植物遗传资源学报
Journal of Plant Genetic Resources
ISSN 1672-1810,CN 11-4996/S

《植物遗传资源学报》网络首发论文

题目：57 个橡胶树优树无性系表型多样性分析及抗旱性综合评价
作者：李小琴，张凤良，杨湉，周艳，吴裕
DOI：10.13430/j.cnki.jpgr.20250911003
收稿日期：2025-09-11
网络首发日期：2025-10-31
引用格式：李小琴，张凤良，杨湉，周艳，吴裕．57 个橡胶树优树无性系表型多样性分析及抗旱性综合评价[J/OL]．植物遗传资源学报．
https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20250911003

植物遗传资源学报
Journal of Plant Genetic Resources　DOI:10.13430/j.cnki.jpgr.20250911003

57 个橡胶树优树无性系表型多样性分析及抗旱性综合评价

李小琴，张凤良，杨　湉，周　艳，吴　裕
（云南省热带作物科学研究所/云南省天然橡胶可持续利用研究重点实验室，景洪 666100）

摘要：本研究以从我国第一代胶园中收集保存的 57 个橡胶树优树无性系为材料，对其 25 个数量性状进行了测定，包括茎围、叶片形态及解剖结构等指标，并进一步分析了各性状的变异程度、遗传多样性指数及性状间的相关性。在此基础上，基于全部表型性状进行了系统聚类分析和主成分综合评价。结果表明，25 个表型性状在 57 个橡胶树优树无性系间均存在极显著差异，变异系数为 7.26%~45.29%，其中苗期（第 1 年）茎围的变异系数最大，而脉左宽/叶宽的变异系数最小；表型遗传多样性指数在 1.018~2.188 之间，以叶面积的表型遗传多样性指数最高，脉左宽/叶宽的最低。25 个表型性状中除脉左宽/叶宽、叶脉数、主脉粗、叶脉夹角、栅海比、下表皮厚度和细胞结构疏松度与绝大多数性状间相关性不显著外，其余性状之间多数呈极显著或显著相关，其中茎围与叶面积、叶长及叶片厚度的正相关系数均 超过 0.8；叶片解剖结构性状中，除栅栏组织厚度和海绵组织厚度相关性不显著外，叶片厚度、角质层厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和上表皮厚度等指标两两之间均呈极显著或显著相关，且与绝大多数叶片形态指标也达到极显著或显著水平。系统聚类分析将 57 个优树无性系划分为 6 个类群，聚类结果与收集地之间无明显相关性，其中约半数无性系集中于第Ⅰ类群，第Ⅳ类群和第Ⅴ类群表现出茎围和叶面积大、叶脉分布稀疏、叶片解剖结构各性状均较厚等特点。基于聚类分析与主成分综合评价，筛选出 7 号、10 号、33 号、27 号、46 号和 14 号等 6 个速生抗旱性强的优异无性系，在第 7 年时茎围均超过了 52 cm，其中 7 号和 10 号为三倍体无性系。本研究较好地反映了国内植胶园内散生分布的优树资源的表型多样性，为橡胶树优良亲本选配与定向育种提供宝贵的材料资源。

关键词：橡胶树；生长；叶片形态；叶片解剖结构；表型多样性；综合评价

Phenotypic Diversity Analysis and Comprehensive Drought Tolerance Evaluation of 57 Superior *Hevea brasiliensis* Clones

LI Xiaoqin, ZHANG Fengliang, YANG Tian, ZHOU Yan, WU Yu
(*Yunnan Institute of Tropical Crops/Yunnan Key Laboratory of Sustainable Utilization Research on Rubber Tree, Jinghong 666100*)

Abstract: This study investigated 57 superior *Hevea brasiliensis* clones collected from first-generation rubber plantations in China. A total of 25 quantitative traits were determined, including stem circumference, leaf morphological features, and anatomical structure. The variation extent, genetic diversity indices, and correlations among these traits were further analyzed. Based on the comprehensive set of phenotypic traits, systematic cluster analysis and principal component-based evaluation were subsequently conducted. The results indicated that all 25 phenotypic traits exhibited highly significant differences among the 57 superior *H. brasiliensis* clones. The coefficient of variation (CV) ranged from 7.26% to 45.29%. Among them, the CV of stem circumference at the seedling stage (the first year) was the largest, while that of the left vein width/leaf width ratio was the smallest. The phenotypic genetic diversity index ranged from 1.018 to 2.188, with leaf area showing the highest diversity index and the left vein width/leaf width ratio exhibiting the lowest. Among the 25 phenotypic traits, except for left vein width/leaf width, leaf vein number, midrib thickness, leaf vein angle, palisade to spongy tissue ratio, lower epidermis thickness, and cell structural looseness, which showed no significant correlation with most other traits,

收稿日期：2025-09-11

第一作者研究方向为橡胶树种质资源收集、评价及品种选育，E-mail: 512504431@qq.com
通信作者：张凤良，研究方向为橡胶树种质创新、评价及品种选育，E-mail: 278540721@qq.com
吴　裕，主要从事植物遗传育种与种质资源学研究，E-mail: hhyyw20030105@126.com

基金项目：云南省热带作物科技创新体系建设专项资金项目（RF2025）；云南省现代农业橡胶产业技术体系建设项目（2024KJTX012-02）
Foundation projects: Yunnan Special Fund for Scientific and Technology Innovation of Tropical Crop（RF2025）; Yunnan Modern Agricultural Rubber Industry Technology System Construction Project（2024KJTX012-02）

the majority of the remaining traits exhibited highly significant or significant correlations. Notably, the positive correlation coefficients between stem circumference and leaf area, leaf length, and leaf thickness all exceeded 0.8. Among the leaf anatomical structure, indicators such as leaf thickness, cuticle thickness, palisade tissue thickness, spongy tissue thickness, and upper epidermis thickness showed highly significant or significant pairwise correlations (only the correlation between palisade tissue thickness and spongy tissue thickness was not significant). Moreover, these anatomical parameters were also showed highly significant or significant correlations with most leaf morphological traits. Systematic cluster analysis classified the 57 superior clones into six distinct groups. No clear relationship was observed between the clustering results and the geographic origins of the clones. Approximately half of the clones were grouped into Group I. Groups IV and V exhibited desirable traits such as larger stem circumference and leaf area, sparse vein distribution, and greater thickness across various leaf anatomical parameters. Based on cluster analysis and principal component comprehensive evaluation, six superior clones with fast-growing and strong drought resistance were screened out, namely No. 7, 10, 33, 27, 46, and 14. By the seventh year, the stem circumference of all these clones had exceeded 52 cm. Among them, No. 7 and No. 10 were triploid clones. This study adequately demonstrates the phenotypic diversity of scattered superior tree resources in domestic rubber planting areas, providing valuable genetic materials for parental selection and targeted breeding in *H. brasiliensis* improvement.

Key words: *Hevea brasiliensis*; growth; leaf morphology; leaf anatomical structure; phenotypic diversity; comprehensive evaluation

橡胶树（*Hevea brasiliensis* Muell. Arg）原产于南美洲亚马逊流域热带雨林中，是大戟科（Euphorbiaceae）橡胶树属（*Hevea*）重要的热带经济作物之一[1]。在全球众多产胶植物中，橡胶树贡献了约 98%的天然橡胶产量，其胶乳中异戊二烯含量高达 92%～95%，是目前唯一用于大规模产业化生产天然橡胶的树种[2-3]。全球有 40 多个国家和地区种植橡胶树，东南亚是天然橡胶的主产区[3]。从 1952 年开始，我国在云南、海南、广东等地陆续建立了规模化的生产种植基地，经过 70 多年的实践证明，云南已成为我国最佳的植胶区，平均单位面积产量最高。

20 世纪 50 年代，我国引种国外数百份优良无性系进行试种，最终仅有 RRIM600、PB86、PR107 和 GT1 等 4 个无性系被推广种植[4]，引种试种选择效率极低。目前常规杂交育种仍然是橡胶树优良品种选育的主要方法，具有广泛遗传多样性的种质资源是杂交育种的基础[5-6]。然而国内可利用的种质资源却十分匮乏，加强对橡胶树优异种质资源的收集、保存和评价显得尤为重要。根据引种经验，习惯将橡胶树种质资源分为魏克汉种质资源和 81’IRRDB 种质资源两大类[7]。近几十年来，虽持续开展种质资源的收集与保存工作，但资源总量仍然匮乏。由于中国并非橡胶树的原产地，无法在本土获取野生资源，然而国内在植胶初期，因认知水平有限与管理措施滞后，部分以嫁接无性系建设的植胶区出现接穗未能成活的情况，反而保留了大量实生树。加之云南植胶区地形复杂、小气候多样，促使这些实生树在表型上发生了显著变异，形成了丰富的多样性。因此，第一代生产胶园中存在的优良实生单株，已成为一种难得且具有重要价值的种质资源。课题组经过多年调查发现，20 世纪营建的胶林中存在大量源自家系种植或嫁接苗的砧木的实生树，且分布于各类生态类型区，树龄在 30～50 年之间，已完成林木生长的发育周期，其优良性状和不良性状均得到充分表现，是极为

宝贵的育种材料。随着胶林的更新，这些材料已遭破坏或正面临破坏，2009 年至 2015 年，本课题组历时 7 年在国内首次对云南和广东植胶区超 30 万 hm^2 的第一代胶园内进行了普查，并开展了抢救性收集工作，以嫁接无性系的形式，成功保存了 57 个无性系种质资源。

虽然云南已成为我国橡胶种植的最佳植胶区域，但该地区季节性干旱问题日益加剧。近年来，云南冬春干旱持续加重，大部分植胶区的旱情在冬春季节表现得尤为显著。前人研究表明植物叶片形态特征和解剖结构最能直观反应出其对环境的长期适应特点，可作为判断植物抗旱能力的主要依据[8]。本研究以收集保存的这些种质资源为材料，建立了初级无性系比较试验测定林，系统测定了各无性系的茎围、叶片形态及解剖结构等性状。通过表型性状变异分析、遗传多样性指数分析和聚类分析等方法，进一步揭示了散生于第一代胶园中的橡胶树种质资源所蕴含的遗传多样性，并利用综合评价方法筛选出了速生、抗旱性强的无性系作为育种亲本和定向培育的优异材料。本研究可为选育速生和抗旱性强的优良品种提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为云南和广东植胶区第一代胶园内收集并保存的 57 份橡胶树优树资源，采集芽条嫁接保存在云南省景洪市云南省热带作物科学研究所橡胶树种质资源圃苗圃地内，采穗圃种植密度为株行距 1 m×1.5 m。各优树无性系原株的生长情况、采集地点及海拔高度信息详见表 1。

表 1 57 个橡胶树优树无性系原株基本信息

Table 1 Basic information for the 57 superior *H. brasiliensis* clonal original plants

编号 No.	茎围（cm） Stem circumference	枝下高（m） Crown base height	干形 Straightness	分枝角度(°) Branch angle	海拔(m) Altitude	采集地 Collection location
1	135	3.7	直	30～60	600	云南西双版纳州景洪市
2	128	3.5	直	30～60	620	云南西双版纳州景洪市
3	159	4.3	直	<30	620	云南西双版纳州景洪市
4	160	2.4	直	<30	600	云南西双版纳州景洪市
5	-	-	-	-	570	云南西双版纳州景洪市
6	-	-	-	-	680	云南西双版纳州景洪市
7	160	2.7		<30	650	云南西双版纳州景洪市
8	-	-	-	-	-	云南普洱市孟连县
9	-	-	-	-	600	云南西双版纳景洪市
10	152	2.2	直	<30	800	云南德宏州瑞丽市
11	150	2.6		30～60	-	云南临沧市永德县
12	-	-	-	-	50	广东湛江市徐闻县
13	-	-	-	-	-	云南临沧市永德县
14	-	-	-	-	70	广东湛江市徐闻县
15	150	3.1	直	30～60	55	广东湛江市徐闻县
16	-	-	-	-	50	广东湛江市徐闻县

17	150	3.9	直	30～60	45	广东湛江市徐闻县
18	-	-	-	-	685	云南西双版纳州景洪市
19	-	-	-	-	620	云南西双版纳州景洪市
20	-	-	-	-	620	云南西双版纳州景洪市
21	-	-	-	-	650	云南西双版纳州景洪市
22	-	-	-	-	650	云南西双版纳州景洪市
23	-	-	-	-	600	云南西双版纳州景洪市
24	-	-	-	-	650	云南西双版纳州景洪市
25	-	-	-	-	600	云南西双版纳州景洪市
26	113	10	直	30～60	800	云南德宏州瑞丽市
27	161	6	直	<30	780	云南德宏州瑞丽市
28	87	2.2	直	30～60	800	云南德宏州瑞丽市
29	240	2.4	稍弯	30～60	800	云南德宏州瑞丽市
30	88	2.5	-	<30	138	云南红河州河口县
31	72	2.8	-	30～60	150	云南红河州河口县
32	147	2.5	直	30～60	120	云南红河州河口县
33	106	3.5	稍弯	>60	1050	云南西双版纳州勐海县
34	131	3.5	直	<30	910	云南西双版纳州勐海县
35	170	2.5	直	30～60	928	云南西双版纳州勐海县
36	117	2.1	-	30～60	128	云南红河州河口县
37	151	2	稍弯	30～60	938	云南西双版纳州勐海县
38	143	2	直	30～60	920	云南西双版纳州勐海县
39	180	2.2	稍弯	30～60	911	云南德宏州盈江县
40	174	2.2	直	<30	900	云南德宏州盈江县
41	150	4	直	30～60	290	云南文山州马关县
42	180	4.3	直	30～60	290	云南文山州马关县
43	120	3	直	<30	210	云南文山州麻栗坡县
44	147	5	直	30～60	893	云南德宏州盈江县
45	166	3.5	直	30～60	893	云南德宏州盈江县
46	146	2.5	直	30～60	893	云南德宏州盈江县
47	128	2.5	直	30～60	128	云南红河州河口县
48	100	5.6	直	>60	973	云南德宏州瑞丽市
49	105	8	直	>60	940	云南德宏州瑞丽市
50	280	3	直	30～60	960	云南德宏州盈江县
51	115	2	直	30～60	900	云南德宏州盈江县
52	120	3	直	30～60	900	云南德宏州盈江县
53	123	2.3	直	30～60	900	云南德宏州盈江县
54	-	-	-	-	920	云南德宏州盈江县
55	-	-	-	-	950	云南西双版纳州勐海县
56	-	-	-	-	800	云南德宏州瑞丽市
57	-	-	-	-	800	云南德宏州瑞丽市

—表示数据缺失

—indicates data missing

1.2 优树无性系初级系比区试验林建设

试验地位于云南省景洪市云南省热带作物科学研究所橡胶树试验基地，海拔 550～600 m，年平均降雨量约 1200 mm，热量充足，年平均气温 21.9 ℃，土壤类型为酸性红壤，pH 值 6.0～6.5，土层深厚，适合橡胶树的正常生长。

从已建好的优树无性系的采穗圃内，采集芽条进行嫁接育苗，建立橡胶树初级无性系比较试验测定林。具体如下：以 GT1 开放授粉种子园培育砧木，于 2016 年进行嫁接育苗，2017 年 7 月进行定植移栽，株行距设置为 3 m×8 m。试验采用随机区组设计，每个小区包含 6 株，3 次重复。管理按生产性林地的常规管理模式，植株生长状况良好。

1.3 表型性状指标测定

1.3.1 茎围测定 从 2018 年到 2024 年，每年的 12 月底对参试的无性系逐株进行茎围测量，测量高度为离地 1.3 m，其中茎围指橡胶树主干一圈的周长。同步计算出连年生长量，即植株在一年茎围生长的绝对值，连年生长量=当年茎围-上一年的茎围；年均生长量=茎围/树龄。

1.3.2 叶片形态测定 2024 年 9 月，选择晴朗天气的上午 9：00～11:00 进行采样，每个无性系选择 5 株长势均匀健康的植株，采集其中上部向阳面的枝条，每根枝条选择自上而下第 2 个叶蓬进行叶样采集（密集叶除外），每株采集 10 片叶，每个无性系共计 50 片叶，对每片叶的 15 个表型性状进行测量，具体方法见表 2。

表 2 橡胶树优树无性系叶片形态指标与测量标准

Table 2 Leaf morphological indicators and measurement standards of superior *H. brasiliensis* clones

指标 Indicators	测量标准 Measurement standard	测量方法 Measuring method
叶长 LL	叶基部到叶尖的垂直距离	YMJ-D 叶面积仪
叶宽 LW	叶片最宽处的距离	YMJ-D 叶面积仪
叶面积 LA	叶片叶背的表面积	YMJ-D 叶面积仪
叶长/叶宽 LL/LW	叶长与叶宽的比值	计算
小叶柄长 PEL	叶柄端到叶基的距离	直尺
小叶柄长/叶长 PEL/LL	叶柄长与叶长的比值	计算
小叶枕长 PUL	小叶柄背部膨大部分的长度	直尺
宽基距 WBD	叶最宽处距叶基的距离	直尺
宽基距/叶长 WBD/LL	宽基距与叶长的比值	计算
脉左宽 LVW	叶最宽处左缘到主脉的距离	直尺
脉左宽/叶宽 LVW/LW	脉左宽与叶宽的比值	计算
叶脉数 LVN	到达叶边缘左右两侧叶脉总数	计数
叶脉密度 VD	每米叶脉总数	计算
主脉粗 MT	叶片中部位主脉粗度	游标卡尺
叶脉夹角 LVA	叶正面右侧主脉与叶边缘的夹角	量角器

LL: Leaf length; LW: Leaf width; LS: Leaf area; LL/LW: Leaf length/Leaf width; PEL: Petiole length; PEL/LL: Petiole length/leaf length; PUL: Pulvinus length; WBD: Wide basal distance; WBD/LL: Wide basal distance/ leaf length; LVW: Left vein width; LVW/LW: Left vein width / leaf width; LVN: Leaf vein number; VD: Vein density; MT: Midrib thickness; LVA: Leaf vein angle; The same as below.

1.3.3 叶片解剖结构测定 叶片组织解剖结构采用石蜡切片法进行观测：每个无性系制作切片 3 张，平均每张切片上有叶片横切面约 20 个，从中随机选择 8 个完整样点进行拍照观察。采用 Motic ImagesPlus 2.0 软件对叶片厚度、角质层厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、栅栏

组织厚度及海绵组织厚度等参数进行测量。根据测量结果按以下公式计算叶片栅海比、叶片细胞结构紧密度和细胞结构疏松度[9]：

栅海比=栅栏组织厚度/海绵组织厚度　　（1）

细胞结构紧密度=栅栏组织厚度/叶片厚度×100%　　（2）

细胞结构疏松度=海绵组织厚度/叶片厚度×100%　　（3）

1.4 数据处理与分析

表型性状变异特征值：统计优树群体各性状的最小值、最大值、极差、相对极差、均值、标准差、变异系数。用变异系数表示表型性状的离散程度，用相对极差表示极端差异程度，其中极差=最大值−最小值，相对极差=极差/平均值。

利用 Execl 2010 软件对数据进行录入和数据整理，采用 Shannon-Weaver 信息指数来衡量群体表型遗传多样性（*H′*，Shannon-wiener diversity index）大小[10]。本研究涉及到的性状均为数量性状，根据平均值（*x*）、标准差（*s*）将供试材料分为 10 级，从第 1 级 X_1＜（*x*-2*s*）到第 10 级 X_{10}≥（*x*+2*s*），每 0.5s 为 1 级，使用每一组的相对频率（Pi）用于计算多样性指数（*H′*）；计算公式为：

$$H'=-\sum \mathrm{Pi}\ln \mathrm{Pi} \qquad (4)$$

其中 Pi 为某一性状在第 i 个级别出现的频率，ln 为自然对数。

采用 OriginPro 2025 软件对数据进行相关性分析及聚类分析；利用 SPSS20.0 软件分别进行单因素方差分析和主成分分析。主成分分析法具体参照侯献飞等[11]的方法进行，具体为使用隶属函数值将表型数据标准化：*Zij*=(*Xij*-*Ximin*)/ (*Ximax*-*Ximin*) ，其中 *Xij* 为第 i 个无性系第 j 个指标的测定值，*Ximax* 和 *Ximin* 分别为全部无性系第 j 项指标的最大值和最小值。利用 SPSS20.0 软件将每份种质资源的各个标准化表型数据与相应主成分因子系数进行乘积和运算，获得每份种质资源各个主成分的得分（F_n），再将其与主成分因子的贡献率权重 V_n 进行乘积和运算，最终获得每份种质资源的综合得分（F 值），即 $F=V_1F_1+V_2F_2+...+V_nF_n$。

2 结果与分析

2.1 橡胶树优树无性系原株差异分析

所收集保存的优树无性系原株大多数茎围都超过 120 cm，范围为 72～280 cm；枝下高大多在 2～3 m，范围为 2～10 m；主干大多都保持了橡胶树的通直特性，少数略弯曲；侧枝分枝角大多居中在 30°～60°，变化程度可以从紧贴树干生长至垂直树干生长，少数下垂。从资源分布区来看，云南西双版纳州（景洪县和勐海县）和云南德宏州（瑞丽市和盈江县）各收集资源 22 份、19 份，占比达 71.93%；云南红河州河口县和广东湛江市徐闻县各收集到 5 份，占比达 17.54%；云南普洱市（孟连县）、临沧市（永德县）和文山州（马关县、麻栗坡县）等植胶区零星收集到一些，这些区域植胶面积相对较小，优树资源存在的比例就相对更少（表 1）。

2.2 橡胶树优树无性系表型性状遗传变异分析

2.2.1 优树无性系茎围性状变异分析 对参试优树无性系的茎围差异进行了分析（表 3），结果表明，从第 1 年到第 7 年无性系间差异均达到了极显著水平，变异系数随着树龄的增加呈下降趋势，范围为 13.65%～45.29%，第 1 年变异系数最大，对应的相对极差也最大，第 7 年变异系数最小，相对极差也最小，故对生长量的选择应充分考虑树龄的影响。7 年间茎围的遗传多样性指数较接近，范围为 1.432～1.666，多样性丰富程度处于中等水平。

由橡胶树优树无性系年度茎围变化曲线图可以看出，从第 2 年开始到第 5 年林木保持一个较快的生长速度，连年生长量每年逐渐增大，第 5 年时达到最大值，为 8.31 cm，从第 6 年开始逐渐下降。年均生长量到第 6 年时到达最大值，为 7.02 cm，3 条生长量曲线相交于第 6 年与第 7 年之间，相交后连年生长量低于年均生长量（图 1）。

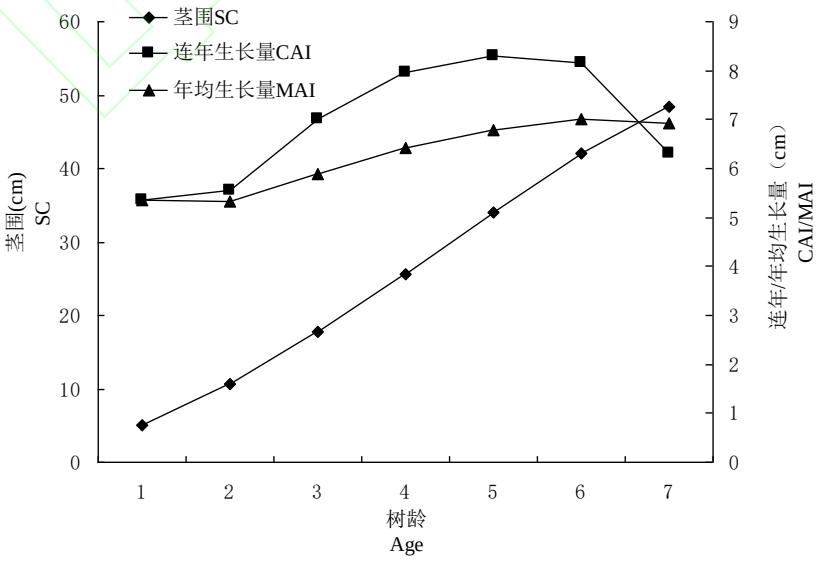
表 3 茎围变异情况和遗传多样性分析

Table 3 Analysis of variation and genetic diversity of stem circumference

年份(树龄) Year (age)	最小值 (cm) Min	最大值 (cm) Max	极差(cm) Range	相对极差 (%) Relative range	平均值 (cm) Mean	标准差 *SD*	变异系数 (%)*CV*	遗传多样性指数 *H′*
2018（1）	3.25	9.28	6.03	118.24	5.10**	2.31	45.29	1.432
2019（2）	7.30	15.53	8.23	77.24	10.66**	2.82	26.46	1.655
2020（3）	13.40	25.69	12.29	65.85	17.66**	4.38	23.48	1.559
2021（4）	15.96	35.40	19.44	75.83	25.64**	4.89	19.09	1.635
2022（5）	23.46	44.93	21.47	63.25	33.94**	5.65	16.64	1.666
2023（6）	31.94	52.07	20.13	47.81	42.10**	6.22	14.78	1.594
2024（7）	36.68	58.12	21.44	44.30	48.40**	6.61	13.65	1.637

**表示处理间在 *P*<0.01 水平上存在极显著差异；下同

** indicates that there is a highly significant difference between the treatments at the *P*<0.01 level; The same as below



SC: Stem circumference; CAI: Current annual increment; MAI: Mean annual increment

图 1 橡胶树优树无性系茎围变化曲线图

Fig. 1 The variation of stem circumference of superior *H. brasiliensis* clones

2.2.2 优树无性系叶片形态特征变异分析　15 个叶片形态特征的变异分析结果表明（表 4），参试无性系间各性状差异均达到了极显著水平，变异系数范围为 7.26%～45.10%。其中，叶脉数（45.10%）、小叶枕长（37.38%）、小叶柄长（37.09%）、主脉粗（36.14%）、小叶柄长/叶长（32.67%）和叶面积（26.72%）表现出丰富的变异，具有较大的遗传改良潜力，可通过定向选择进行改良。而脉左宽/叶宽（7.26%）和叶脉夹角（9.25%）变异程度较低，遗传潜力较小，在不同基因型中较稳定。一般地，相对极差越大，离散程度越高，越不稳定，其中小叶枕长、小叶柄长、小叶柄长/叶长和叶面积对应的相对极差均较大，进一步说明了这几个性状离散程度高，变异丰富。

15 个叶片形态形状遗传多样性指数范围为 1.018～2.188，平均值为 1.664，其中叶面积的遗传多样性指数最大，其次叶脉密度、小叶柄长/叶长和叶长/叶宽等性状遗传多样性指数均较大，表现出了较丰富的表型遗传多样性。

表 4 15 个叶片形态性状的变异情况及遗传多样性分析

Table 4 Analysis of variation and genetic diversity of 15 leaf morphological traits

性状 Traits	最小值 Min	最大值 Max	极差 Range	相对极差(%) Relative range	平均值 Mean	变异系数 (%)*CV*	遗传多样性指数 *H′*
叶长（cm）LL	10.34	20.44	10.10	64.37	15.69±2.81**	17.90	1.779
叶宽（cm）LW	6.53	9.47	2.94	37.93	7.75±0.90**	11.67	1.705
叶面积（cm^2）LA	54.30	116.00	61.70	72.50	85.10±22.74**	26.72	2.188
叶长/叶宽 LL/LW	1.33	2.72	1.39	68.41	2.03±0.36**	17.70	1.868
小叶柄长（cm）PEL	0.56	1.90	1.34	124.94	1.07±0.40**	37.09	1.796
小叶柄长/叶长 PEL/LL	0.037	0.117	0.080	117.45	0.068±0.022**	32.67	1.875
小叶枕长（cm）PUL	0.50	2.08	1.58	190.09	0.833±0.311**	37.38	1.710
宽基距（cm）WBD	10.18	13.80	3.62	30.86	11.73±1.34**	11.39	1.674
宽基距/叶长 WBD/LL	0.66	1.10	0.45	58.34	0.764±0.127**	16.64	1.572
脉左宽（cm）LVW	3.22	4.59	1.37	35.76	3.83±0.51**	13.41	1.612
脉左宽/叶宽 LVW/LW	0.46	0.54	0.09	17.60	0.494±0.036**	7.26	1.018
叶脉数 LVN	16.20	24.70	8.50	41.61	20.43±9.21**	45.10	1.331
主脉粗（mm）VD	1.25	1.71	0.46	31.97	1.44±0.52**	36.14	1.186
叶脉密度（条/m）MT	98.17	200.71	102.54	77.87	131.67±26.36**	20.02	1.927
叶脉夹角（°）LVA	48.85	67.25	18.40	31.18	59.01±5.46**	9.25	1.713

2.2.3 优树无性系解剖结构变异分析　9 个叶片解剖结构性状的变异分析结果表明（表 5），各指标在无性系间差异均达到了极显著水平，变异系数范围为 10.42%～38.91%，其中下表皮厚度变异系数最高，其次叶片厚度、角质层厚度和栅海比的变异系数也较大，均超过了 20%；细胞结构紧密度和结构疏松度两个指标的变异系数较小，低于 15%。

9 个叶片解剖结构性状的表型遗传多样性指数范围为 1.261～1.957，平均值为 1.819。其

中，只有下表皮厚度遗传多样性指数较小，说明下表皮厚度分布相对集中；其他性状的遗传多样性指数均较大，表明这些性状具有较高的遗传多样性，分布相对分散。

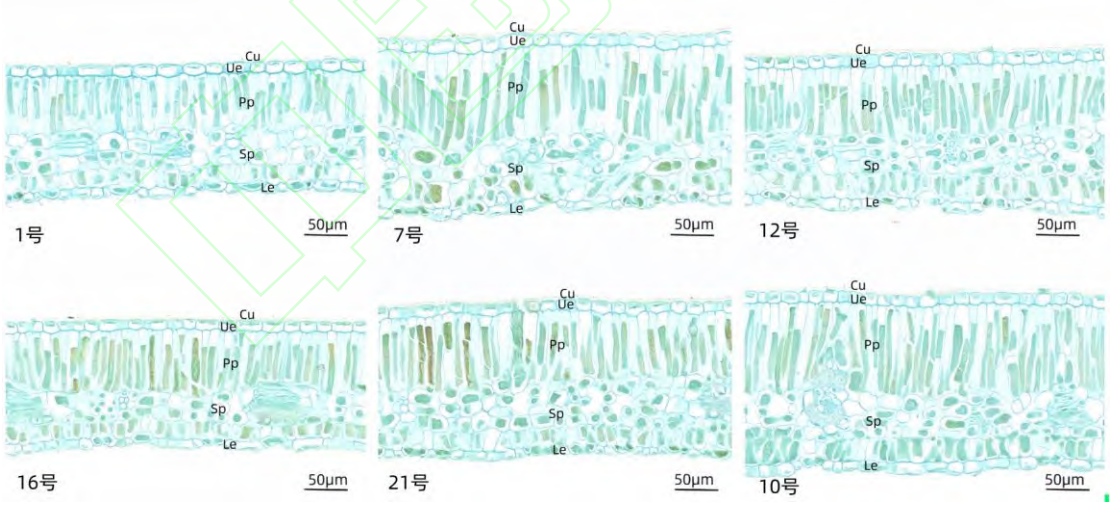
叶肉组织结构显微结构（图 2）显示，橡胶树优树无性系的叶片上表面和下表面内部结构差异较大，表现为异面叶。上表面栅栏组织由柱状细胞组成，排列整齐而紧密，下表面海绵组织由不规则椭球状细胞构成，排列疏松。

表 5　9 个叶片解剖结构性状的变异情况及遗传多样性分析

Table 5 Analysis of variation and genetic diversity of 15 leaf anatomical structure traits

性状 Traits	最小值 Min	最大值 Max	极差 Range	相对极差(%) Relative range	平均值 Mean	变异系数(%) *CV*	遗传多样性指数 *H'*
叶片厚度（μm）TL	137.42	236.40	98.98	53.39	185.37±38.22**	20.62	1.860
角质层厚度（μm）TEC	2.61	5.21	2.60	68.44	3.80±0.81**	21.39	1.898
栅栏组织厚度（μm）TP	58.02	120.60	62.58	73.94	84.64±16.33**	19.29	1.875
海绵组织厚度（μm）TS	48.92	83.50	34.58	49.16	70.34±11.77**	16.73	1.909
栅海比 TP/TS	0.82	1.78	0.96	78.29	1.23±0.27**	21.97	1.822
上表皮厚度（μm）TUE	9.50	17.76	8.26	55.74	14.82±2.39**	16.10	1.957
下表皮厚度（μm）TLE	8.73	25.34	16.61	137.54	12.08±4.70**	38.91	1.261
细胞结构紧密度（%）CTR	36.6	54.2	17.6	38.74	45.00±5.01**	10.42	1.932
细胞结构疏松度（%）SR	30.6	45.4	14.8	38.97	38.02±4.23**	11.49	1.854

TL: Leaf thickness; TEC: Thickness of cuticle; TP: Thickness of palisade parenchyma; TS: Thickness of spongy parenchyma; TP/TS: Thickness of palisade parenchyma/ thickness of spongy parenchyma; TUE: Thickness of upper epidermis; TLE: Thickness of lower epidermis; CTR: Cell tightness ratio; SR: Spongy ratio; The same as below



Cu：角质层；Ue：上表皮；Pp：栅栏组织；Sp：海绵组织；Le：下表皮；编号同表 1；下同

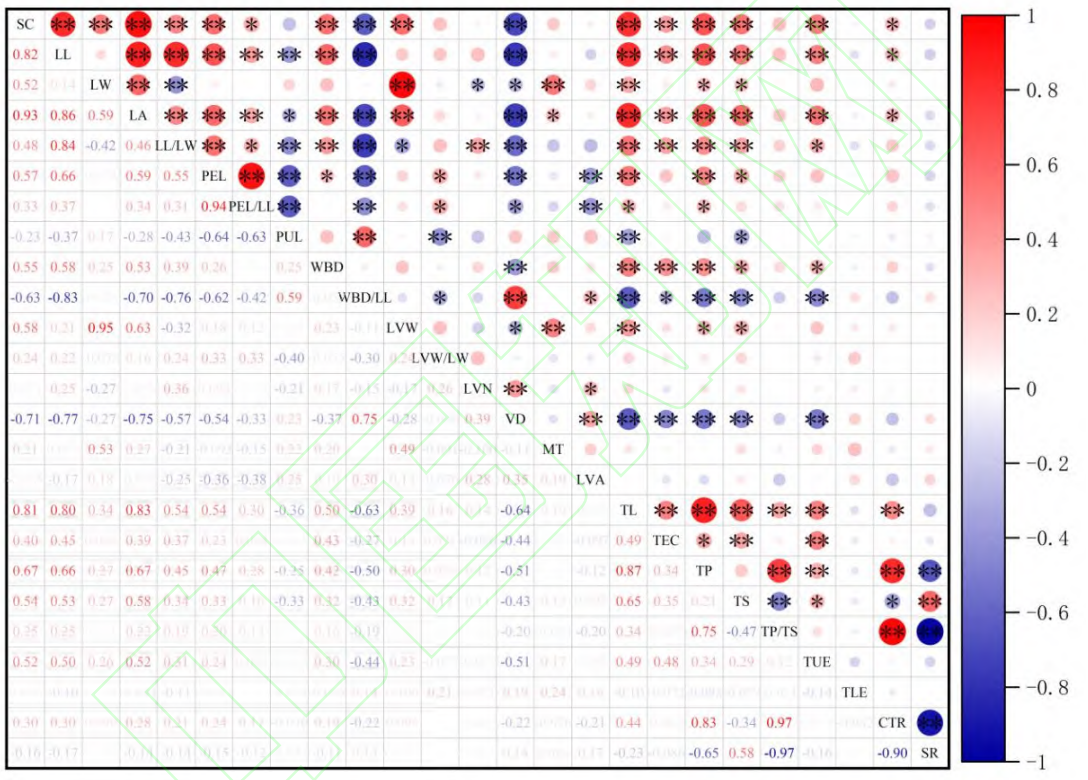
Cu: Cuticle; Ue: Upper epidermis; Pp: Palisade parenchyma: Sp: Spongy parenchyma; Le: Lower epidermis; No. are the same as in table 1; The same as below

图 2　光学显微镜下橡胶树部分优树叶片解剖结构

Fig. 2 The anatomical structure of the leaves of some superior *H. brasiliensis* clones under an optical microscope

2.3　各性状相关性分析

橡胶树优树无性系表型性状间相关性分析结果见图 3，结果显示，25 个表型性状间大部分性状达到极显著或显著水平。第 7 年茎围（SC）与绝大多数性状均达到了极显著或显著相关；叶长（LL）、叶面积(LA)、叶长/叶宽（LL/LW）及小叶柄长（PEL）等性状间两两相关性极显著；叶脉密度（VD）仅与小叶枕长（PUL）、脉左宽/叶宽（LVW/LW）、主脉粗（MT）、栅海比（TP/TS）、下表皮厚度（TLE）、细胞结构紧密度（CTR）及细胞结构疏松度（SR）相关性不显著，与其他性状极显著或显著相关。叶片厚度（TL）、栅栏组织厚度（TP）和海绵组织厚度（TS）等 3 个性状与绝大多数性状间呈极显著或显著相关。脉左宽/叶宽（LVW/LW）、叶脉数（LVN）、主脉粗(MT)、叶脉夹角(LVA)、栅海比（TP/TS）、细胞结构紧密度（CTR）和细胞结构疏松度(SR)与绝大多数性状间相关性均不显著。



*和**分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关

*and**means significant correlation at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively

图 3　25 个表型性状的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of 25 phenotypic traits

2.4 聚类分析

基于第 7 年茎围、叶片形态及解剖结构等 25 个表型性状对参试的优树无性系进行系统聚类分析，采用欧式距离度量结合组间最大距离连接法，将 57 个无性系划分成了 6 个类群（图 4）。第Ⅰ类群包含 29 个无性系，主要特征为大多数性状都处于中等水平，收集地分别为云南西双版纳州景洪（11 份）和勐海县（4 份）、云南德宏州瑞丽市（4 份）和盈江县（3 份）、云南红河州河口（1 份）、云南文山州马关县（1 份）和麻栗坡县（1 份）、云南临沧市永德县（1 份）及广东湛江市徐闻县（3 份）。第Ⅱ类群包含 3 个无性系，该类群特

征主要表现为小叶柄较长、小叶柄/叶长较大、叶脉数较少、叶片细胞结构疏松度较大，其余绝大多数性状处于中等水平，收集地分别为云南临沧市永德县（1 份）、云南红河州河口县（1 份）和云南西双版纳州勐海县（1 份）。第Ⅲ类群包含 14 个无性系，主要表现为茎围较小、叶面积较小、小叶柄较短、叶宽较窄、叶片厚度较薄和栅海比较小等特点，收集地分别为云南德宏州瑞丽市（2 份）和盈江县（3 份）、云南西双版纳州景洪市（3 份）、云南红河州河口县（4 份）、云南普洱市孟连县（1 份）及广东湛江市徐闻县（1 份）。第Ⅳ类群包含 2 个无性系，该类群具有茎围最大、叶面积最大、叶片和小叶柄最长、宽基距和脉左宽最大、小叶枕较短、叶脉数最多但叶脉分布较稀疏、叶脉夹角最大、叶片厚度、栅栏组织厚度及海绵组织厚度最厚、栅海比较大、上表皮最厚等特点，收集地为云南西双版纳州景洪县（1 份）和德宏州瑞丽市（1 份）。第Ⅴ类群包含 5 个无性系，该类群主要特征为茎围较大、叶面积较大、小叶枕较短、叶脉分布较稀疏、叶片厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度较厚等，收集地为云南德宏州瑞丽市（1 份）和盈江县（1 份）、云南西双版纳州勐海县（1 份）、云南红河州河口县（1 份）及广东湛江市徐闻县（1 份）。第Ⅵ类群包含 4 个无性系，该类群具有该类群主要表现为茎围最小、叶面积最小、小叶柄最短、小叶枕最长、宽基距和脉左宽均最小、叶脉分布最紧密、叶片厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度最薄、栅海比最小、上表皮细胞最薄等特点，收集地为云南西双版纳州景洪市（1 份）、云南德宏州瑞丽（1 份）和盈江县（1 份）、云南文山州马关县（1 份）。

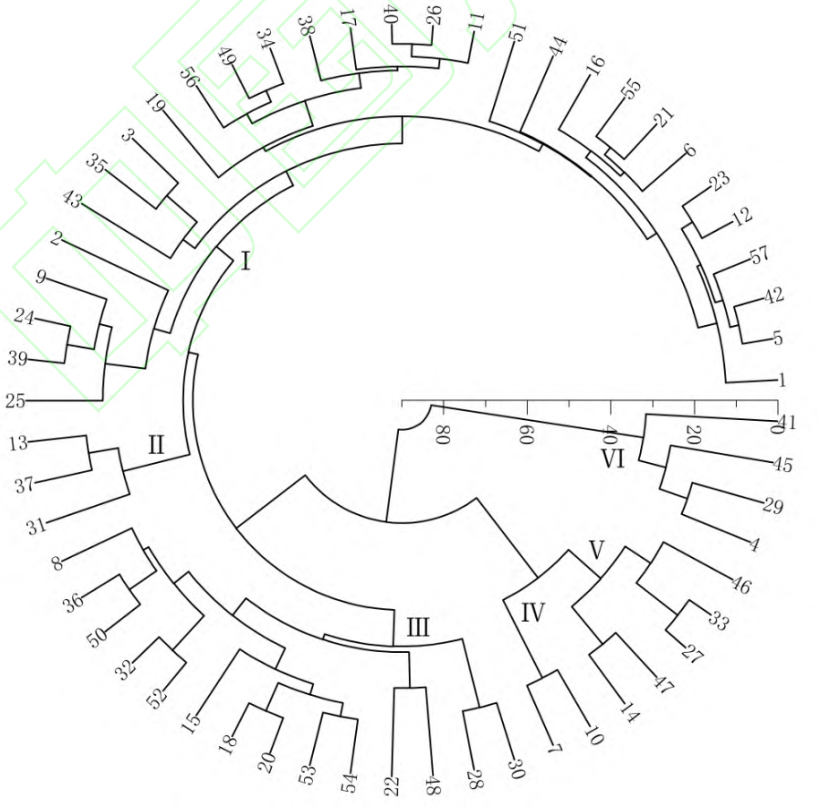


图 4 57 个橡胶树优树无性系聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis of 57 superior *H. brasiliensis* clones

2.5 基于茎围、叶片形态及解剖结构性状的抗旱性综合评价

叶片作为应对环境变化较敏感的器官，其形态特征和解剖结构可以反映植物在干旱环境下的适应能力[9]，本研究利用叶片形态性状及解剖结构性状，结合第 7 年茎围性状利用主成分分析对 57 个橡胶树无性系的抗旱性进行综合分析，筛选出速生、抗旱的优异种质。

对橡胶树 57 个优树无性系的表型性状进行了主成分分析（表 6），根据特征值大于 1，提取到 6 个主成分，其特征值分别为 8.595、3.577、3.304、2.030、1.780 和 1.051；贡献率分别为 34.38%、14.3%、13.22%、8.12%、7.12%和 4.21%，累计贡献率达到 81.35%，表明 6 个主成分可代表全部数据的绝大部分信息。第 1 主成分中茎围、叶长、叶面积、叶脉密度、叶片厚度和栅栏组织厚度的特征向量较大，反映了植株茎围增粗、叶片大小发育程度、叶脉分布稀疏程度及叶肉组织的排列紧密度。第 2 主成分中叶宽、脉左宽、海绵组织厚度、栅海比和细胞结构疏松度的特征向量较大，反映了叶片中脉结构对称性和下表面叶肉组织功能的综合指标。第 3 主成分中叶宽、小叶枕长和栅海比的特征向量较大，反映了叶片宽向生长、小叶枕形态和叶肉组织结构比例的综合表现。第 4 主成分中小叶柄长/叶长和宽基距的特征向量绝对值较大，指示叶片形状的重要指标。第 5 主成分中叶脉数、叶脉夹角的特征向量较大，是叶脉分布形态的综合反映。第 6 主成分下表皮厚度的特征向量较大，说明第 6 主成分代表部分表皮层的结构。

表 6 各性状的主成分载荷和贡献率

Table 6 Factor loading matrix and contribution rates of principal components for each trait

性状 Traits	主成分 Principle factor					
	1	2	3	4	5	6
茎围 SC	0.893	0.251	0.121	-0.042	0.085	0.036
叶长 LL	0.932	0.023	-0.161	0.217	0.077	0.042
叶宽 LW	0.326	0.590	0.584	-0.373	-0.054	-0.163
叶面积 LA	0.918	0.293	0.118	-0.056	0.028	-0.084
叶长/叶宽 LL/LW	0.672	-0.292	-0.472	0.407	0.081	0.133
小叶柄长 PEL	0.737	-0.160	-0.360	-0.350	-0.047	0.103
小叶柄长/叶长 PEL/LL	0.497	-0.220	-0.376	-0.538	-0.108	0.112
小叶枕长 PUL	-0.420	0.213	0.602	0.419	-0.104	0.221
宽基距 WBD	0.516	0.210	0.242	0.440	0.168	0.267
宽基距/叶长 WBD/LL	-0.794	0.100	0.352	0.019	0.088	0.124
脉左宽 LVW	0.402	0.561	0.460	-0.394	0.073	-0.083
脉左宽/叶宽 LVW/LW	0.258	-0.041	-0.344	-0.392	0.391	0.224
叶脉数 LVN	0.092	-0.146	-0.266	0.231	0.812	-0.164
叶脉密度 VD	-0.801	-0.100	0.030	-0.063	0.479	-0.087
主脉粗 MT	0.103	0.515	0.406	-0.139	0.094	0.229
叶脉夹角 LVA	-0.215	0.392	0.217	0.222	0.568	-0.209
叶片厚度 TL	0.903	0.086	0.079	0.108	0.125	-0.168
角质层厚度 TEC	0.489	0.154	0.027	0.395	-0.180	0.381
栅栏组织厚度 TP	0.808	-0.315	0.358	0.030	0.142	-0.143

海绵组织厚度 TS	0.514	0.629	-0.392	0.117	0.062	-0.190
栅海比 TP/TS	0.393	-0.707	0.574	-0.044	0.065	-0.010
上表皮厚度 TUE	0.548	0.214	0.120	0.301	-0.190	0.013
下表皮厚度 TLE	-0.097	0.108	0.045	-0.311	0.440	0.640
细胞结构紧密度 CTR	0.450	-0.670	0.538	-0.074	0.101	-0.081
细胞结构疏松度 SR	-0.307	0.723	-0.577	0.034	-0.040	-0.058
特征值 Eigenvalue	8.595	3.577	3.304	2.030	1.780	1.051
贡献率（%）Contribution rate	34.38	14.31	13.22	8.12	7.12	4.21
累计贡献率（%）Cumulative contribution rate	34.38	48.69	61.90	70.02	77.14	81.35

结合6个主成分中每个指标所对应的特征向量作为权重，构建6个主成分的函数表达式，随后以每个主成分因子的贡献率作为权重建立主成分综合模型[11]，即$F=0.344F_1+0.143F_2+0.132F_3+0.081F_4+0.071F_5+0.042F_6$。根据F值对57个橡胶树优树无性系进行表型性状综合评价，得分越高，表明该种质速生、抗旱性越强。从表7可知，综合得分F值大于2的无性系有8个，从高到底依次为：7号、10号、33号、27号、46号、14号、2号及9号。综合得分前6名均来自聚类结果的第Ⅳ类群和第Ⅴ类群，属于茎围和叶面积较大、叶脉分布较稀疏、叶片厚度、栅栏组织厚度及海绵组织厚度最厚、栅海比较大、上表皮最厚类型。

表7　57个橡胶树优树无性系综合得分及排名

Table 7 Comprehensive scores and rankings of 57 superior *H. brasiliensis* clones

编号 No.	F值 F value	得分排序 Score ranking	编号 No.	F值 F value	得分排序 Score ranking	编号 No.	F值 F value	得分排序 Score ranking
7	4.528	1	51	0.102	20	56	-1.222	39
10	4.107	2	17	0.072	21	34	-1.240	40
33	2.886	3	23	0.032	22	49	-1.318	41
27	2.755	4	5	0.027	23	18	-1.754	42
46	2.616	5	6	0.033	24	48	-1.850	43
14	2.502	6	3	-0.025	25	15	-1.863	44
2	2.377	7	44	-0.062	26	52	-1.971	45
9	2.306	8	12	-0.197	27	36	-1.986	46
47	1.713	9	21	-0.504	28	8	-2.015	47
13	1.437	10	1	-0.603	29	20	-2.022	48
37	1.257	11	42	-0.610	30	32	-2.151	49
25	1.251	12	38	-0.637	31	50	-2.685	50
39	1.161	13	53	-0.707	32	28	-2.983	51
31	0.828	14	43	-0.877	33	30	-2.986	52
24	0.740	15	40	-0.879	34	22	-3.397	53
35	0.567	16	55	-0.990	35	45	-3.744	54
19	0.389	17	26	-1.031	36	29	-4.615	55
16	0.245	18	54	-1.121	37	4	-4.742	56
57	0.106	19	11	-1.194	38	41	-5.425	57

3 讨论

橡胶树种质资源是橡胶科技创新和天然橡胶产业发展的基础，对促进我国橡胶树新品种选育种研究和热区农业经济发展起着重要的支撑作用[12]。因此，加强对橡胶树优异种质资源的收集、保存和评价显得尤为重要。为了加快橡胶树育种进程，课题组从国内第一代胶园中进行实生优良单株选择，收集地海拔范围为 45～1050 m，所收集的资源所处环境差异较大，优树无性系原株茎围最小的为 72 cm，最大的为 280 cm，参试的无性系茎围与其原株茎围间相关性不显著（P=0.779，R=0.051），引起这一现象的原因主要是优树无性系原株间树龄以及采集地环境相差较大带来的，故对收集保存的优树资源在环境相一致的条件下建立无性系测定林，再利用无性系测定林进行种质资源鉴定才具有科学意义。这些优树资源表现出了丰富的可利用的表型遗传多样性，本研究对其表型多样性进行深入分析，有利于进一步挖掘有利基因加以利用。

3.1 橡胶树优树无性系的表型多样性分析

研究种质资源的遗传多样性可以辅助了解其遗传信息及变异程度，为育种和遗传改良奠定基础[13]。而表型性状受基因型和环境共同作用，表型多样性分析是研究作物遗传多样性的重要手段[14]。对橡胶树资源的表型多样性分析评价，可以了解橡胶树种质资源不同表型性状间的遗传差异，从而更高效的筛选出综合性状优异的种质。

变异系数和遗传多样性指数是评价种质资源表型遗传多样性的重要指标。表型性状的变异系数越大，其离散程度就越大[15]。本研究中，所测定的茎围、叶片形态及解剖结构等 25 个表型性状在无性系间差异均达到了极显著水平。前人研究表明橡胶树不同无性系间解剖结构存在极显著或显著差异[16-17]，本研究与之相一致。吕伟等[18]认为当某一性状变异系数大于 10%时参试样本间差异较大，本研究中 25 个表型性状的变异系数在 7.26%~45.29%之间，平均为 21.58%，各性状间存在明显差异，除脉左宽/叶宽和叶脉夹角变异系数低于 10%外，其余均大于 10%，说明参试无性系的绝大多数表型性状变异较丰富。其中，苗期（第 1 年）茎围（45.29%）、叶脉数（45.10%）、下表皮厚度（38.91%）、小叶柄长（37.09%）、小叶枕长（37.38%）、主脉粗（36.14%）、小叶柄长/叶长（32.67%）和叶面积（26.72%）的变异系数较大，说明这些性状变异度丰富，与前人研究结果基本相一致[19-20]。表型遗传多样性指数能较好的评价种质资源的遗传多样性，即遗传多样性指数越高，表明性状多样性程度越丰富[21]。参试无性系的表型性状遗传多样性指数（H′）范围为 1.018~2.188，平均为 1.697，其中叶面积（2.188）、上表皮厚度（1.957）、细胞结构紧密度（1.932）、叶脉密度（1.927）和海绵组织厚度（1.909）的表型遗传多样性指数较大，说明这些性状数值分布范围较广，在性状选择上可利用度更高；脉左宽/叶宽（1.018）、主脉粗（1.186）、下表皮厚度（1.261）、叶脉数（1.331）和苗期（第 1 年）茎围（1.432）的遗传多样性指数较小。值得注意的是，所测定性状的遗传多样性指数与变异系数之间相关性不显著（P=0.169，R=－0.254），这与

马天天等[22]和李赢等[23]的研究结果相一致。本研究中茎围在不同年份间的遗传多样性指数处于中等偏下水平，略小于课题组前期研究的橡胶树魏克汉种质资源的遗传多样性指数[24]。

3.2 橡胶树优树无性系表型性状相关性分析和聚类分析

相关性分析和聚类分析在种质资源鉴定评价中被广泛应用[25]。表型性状间的相关性分析可评估次要性状对主要性状遗传增益的影响，为育种中多个性状的有效选择提供理论参考。对 57 个橡胶树无性系的 25 个数量性状进行了相关性分析，研究结果表明，除脉左宽/叶宽（LVW/LW）、叶脉数（LVN）、主脉粗(MT)、叶脉夹角(LVA)、栅海比（TP/TS）、细胞结构紧密度（CTR）和细胞结构疏松度(SR)与绝大多数性状间相关性不显著外，其余性状间大部分达到极显著或显著水平。其中，第 7 年茎围与绝大多数性状间呈极显著或显著相关，且与叶面积、叶长及叶片厚度的正相关系数均超过了 0.8，相关性极强。叶片解剖结构性状中，除栅栏组织厚度和海绵组织厚度相关性不显著外，叶片厚度、角质层厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和上表皮厚度等两两间均呈极显著或显著相关，且与绝大多叶片形态参数间呈极显著或显著相关，这与前人在杨树[26]和猕猴桃[27]上做的结果相一致。

聚类分析是研究作物种质资源的亲缘关系及距离分布远近的重要方法，可以直观反映种质资源个体间相关性的远近[28]。本研究通过系统聚类分析将 57 个优树无性系资源划分为 6 个类群。研究结果表明，第Ⅳ类群和第Ⅴ类群的主要特征相似，表现为茎围和叶面积较大、叶脉分布较稀疏，叶片厚度、栅栏组织厚度及海绵组织厚度值均偏大；第Ⅲ类群和第Ⅵ类群主要特征较为相似，表现为茎围和叶面积小、小叶柄短、叶片厚度较薄和栅海比较小。值得注意的是，同一采集地的优树无性系被分别聚在了不同的类群，如来自云南西双版纳州景洪市的被聚在了 4 个类群中，来自云南德宏州瑞丽市的被聚在了 5 个类群中，来自云南德宏州盈江县的被聚在了 4 个类群中，来自云南红河州河口县的被聚在了 3 个类群中，来自广东湛江市徐闻县的被聚在了 3 个类群中，表明系统聚类结果与资源收集地的来源无明显关系。

3.3 橡胶树优树无性系抗旱性综合评价

当测试的指标参数过多时，往往需要采用主成分分析将多个变量降维为少数相关性不强的综合指标，以便更好地描述总变异构成特征[29]。本研究中对 57 个优树无性系的 25 个表型性状主成分分析表明，前 6 个主成分的累计贡献率达到了 81.35%，充分说明这 6 个综合指标可代表全部性状绝大部分的信息。其中，第 1 主成分可以作为植株茎围增粗、叶片大小发育、叶脉分布稀疏程度及叶肉组织的排列紧密度的综合反映；第 2 主成分作为叶片中脉结构对称性和下表面叶肉组织功能的综合反映；第 3 主成分作为叶片宽向生长、小叶枕形态和叶肉组织结构比例的综合表现；第 4 主成分是指示叶片形状的重要指标；第 5 主成分是叶脉分布形态的综合反映；第 6 主成分综合反映了叶片表皮层的结构。综合分析得出，植株的茎围、叶长、叶面积、叶脉密度、小叶枕长、小叶柄长/叶长、叶脉数、叶片厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度等载荷值较高的性状对橡胶树优树无性系的生长、叶片形态及解剖结构表型性状差异有较大的贡献。

本研究通过计算 F 值对参试的橡胶树优树无性系进行了综合排序，分值越高代表种质材料抗旱性越强，F 值最高的来自云南西双版纳州景洪市收集的 7 号无性系，其次是 10 号无性系，7 号和 10 号是三倍体无性系，表现出茎围和叶片均较大、叶脉分布稀朗、叶片厚度和叶肉组织厚度均较厚等特点，这些性状有助于植物更好的适应干旱环境。F 值大于 2 的无性系有 8 个，分别来自云南西双版纳州景洪市（3 份）和勐海县（1 份）、云南德宏州瑞丽市（3 份）和盈江县（1 份），这些无性系具有较强的抗旱能力。

橡胶树表型多样性研究一直是种质筛选最基本、最直接、最可靠的研究方法，在种质鉴定评价方面发挥着重要的作用[11]。通过对橡胶树的表型特征进行系统的鉴定评价和分类管理，可以更好的了解和利用这些资源的遗传多样性和稳定性。本研究结果表明，国内第一代胶园内收集到的优树无性系茎围、叶片形态和解剖结构等表型遗传多样性较丰富，研究结果可为后续橡胶树速生、抗旱性强种质资源的收集、保护和利用提供科学依据和信息支持。

参考文献

[1] Zou Z, Liu J T, Yang L F, Xie G S. Survey of the rubber tree genome reveals a high number of cysteine protease-encoding genes homolo-gous to *Arabidopsis* SAG12. PLoS ONE, 2017, 12(2): e0171725

[2] Tangphatsornruang S, Uthaipaisanwong P, Sangsrakru D, Chanprasert J, Yoocha T, Jomchai N, Tragoonrung S. Characterization of the complete chloroplast genome of *Hevea brasiliensis* reveals genome rearrangement, RNA editing sites and phylogenetic relationships. Gene, 2011, 475(2): 104-112

[3] R S J, Duangjai S, Panthita R A, Chutima S, Pichahpuk U, Thippawan Y, Supannee P, Kanikar T, Somvong T, Sithichoke T. Assembly and analysis of a male sterile rubber tree mitochondrial genome reveals DNA rearrangement events and a novel transcript. BMC Plant Biology, 2014, 14(1): 45

[4] 罗仲全, 肖桂秀. 云南垦区橡胶树优良品种推荐方案及新品种简介. 热带农业科技, 2003, 26(4): 15-19
Luo Z Q, Xiao G X. The brief introduction on new varietiesand the recommendation project on promising varietyof *Hevea* in Yunnan. Tropical Agricultural Science & Technology, 2003, 26(4): 15-19

[5] 程西永, 陈平, 许海霞, 詹克慧, 董中东, 王勋, 崔党群. 不同国家小麦种质资源遗传多样性研究. 麦类作物学报, 2009, 29(5): 803-808
Chen X Y, Chen P, Xu H X, Zhan K H, Dong Z D, Wang X, Cui D Q. Genetic diversity of wheat germplasm from different countries. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(5): 803-808

[6] 黎裕, 王建康, 邱丽娟, 马有志, 李新海, 万建民. 中国作物分子育种现状与发展前景. 作物学报, 2010, 36(9): 1425-1430
Ni Y, Wang J K, Qiu L J, Ma Y Z, Li X H, Wan J M. Crop molecular breeding in China: current status and perspectives. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(9): 1425-1430

[7] 毛常丽, 吴裕, 张凤良, 倪书邦. 云南保存橡胶树魏克汉种质资源亲子谱系分析. 植物遗传资源学报, 2015, 16(6): 1206-1213
Mao C L, Wu Y, Zhang F L, Ni S B. Pedigree analysis of Wackham germplasm resources of *Hevea brasiliensis* in Yunnan province. Journal of Plant Genetic Resources, 2015, 16(6): 1206-1213

[8] Muntoreanu T G, Dasilva C R, Melo-de-pinna G F. Comparative leaf anatomy and morphology of some neotropical Rutaceae: *Pilocarpus* Vahl and related genera. Plant Systematics and Evolution, 2011, 296(1): 87-99

[9] 王爽, 侯毅兴, 冯琳骄, 卢倩倩, 周龙. 干旱胁迫对鲜食葡萄叶片解剖结构的影响. 中国农业科技导报, 2023, 25(6): 40-49
Wang S, Hou Y X, Feng L J, Lu Q Q, Zhou L. Effect of drought stress on anatomical structure of leaves in table grape varieties. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(6): 40-49

[10] 李鸿雁, 李悦煊, 李俊, 武自念, 黄帆, 朱琳, 郭茂伟, 李志勇, 辛霞. 内蒙古 143 份冰草属种质资源表型多样性分析与综合评价. 植物遗传资源学报, 2024, 25(1): 1254-1267
Li H Y, Li Y X, Li J, Wu Z N, Huang F, Zhu L, Guo M W, Li Z Y, Xin X. Phenotypic Diversity analysis and comprehensive evaluation of 143 agropyron germplasm resources in Inner Mongolia, China. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(1): 1254-1267

[11] 侯献飞, 张云, 刘雨馨, 宋贤明, 贾东海, 顾元国, 李强, 苗昊翠, 陈晓露, 扈瑞祥. 基于主要农艺性状的 686 份红花种质资源遗传多样性分析. 植物遗传资源学报, 2024, 25(9): 1468-1479

Hou X F, Zhang Y, Liu Y X, Song X M, Jia D H, Gu Y G, Li Q, Miao H C, Chen X L, Hu R X. Genetic diversity analysis of 686 safflower(*Carthamus tinctorius* L.) germplasm accessions based on agronomic traits. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(9): 1468-1479

[12] 胡彦师, 周世俊, 安泽伟, 张晓飞, 方家林, 涂敏, 程汉, 曾霞, 黄华孙. 国家橡胶树种质资源圃资源安全保存. 热带作物学报, 2022, 43(1): 78-86

Hu Y S, Zhou S J, An Z W, Zhang X F, Fang J L, Tu M, Chen H, Zeng X, Huang H S. Safe conservation of rubber tree germplasm resources in the national rubber tree germplasm repository. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(1): 78-86

[13] 金京花, 李淑芳, 赵亚东, 王迪, 张好, 金国光, 李鹤南, 全成哲, 张强. 1775 份水稻种质资源重要农艺性状遗传多样性研究. 植物遗传资源学报, 2025, 26(3): 481-495

Jin J H, Li S F, Zhao Y D, Wang D, Zhang Y, Jin G G, Li H N, Quan C Z, Zhang Q. Study on important agronomic characters and genetic diversity of 1775 rice germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(3): 481-495

[14] 董昕, 李淑君, 杨华, 官玲, 付忠军, 祁志云, 金川, 余雪源, 易红华, 陈荣丽, 张丕辉. 重庆玉米地方品种表型多样性分析. 植物遗传资源学报, 2019, 20(4): 861-870

Dong X, Li S J, Yang H, Guan L, Fu Z J, Qi Z Y, Jin C, Yu X Y, Yi H H, Chen R L, Zhang P H. Phenotypic diversity of maize landraces collected from Chongqing. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(4): 861-870

[15] 李欢, 鄢小青, 杨占烈, 谭金玉, 黎小冰, 陈能刚, 吴荣菊, 陈惠查, 阮仁超. 贵州香禾糯地方稻种资源表型遗传多样性分析与综合评价. 中国农业科学, 2023, 56(11): 2035-2046

Li H, Yan X Q, Yang Z L, Tan J Y, Li X B, Chen N G, Wu R J, Chen H C, Ruan R C. Analysis and comprehensive evaluation of phenotype genetic diversity in kam sweet rice germplasm resources in Guizhou. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(11): 2035-2046

[16] 邱彦芬, 杨湉, 李小琴, 张凤良, 吴裕, 陈严平. 橡胶树无性系叶片解剖结构及耐旱性研究. 西部林业科学, 2020, 49(1): 92-98

Qiu Y F, Yang T, Li X Q, Zhang F L, Wu Y, Chen Y P. Some features on leaf anatomy and drought tolerance in 9 rubber tree clones (*Hevea brasiliensis*). Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(1): 92-98

[17] 杨雨, 胡欣欣, 丁世涛, 袁志能, 黄肖, 欧阳宇珺, 高新生. 21 个品系橡胶树的叶片解剖特征研究. 热带生物学报, 2024, 15(4): 373-381

Yang Y, Hu X X, Ding S T, Yuan Z N, Huang X, Ouyang Y J, Gao X S. Anatomical traits of leaves in 21 clones of *Hevea brasiliensis*. Journal of Tropical Biology, 2024, 15(4): 373-381

[18] 吕伟, 韩俊梅, 文飞, 任果香, 王若鹏, 刘文萍. 不同来源芝麻种质资源的表型多样性分析. 植物遗传资源学报, 2020, 21(1): 234-242

Lv W, Han J M, Wen F, Ren G X, Wang R P, Liu W P. Phenotypic diversity analysis of sesame germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2020, 21(1): 234-242

[19] 李明谦, 张凤良, 李小琴, 穆洪军, 吴裕. 橡胶树无性系苗期生长和光合生理特性的比较. 西南林业大学学报: 自然科学, 2020, 40(2): 18-22

Li M Q, Zhang F L, Li X Q, Mu H J, Wu Y. Comparative analysis on growth and photosynthetic characteristics of *Hevea brasiliensis* budding clones. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2020, 40(2): 18-22

[20] 张勇, 朱文, 高梅, 王朝, 李芹, 岳增福, 兰明, 周敏, 钱云, 张凤良. 橡胶树无性系苗期生长和叶片表型性状比较分析. 西部林业科学，2020, 49(3): 66-73

Zhang Y, Zhu W, Gao M, Wang C, Li Q, Yue Z F, Lan M, Zhou M, Qian Y, Zhang F L. Comparison analysis of phenotypic growth and leaf traits of *Hevea brasiliensis* clones at seedling stage. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(3): 66-73

[21] 冯章丽, 于文全, 顾广军, 刘畅, 卜海东, 程显敏, 刘延杰, 董雪梅, 邢星. 东北部分地区山荆子种质资源表型多样性及聚类分析. 植物遗传资源学报, 2016, 17(6): 984-992

Feng Z L, Yu W Q, Gu G J, Liu C, Bu H D, Cheng X M, Liu Y J, Dong X M, Xing X. Phenotypic diversity and clustering analysis of *Malus baccata*（L. ）Borkh. in some areas of Northeast China. Journal of Plant Genetic Resources, 2016, 17(6): 984-992

[22] 马天天, 孟俊瑛, 陈高, 陈禅友, 郭瑞. 100 份菜用豌豆种质资源品质鉴定与评价. 植物遗传资源学报, 2025, 26(4): 683-692

Ma T T, Meng J Y, Chen G, Chen C Y, Guo R. Quality identification and evaluation of 100 garden pea germplasm resources. Journal of Plant Genetic Resources, 2025, 26(4): 683-692

[23] 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(5): 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(5): 1311-1320

[24] 张凤良, 李小琴, 胡永华, 毛常丽, 杨湉, 者国熊, 倪书邦, 吴裕. 橡胶树魏克汉种质资源生长与形质性状变异分析. 植物遗传资源学报, 2018, 19(1): 65-75

Zhang F L, Li X Q, Hu Y H, Mao C L, Yang T, Zhe G X, Ni S B, Wu Y. The variation analysis of growth and stemform quality traits from Wickham germplasm resources of *Hevea brasiliensis*. Journal of Plant Genetic Resources, 2018, 19(1): 65-75

[25] Nivedha R, Manonmani S, Kalaimagal T, Raveendran M, Kavitha S. Assessing the genetic diversity of parents for developing hybrids through morphological and molecular markers in rice (*Oryza sativa* L.). Rice, 2024, 17(1): 17

[26] 王烟霞, 樊军锋, 程玮哲, 高建社, 周永学. 基于叶片解剖结构的 12 个杨树无性系抗旱性分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2021, 49(11): 147-154

Wang Y X, Fan J F, Chen W Z, Gao J S, Zhou Y X. Drought resistances analysis of 12 poplar clones based on leaf anatomical structures. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2021, 49(11): 147-154

[27] 胡光明, 肖涛, 彭家清, 李大卫, 田华, 王华玲, 肖丽丽, 程均欢, 黄海雷, 吴伟, 钟彩虹. 基于叶片形态及显微特征评价 12 个猕猴桃栽培品种的抗旱性. 果树学报, 2024, 41(5): 911-928

Hu G M, Xiao T, Peng J Q, Li D W, Tian H, Wang H L, Xiao L L, Chen J H, Huang H L, Wu W, Zhong C H. Evaluation of drought resistance of 12 kiwifruit cultivars based on leaf morphology and microscopic characteristics. Journal of Fruit Science, 2024, 41(5): 911-928

[28] 李颖, 张树航, 郭燕, 张馨方, 王广鹏. 211 份板栗种质资源花序表型多样性和聚类分析. 中国农业科学, 2020, 53(22): 4667-4682

Li Y, Zhang S H, Guo Y, Zhang X F, Wang G P. Catkin phenotypic diversity and cluster analysis of 211 Chinese chestnut germplasms. Scientia Agricultural Sinica, 2020, 53(22): 4667-4682

[29] 韩海波, 师文贵, 王晓娜, 李志勇, 李鸿雁, 李兴西, 刘磊. 内蒙古扁蓿豆野生资源形态特征研究. 植物遗传资源学报, 2011, 12(5): 721-726

Han H B, Shi W G, Wang X N, Li Z Y, Li H Y, Li X Y, Liu L. Morpholgical properties of wild resources in medicago ruthenica in Inner Mongolia. Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12(5): 721-726