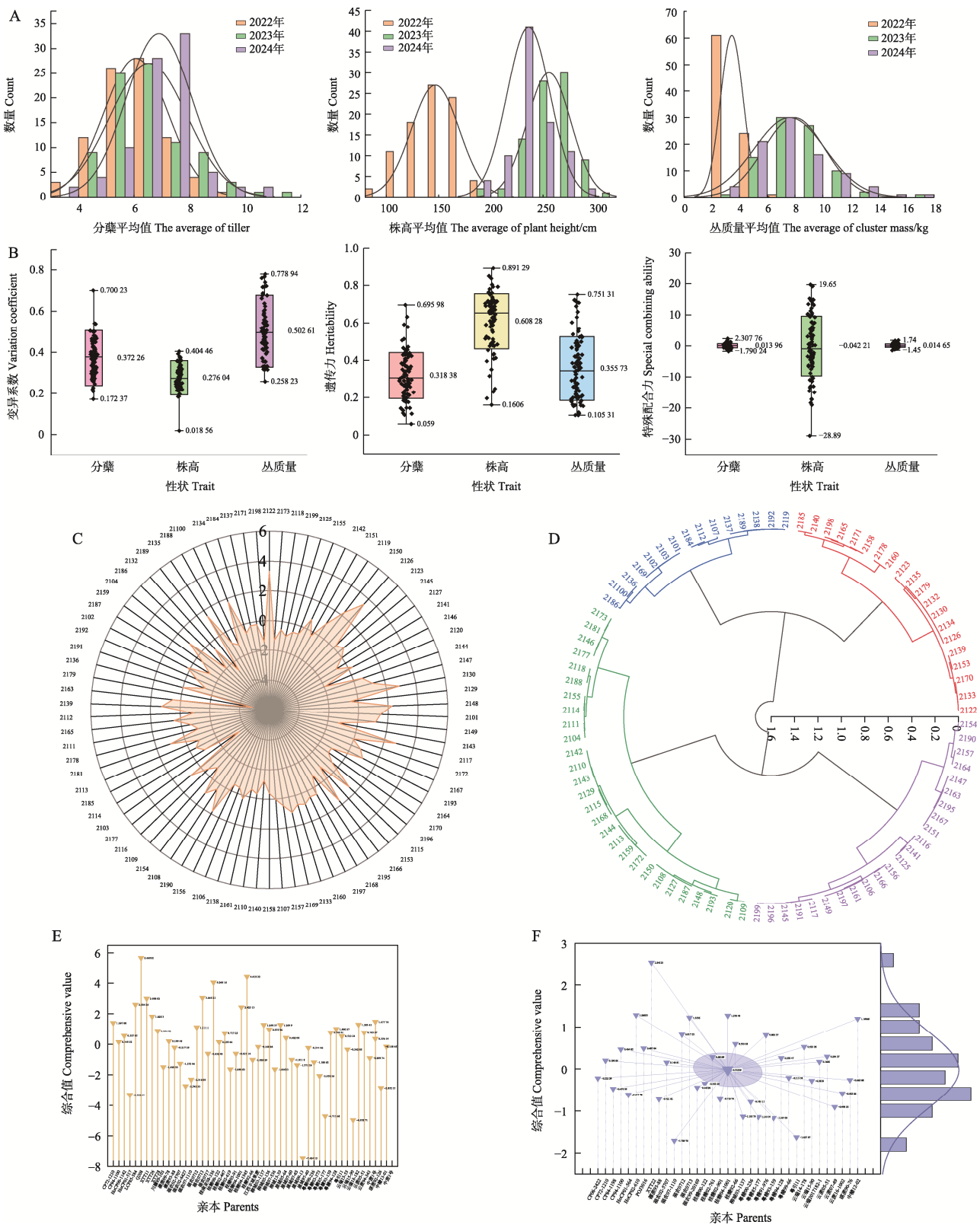
表 2 不同产量表现相关性分析
Tab. 2 Correlation analysis of different yield performances

指标 Index	分蘖 Tiller	丛质量 Cluster mass	株高 Plant height
分蘖	1.000	0.521**	0.294**
丛质量	0.521**	1.000	0.363**
株高	0.294**	0.363**	1.000

注：**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。

Note: ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

GCA 为负效应，因此不推荐作为产量性状的母本。父本中 XTT22、桂糖 04-1001、Hocp02-610、中糖 12-02 和福农 0713 等产量性状的 GCA 较好且为正效应，因此可筛选为产量性状核心父本（图 1F）。而云蔗 07-49、粤糖 93-159、粤引 11、粤糖 85-177 和福农 07-1110 等的父本 GCA 综合评分较差，且产量性状的 GCA 为负效应，因此不推



A: 产量性状分布范围; B: 变异系数、遗传力、特殊配合力; C: 主成分分析; D: 聚类分析;
E: 母本一般配合力主成分分析综合值; F: 父本一般配合力主成分分析综合值。
A: Distribution range of yield traits; B: Variation coefficient, heritability, special combining ability; C: Principal component analysis;
D: Cluster analysis; E: Comprehensive value of principal component analysis for maternal general combining ability;
F: Comprehensive value of principal component analysis for paternal general combining ability.

图 1 产量性状分析
Fig. 1 Analysis of yield traits

荐作为改良产量性状的父本。

2.2 病虫害性状

通过对 3 a 的病虫害(黑穗病、梢腐病、枯心苗)发生率进行调查发现,不同杂交组合间,黑穗病发病率和梢腐病发病率呈逐年上升趋势,而枯心苗发生率呈逐年下降趋势(图 2A)。分别计算黑穗病、梢腐病、枯心苗 3 a 的平均发生率,再进行主成分分析,计算不同组合的抗病性主成分综合值(图 2B)。结果显示,病虫害抗性较好的杂交组合有粤糖 03-373×CP84-1198、桂糖 04-1545×中糖 12-02、桂糖 04-1545×粤糖 00-236、福农 02-5707×桂糖 92-66 和云蔗 05-51×云蔗 16-1002 等,可选为抗病虫害强的杂交组合进行扩大种植。而云瑞 15-90×粤糖 85-177、柳城 03-1137×桂糖 00-122、桂糖 04-1001×云蔗 05-51、云瑞 15-90×福农 99-20169 和桂糖 00-122×柳城 03-1137 等杂交组合的综合抗病性较差,因此不宜作为抗病虫害杂交组合。

此外,通过对病虫害的遗传力和 SCA 进行计算,发现黑穗病遗传力较大,枯心苗遗传力和梢腐病遗传力较低。通过对病虫害的 SCA 进行变异系数分析,发现黑穗病的 SCA 变异系数最小,梢腐病和枯心苗的 SCA 变异系数较大(图 2C)。遗传力变异系数分析发现,不同病虫害之间没有太大差异。进一步计算亲本不同病虫害的 GCA,并进行主成分分析,计算出不同亲本的主成分分析综合值(图 2D、图 2E)。筛选出病虫害综合 GCA 较差且为负效应的母本有 HoCP01-517、LCP85-384、福农 0717、云蔗 05-51 和德蔗 93-88 等。表明用这些亲本作为母本,其后代发生这些病虫害的概率会小很多,可选为抗性强的材料。父本病虫害综合 GCA 表现较差且为负效应的亲本有 XTT22、桂糖 04-1001、粤糖 91-976、福农 02-5707 和福农 0712 等。表明如用这些亲本作为父本,其后代发生病虫害的概率较小。因此,在改良后代抗病虫害方面可选择父母本病虫害的 GCA 为负效应的亲本进行杂交。

2.3 糖分性状

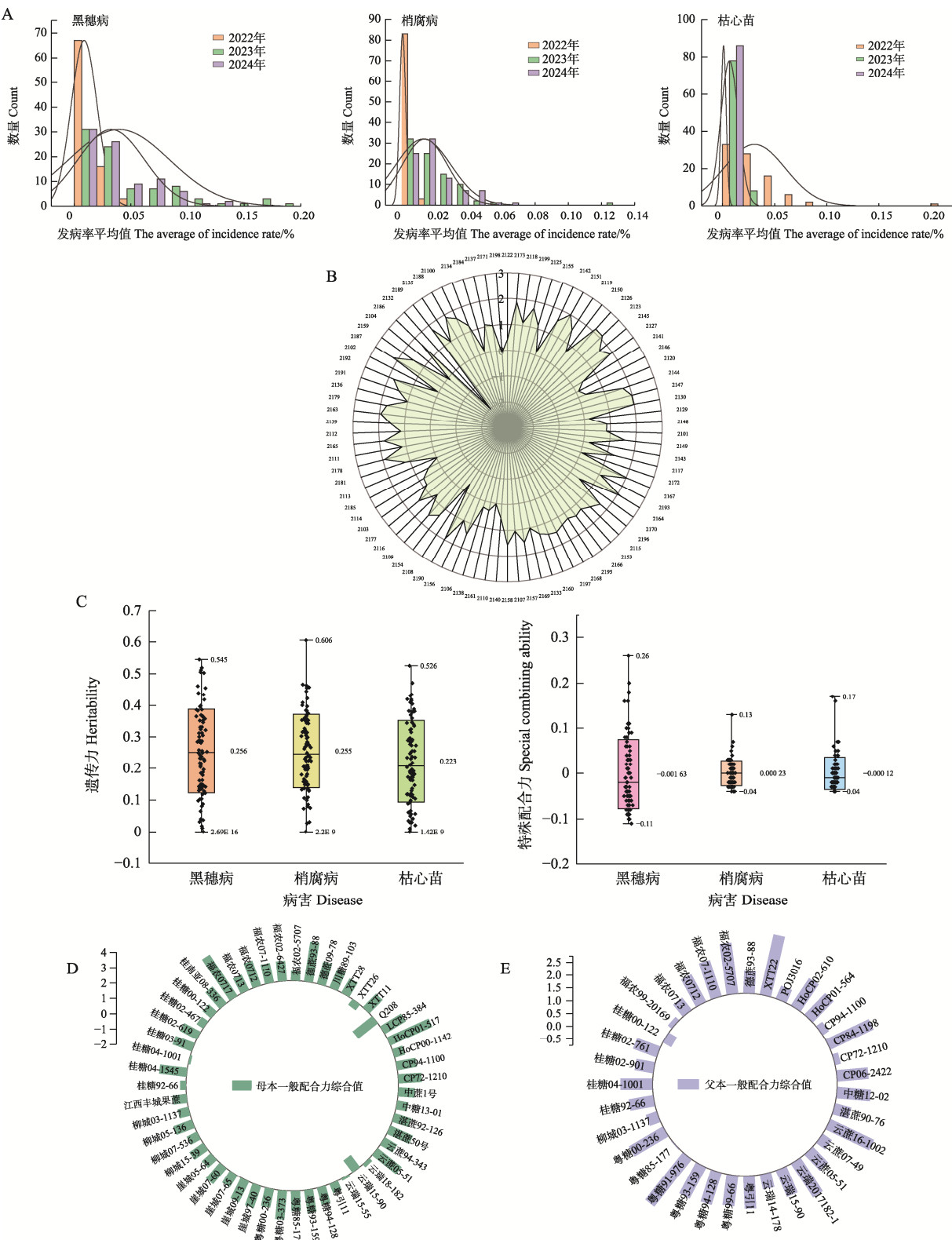
通过对宿根蔗进行锤度测量,计算不同组合的平均锤度以及各组合的锤度遗传力和锤度 SCA。通过分析比较 2 a 的锤度值,发现 2024 年的整体锤度要明显高于 2023 年(图 3A),推测是试验地区在 2024 年的干旱造成的。对这 2 a 的锤度平均值和锤度遗传力进行变异分析,发现 2024

年的平均锤度和锤度遗传力的变异系数均较大(图 3B、图 3C),表明在宿根第 2 年可以筛选出糖分优异的组合。为筛选出糖分高且遗传效应好的杂交组合,同时对不同年份及组合的平均锤度和 SCA 进行 PCA 分析,筛选出高锤度、高 SCA 且为正效应的组合(图 3D)。如云蔗 05-51×桂糖 00-122、德蔗 93-88×柳城 03-1137、云蔗 05-51×桂糖 04-1001、桂糖 04-1001×云蔗 05-51 和桂糖 00-122×粤糖 91-976 等杂交组合在平均锤度和 SCA 表现均较好,适合作为选育高糖材料的生产性组合。而云瑞 18-182×POJ3016、桂糖 04-1545×中糖 12-02、中蔗 1 号×云瑞 14-178、XTT11×粤糖 91-976 和江西丰城果蔗×XTT22 等杂交组合的糖分性状综合分析表现较差,所以不适合作为选育高糖材料的组合。

通过计算不同亲本的锤度 GCA 并依据锤度 GCA 数值大小,将母本和父本进行排名。研究发现,云瑞 15-90、HoCP01-517、桂糖 04-1001、福农 0717、崖城 05-64 等亲本的母本锤度 GCA 较高且为正效应,可作为高糖母本。母本 GCA 较差且为负效应的亲本有桂糖 04-1545、江西丰城果蔗、云瑞 18-182、XTT11 和中蔗 1 号等(图 3E),不建议作为改良糖分性状的母本。父本中 CGA 较好的亲本有桂糖 04-1001、云蔗 05-51、福农 0712、桂糖 00-122 和粤引 11 等,它们的 GCA 高且为正效应,因此适合作为改良糖分性状的核心父本(图 3F)。POJ3016、中糖 12-02、云瑞 14-178、云蔗 07-49 和云蔗 16-1002 等的 GCA 为负效应,因此不建议作为改良糖分性状的父本。

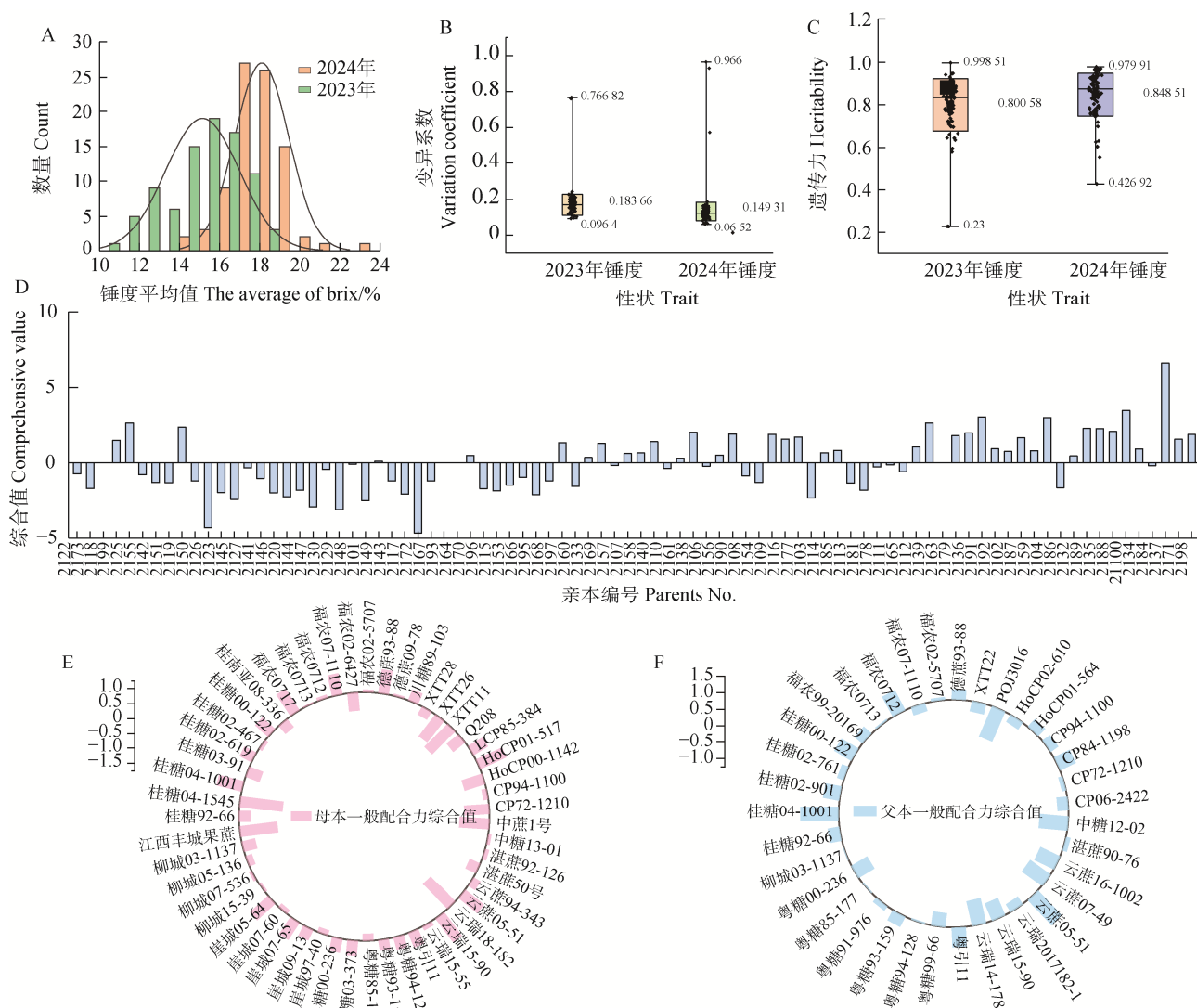
2.4 综合性状

通过对不同性状的平均值进行 PCA 和聚类分析,计算经济育种值(economic breeding value, EBV),从而筛选出 86 个杂交组合在株高、分蘖、丛质量、糖分、病虫害 5 个性状综合较好和较差的杂交组合(图 4A)。对 5 个性状进行聚类分析,共分为 4 类,第 I 类的综合性状较好,第 IV 类综合性状较差,这与主成分分析综合值结果基本一致(图 4B)。EBV 的结果显示,EBV 高的杂交组合和 EBV 低的杂交组合结果与主成分分析综合值的结果一致(图 4C)。但是,桂糖 04-1001×云蔗 05-51 和云瑞 15-90×湛蔗 90-76 这 2 个组合的 EBV 较高,但 PCA 分析综合值处于中等,这可能是因为在计算 EBV 的时候未考虑病虫害性状。



A: 病害频率分布; B: 主成分分析综合值; C: 变异分析; D: 母本一般配合力主成分分析综合值;
E: 父本一般配合力主成分分析综合值.
A: Disease frequency distribution; B: Comprehensive value of principal component analysis; C: Variation analysis;
D: Comprehensive value of principal component analysis for maternal general combining ability;
E: Comprehensive value of principal component analysis of paternal general combining ability.

图 2 病害性状分析
Fig. 2 Analysis of disease traits



A: 锤度分布; B: 锤度变异系数; C: 锤度遗传力; D: 锤度主成分分析综合值; E: 锤度母本一般配合力综合值; F: 锤度父本一般配合力综合值。

A: Brix frequency distribution; B: Variation coefficient of brix value; C: Brix heritability; D: Comprehensive value of brix principal component analysis; E: Comprehensive value of maternal general combining ability for brix; F: Comprehensive value of paternal general combining ability for brix.

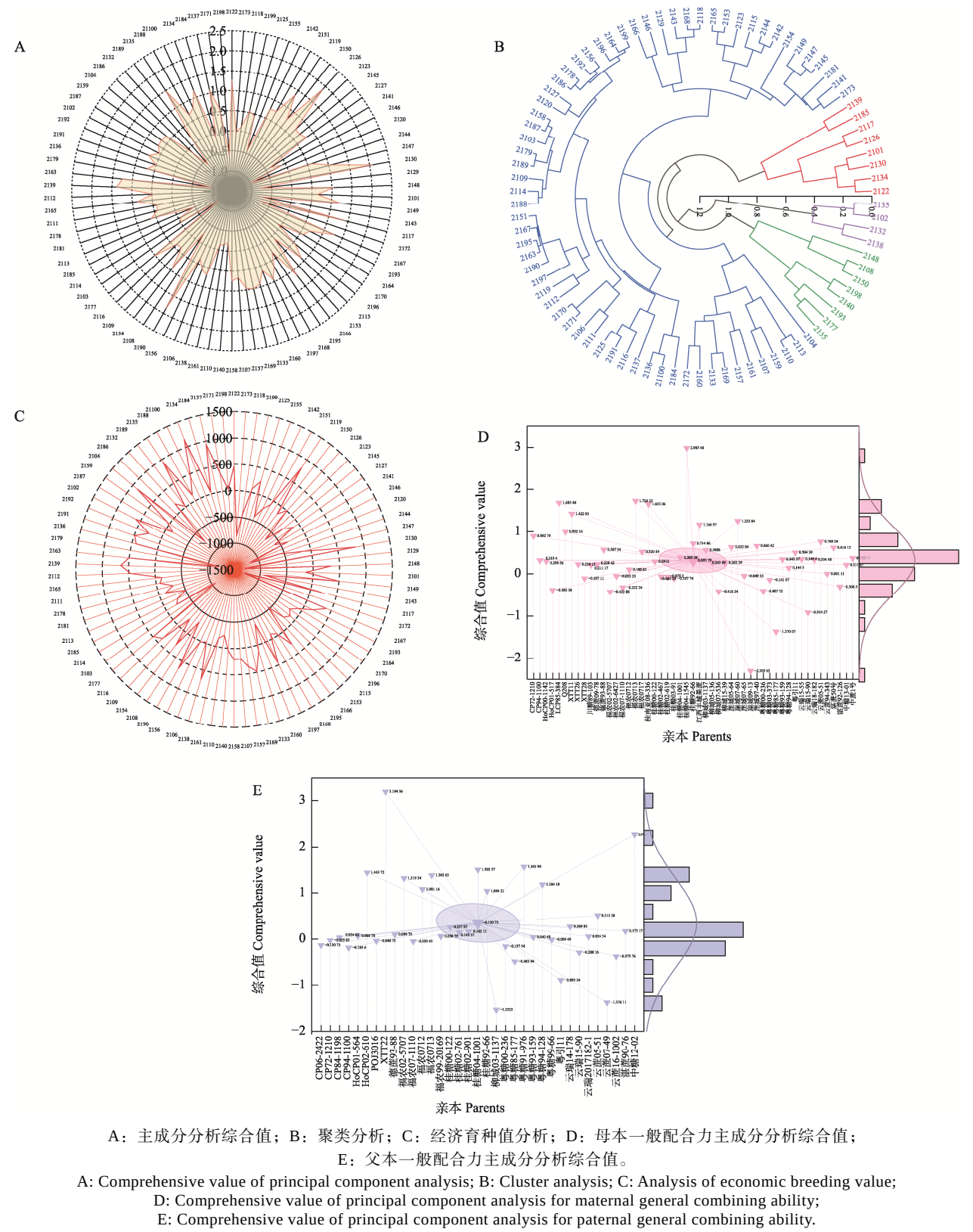
图 3 糖分性状分析

Fig. 3 Analysis of sugar traits

综合分析结果显示, LCP85-384×粤糖 94-128、桂糖 04-1545×中糖 12-02、福农 0713×桂糖 04-1001、崖城 05-64×粤糖 93-159 和桂糖 04-1545×XTT22 等杂交组合在产量、糖分、抗病虫害能力方面均表现较好, EBV 也较高且均为正值, 因此这些组合可考虑作为优良生产性组合。而崖城 09-13×福农 07-1110、桂糖 92-66×云蔗 07-49、粤糖 85-177×云蔗 16-1002、云瑞 15-90×福农 99-20169 和桂糖 00-122×柳城 03-1137 等杂交组合的综合性状表现较差, 因此这些组合可考虑选择性利用或者淘汰。EBV 结果显示, 云瑞 18-182×POJ3016、中蔗 1 号×云瑞 14-178、桂糖 92-66×

云蔗 07-49、崖城 09-13×福农 07-1110、粤糖 85-177×云蔗 16-1002 的 EBV 为负值, 因此不考虑作为高经济效益的组合。

为筛选出综合性状较好的亲本, 对 5 个性状的 GCA 进行 PCA 分析, 分别计算父本和母本的主成分分析综合值。结果发现, 桂糖 04-1545、LCP85-384、XTT11、云蔗 05-51 和桂南亚 08-336 等作为母本时, 综合性状的 GCA 表现优异且为正效应, 因此这些亲本可作为优选母本 (图 4D)。柳城 07-536、福农 02-5707、云瑞 15-90、粤糖 85-177 和崖城 09-13 等亲本在作为母本时综合性状的 GCA 表现较差, 因此建议减少作为母本



使用的频率。GCA 综合分析结果显示, XTT22、桂糖 04-1001、粤糖 91-976、中糖 12-02 和 HoCP02-610 等亲本在作为父本时 GCA 表现优异, 可被重点利用 (图 4E)。柳城 03-1137、云蔗

07-49、粤引 11、粤糖 85-177 和云蔗 16-1002 等作为父本时, 综合性状的 GCA 表现较差, 呈负效应。

3 讨论

3.1 产量性状的遗传分析与亲本选配优化

本研究发现甘蔗产量相关性状(株高、分蘖、丛质量)间存在显著相关性, 且丛质量与株高、分蘖呈显著正相关, 这与谭芳等^[17]在甘蔗杂交组合产量性状分析中有效茎数、单茎质量与蔗茎产量呈显著正相关的结论基本一致。从遗传力分析来看, 本研究中产量性状遗传力排序为株高>丛质量>分蘖, 这一结果与安汝东等^[18]对云瑞系列甘蔗亲本遗传力的研究趋势相似, 高遗传力性状(如株高)受环境影响较小, 可在早期世代优先选择, 而低遗传力性状(如分蘖)需结合家系选择提高准确性, 同时可多地点间进行种植试验, 以减小环境影响的误差。

在亲本 GCA 分析中, 通过聚类分析发现母本 Q208、福农 0713、桂糖 04-1545 及父本 XTT22、桂糖 04-1001、HoCP02-610 等亲本的产量性状 GCA 较高, 这类亲本的筛选逻辑与谭芳等^[17]通过计算配合力并进行聚类分析筛选出高糖高产亲本的方法一致, 即通过加性遗传效应的累加实现后代产量提升。而母本云瑞 15-90、云蔗 94-343 以及父本粤引 11、福农 07-1110 等的 GCA 为负效应, 提示其可能携带与产量相关的不利基因, 因此不建议作为核心亲本使用。

3.2 病虫害抗性的遗传特征与抗逆组合筛选

研究表明, 黑穗病和梢腐病发病率呈逐年上升趋势, 这一动态变化可能是环境变化导致的差异。从遗传特征分析, 黑穗病遗传力较大, 而黑穗病 SCA 变异系数最小, 说明黑穗病抗性可能受主效基因控制更强, 而黑穗病抗性可能更依赖亲本间的非加性效应(如显性、上位性), 这与杨荣仲等^[19]研究的黑穗病遗传力较高但可通过亲本选配间接提高黑穗病抗病性的结论相符。

粤糖 03-373×CP84-1198 和桂糖 04-1545×中糖 12-02 等抗病虫组合的筛选是依据 3 a 病虫害发生率, 并对其 SCA 进行主成分分析综合评价筛选, 这种多维度评价方法参考了俞华先等^[20]基于农艺性状与抗性的综合聚类思路, 可有效避免单一环境或年度数据的偏差。因为病害在选配杂交亲本时是作为负影响因子考虑的。在本研究中, HoCP01-

517、云蔗 05-51、福农 0717、德蔗 93-88 和粤糖 03-373 等亲本的病虫害 GCA 为负效应, 提示其可能携带较少的易感病基因, 这与谭芳等^[17]选择病害性状低配合力的亲本以减少感病组合的育种实践一致, 为抗病虫害亲本的选配提供参考。

3.3 糖分性状变异与高糖种质挖掘

对宿根时期进行锤度调查并计算遗传力结果表明, 不同组合间的锤度遗传力均在 0.75 以上, 表明锤度性状受基因遗传影响较大, 这与刘家勇等^[21]的研究结论一致。从综合分析结果来看, 云蔗 05-51×桂糖 00-122、德蔗 93-88×柳城 03-1137 等组合的平均锤度与锤度 SCA 均表现优异, 可作为高糖组合筛选, 同时这类组合的筛选也符合邓祖湖等^[12]糖分性状经济权重较高的原则, 可作为优先选择的育种目标, 因其直接决定甘蔗的加工价值。

高糖亲本的筛选结果显示, 母本福农 0717、HoCP01-517 及父本桂糖 04-1001、桂糖 00-122 等亲本的锤度 GCA 为正效应, 因此这类亲本建议作为高糖亲本加以利用, 这与胡倩等^[22]研究的父本桂糖 04-1001 和桂糖 00-122 的锤度 GCA 较高的结论一致。而桂糖 04-1545、江西丰城果蔗等亲本的锤度 GCA 为负效应, 说明这些亲本可能有与低糖分相关的基因, 因此不宜作为高糖育种的核心亲本。

3.4 综合性状的多维度评价与优良组合的筛选

通过 PCA 分析、聚类分析与 EBV 的相互协同验证, 本研究将 86 个组合分为 4 类, 且经济育种值、聚类分析、主成分综合得分结果一致, 这种多方法交叉相互验证的思路参考俞华先等^[20]采用聚类分析与 PCA 分析相互论证的方式来进行综合评价, 以及胡倩等^[22]利用丛产糖量分别筛选, 然后与 SCA 聚类分析结果相互印证的思路, 可有效减小单一方法的误差。其中, LCP85-384×粤糖 94-128、桂糖 04-1545×中糖 12-02 等组合在产量、抗性、糖分上均表现优异, 且经济育种值为正, 这类组合的筛选与谭芳等^[17]优良组合筛选需同时参考多个性状指标的思路一致, 研究筛选出的组合可作为生产性组合扩大种植。粤糖 85-177×云蔗 16-1002、桂糖 92-66×云蔗 07-49 和崖城 09-13×福农 07-1110 等杂交组合的综合性状表现较差, 因此降低入选率, 以后不再配置这些组合。

从亲本综合性状的 GCA 分析来看, 同一材料在作为母本和父本时 GCA 差异较大, 这与胡倩等^[22]的研究结果一致。综合分析发现, 母本桂糖 04-1545、LCP85-384 及父本 XTT22、桂糖 04-1001 等亲本的 GCA 综合表现优异, 这与胡倩等^[22]的研究结果一致 (XTT22、桂糖 04-1001 等材料作为父本时 GCA 较高), 暗示亲本的性别效应 (如父本对株高的遗传贡献更大) 需在选配中加以考虑。而崖城 09-13、云瑞 15-90 等亲本的综合 GCA 为负效应, 建议淘汰或作为利用优良特性创制新材料。

3.5 研究局限与未来方向

以上研究虽实现了多性状的综合评价, 但材料种植地点单一, 在进行家系评价时具有一定局限性。病虫害调查虽涵盖 3 a 数据, 但未涉及在不同环境下的多点试验, 可能存在环境适应性评价不足的问题。未来可参考邢雪梅等^[23]杂种落叶松多点稳定性分析的方法, 开展多年多点试验。此外, 本研究主要基于表型评价与分析, 后续可结合分子标记 (如 SSR、SNP) 解析产量、抗性、糖分性状的 QTL 位点, 实现标记辅助选择, 提高育种效率^[24]。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 赵婷婷, 孙婷婷, 王俊刚, 王文治, 冯翠莲, 刘新龙, 甘仪梅, 赵培方, 徐超华, 林继山, 曹峥英, 张树珍. 甘蔗育种研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(10): 1814-1832.
ZHAO T T, SUN T T, WANG J G, WANG W Z, FENG C L, LIU X L, GAN Y M, ZHAO P F, XU C H, LIN J S, CAO Z Y, ZHANG S Z. The research progress on sugarcane breeding[J]. Scientia Sinica Vitae, 2024, 54(10): 1814-1832. (in Chinese)
- [3] 张钰, 桃联安, 安汝东, 周清明, 董立华, 孙有芳, 俞华先, 郎荣斌, 边芯, 田春艳, 经艳芬. 27 个甘蔗杂交组合经济育种值评价[J]. 种子, 2023, 42(6): 126-131.
ZHANG Y, TAO L A, AN R D, ZHOU Q M, DONG L H, SUN Y F, YU H X, LANG R B, BIAN X, TIAN C Y, JING Y F. Evaluation of economic breeding value of 27 sugarcane hybrid combinations[J]. Seed, 2023, 42(6): 126-131. (in Chinese)
- [4] 黄玉新, 段维兴, 张保青, 杨翠芳, 高铁静, 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 Sciences), 2019, 34(4): 564-570. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 安汝东, 周清明, 俞华先, 桃联安, 孙友芳, 杨李和, 董立华, 经艳芬, 朱建荣, 边芯, 郎荣斌, 冯蔚. 9 个云南甘蔗创新亲本作为父本的经济育种值分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2015, 41(2): 113-118.
AN R D, ZHOU Q M, YU H X, TAO L A, SUN Y F, YANG L H, DONG L H, JING Y F, ZHU J R, BIAN X, LANG R B, FENG W. Analysis of economic breeding value on innovated parents of sugarcane in Yunnan[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition), 2015, 41(2): 113-118. (in Chinese)
- [7] 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. Evaluation on common parents and hybrid combination families of sugarcane[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12(2): 234-240. (in Chinese)
- [8] 马文清, 郭强, 秦昌鲜, 黄珍玲, 闭德金, 彭崇, 施泽升, 莫周美, 唐利球. 甘蔗主要农艺性状的遗传力和育种值估计[J]. 分子植物育种, 2019, 17(4): 1333-1345.
MA W Q, GUO Q, QIN C X, HUANG Z L, BI D J, PENG C, SHI Z S, MO Z M, TANG L Q. Estimations of heritabilities and breeding values for the main agronomic traits in sugarcane[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(4): 1333-1345. (in Chinese)
- [9] 吴才文. 澳大利亚甘蔗家系选择技术简介[J]. 甘蔗糖业, 2007(1): 6-9.
WU C W. Brief introduction to sugarcane family selection technology in Australia[J]. Sugarcane and Canesugar, 2007(1): 6-9. (in Chinese)

- [10] STRINGER J K, COX M C, ATKIN F C. Family selection improves the efficiency and effectiveness of selecting original seedlings and parents[J]. *Sugar Tech*, 2011, 13: 36-41.
- [11] 桃联安, 董立华, 经艳芬, 安汝东, 杨李和, 田春艳, 俞华先, 周清明, 孙有芳, 边芯, 郎荣斌, 张钰. 93 份云瑞甘蔗创新亲本及其组合经济育种值评价[C]//中国热带作物学会、西北农林科技大学. 2019 年全国热带作物学术年会论文集, 2019: 285-292.
- TAO L A, DONG L H, JING Y F, AN R D, YANG L H, TIAN C Y, YU H X, ZHOU Q M, SUN Y F, BIAN X, LANG R B, ZHANG Y. Evaluation on economic breeding value of 93 Yunrui innovative sugarcane parents and their combinations[C]//Chinese Society of Tropical Crops, Northwest A&F University. Proceedings of 2019 National Academic Annual Conference on Tropical Crops, 2019: 285-292. (in Chinese)
- [12] 邓祖湖, 徐良年, 韦先明, 林彦铨, 陈如凯. 经济遗传值在甘蔗选育种的应用研究 I. 经济遗传值及性状经济权重的确定[J]. *中国糖料*, 2011(1): 39-43.
- DENG Z H, XU L N, WEI X M, LIN Y Q, CHEN R K. Application of economic genetic value in sugarcane breeding I. Determination of economic genetic value and economic weight of traits[J]. *Sugar Crops of China*, 2011(1): 39-43. (in Chinese)
- [13] 杨荣仲, 周会, 王伦旺, 梁强, 唐仕云, 贤武, 桂意云, 经艳, 雷敬超, 邓宇驰, 段维兴. 甘蔗家系农艺性状遗传力分析[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(3): 337-342.
- YANG R Z, ZHOU H, WANG L W, LIANG Q, TANG S Y, XIAN W, GUI Y Y, JING Y, LEI J C, DENG Y C, DUAN W X. Heritability analysis of agronomic traits in sugarcane families[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2016, 47(3): 337-342. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 俞华先, 桃联安, 安汝东, 经艳芬, 边芯, 董立华, 郎荣斌, 周清明, 杨李和, 孙有芳, 田春艳. 云南甘蔗细茎野生种 F₂ 群体主要农艺性状的主成分分析与综合评价[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(1): 54-61.
- YU H X, TAO L A, AN R D, JING Y F, BIAN X, DONG L H, LANG R B, ZHOU Q M, YANG L H, SUN Y F, TIAN C Y. Principal component analysis and comprehensive evaluation of main agronomic traits in *Saccharum spontaneum* L. blood F₂ progeny innovated in Yunnan[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(1): 54-61. (in Chinese)
- [16] 徐良年. 甘蔗杂交后代家系评价及选择[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- XU L N. Evaluation and selection of families in sugarcane hybrid populations[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009. (in Chinese)
- [17] 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[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(4): 958-965. (in Chinese)
- [18] 安汝东, 朱建荣, 周清明, 桃联安, 杨李和, 边芯, 孙友芳, 经艳芬, 董立华, 冯蔚, 郎荣斌, 俞华先. 云瑞系列甘蔗亲本的遗传力和配合力分析[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(1): 1-6.
- AN R D, ZHU J R, ZHOU Q M, TAO L A, YANG L H, BIAN X, SUN Y F, JING Y F, DONG L H, FENG W, LANG R B, YU H X. Analysis on heritability and combining ability of sugarcane parents of Yunrui series[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(1): 1-6. (in Chinese)
- [19] 杨荣仲, 周会, 李文教, 黄赞斌, 唐仕云, 雷敬超, 刘昔辉, 梁强, 黄海荣. 甘蔗重要亲本田间自然抗黑穗病测定[J]. *中国糖料*, 2022, 44(2): 51-57.
- YANG R Z, ZHOU H, LI W J, HUANG Z B, TANG S Y, LEI J C, LIU X H, LIANG Q, HUANG H R. Field natural smut resistance determination of important sugarcane parents[J]. *Sugar Crops of China*, 2022, 44(2): 51-57. (in Chinese)
- [20] 俞华先, 安汝东, 桃联安, 郎荣斌, 边芯, 张钰, 刘新龙, 刘家勇, 赵丽萍, 刘洪博, 张革民, 张保青. 基于农艺性状对 57NG208 与南涧果蔗正反交后代的综合评价[J/OL]. *作物杂志*, 1-12. (2025-03-14)[2025-09-03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20250313.1754.006>.
- YU H X, AN R D, TAO L A, LANG R B, BIAN X, ZHANG Y, LIU X L, LIU J Y, ZHAO L P, LIU H B, ZHANG G M, ZHANG B Q. Comprehensive evaluation of reciprocal cross progenies between 57NG208 and Nanjian chewing cane based on agronomic traits[J/OL]. *Crops*, 1-12. (2025-03-14)[2025-09-03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20250313.1754.006>. (in Chinese)
- [21] 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): 746-756.

- 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): 746-756. (in Chinese)
- [22] 胡倩, 蒋福红, 王茂瑶, 姚伟, 张木清, 黄江锋. 甘蔗种质资源家系评价及高产高糖种质的挖掘[J/OL]. *分子植物育种*, 1-18. (2025-04-10)[2025-12-14]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230410.1423.002>.
HU Q, JIANG F H, WANG M Y, YAO W, ZHANG M Q, HUANG J F. Evaluation of sugarcane germplasm for exploitation of high sugar and yield[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 1-18. (2025-04-10)[2025-09-03]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230410.1423.002>. (in Chinese)
- [23] 邢雪梅, 宋瑞珂, 孙国飞, 胡振宇, 王浩浩, 刘梦圆, 郝俊飞, 张磊, 张含国. 杂种落叶松多点稳定性分析及优良家系选择[J]. *东北林业大学学报*, 2025, 53(7): 16-26.
XING X M, SONG R K, SUN G F, HU Z Y, WANG H H, LIU M Y, HAO J F, ZHANG L, ZHANG H G. Multi-point stability analysis and excellent family selection of hybrid *Larix gmelinii*[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, 53(7): 16-26. (in Chinese)
- [24] 罗含敏, 熊发前, 丘立杭, 刘菁, 段维兴, 高铁静, 覃夏燕, 吴建明, 李杨瑞, 刘俊仙. 性状相关的分子标记在甘蔗分子育种中的应用研究[J]. *作物杂志*, 2022(2): 35-43.
LUO H M, XIONG F Q, QIU L H, LIU J, DUAN W X, GAO Y J, QIN X Y, WU J M, LI Y R, LIU J X. Application of trait-associated molecular markers in sugarcane molecular breeding[J]. *Crops*, 2022(2): 35-43. (in Chinese)