

苹婆种质果实性状多样性分析与综合评价

罗培四, 黄丽君, 卢美瑛, 李文砚, 蒋娟娟, 韦优, 颜桢灵, 赵静, 周婧

(广西农业科学院广西南亚热带农业科学研究所, 龙州 532415)

摘要: 为有效保护和利用苹婆种质资源, 本研究采用多样性分析、聚类分析、相关分析、主成分分析和逐步回归分析等方法对 70 份苹婆种质进行遗传多样性分析和综合评价。结果表明: 13 个性状变异系数介于 7.80%~42.94%, 单果重、单果种子总重、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和淀粉含量变异程度较大。遗传多样性指数介于 1.57~2.04, 其中种形指数 (2.04)、淀粉含量 (2.02)、种子纵径 (2.01)、果实种子数 (2.00) 的多样性指数较高。聚类分析把供试材料划分为 4 个类群, 其中类群 II 的 15 份资源属于果实偏大、外观品质较好的种质类型, 符合市场及选育需求。主成分分析表明, 前 4 个主成分能代表 13 个果实性状的大部分信息, 累计贡献率为 74.46%。果实性状综合评价得分 (F) 介于 -2.95~3.35, S009、S021、S011、S036、S028 等种质位居前列, 综合性状优良。逐步回归分析筛选出单果种子总重、种子重量、可溶性糖含量、种子横径 4 个性状指标, 可作为综合评价苹婆果实性状的关键性指标。

关键词: 苹婆; 种质资源; 果实性状; 遗传多样性; 综合评价

Fruit Traits Diversity Analysis and Comprehensive Evaluation of *Sterculia monosperma* Vent. Germplasm

LUO Peisi, HUANG Lijun, LU Meiying, LI Wenyan, JIANG Juanjuan, WEI You, YAN Zhenling, ZHAO Jing, ZHOU Jing

(Guangxi South Subtropical Agricultural Science Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Longzhou 532415)

Abstract: In an effort to effectively conserve and exploit the germplasm resources of *Sterculia monosperma* Vent., a comprehensive assessment and diversity analysis was conducted on 70 germplasms of this species. This study employed a robust set of statistical methodologies including diversity, cluster, correlation, principal component, and stepwise regression analyses. Variability in thirteen fruit traits was examined, with the coefficient of variation ranging between 7.80% and 42.94%. Notable variability was observed particularly in traits such as single fruit weight, single fruit seed weight, starch content, soluble sugar content, and soluble protein content. The genetic diversity index across these traits spanned from 1.57 to 2.04, with the seed-form index, starch content, seed longitudinal diameter, and fruit seed number displaying higher diversity indices, indicative of a substantial genetic variation. Through cluster analysis, the germplasms were segregated into four groups, with Group II consisting of 15 resources identified as larger fruit-bearing and aesthetically superior, aligning with market preferences and breeding objectives. Principal component analysis elucidated that the primary four components accounted for 74.46% of the total variance in the 13 assessed fruit traits. Furthermore, a comprehensive evaluation yielded a score range (F) from -2.95 to 3.35 for the fruit traits, with germplasms S009, S021, S011, S036, and S028 demonstrating superior comprehensive attributes. Finally, stepwise regression analysis delineated four pivotal trait indicators—single fruit seed weight, seed weight, soluble sugar content, and seed transverse diameter—as essential for the holistic assessment of the *Sterculia monosperma* Vent. fruit traits. These indicators are proposed to guide future conservation strategies and breeding programs for this species.

收稿日期: 修回日期: 网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为热带亚热带珍稀果树种质资源研究, E-mail: 280135465@qq.com

通信作者: 周婧, 研究方向为果树种质资源收集保存及开发利用, E-mail: 443868870@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31860533); 广西农业科学院基本科研业务专项 (桂农科 2021YT163)

Foundation projects: National Natural Science Foundation of China (31860533); Guangxi Academy of Agricultural Sciences Special Funding Project for Basic Scientific Research Business (Guinongke2021YT163)

Key words: *Sterculia monosperma* Vent.;germplasm resources;fruit traits;genetic diversity;comprehensive evaluation

苹婆 (*Sterculia monosperma* Vent.) 系锦葵科 (Malvaceae) 苹婆属 (*Sterculia*) 常绿乔木 (APG IV)^[1], 又名频婆、九层皮、凤眼果、七姐果等, 自然分布于云南、广东、广西、海南等省(区)。苹婆具有较高的食用价值, 其种胚富含淀粉、蛋白质、脂肪、维生素、多酚以及多种氨基酸和微量元素^[2], 以煮熟食用为主, 味微甜而香, 也可加工成果仁、果脯、饼干、糕点等产品; 苹婆种仁的淀粉含量约占 60%^[3], 实验表明, 苹婆淀粉的透光率、溶解度、膨胀度、凝沉性及冻融稳定性均与玉米淀粉接近, 可以作为一种新的淀粉资源开发利用^[3]。另外, 苹婆还具有较高的药用和保健价值, 其种仁味甘性温, 具有和胃消食、解毒杀虫、明目壮阳等功效, 用于治疗翻胃吐食、虫积腹痛、疝痛等症^[4]; 有研究表明, 苹婆种子的甲醇提取物对小鼠的胃溃疡有良好疗效^[5]; 苹婆蓇葖果壳和种胚的多酚类物质含量丰富, 具有较强的抗氧化性, 可用于食品添加剂和功能性食品^[1,6]。目前国内外对苹婆开展的研究不多, 主要集中在化学成分^[2,3,6,7]、资源评价筛选^[8-10]与病虫害^[11, 12,13]方面, 在开发利用方面, 多集中于园林绿化用途上。实际上, 广西、广东民间对苹婆的药用、食用, 特别是用于民间特色食品制作由来已久。而目前苹婆种质资源多呈野生、半野生状态, 无规模化的果用性栽培, 较少有成片种植, 主要作为园林植物以实生树或下山树桩分散种植于行道或房前屋后, 尚未选育出适宜规模化栽培的果用优良品种。由于具备较好的市场开发潜力, 近年来陆续有果农对苹婆进行人工栽培, 然而所种植的种苗多为实生苗, 品种混杂, 导致果实产量高低不一, 品质参差不齐, 商品性较差, 如何加快优良品种的选育已是苹婆产业亟待解决的瓶颈问题。

遗传多样性评价是优异种质资源挖掘利用和种质创新的基础。表型多样性分析由于简单、方便、成本低、结果直观, 是目前分析评价植物种质资源遗传多样性的首选方法^[14]。广西南亚所优稀野生果树研究团队自 2012 年始, 陆续对广西、广东、云南等苹婆资源蓄藏量较大的省份开展实地调查, 目前已收集保存了苹婆、假苹婆、粉苹婆、香苹婆等苹婆属植物种质资源 162 份。课题组前期已经对苹婆开展了一些评价筛选工作^[8-10], 然而涉及的资源份数较少, 评价的种质资源范围仍需进一步扩大。本研究基于果实性状指标数据, 采用多样性分析、聚类分析、相关性分析及主成分分析等方法, 对 70 份苹婆种质资源进行遗传多样性分析和综合评价, 旨在为苹婆种质资源的保护与利用、优良品种选育等工作提供基本参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的苹婆种质资源类型为来源于广西、广东、云南等地的农家种或野生资源, 种质编号为 S001~S070, 均以嫁接的方式保存于广西南亚所苹婆种质资源圃内, 常规管理, 其编号及来源见表 1。苹婆种质资源圃位于广西龙州县彬桥乡, 处于广西西南部, 该区域年均气温 22.3 °C~23 °C, 年有效积温 7362 °C~7756 °C, 常年降雨量为 821 mm~1979 mm, 年均日照时数 1251 h, 年无霜期达 350 d 以上, 年平均空气相对湿度 81%~87%,

属于典型的亚热带季风气候区。苹婆果实性状数据来源于课题组在 2021 年~2023 年调查鉴定所创建的苹婆表型数据库。

表 1 苹婆种质资源的编号及来源

Table 1 Numbering and origin of *Sterculia monosperma* Vent. germplasm resources

编号	来源	海拔 (m)	资源类型	编号	来源	海拔 (m)	资源类型
S001	广西南宁市西乡塘区	90	农家种	S036	广西龙州县彬桥乡	140	农家种
S002	广西横州市校椅镇	80	农家种	S037	广东广州市天河区	250	野生资源
S003	广西天等县富新乡	510	野生资源	S038	云南省景洪市	560	野生资源
S004	广西天等县进远乡	400	野生资源	S039	云南省勐海县孟海镇	1180	野生资源
S005	广西天等县进远乡	390	野生资源	S040	云南省麻栗坡县	1120	野生资源
S006	广西天等县进远乡	390	野生资源	S041	广西南宁市西乡塘区	90	野生资源
S007	广西大新县下雷镇	240	野生资源	S042	广西南宁市西乡塘区	90	野生资源
S008	广西龙州县逐卜乡	210	农家种	S043	广西南宁市西乡塘区	90	野生资源
S009	广西龙州县逐卜乡	210	农家种	S044	广西苍梧县岭脚镇	18	野生资源
S010	广西龙州县逐卜乡	210	农家种	S045	广西苍梧县岭脚镇	18	野生资源
S011	广西龙州县逐卜乡	210	农家种	S046	广西苍梧县岭脚镇	27	野生资源
S012	广西龙州县水口镇	165	野生资源	S047	广西苍梧县岭脚镇	6	野生资源
S013	广西龙州县水口镇	157	野生资源	S048	广西苍梧县岭脚镇	6	野生资源
S014	广西龙州县水口镇	167	野生资源	S049	广西藤县藤州镇	23	野生资源
S015	广西龙州县水口镇	146	野生资源	S050	广西藤县藤州镇	64	野生资源
S016	广西龙州县水口镇	146	野生资源	S051	广西藤县藤州镇	11	野生资源
S017	广西龙州县水口镇	150	野生资源	S052	广西藤县天平镇	26	野生资源
S018	广西龙州县水口镇	151	野生资源	S053	广西玉州区茂林镇	70	野生资源
S019	广西龙州县水口镇	149	野生资源	S054	广西玉州区茂林镇	70	野生资源
S020	广西龙州县水口镇	144	野生资源	S055	广西北海市海城区	2	农家种
S021	广西龙州县水口镇	145	野生资源	S056	广西北海市海城区	8	农家种
S022	广西龙州县水口镇	144	野生资源	S057	广西北海市海城区	3	农家种
S023	广西龙州县水口镇	233	野生资源	S058	广西北海市海城区	26	农家种
S024	广西龙州县水口镇	230	野生资源	S059	广西浦北县小江镇	81	野生资源
S025	广西龙州县水口镇	221	野生资源	S060	广西浦北县小江镇	1	野生资源
S026	广西龙州县水口镇	229	野生资源	S061	广西浦北县福旺镇	110	野生资源
S027	广西龙州县龙州镇	130	农家种	S062	广西浦北县福旺镇	125	野生资源
S028	广西龙州县上降乡	384	农家种	S063	广西浦北县寨圩镇	128	野生资源
S029	广西龙州县八角乡	260	野生资源	S064	广西浦北县寨圩镇	182	野生资源
S030	广西龙州县八角乡	260	野生资源	S065	广西浦北县乐民镇	134	野生资源
S031	广西龙州县八角乡	260	野生资源	S066	广西贵港市五里镇	24	农家种
S032	广西龙州县八角乡	260	野生资源	S067	广西贵港市五里镇	42	农家种
S033	广西龙州县彬桥乡	130	农家种	S068	广西贵港市木格镇	68	农家种
S034	广西龙州县八角乡	219	野生资源	S069	广西贵港市木格镇	98	农家种
S035	广西龙州县八角乡	219	野生资源	S070	广西贵港市木梓镇	97	农家种

1.2 试验方法

于果实成熟期（成熟期判断：全树约有 60%~75%蒴果荚颜色由绿色转变为橘红色并自然开裂，种子

颜色由黄白色转变为黑褐色)对 13 项果实性状进行测定,其中果实纵径、果实横径、单果重、果实种子数、出种率、种子重量、种子纵径、种子横径等 8 个性状按照《苹婆种质资源鉴定技术规范》^[15]的要求进行测定;单果种子总重:用电子天平称量单个分果的种子重量,精确到 0.01g;种形指数=种子纵径/种子横径;淀粉、可溶性糖和可溶性蛋白含量委托南宁国拓生物科技有限公司按照蒽酮比色法和 BCA 法进行测定。每份资源选取 10~20 个具有代表性的果荚和种子进行测定,数据均取平均值。

1.3 统计分析

以变异系数(CV)表示不同种质间性状值的离散特性,以 Shannon-Wiener 多样性指数(H')进行遗传多样性评价,变异系数 $CV(\%) = \text{标准差} / \text{性状平均值} \times 100\%$, Shannon-Wiener 多样性指数(H')参照麻一博等^[16]的方法进行计算。相关性分析利用 Origin Pro 2022 进行,聚类分析利用 R 语言进行,主成分分析和逐步回归分析利用 SPSS21.0 进行。

2 结果与分析

2.1 遗传多样性分析

对 70 份苹婆种质的果实性状进行遗传变异分析,结果如表 2 所示。变异系数介于 7.80%~42.94%,可见 13 个果实性状的离散程度存在较大差异。可溶性糖含量变异系数最大,为 42.94%,其次是可溶性蛋白含量、单果种子总重、淀粉含量和单果重,变异系数分别为 36.31%、31.89%、30.67%和 27.51%,表明苹婆种质在可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、单果种子总重、淀粉含量及单果重方面的性状稳定性较差,具有较高的改良潜力。种子纵径的变异系数最低,仅为 7.80%,低于 10%,说明该性状变异小,表现比较稳定。多样性指数变化范围为 1.57~2.04,平均为 1.92,表明供试的 70 份苹婆种质资源拥有丰富的遗传多样性。种形指数、淀粉含量、种子纵径、果实种子数的遗传多样性指数较高,都在 2.00 以上,说明供试材料在这 4 个性状上的表现型相对较多,且分布较均衡。

表 2 苹婆种质 13 个果实性状的遗传多样性

Table 1 Genetic diversity of 13 fruit traits of *Sterculia monosperma* Vent. germplasm

果实性状 fruit traits	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 (%) CV	多样性指数 H'
果实纵径 (mm) FLD	39.68	139.23	97.39	19.57	20.10	1.97
果实横径 (mm) FTD	20.12	66.71	39.91	6.47	16.22	1.81
单果重 (g) SFW	13.15	85.23	48.57	13.36	27.51	1.95
单果种子总重 (g) SFSW	6.89	48.73	23.06	7.35	31.89	1.99
出种率 (%) KRF	0.26	0.62	0.48	0.08	16.55	1.97
果实种子数 FSN	1.30	4.75	3.15	0.67	21.35	2.00
种子重量 (g) SW	3.37	12.42	7.91	1.41	17.87	1.88
种子纵径 (mm) SLD	20.39	33.48	28.48	2.22	7.80	2.01
种子横径 (mm) STD	18.21	45.95	23.04	3.30	14.32	1.57

种形指数 SSI	0.98	1.52	1.26	0.12	9.52	2.04
淀粉含量 (mg/g) SC	15.78	65.12	41.82	12.83	30.67	2.02
可溶性糖含量 (mg/g) SSC	16.32	104.32	32.74	14.06	42.94	1.83
可溶性蛋白含量 (mg/g) SPC	5.84	34.01	15.00	5.45	36.31	1.94

FLD: Fruit longitudinal diamete; FTD: Fruit transverse diamete; SFW: Single fruit weight; SFSW: Single fruit seeds weight; KR: Kernel rate; FSN: Fruit seed number; SW: Seed weight; SLD: Seed longitudinal diamete; STD: Seed transverse diamete; SSI: Seed-form index; SC: Starch content; SSC: Soluble sugar content; SPC: Soluble protein content; The same as below

2.2 苹婆种质基于果实性状的聚类分析

基于 13 个果实性状指标数据, 采用 K-means 聚类方法对 70 份苹婆种质进行聚类 (图 1), 分为 4 个类群, 并进行统计分析 (表 3)。类群 I 包括 25 份种质, 该类群的大部分指标都处于中等水平, 可溶性蛋白含量处于最高水平, 但与类群 II 和类群 IV 差异不显著, 与类群 III 具有显著差异。类群 II 包括 15 份苹婆种质, 该类群的果实纵径、果实横径、单果重、单果种子总重、果实种子数、种子重量和种子纵径这 7 个指标显著高于其他三个类群, 其余 6 个指标处于中高水平, 说明该类群属于果实偏大、外观品质较好的种质类型, 符合良种选育及市场需求的方向。类群 III 包括 24 份种质, 该类群的大部分指标都处于中等水平, 淀粉含量处于最高水平, 但与类群 II 和类群 IV 差异不显著, 与类群 I 具有显著差异。类群 IV 包括 6 份种质, 该类群的可溶性糖含量处于最高水平, 与类群 I 和类群 III 差异显著, 其余大部分指标都处于较低水平, 属于小果类型。

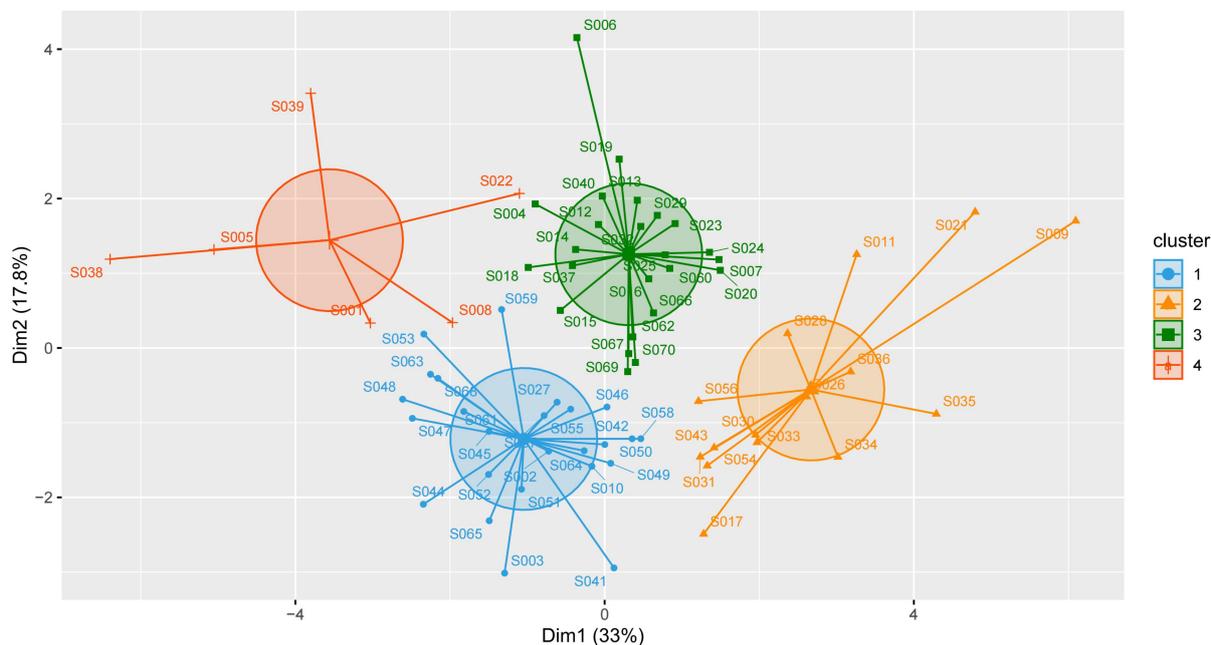


图 1 70 份苹婆种质资源聚类分析图

Fig.1 Cluster analysis of 70 *Sterculia monosperma* Vent. germplasms

表 3 苹婆种质资源 4 个类群的果实性状表现

类群 Group	果实纵径 (mm) FLD	果实横径 (mm) FTD	单果重 (g) SFW	单果种子总重 (g) SFSW	出种率 (%) KR	果实种子数 FSN	种子重量 (g) SW	种子纵径 (mm) SLD	种子横径 (mm) STD	种形指数 SSI	淀粉含量 (mg/g) SC	可溶性糖含量 (mg/g) SSC	可溶性蛋白含量 (mg/g) SPC
I	89.2c	39.76b	42.2c	18.05c	0.42c	2.85c	7.29c	28.87b	22.12b	1.32a	32.9b	31.34b	16.77a
II	115.62a	47.5a	65.37a	31.23a	0.47b	3.75a	9.11a	30.21a	22.93ab	1.33a	44.24a	35.99ab	15.31ab
III	100.3b	37.41b	50.43b	25.54b	0.51b	3.29b	8.29b	27.82c	24.55a	1.18b	49.65a	29.21b	13.23b
IV	71.61d	30.52d	23.65d	13.8d	0.57a	2.35d	6.28c	24.87d	21.58b	1.18b	45.1a	46.89a	14.96ab

2.3 性状间相关性分析

对 13 个果实性状进行相关性分析，结果如图 2 所示。在由 13 个性状指标组成的 78 对性状指标组合中，有 33 对性状指标之间呈显著相关，其中有 24 对性状指标之间呈极显著相关。其中，种子重量与果实纵径、单果重、单果种子总重、种子纵径、种子横径极显著正相关，与出种率、果实种子数显著正相关，说明在选育大果形的品种时，应特别关注一些果实纵径较大的种质。出种率与果实横径极显著负相关，这与实际情况相符，即一些果实横径较大的种质虽然单果重比较高，但是出种率却比较低，所以当以出种率为关键考量指标时，应避免选择一些果实横径较大的种质。可溶性蛋白含量与可溶性糖含量极显著正相关，说明在选育营养型品种时，可在可溶性糖含量高的群体中筛选。



*, **分别表示在 0.05、0.01 水平上显著相关，下同

* and ** represent significance when $\alpha = 0.05$, $\alpha = 0.01$, the same as below

图 2 苹婆种质果实性状间的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of fruit traits in *Sterculia monosperma* Vent. germplasms

2.4 主成分分析及综合评价

根据方差初始特征值 >1 的原则提取主成分，对 13 个果实性状进行主成分分析（表 4）。结果表明，前 4 个主成分特征值 >1 ，累计方差贡献率为 74.46%，说明这 4 个主成分反映了原始因子 74.46%的信息。

第 1 主成分特征值为 4.29, 贡献率为 32.97%, 果实纵径、单果重、单果种子总重、果实种子数及种子重量的载荷值较高, 说明第 1 主成分主要反映蓇葖果荚相关的信息。第 2 主成分特征值为 2.31, 贡献率为 17.79%, 出种率和种形指数的载荷值分别为 0.74 和 -0.77, 说明第 2 主成分反映的是出种率相关信息, 出种率和种形指数相互制约, 这与性状相关性分析结果相符。第 3 主成分特征值为 1.67, 贡献率为 12.87%, 种子纵径和种子横径的载荷值较高, 反映的是种子大小相关信息。第 4 主成分特征值为 1.41, 贡献率为 10.83%, 可溶性糖含量和可溶性蛋白含量的载荷值较高, 反映的是果实营养成分相关信息。

表 4 苹婆果实性状的主成分分析

Table 4 Principal component analysis of fruit traits in *Sterculia monosperma* Vent.

性状 Traits	主成分 Principal component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
果实纵径 FLD	0.76	-0.14	-0.35	0.07
果实横径 FTD	0.58	-0.48	-0.04	-0.25
单果重 SFW	0.93	-0.08	-0.04	-0.13
单果种子总重 SFSW	0.94	0.28	-0.03	0.03
出种率 KRF	0.15	0.74	-0.05	0.32
果实种子数 FSN	0.77	-0.05	-0.37	0.21
种子重量 SW	0.72	0.38	0.41	-0.13
种子纵径 SLD	0.58	-0.33	0.57	-0.06
种子横径 STD	0.17	0.57	0.64	-0.20
种形指数 SSI	0.18	-0.77	0.05	0.17
淀粉含量 SC	0.24	0.46	-0.53	0.11
可溶性糖含量 SSC	0.07	-0.01	0.11	0.83
可溶性蛋白含量 SPC	0.03	-0.21	0.46	0.62
特征值 Eigenvalues	4.29	2.31	1.67	1.41
贡献率 (%) Contribution rate	32.97	17.79	12.87	10.83
累计贡献率 (%) Cumulative contribution rate	32.97	50.76	63.63	74.46

根据主成分分析法, 用每个性状指标的主成分载荷值除以各自主成分特征值的算数平方根, 计算得到 4 主成分的每个性状指标的得分系数, 进而得到 4 个主成分的得分表达式:

$$F_1 = 0.369Z_{X_1} + 0.282Z_{X_2} + 0.451Z_{X_3} + 0.452Z_{X_4} + 0.072Z_{X_5} + 0.374Z_{X_6} + 0.350Z_{X_7} + 0.282Z_{X_8} + 0.081Z_{X_9} + 0.088M_{X_{10}} + 0.115Z_{X_{11}} + 0.033Z_{X_{12}} + 0.016Z_{X_{13}}$$

$$F_2 = -0.095Z_{X_1} - 0.315Z_{X_2} - 0.056Z_{X_3} + 0.181Z_{X_4} + 0.488Z_{X_5} - 0.033Z_{X_6} + 0.248Z_{X_7} - 0.215Z_{X_8} + 0.374Z_{X_9} - 0.507M_{X_{10}} + 0.304Z_{X_{11}} - 0.005Z_{X_{12}} - 0.138Z_{X_{13}}$$

$$F_3 = -0.274Z_{X_1} - 0.028Z_{X_2} - 0.032Z_{X_3} - 0.020Z_{X_4} - 0.039Z_{X_5} - 0.284Z_{X_6} + 0.318Z_{X_7} + 0.443Z_{X_8} + 0.494Z_{X_9} + 0.037M_{X_{10}} - 0.406Z_{X_{11}} + 0.084Z_{X_{12}} + 0.354Z_{X_{13}}$$

$$F_4=0.063Z_{X_1}-0.207Z_{X_2}-0.112Z_{X_3}+0.029Z_{X_4}+0.269Z_{X_5}+0.175Z_{X_6}-0.108Z_{X_7}-0.053Z_{X_8}-0.169Z_{X_9}+0.140M_{X_{10}}+0.096Z_{X_{11}}+0.703Z_{X_{12}}+0.521Z_{X_{13}}$$

上式中 $Z_{X_1}\sim Z_{X_{13}}$ 为果实纵径、果实横径、单果重等 12 个性状原始数据的标准化值， $M_{X_{10}}$ 为种形指数的适度化值，适度化公式为： $M_x=|X-K|$ ，本研究综合考虑苹婆种子的加工适宜性和商品性，此处 K 值取 1。

分别以 4 个主成分的方差贡献率除以 4 个主成分的累计方差贡献率，计算得到各个主成分的权重系数，进而得到综合得分公式： $F=0.443F_1+0.239F_2+0.173F_3+0.145F_4$ ，70 份苹婆种质的综合得分及排名见表 5。综合得分值的变化范围为-2.95~3.35，排在前 10 名的种质资源编号为 S009、S021、S011、S036、S028、S035、S006、S023、S034、S007，表明这 10 份资源的果实性状综合表现较好，可以作为优良品种选育的候选资源。排名第 1 的 S009 来自广西崇左市龙州县逐卜乡，其单果重、单果种子总重和种子重量这 3 个重要性状指标都处于供试材料中的最高水平。

F 值与 13 个果实性状的相关性分析表明（表 6），F 值与果实纵径、果实横径、单果重、淀粉含量等 10 个性状指标呈极显著相关或显著相关，说明 F 值可以作为苹婆种质资源果实性状的综合评价指标。

表 5 70 份苹婆种质果实综合得分

Table 5 Fruit comprehensive scores of 70 *Sterculia monosperma* Vent. germplasm

编号 Code	综合得分 Score	排名 Range									
S009	3.35	1	S025	0.45	19	S040	-0.05	37	S027	-0.75	55
S021	2.64	2	S042	0.45	20	S015	-0.06	38	S045	-0.77	56
S011	2.00	3	S029	0.41	21	S046	-0.08	39	S052	-0.77	57
S036	1.74	4	S030	0.41	22	S069	-0.12	40	S068	-0.79	58
S028	1.69	5	S032	0.37	23	S014	-0.18	41	S001	-0.87	59
S035	1.67	6	S022	0.36	24	S055	-0.20	42	S003	-0.92	60
S006	1.64	7	S019	0.31	25	S010	-0.22	43	S053	-1.05	61
S023	1.06	8	S033	0.31	26	S057	-0.23	44	S065	-1.06	62
S034	0.89	9	S066	0.30	27	S049	-0.27	45	S061	-1.16	63
S007	0.82	10	S058	0.28	28	S050	-0.33	46	S039	-1.30	64
S024	0.76	11	S016	0.27	29	S041	-0.34	47	S044	-1.31	65
S020	0.67	12	S037	0.25	30	S002	-0.40	48	S048	-1.44	66
S056	0.66	13	S004	0.16	31	S059	-0.47	49	S063	-1.44	67
S054	0.64	14	S012	0.09	32	S064	-0.56	50	S047	-1.51	68
S026	0.61	15	S031	0.07	33	S008	-0.59	51	S005	-1.56	69
S060	0.59	16	S062	0.05	34	S018	-0.64	52	S038	-2.95	70
S013	0.47	17	S067	-0.02	35	S017	-0.72	53			
S043	0.46	18	S070	-0.04	36	S051	-0.72	54			

2.5 回归模型建立及关键指标筛选

以综合得分 F 值为因变量，以 13 个果实性状值为自变量，利用逐步回归法建立最优回归方程为：

$$y=0.015+0.705x_4+0.274x_7+0.194x_{12}+0.128x_9$$

式中 x_4 、 x_7 、 x_{12} 和 x_9 分别代表单果种子总重、种子重量、可溶性糖含量和种子横径，相关系数 $R=0.983$ ，调整后 $R^2=0.965$ ，表明这 4 个指标解释了综合得分 F 值 96.5% 的变异， $F=470.72$ ， $p<0.01$ ，方程极显著，表明构建的综合评价函数式可用于苹婆种质资源的综合分析评价。

由表 6 可知，回归方程筛选出的 4 个指标，除可溶性糖含量外，都与 F 值极显著相关，表明单果种子总重、种子重量、可溶性糖含量和种子横径这 4 个性状指标可以作为评价苹婆种质资源果实性状的关键性指标。

表 6 综合得分值 (F) 与 13 个果实性状的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between comprehensive value (F-value) and 13 fruit traits

果实性状 Fruit traits	相关系数 Correlation coefficients	果实性状 Fruit traits	相关系数 Correlation coefficients
果实纵径 FLD	0.579**	种子纵径 SLD	0.558**
果实横径 FTD	0.322**	种子横径 STD	0.432**
单果重 SFW	0.781**	种形指数 SSI	0.018
单果种子总重 SFSW	0.935**	淀粉含量 SC	0.270*
出种率 KRF	0.422**	可溶性糖含量 SSC	0.227
果实种子数 FSN	0.642**	可溶性蛋白含量 SPC	0.167
种子重量 SW	0.843**	-	-

3 讨论

3.1 苹婆种质资源多样性分析

种实性状是植物生存和繁衍适应性的集中表现，与叶片等营养器官相比其特征相对稳定，能在不同地理位置和复杂多变的环境下表现出较强的适应性，能较好地体现物种进化上的变异大小和遗传规律^[17]。近年来，国内外学者基于果实性状对樱桃李^[18]、可食埃塔棕^[19]、枣^[20]及毛榛^[21]等多种果树的遗传多样性进行分析，为这些果树的种质资源评价、保护及创新利用奠定了基础。本研究基于果实性状数据对 70 份苹婆种质资源进行遗传多样性分析，13 个性状指标变异系数平均为 22.54%，遗传多样性系数平均为 1.92，表明供试材料具有丰富的表型多样性。表型多样性是遗传多样性和环境异质性的综合表现，植物生存的环境条件越复杂，遗传变异越大^[22]。本研究涉及的苹婆资源大部分来源于广西的天等、龙州、苍梧等县份，这些区域多为喀斯特或丘陵性地貌，山岭连绵，岭谷相间，独特的地形地貌和复杂的立体气候可能是致使苹婆种质资源多样性较为丰富的主要原因。在 13 个性状指标中，淀粉含量、可溶性糖含量和可溶性蛋白含量的变异系数处于较高水平，说明供试材料在果实的内在品质方面具有较大的改良潜力，可为高淀粉、高品质等特色苹婆品种的选育提供数据参考。

3.2 苹婆种质资源综合评价与关键指标筛选

种质资源综合评价是作物育种研究工作中的重要环节。由于主成分分析法可以将多个复杂的原始指标

转化为几个互不相关且具有代表性的主成分，用于计算综合得分，能够较为客观地筛选出优良种质，近年来被广泛运用于野杏^[23]、板栗^[24]、核桃^[25]、澳洲坚果^[26]等果树的综合评价上。在本研究中，苹婆的13个果实性状具有较大的相关性，信息重叠性大，通过主成分分析，将13个性状指标降维为4项综合指标，其累积方差贡献率为74.46%，反映了果实性状大部分信息。进一步建立了苹婆果实性状综合评价模型，通过计算综合得分，使性状间的差异具有可比性，提高了综合评价的准确性。李文砚等^[10]和黄丽君等^[11]运用DTOPSIS法对苹婆种质资源进行综合评价，其指标权重是基于研究者的个人经验设定，而非通过科学计算得出，具有一定的主观偏向性，本研究运用主成分分析法，指标权重为等权，规避了人为赋权对综合评价的主观影响，客观性相对较高。

逐步回归分析方法可以筛选出最优的评价指标，解决表型性状复杂繁多且彼此相关的问题，为植物种质资源的评价和选育工作供了便捷、有效的方法^[27]。本研究通过逐步回归分析得到的4个性状指标中，单荚种子总重和单种重是重要的产量性状，可溶性糖含量是重要的品质性状，说明这4个指标可作为综合评价苹婆种质资源的关键性指标。苹婆属植物多为高大乔木，随着苹婆及其近缘种种质资源收集保存的数量越来越多，种质圃维护的成本将会越来越高，同时也给优异种质材料的筛选和挖掘增加了难度，所以核心种质库的构建成为将来苹婆种质资源研究必须虑及的工作。然而，如果以《苹婆种质资源鉴定技术规范》^[15]为指导采集表型数据用以分析和构建核心种质库，涉及到的叶片、花、果实等器官的性状指标多达60多项，如何有效筛选出具有代表性的关键指标以降低数据采集和分析的难度，本研究对果实性状的逐步回归分析或可提供一定的方法参考。

4. 结论

本研究的70份苹婆资源的果实性状遗传多样性丰富，单果重、单果种子总重、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量和淀粉含量这5个性状具有较大的改良潜力；聚类分析把供试材料划分为4个类群，其中类群II的15份苹婆种质属于果实偏大、外观品质较好的种质类型，符合良种选育及市场需求的方向；通过综合评价筛选出S009、S021、S011、S036、S028等10份综合性状优良的种质；通过逐步线性回归筛选出4个关键性状指标并构建综合评价模型，为苹婆种质资源的保护及优异品种的选育提供参考。

参考文献

- [1] Stevens P F. Angiosperm Phylogeny Website. (2023-10-15)[2024-01-03]. <http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/>
- [2] 李一伟, 陆玉英, 陈香玲, 任惠, 苏伟强, 刘业强, 罗瑞鸿. 苹婆 (*Sterculia nobilis* Smith) 种胚营养及保健性评价 (英文). 南方农业学报, 2012, 43(05): 641-648
Li Y W, Lu Y Y, Chen X L, Ren H, Su W Q, Liu Y Q, Luo R H. Nutritional and health care valuation of seed embryo *Sterculia nobilis* Smith. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(05): 641-648
- [3] 任惠, 周婧, 李一伟, 韦持章, 陆玉英, 卢艳春, 罗瑞鸿. 苹婆种子营养及抗氧化活性. 植物科学学报, 2013, 31(02): 203-208
Ren H, Zhou J, Li Y W, Wei C Z, Lu Y Y, Lu Y C, Luo R H. Study on nutrition and antioxidant activities of *Sterculia nobilis* Smith seeds. Plant Science Journal, 2013, 31(02): 203-208

- [4]赵广河,甘秋香. 苜蓿淀粉理化性质的研究. 食品工业,2014,35(01):113-115
Zhao G H, Gan Q X. Physical and Chemical Properties of *Sterculia nobilis* Smith Starch. The Food Industry,2014,35(01):113-115
- [5]江苏新医学院. 中药大辞典. 上海: 上海科学技术出版社,1977: 490
Jiangsu New Medical College. The Dictionary of traditional Chinese medicine. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers,1977: 490
- [6] Song J L, Sun P, Wang R, Zhao X. Gastroprotective Effects of Methanolic Extract of *Sterculia nobilis* Smith Seeds in Reserpine-Induced Gastric Ulcer in Mice. Journal of Food Biochemistry, 2015, 39(3): 230-237
- [7] 张鹏,花燕莹,陈欣荣,唐森,谢济运. 苜蓿果壳总酚酸提取工艺优化及抗氧化性研究[J]. 中国野生植物资源,2021,40(03):20-27
Zhang P, Hua Y Y, Chen X R, Tang S, Xie J Y. Extraction Technology Optimization and Antioxidant Activity of Total Phenolic Acids from Follicle Shell of *Sterculia nobilis*. Chinese Wild Plant Resources,2021,40(03):20-27
- [8] 李文砚,黄丽君,卢美瑛,蒋娟娟,韦优,罗培四,赵静,孔方南,卓福昌,杨志强,周婧. DTOPSIS 法在苜蓿不同品系综合评价中的应用. 南方农业学报,2019,50(07):1527-1533
Li W Y, Huang L J, Lu M Y, Jiang J J, Wei Y, Luo P S, Zhao J, Kong F N, Zhuo F C, Yang Z Q, Zhou J. Comprehensive evaluation of *Sterculia nobilis* Smith lines by DTOPSIS method. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(7): 1527-1533
- [9] 黄丽君,李文砚,蒋娟娟,卢美瑛,赵静,杨志强,韦优,周婧. 桂西南地区 6 个苜蓿株系综合性状比较. 西南农业学报,2020,33(02):415-422
Huang L J, Li W Y, Jiang J J, Lu M Y, Zhao J, Yang Z Q, Wei Y, Zhou J. Comparative analysis of comprehensive traits of six *Sterculia nobilis* Smith in the southwest region of Guangxi. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(02): 415-422
- [10] 李文砚,周婧,张秀芬,周彩霞,黄丽君,卢美瑛,赵静,卓福昌,罗培四,韦优. 基于 AHP-FCE 数学模型与 DTOPSIS 法的苜蓿种质资源综合评价. 南方农业学报,2021,52(06):1557-1567
Li W Y, Zhou J, Zhang X F, Zhou C X, Huang L J, Lu M Y, Zhao J, Zhuo F C, Luo P S, Wei Y. Comprehensive evaluation of *Sterculia nobilis* Smith germplasm resources based on AHP-FCE mathematical model and DTOPSIS method. Journal of Southern Agriculture, 2021,52(06):1557-1567
- [11] 杨志强,周婧,韦优,黄丽君,何文,唐景美,徐冬英,卢艳春. 广西苜蓿饰边裂木虱种群消长动态及防治药剂的室内筛选. 广西植保, 2020, 33(04):1-4
Yang Z Q, Zhou J, Wei Y, Huang L J, He W, Tang J M, Xu D Y, Lu Y C. Population dynamics and indoor screening for the control of *Carsidara marginalis* Walker of *Sterculia nobilis* Smith in Guangxi. Guangxi Plant Protection,2020,33(04):1-4
- [12] Zhang Y W, Shen R, Mo Y X, Li Q Q, Lin W, Yuan G Q. Colletotrichum siamense: A novel leaf pathogen of *Sterculia nobilis* Smith detected in China. Forest Pathology,2020, 50(1): e12575
- [13] 王成,赵丹阳,扈丽丽,赵奕,高成龙,张心结,陈诗琦,黄华毅. 苜蓿炭疽病病原菌生物学特性及室内毒力测定. 林业与环境科学, 2023, 39(04):21-26
Wang C, Zhao D Y, Hu L L, Zhao Y, Gao C L, Zhang X J, Chen S Q, Huang H Y. Studies on Biological Characteristics and Lab Toxicity Test of Leaf Pathogen (*Colletotrichum siamense*) on *Sterculia monosperma*. Forestry and Environmental Science,2023,39(04):21-26
- [14]李赢,刘海翠,石晓旭,石吕,韩笑,刘建,魏亚凤. 398 份裸大麦种质资源表型性状遗传多样性分析. 植物遗传资源学报,2023,24(05):1311-1320
Li Y, Liu H C, Shi X X, Shi L, Han X, Liu J, Wei Y F. Phenotypic Diversity Analysis of 398 Naked Barley Germplasm Resources. Journal of Plant Genetic Resources,2023,24(05):1311-1320
- [15] 周婧,卓福昌,李文砚,韦优,黄丽君,罗培四,周彩霞,卢美瑛,孔方南,赵静,蒋娟娟,唐景美,韦雪英,卢艳春,杨志强,徐健,韦巧云. DB45/T 2345-2021, 苜蓿种质资源鉴定技术规范
Zhou J, Zhuo F C, Li W Y, Wei Y, Huang L J, Luo P S, Zhou C X, Lu M Y, Kong F N, Zhao J, Jiang J J, Tang J M, Wei X Y, Lu Y C, Yang Z Q, Xu J, Wei Q Y. DB45/T 2345-2021, Technical Specification for evaluating germplasm of *Sterculia nobilis* Smith
- [16] 麻一博,贾晓艳,刘亚捷,杨中哲,赵永锋,郭晋杰,祝丽英. 玉米种质资源苞叶相关性状鉴定及综合评价. 植物遗传资源学报,2023,24(06):1568-1579
Ma Y B, Jia X Y, Liu Y J, Yang Z Z, Zhao Y F, Guo J J, Zhu L Y. Identification and Comprehensive Evaluation of Bract Related Traits of Maize Germplasm Resources. Journal of Plant Genetic Resources,2023,24(06):1568-1579
- [17] 武艳虹,樊泽璐,李佳,郭晋宏,郭雅坤,王祎玲. 茶条槭自然种群种子和果实表型多样性研究. 广西植物,2018,38(06):795-803
Wu Y H, Fan Z L, Li J, Guo J H, Guo Y K, Wang W L. Phenotypic diversity of seeds and fruits in natural populations of *Acer ginnala* in China. Guihaia, 2018, 38(06): 795-803
- [18] Cosmulescu S N, Ionica M E, Mutu N. Evaluation on genetic diversity of phenotypic traits in myrobalan plum (*Prunus cerasifera* EHRH.). South-Western Journal of Horticulture Biology and Environment, 2018, 9(1): 25-34
- [19] TDS Maral, CDO Bernardes, WBDS Oliveira, JHS Guilhen, A Ferreira. Genetic diversity of *Euterpe edulis* martius based on fruit traits. Bioscience

Journal,2020, 36(5):1549-1556

- [20] 吴昊,苏万龙,石美娟,薛晓芳,任海燕,王永康,赵爱玲,李登科.枣种质果实性状多样性分析与综合评价.植物遗传资源学报,2022,23(06):1613-1625
Wu H, Su W L, Shi M J, Xue X F, Ren H Y, Wang Y K, Zhao A L, Li D K. Diversity Analysis and Comprehensive Evaluation of Jujube Fruit Traits. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(06): 1613-1625
- [21] 李红莉,李雪,逢宏扬.黑龙江野生毛榛果实表型性状的多样性研究.西部林业科学,2022,51(02):20-26
Li H L, Li X, Jiang H Y. Phenotypic Trait Diversity of Wild *Corylus mandshurica* Fruit in Heilongjiang Province. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(02): 20-26
- [22] 赵冰,张启翔.蜡梅种质资源表型多样性.东北林业大学学报,2007(05):10-13+35
ZHAO B, ZHANG Q X. Phenotypic diversity of *Chimonanthus praecox* germplasm in China. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(5): 10-13, 35
- [23] 董胜君,孙永强,陈建华,卢彩云,刘权钢,刘立新.野杏无性系表型性状多样性分析及综合评价.植物遗传资源学报,2020,21(05):1156-1166
Dong S J, Sun Y Q, Chen J H, Lu C Y, Liu Q G, Liu L X. Phenotypic Traits Diversity Analysis and Comprehensive Evaluation of *Armeniaca vulgaris* var. *ansu* Clones. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(05): 1156-1166
- [24] 魏源,吕梦扬,马亚特,刘静,王旋,王东升.基于3种分析方法的板栗果实营养品质综合评价.河南农业科学,2023,52(06):111-119
Wei Y, Lv M Y, Ma Y T, Liu J, Wang X, Wang D S. Comprehensive Evaluation of the Nutritional Quality of Chestnut Based on Three Methods. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(06): 111-119
- [25] 黄晓露,赵志珩,李开祥,廖健明,蓝金宣,陈晓明,梁文汇.广西优良核桃单株果实品质差异及综合评价研究.西南农业学报,2019,32(03):489-494
Huang X L, Zhao Z H, Li K X, Liao J M, Lan J X, Chen X M, Liang W H. Quality difference and comprehensive evaluation of *Juglans regia* seedling individuals in Guangxi. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(03): 489-494
- [26] 谭秋锦,韦媛荣,潘贞珍,环秀菊,潘浩男,许鹏,韦哲君,郑树芳,王文林.澳洲坚果种质果实数量性状分析与综合评价.植物遗传资源学报,2023,24(06):1615-1625
Tan Q J, Wei Y R, Pan Z Z, Huan X J, Pan H N, Xu P, Wei Z J, Zheng S F, Wang W L. Analysis and Comprehensive Evaluation of the Fruit Quantitative Traits for *Macadamia* Germplasms. Journal of Plant Genetic Resources, 2023, 24(06): 1615-1625
- [27] 徐泽俊,齐玉军,邢兴华,童飞,王幸.黄淮海大豆种质农艺与品质性状分析及综合评价.植物遗传资源学报,2022,23(02):468-480
Xu Z J, Qi Y J, Xing X H, Tong F, Wang X. Analysis and Evaluation of Agronomic and Quality Traits in Soybean Germplasms from Huang-Huai-Hai Region. Journal of Plant Genetic Resources, 2022, 23(02): 468-480