

基于叶片解剖结构特征的 50 份茶树品种（系）综合评价 与性状关联分析

覃爱颖¹, 陈恩海¹, 劳福增¹, 陈达辉¹, 钟 勇¹, 莫干辉^{2*}

1. 广西职业技术学院农业工程学院, 广西南宁 530226; 2. 广西壮族自治区亚热带作物研究所/农业农村部亚热带果品蔬菜质量安全控制重点实验室/广西亚热带特色水果质量安全控制重点实验室, 广西南宁 530001

摘要: 为挖掘亚热带茶树优质耐逆种质并服务于新品种选育与特色茶产品开发, 本研究以种植于南宁市广西职业技术学院茶叶教学科研基地的 50 份茶树品种（系）叶片为研究对象, 对 17 项叶片解剖结构性状进行观测与遗传多样性分析, 并间接鉴定其抗逆性、适制性和生产力水平, 采用主成分分析法结合聚类分析进行综合评价。结果表明: 50 份茶树品种（系）的 17 个叶片解剖结构性状存在比较丰富的遗传变异, 叶片解剖结构性状的变异系数范围为 11.00%~39.10%; 总体表现出较强的抗逆性, 抗旱、抗病虫性平均隶属函数均值和抗寒性平均得分分别为 0.67、0.61、6.28, 平均生产力指数为 3329.20, 潜在生产力总体较高; 基于叶片解剖结构指标进行聚类分析, 将 50 份茶树品种（系）划分为 3 个类群, 第 II 类群的上表皮角质层厚度、下表皮角质层厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度、栅栏组织层数、海绵组织层厚度、叶片厚度、草酸钙结晶指标显著甚至极显著高于第 I、III 类群; 根据 50 份茶树品种（系）前 5 个主成分值及其对应特征值建立线性方程, 计算其主成分的综合得分, 排在前 10 位的茶树品种（系）综合性状优良, 可在茶树优良品种选育等方面加以利用。该研究结果旨在为广西地方优异茶树品种（系）的鉴定与利用、新品种选育提供参考。

关键词: 茶树品种; 叶片解剖结构; 抗逆性; 聚类分析

中图分类号: S571.1 文献标志码: A

Leaf Anatomical Determinants of Stress Resistance and Productivity: A Comprehensive Evaluation of 50 Tea Accessions in Guangxi

QIN Aiyong¹, CHEN Enhai¹, LAO Fuzeng¹, CHEN Dahui¹, ZHONG Yong¹, MO Ganhui^{2*}

1. School of Agricultural Engineering, Guangxi Vocational & Technical College, Nanning, Guangxi 530226, China; 2. Guangxi Institute of Subtropical Crops / Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruit and Vegetable, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Guangxi Key Laboratory of Quality and Safety Control for Subtropical Fruits, Nanning, Guangxi 530001, China

Abstract: This study was aimed to identify high-quality and stress-resistant germplasm resources of subtropical tea for the purpose of supporting new variety breeding and the development of characteristic tea products. Leaves from 50 tea accessions cultivated at Tea Teaching and Research Base of Guangxi Vocational and Technical College in Nanning were selected as the samples. 17 leaf anatomical and structural traits were examined to assess the genetic diversity. Based on stress resistance, processing suitability, productivity potential of the traits were evaluated. Principal component analysis combined with hierarchical cluster analysis was employed for the comprehensive evaluation. There existed substantial genetic variation among the accessions, and the coefficient of variation ranged from 11.00% to 39.10%. The accessions demonstrated robust stress resistance with average membership function value for drought resistance and pest resistance 0.67 and 0.61, respectively, along with average cold resistance score 6.28. The average productivity index of 3329.20 suggested a relatively high productivity potential. Based on the leaf anatomical and structural indicators, the accessions

收稿日期 2025-04-17; 接受日期 2025-06-19

基金项目 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(桂教科研[2023]2号 2023KY1030); 国家现代农业产业技术体系广西创新团队建设专项资金项目(桂财农函[2025]9号)。

作者简介 覃爱颖(1992—), 女, 硕士, 农艺师, 研究方向: 茶树生理。*通信作者(Corresponding author): 莫干辉(MO Ganhui), E-mail: 394993113@qq.com。

were clustered into three distinct groups. The upper cuticle thickness, lower cuticle thickness, upper epidermis thickness, lower epidermis thickness, palisade tissue thickness, palisade tissue layer number, spongy tissue layer thickness, leaf thickness, and calcium oxalate crystal indexes of the Group 2 appeared to be significantly or highly significantly different than those of Group 1 and Group 3. Based on the top five principal component values and the corresponding eigenvalues of the accessions, a linear equation was established to calculate the comprehensive score of the principal components. The top 10 accessions exhibited superior overall characteristics, demonstrating strong potential for breeding elite tea cultivars. These findings would provide valuable references for identification and utilization of the superior local tea germplasm resources in Guangxi.

Keywords: tea accessions; leaf anatomical structure; stress resistance; cluster analysis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.10.009

茶树 (*Camellia sinensis*) 属于山茶科 (Theaceae) 山茶属 (*Camellia* L.), 起源于我国西南地区, 至今已有三千多年的栽培历史, 并先后传入日本、印度、斯里兰卡等 50 多个国家, 目前已成为全世界三大饮料作物之一^[1], 其叶片不仅是茶叶生产的主要原料, 也是茶树进行光合作用、水分代谢和物质交换的重要器官, 茶树叶片的解剖结构与其抗逆性、适制性和生产力等性状密切相关。通过分析叶片解剖结构, 可为茶树品种的选育、栽培管理和茶叶加工提供重要的理论依据^[2]。基于叶片解剖结构特征进行资源的鉴定评价和遗传多样性分析, 在秋海棠^[3]、油橄榄^[4]、油棕^[5]、红豆杉^[6]等植物种质资源研究中得到了广泛应用, 为相关植物类群优良种质资源保存及品种选育奠定了理论基础。近年来, 对茶树种质资源叶片解剖结构的研究日益受到关注, 并取得了显著成果, 陈荣冰^[7]从全国各地采集 43 份不同茶树品种的成熟叶片, 经石蜡切片后在光学显微镜下观察其解剖结构, 发现可通过叶片解剖结构来估测各品种的抗寒性强弱, 从而选择适宜的气候区域种植该茶树品种, 提高茶树引种的成功率。覃秀菊等^[8]对广西选育成的 10 个新品种 (系) 通过探索叶片解剖结构中的叶片角质层等与产量、适制性、抗逆性之间的相关性, 筛选出产量最高、抗高温干旱及抗寒性强茶树种质 2 份。近年来, 国内外针对“高耐逆-高产”茶树品种的饮品品质开展相关研究, 结果显示, 在维持或提升产量的同时, 这类品种的理化与感官品质并未显著降低。例如, 与传统绿茶品种福鼎大白茶和龙井 43 相比, 由中国农业科学院茶叶研究所选育的中茶 108 田间自然鉴定表明其耐旱、耐寒及对炭疽病的抗性均显著优于对照, 且鲜叶产量平均提高 122.88%~167.16%, 春茶干样氨基酸为 4.20%、茶多酚为 23.90%、咖啡碱为 4.20%, 酚氨比约为 5.69, 冲

泡后汤色黄绿明亮、香气清鲜、滋味爽口, 适制龙井、烘青等高档绿茶^[9]。李凤英等^[10]采用改良石蜡切片方法制片、光学显微镜观察, 从广西姑辽野生茶树 13 个株系中, 筛选出 3 份综合性状较好且具有良好的开发前景的种质。王飞权等^[11]通过对 70 份武夷名丛的上下表皮角质层厚度、上下表皮厚度、栅栏组织厚度等 17 项叶片解剖结构指标采用聚类分析、主成分分析等进行综合评价, 筛选出综合性状优良排名前 10 的茶树种质。李佼等^[12]运用隶属函数法和与抗寒性相关的线性回归方程, 对 43 份来自汉中不同群体的优良株系的石蜡切片的叶片解剖结构指标进行分析, 筛选出 3 份抗逆性强, 生产潜力大, 综合性状优良的茶树资源。杨春等^[13]以贵州两地 24 份野生茶树为材料, 通过比较两地野生茶树叶片形态特征和叶片解剖特征的 23 个性状, 筛选出 4 份综合抗性较优的野生茶树, 为高抗野生茶树种质选育抗逆性茶树品种提供了科学依据。董方等^[14]基于叶片解剖结构性状对江西茶树种质资源进行综合评价得出, 17 份种质资源表现出丰富的遗传多样性, 茶树种质资源综合性状排名前 3 为赣茶 3 号、程风绿、杏林, 可在江西绿茶品种选育及茶产品开发方面加以利用。

尽管已有研究对不同茶树种品种进行了叶片解剖结构分析, 但大多研究只集中在本土茶树品种的研究, 尚未完全掌握资源的品种特性及遗传多样性水平, 并且对全国范围内茶树品种资源, 在同一生态环境条件下生长的茶树叶片解剖结构的变异及抗逆性、适制性和生产力等性状的分析研究, 未见报道。本研究以广西职业技术学院茶树种质资源圃保存的 50 份茶树品种 (系) 为研究对象, 在相同的生长环境和田管下的上表皮角质层厚度 (TUC)、下表皮角质层厚度 (TLC)、上表皮厚度 (TU) 和下表皮厚度 (TL) 等叶片解剖

结构指标,进行遗传变异性分析;在前人研究的基础上,对其抗逆性、适制性和生产力指数进行间接鉴定,并通过主成分分析、系统聚类及综合评价,分析其叶片解剖结构的性状特征,并筛选综合性状优良的茶树种质,为茶树品种的遗传多样性研究和新品种选育提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

本研究供试的 50 份茶树品种(系)种植于南宁市广西职业技术学院茶叶教学科研基地(108°13'~108°24'E, 22°34'~22°58'N),树龄 10 a(表 1)。

1.2 方 法

1.2.1 采样与固定 选择长势一致的植株 10 株,在每株树冠当年生第 1 轮新梢芽下第 4 叶位,采集健康完整的成熟叶片 3 片为试验材料,共 30 片鲜叶。然后在每株的 3 片叶中,随机选取 1 片叶

片取其中部沿叶脉两侧 5 mm×10 mm 的组织块,于 70%乙醇的 FAA 液中固定 3 d 后备用。

1.2.2 切片的制作与观测 通过石蜡切片技术^[2]处理采集的叶片组织样本,制作成 3 张切片(每张切片包含 4~5 条组织),总计 150 张。利用 Saga-sg40-2 电子生物显微镜(萨伽,苏州,中国)及其成像系统(iMicro,苏州,中国)对切片进行观察和摄影,对于每份样本选取 3 个不同的视野进行观测,并使用 Motic Images Advanced 3.2 软件(厦门,中国)进行观察和测量茶树叶片的指标:上表皮角质层厚度(TUC, μm)、上表皮厚度(TU, μm)、栅栏组织厚度(TP, μm)、海绵组织厚度(TS, μm)、下表皮厚度(TL, μm)、下表皮角质层厚度(TLC, μm)、叶片厚度(LT, μm)、细胞个数(CA)、栅栏组织层数(LP)、栅栏组织厚度/海绵组织厚度(P/S)、栅栏组织厚度/叶片厚度(P/L)、上表皮厚度/海绵组织厚度(U/S)、海绵组织厚度/栅栏组织厚度(S/P)、

表 1 50 份茶树品种(系)名称及来源
Tab. 1 Names and origins of 50 tea accessions

编号 Code	名称 Name	来源 Origin	编号 Code	名称 Name	来源 Origin	编号 Code	名称 Name	来源 Origin
A01	龙井长叶	安徽	A18	大红袍	福建武夷山	A35	台茶 12 号	台湾
A02	福云 6 号	福建	A19	奇种	福建武夷山	A36	翠玉	台湾
A03	丹桂	福建	A20	玉麒麟	福建武夷山	A37	云抗 10 号	云南省农业科学院茶叶研究所
A04	金观音	福建	A21	本山	福建西坪尧阳	A38	玫瑰	云南省农业科学院茶叶研究所
A05	春波绿	福建	A22	元宵绿	福建崇儒乡	A39	紫娟茶	云南省农业科学院茶叶研究所
A06	毛蟹	福建安溪县	A23	白叶单枞	广东饶平县	A40	黄金芽	浙江
A07	黄旦	福建安溪县	A24	桂绿 1 号	广西桂林	A41	浙农 113	浙江
A08	软枝乌龙	福建草洋乡	A25	桂红 3 号	广西桂林	A42	安吉白茶	浙江安吉县
A09	福鼎大毫	福建福鼎县	A26	桂红 4 号	广西桂林	A43	尧山秀绿	浙江淳安县
A10	肉桂	福建慧苑岩	A27	桂香 22 号	广西凌云	A44	中黄 2 号	浙江缙云县
A11	水仙	福建建阳区	A28	桂职 1 号	广西南宁	A45	浙农 117	浙江余姚市
A12	金牡丹	福建农业科学院茶叶研究所	A29	桂红 2 号	广西南宁	A46	乌牛早	浙江永嘉县
A13	紫牡丹	福建农业科学院茶叶研究	A30	白毫早	湖南农业科学院茶叶研究	A47	中茶 108	中国农业科学院茶叶研究所
A14	黄玫瑰	福建农业科学院茶叶研究	A31	特早 213	四川	A48	龙井 43 号	中国农业科学院茶叶研究所
A15	黄观音	福建农业科学院研究所	A32	川茶 1 号	四川峨眉山市	A49	中黄 1 号	中国农业科学院茶叶研究所
A16	白芽奇兰	福建平和县	A33	川农黄	四川名山县	A50	中茶 102	中国农业科学院茶叶研究所
A17	铁罗汉	福建武夷山	A34	蒙山 9 号	四川名山县			

海绵组织厚度/叶片厚度 (S/L)、生产力指数 (N)、抗寒性得分 (Y)、草酸钙结晶 (CN)。根据公式计算：细胞结构紧密度=栅栏组织厚度/叶片厚度 (P/L)；细胞结构疏松度=海绵组织厚度/叶片厚度 (S/L)；栅海比=栅栏组织厚度/海绵组织厚度 (P/S)。

1.3 数据处理

利用 WPS 软件，计算变异系数 (CV) 和遗传多样性指数 (H')，其中遗传多样性 (H')^[15] 分析采用 Shannon-Weaver 指数法计算，即 $H' = -\sum(P_i \ln P_i)$ ， P_i 为某性状第 i 级出现的频率。每个性状的观察值 (X) 分为 10 级，1 级为 $X < x - 2\sigma$ ，10 级为 $X \geq x + 2\sigma$ ，中间每级相差 0.5σ ，其中 σ 为标准差， x 为均值。

各性状指标的隶属函数值 $f(x_i)$ 以 Fuzzy 数学中隶属函数法进行计算，即 $f(x_i) = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$ ，式中 x_i 为指标测定值， x_{\min} 、 x_{\max} 分别为 50 份茶树品种（系）叶片解剖结构某一指标的最小值和最大值。

采用 SPSSAU 软件进行主成分分析、相关性分析和聚类分析。

茶叶生产力指数 (N) = 第 1 层栅栏组织细胞数 × 栅栏组织厚度 (400 μm 范围) 进行计算^[2]；

抗寒性得分 (Y) 按照公式 $Y = 5.47X - 1.78$ ^[16] 进行计算，式中， X 为栅栏组织厚与海绵组织厚的比值， $R = 0.85$ 。

2 结果与分析

2.1 叶片解剖结构的遗传变异性分析

衡量品种（系）遗传多样性的关键指标有变异系数与遗传多样性指数，该指标的数值越高，意味着变异范围越广，遗传多样性越丰富，更可能包含极端变异类型，品种改良的选择潜力也越大^[17]。通过对 50 份茶树品种（系）17 项叶片解剖结构指标的遗传多样性指数、变异系数进行分析（表 2）可知，50 份茶树品种（系）在叶片解剖结构方面，表现出丰富遗传多样性。其中，上表皮厚度 (2.08) 的遗传多样性指数最大，其次是海绵组织厚度 (2.02)、叶层总厚度 (2.01)、U/S (1.97)、上表皮角质层厚度 (1.95)、S/L (1.95)、细胞个数 (1.95)、栅栏组织厚度 (1.93)、抗寒性 (1.93)、P/S (1.93) 的遗传多样性指数均大于平均值，表明其遗传多样性明显，遗传改良潜力较大。S/P (1.63)、栅栏组织层数 (1.78) 的遗传多样性较低，S/P 在 0.679~3.12 之间和栅栏组织层数在 1~3 层之间是该 50 份茶树品种（系）比较普遍的性状。

表 2 叶片解剖结构性状统计与遗传多样性分析
Tab. 2 Statistical analysis and genetic diversity of leaf anatomical structural traits

指标 Indicator	极大值 Max	极小值 Min	均值 Mean	方差 Variance	标准差 SD	变异系数 CV/%	遗传多样性 指数 H'
TUC/ μm	4.99	1.75	3.15	0.58	0.76	24.20	1.95
TU/ μm	32.86	16.12	24.06	13.59	3.69	15.30	2.08
TP/ μm	240.85	56.63	135.20	1078.96	32.85	24.30	1.93
TS/ μm	228.78	105.97	161.57	530.90	23.04	14.30	2.01
TL/ μm	27.54	11.70	16.22	10.66	3.27	20.10	1.86
TLC/ μm	4.75	1.86	2.87	0.47	0.68	23.80	1.88
LT/ μm	434.89	255.48	338.53	2036.72	45.13	13.30	2.02
CA	30.67	18.33	24.59	11.32	3.37	13.70	1.95
LP	3.00	1.00	2.06	0.26	0.51	24.60	1.78
P/S	1.47	0.32	0.85	0.04	0.20	24.10	1.93
P/L	0.56	0.21	0.40	0.04	0.06	15.60	1.90
U/S	0.21	0.10	0.15	0.01	0.03	17.90	1.97
S/P	3.12	0.68	1.27	0.17	0.42	32.80	1.63
S/L	0.66	0.38	0.48	0.03	0.05	11.00	1.95
N	6181.74	1362.94	3329.20	896 888.65	947.04	28.40	1.91
Y	6.28	-0.03	2.85	1.24	1.11	39.10	1.93
CN	3.00	0.33	1.59	0.361	0.60	37.90	1.88

50 份茶树品种 (系) 17 项叶片解剖结构性状的变异系数范围为 11.00%~39.10%，表明 50 份茶树品种 (系) 在叶片解剖结构性状方面，表现出较明显变异，变异系数最大的是抗寒性得分 (39.10%)，其次是草酸钙结晶 (37.90%)、S/P (32.80%)、生产力指数 (28.40%)、栅栏组织层数 (24.60%)、栅栏组织厚度 (24.30%)、上表皮角质层厚度 (24.20%)、P/S (24.10%)、下表皮角质层厚度 (23.80%)，数值均大于平均值 22.30%。

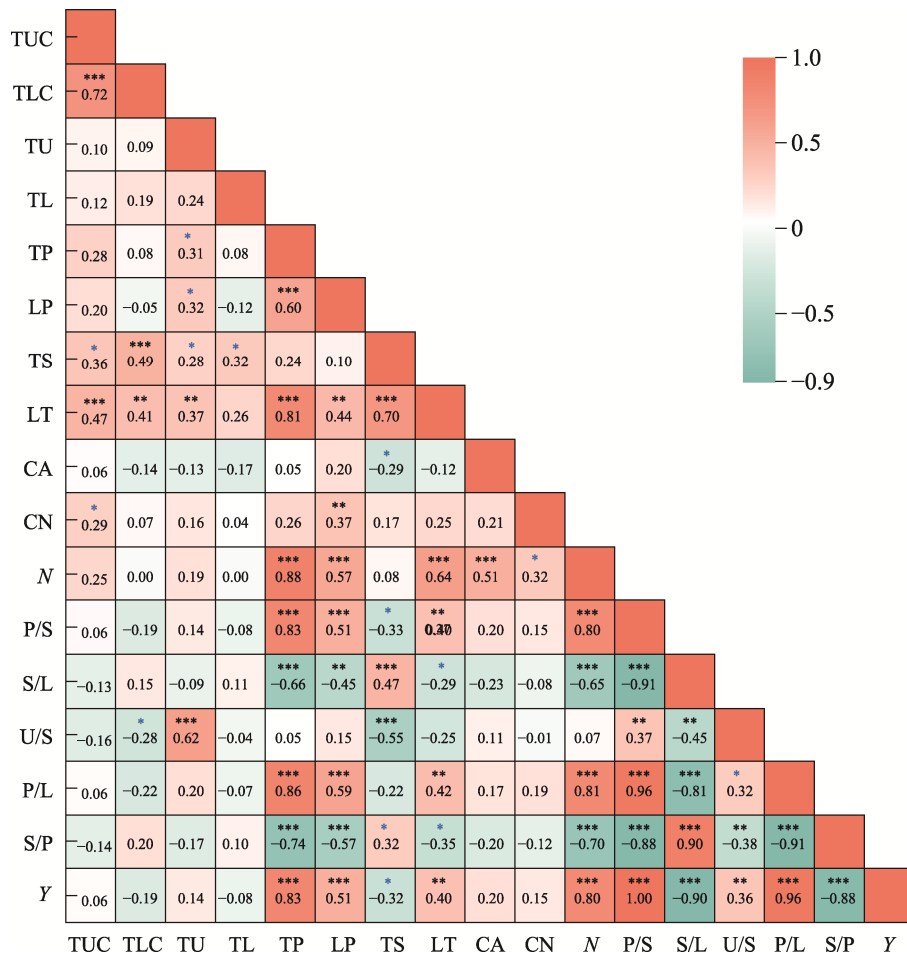
2.2 茶树品种 (系) 叶片解剖结构的相关性分析

对 50 份茶树品种 (系) 叶片解剖结构的 17 项指标进行相关性分析 (图 1)，可见各指标间存在一定的相关性，其中呈极显著正相关的有：上表皮角质层厚度与下表皮角质层厚度 (0.72) 且相关系数最高，下表皮角质层厚度与海绵组织厚

度 (0.49)，栅栏组织厚度与栅栏组织层数 (0.60)，叶片厚度与上表皮角质层厚度 (0.47)、海绵组织厚度 (0.70)、栅栏组织厚度 (0.81)，叶片厚度与下表皮角质层厚度 (0.41)、上表皮厚度 (0.37)、栅栏组织层数 (0.44)；呈显著正相关有：上表皮角质层厚度与海绵组织厚度 (0.36)、草酸钙结晶 (0.29)，上表皮厚度与栅栏组织厚度 (0.31)、栅栏组织层数 (0.32)、海绵组织厚度 (0.28)，下表皮厚度与海绵组织厚度 (0.32)；海绵组织厚度与细胞个数 (-0.29) 呈显著负相关。

2.3 茶树品种 (系) 的抗逆性分析

茶树的抗虫性关系研究发现，虫口密度与叶片内部结构的角质层厚度、皮层厚度、栅栏组织厚度及层数、叶片厚度和草酸钙结晶数呈极显著负相关关系^[18]。表 3 为运用隶属函数法计算的 50



*表示显著相关 ($P<0.05$)，**表示极显著相关 ($P<0.01$)，***表示极显著相关 ($P<0.001$)。
* indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$), *** indicates extremely significant correlation ($P<0.001$).

图 1 50 份茶树品种 (系) 17 个指标相关性热图

Fig. 1 Heatmap of correlation of 17 indicators for 50 tea accessions

表 3 50 份茶树品种（系）的叶片解剖特征及抗性评价
Tab. 3 Leaf anatomical features and resistance evaluation of 50 tea accessions

编号 Code	上表皮角质层 厚度 TUC/ μm	栅栏组织厚度 TP/ μm	下表皮厚度 TL/ μm	下表皮角质层 厚度 TLC/ μm	叶片厚度 LT/ μm	栅栏组织 层数 LP	栅栏组织厚度/ 海绵组织厚度 P/S	草酸钙 结晶 CN	抗病虫性 Resistance to disease and pest		抗旱性 Resistance to drought		抗寒性 Resistance to cold	
									均值 Mean	排序 Rank	均值 Mean	排序 Rank	均值 Mean	排序 Rank
A07	0.78	0.60	0.27	1.00	0.41	0.50	0.69	0.50	0.61	1	0.58	4	4.35	5
A35	0.95	0.50	0.55	0.64	0.31	0.67	0.58	1.00	0.60	2	0.67	1	3.62	9
A41	0.77	0.39	1.00	0.74	0.39	0.50	0.36	0.37	0.59	3	0.47	17	2.22	40
A20	0.94	0.38	0.12	0.86	0.34	0.75	0.39	0.50	0.54	4	0.55	8	2.46	31
A03	1.00	0.32	0.29	0.84	0.26	0.58	0.41	0.37	0.53	5	0.49	13	2.53	29
A01	0.70	0.54	0.50	0.66	0.49	0.50	0.29	0.63	0.53	6	0.52	10	1.83	45
A08	0.31	0.76	0.32	0.10	0.41	0.75	1.00	0.63	0.52	7	0.64	2	6.28	1
A18	0.45	0.48	0.47	0.35	0.31	1.00	0.53	0.63	0.51	8	0.57	5	3.30	15
A11	0.79	0.43	0.10	0.46	0.35	1.00	0.46	0.63	0.51	9	0.61	3	2.86	22
A04	0.39	0.44	0.68	0.45	0.20	0.58	0.76	0.13	0.50	10	0.42	22	4.78	3
A21	0.56	0.47	0.18	0.73	0.30	0.67	0.60	0.63	0.50	11	0.54	9	3.76	8
A49	0.40	0.52	0.46	0.20	0.26	0.67	0.77	0.75	0.47	12	0.56	6	4.85	2
A23	0.43	0.37	0.28	0.27	0.16	1.00	0.51	0.88	0.43	13	0.56	7	3.17	19
A15	0.57	0.33	0.45	0.44	0.22	0.50	0.45	0.13	0.42	14	0.36	31	2.80	25
A06	0.65	0.34	0.24	0.59	0.28	0.50	0.32	0.50	0.42	15	0.43	20	1.98	44
A32	0.33	0.46	0.34	0.21	0.24	0.75	0.51	0.37	0.41	16	0.44	18	3.17	20
A45	0.37	0.45	0.11	0.22	0.19	0.75	0.63	0.50	0.39	17	0.48	15	3.98	7
A42	0.49	0.28	0.26	0.19	0.18	0.92	0.36	0.63	0.38	18	0.48	16	2.26	39
A13	0.73	0.31	0.16	0.42	0.16	0.50	0.38	1.00	0.38	19	0.51	11	2.34	36
A44	0.36	0.28	0.13	0.33	0.12	0.92	0.52	0.75	0.38	20	0.49	14	3.24	17
A05	0.31	0.37	0.34	0.33	0.23	0.50	0.52	0.25	0.37	21	0.36	34	3.23	18
A19	0.16	0.31	0.50	0.40	0.20	0.58	0.42	0.25	0.37	22	0.32	40	2.63	28
A30	0.43	0.27	0.33	0.55	0.12	0.50	0.36	0.37	0.37	23	0.34	37	2.26	38
A37	0.58	0.32	0.27	0.33	0.16	0.42	0.46	0.25	0.36	24	0.36	32	2.85	24
A34	0.57	0.37	0.50	0.11	0.19	0.25	0.52	0.37	0.36	25	0.38	28	3.27	16
A09	0.60	0.28	0.12	0.37	0.15	0.50	0.47	0.63	0.36	26	0.44	19	2.96	21

续表 3 50 份茶树品种 (系) 的叶片解剖特征及抗性评价

Tab. 3 Leaf anatomical features and resistance evaluation of 50 tea accessions (continued)

编号 Code	上表皮角质层 厚度 TUC/ μm	栅栏组织厚 度 TP/ μm	下表皮厚度 TL/ μm	下表皮角质层 厚度 TLC/ μm	叶片厚度 LT/ μm	栅栏组织 层数 LP	栅栏组织 海绵组织厚度 P/S	草酸钙 结晶 CN	抗病虫性 Resistance to disease and pest		抗旱性 Resistance to drought		抗寒性 Resistance to cold	
									均值 Mean	排序 Rank	均值 Mean	排序 Rank	均值 Mean	排序 Rank
A47	0.22	0.43	0.12	0.07	0.26	0.83	0.53	0.75	0.35	27	0.51	12	3.33	13
A50	0.64	0.19	0.16	0.44	0.00	0.42	0.56	0.50	0.34	28	0.38	26	3.50	12
A10	0.42	0.44	0.07	0.13	0.27	0.50	0.57	0.25	0.34	29	0.41	24	3.59	11
A33	0.42	0.26	0.19	0.30	0.14	0.67	0.35	0.37	0.33	30	0.37	30	2.16	43
A22	0.20	0.43	0.13	0.00	0.20	0.58	0.74	0.37	0.33	31	0.42	21	4.67	4
A16	0.36	0.22	0.49	0.16	0.14	0.50	0.35	0.37	0.32	32	0.33	39	2.21	41
A36	0.21	0.39	0.03	0.12	0.16	0.67	0.65	0.37	0.32	33	0.41	23	4.09	6
A12	0.27	0.31	0.27	0.16	0.12	0.50	0.57	0.37	0.31	34	0.36	35	3.60	10
A28	0.16	0.25	0.09	0.12	0.13	1.00	0.39	0.25	0.31	35	0.36	33	2.41	32
A24	0.44	0.31	0.24	0.16	0.18	0.33	0.46	0.63	0.30	36	0.39	25	2.85	23
A29	0.31	0.25	0.38	0.51	0.20	0.25	0.20	0.25	0.30	37	0.24	45	1.24	48
A27	0.57	0.24	0.13	0.40	0.12	0.25	0.38	0.25	0.30	38	0.30	42	2.39	35
A38	0.25	0.23	0.37	0.16	0.04	0.50	0.53	0.50	0.30	39	0.34	38	3.31	14
A40	0.54	0.20	0.11	0.22	0.09	0.50	0.38	0.37	0.29	40	0.35	36	2.39	34
A02	0.43	0.20	0.07	0.57	0.05	0.25	0.44	0.50	0.29	41	0.31	41	2.78	26
A48	0.07	0.28	0.49	0.07	0.17	0.50	0.38	0.88	0.28	42	0.38	27	2.40	33
A46	0.19	0.28	0.20	0.30	0.17	0.33	0.37	0.25	0.26	43	0.26	44	2.30	37
A43	0.34	0.24	0.00	0.13	0.09	0.50	0.43	0.63	0.25	44	0.37	29	2.70	27
A31	0.06	0.30	0.03	0.22	0.22	0.25	0.40	0.37	0.21	45	0.27	43	2.48	30
A26	0.24	0.02	0.67	0.48	0.04	0.00	0.04	0.75	0.20	46	0.16	47	0.21	49
A17	0.11	0.11	0.42	0.20	0.03	0.25	0.20	0.25	0.19	47	0.16	48	1.26	47
A14	0.29	0.10	0.54	0.13	0.02	0.00	0.22	0.37	0.19	48	0.17	46	1.37	46
A39	0.33	0.00	0.04	0.63	0.07	0.00	0.00	0.25	0.15	49	0.11	50	-0.03	50
A25	0.00	0.21	0.06	0.06	0.07	0.17	0.35	0.00	0.13	50	0.13	49	2.20	42

份茶树品种（系）上表皮角质层厚度、下表皮角质层厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度、栅栏组织层数、叶片厚度和草酸钙结晶 7 项指标的隶属函数值，50 份茶树品种（系）的平均隶属函数值为 0.13~0.61，整体表现出较强的抗病虫性。排名前 20 份茶树资源的抗病虫性平均隶属函数值均高于均值 0.37，说明这 20 份茶树资源具有较强的抗病虫性。

从茶树抗逆性机理等方面，综述了当前茶树抗旱性、抗病性等研究进展，结果发现，上表皮角质层、栅栏组织、叶片厚度及栅栏层数、栅海比值、草酸钙结晶数与茶树的抗旱性息息相关^[19]。本研究参考刘燕等^[19]的方法，对抗旱性进行综合评价。由表 3 可知，通过隶属函数法计算出 50 份茶树品种（系）平均隶属函数值在 0.11~0.67 之间，说明 50 份茶树品种（系）总体呈现出较强的抗旱性。排在前 24 位的茶树资源抗旱性平均隶属函数值均高于平均值 0.40，表明其在 50 份品种（系）中具有强的抗旱性。

参考骆颖颖等^[16]提出的茶树品种苗期抗寒性

鉴定方法，利用回归方程计算，获得 50 份茶树品种（系）的抗寒性得分，并据此评估各茶树品种（系）抗寒性的强弱。由表 3 可知，其抗寒性得分变化范围为-0.03~6.28，总体抗寒性较强，得分最高的是 A08，最低的是 A39；排名前 21 份的茶树资源的抗寒性得分均大于均值 2.85，表明其具有较强的抗寒性。

2.4 生产力水平分析

茶叶中有机物的累积量受到茶叶叶片光合作用强度的直接影响，光合作用越强烈，有机物的累积量就越大，从而增强茶叶的生产力，且茶叶的光合强度与栅栏组织的厚度和密度，以及栅栏组织与海绵组织的比例之间存在正相关关系^[20]。对 50 份茶树品种（系）的生产力指数（ N ）值进行比较分析（图 2），发现不同品种间 N 的差异较大（1363.94~6182.74），其中 N 值最大的是 A08（6182.74），最小的是 A26（1363.94），平均值为 3329.20；有 30 份茶树资源具有高产性状的潜力， N 高于 3000.00 以上，3 份茶树资源低于 2000.00，表明其生产力水平偏下。

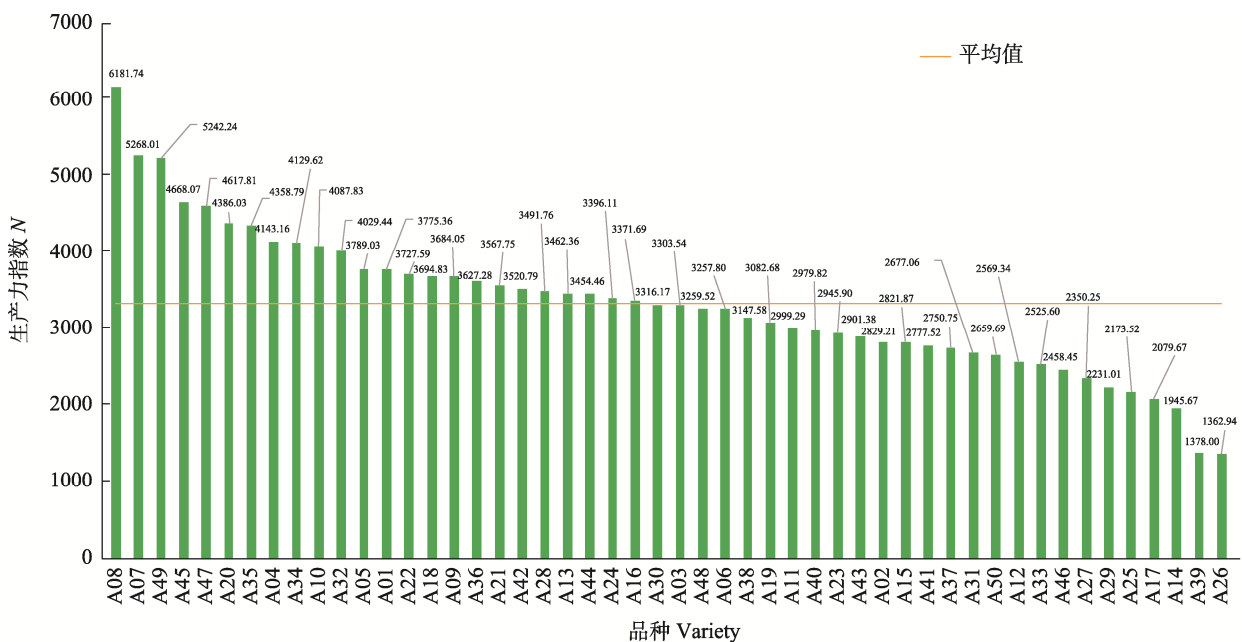


图 2 50 份茶树品种（系）生产力水平
Fig. 2 Productivity levels of 50 tea accessions

2.5 聚类分析

对 50 份茶树品种（系）基于 17 项叶片解剖结构指标进行聚类分析（图 3），在欧氏距离为 5.0 时，将 50 份茶树品种（系）聚为 3 个类群。第 I 类群包含 2 个亚群、13 份茶树资源；第 II 类群包含 2 个亚群、13 份茶树种质；第 III 类群包含 2 个

亚群、24 份茶树资源。根据聚类结果发现，第 II 类群的上表皮角质层厚度、下表皮角质层厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度、栅栏组织层数、海绵组织层厚度、叶片厚度、草酸钙结晶指标显著甚至极显著高于第 I、III 类群；第 III 类群的细胞个数、生产力指数、P/S 显著高

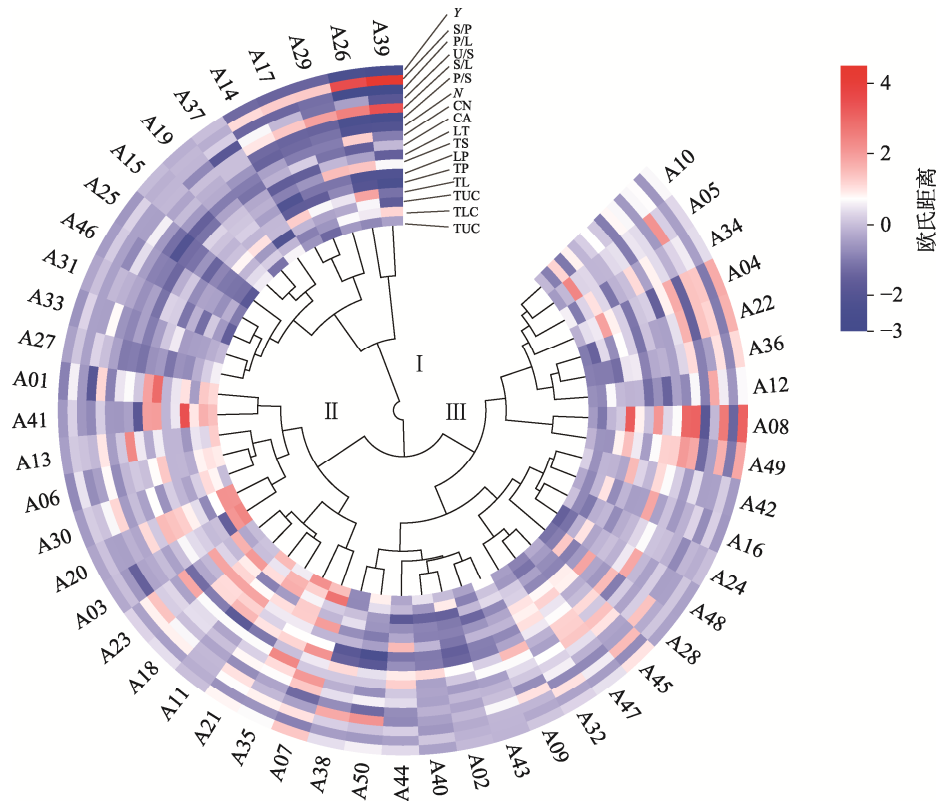


图 3 50 份茶树品种 (系) 叶片解剖结构性状的聚类图

Fig. 3 Cluster diagram of anatomical structural traits of 50 tea accessions leaves

于其他 2 个类群；第 I 类群的 S/L 高于第 II、III 类群，但差异不显著。

2.6 主成分分析及综合评价

对 50 份茶树品种 (系) 的叶片解剖结构指标使用主成分分析进行信息浓缩研究^[12]，抽样适合性检验 (KMO) 为 0.674，大于 0.6，且数据通过 Bartlett 球形度检验 ($P < 0.05$)，说明研究数据适合进行主成分分析，根据 50 份茶树品种 (系) 前 5 个主成分值及其对应特征值建立线性方程 $Z_i = 0.491 \times Z_{(i,1)} + 0.230 \times Z_{(i,2)} + 0.108 \times Z_{(i,3)} + 0.097 \times Z_{(i,4)} + 0.074 \times Z_{(i,5)}$ ，计算其主成分的综合得分并进行排序 (表 4)，综合得分排在前 10 位的茶树品种分别为 A08、A07、A35、A49、A18、A21、A04、A11、A20、A23。

通过提取前 2 个主成分 PCo1 和 PCo2 (图 4)，PCo1 解释了 84.80% 的变异，而 PCo2 解释 7.95% 的变异，二者合计解释超过 92.00% 的总变异，表明前 2 个主成分足以代表原始数据的大部分信息，50 份茶树品种 (系) 被分为几个明显的聚类，其中 A08 和 A07 在 PCo1 上得分较高，A26 和 A39 在 PCo2 上得分较高。A30 和 A48、A20 和 A35、A10 和 A34 等品种 (系) 在图中的位置较为接近，

说明它们在这 2 个主成分所代表的解剖特征上相似。且 50 个茶树品种在 PCo1 和 PCo2 上的分布较为分散，表明这些品种在叶片解剖结构上存在较大差异，但种间存在明显的聚类现象，说明它们在叶片解剖特征上较为相似。

3 讨论

茶树的叶片解剖结构是种间分类的重要依据之一，也是遗传改良成功的关键，对植物资源的保护和利用具有重要作用^[21]。本研究对 50 份茶树品种 (系) 的 17 项叶片解剖结构指标进行了分析，结果显示这些结构性状存在丰富的遗传多样性，尤其是上表皮厚度、海绵组织厚度和叶片总厚度等指标的遗传多样性指数较高，表明这些性状具有较大的遗传改良潜力。在类似研究中，油茶近缘种的叶片结构指标也表现出极显著差异，反映出品种 (系) 对生境的不同适应性^[22]。

茶树叶片解剖结构与茶树品种的产量、品质、抗逆性、茶类适制性等均有密切的关系，是一切生理活动的基础^[23]。叶片解剖结构与光合强度密切相关，栅栏组织厚度越大，层次越多，细胞排列越紧密，光合能力越强^[24]。本研究中，根据生

表 4 50 份茶树品种（系）的主成分得分
Tab. 4 Principal component scores of 50 tea accessions

编号 Code	主成分得分 Score of principal component					综合得分 Composite score	排名 Rank
	$Z_{(i,1)}$	$Z_{(i,2)}$	$Z_{(i,3)}$	$Z_{(i,4)}$	$Z_{(i,5)}$		
A08	7.694	0.536	-0.721	-2.515	1.419	3.688	1
A07	4.046	2.880	-1.066	-0.272	-1.796	2.375	2
A35	2.862	2.945	-0.029	1.171	-0.484	2.157	3
A49	4.459	-0.171	-1.362	-0.531	0.853	2.017	4
A18	2.038	1.580	2.251	0.928	1.071	1.776	5
A21	2.452	1.331	1.586	0.436	-1.001	1.649	6
A04	3.466	-1.005	1.417	-1.324	-1.499	1.385	7
A11	1.023	2.255	0.907	1.067	-0.100	1.214	8
A20	1.046	3.033	-1.086	1.691	-1.035	1.181	9
A23	1.457	0.019	2.150	1.267	0.937	1.144	10
A47	1.956	-0.060	-1.523	0.503	2.366	1.009	11
A45	2.672	-0.784	-1.639	-0.085	0.809	1.009	12
A10	2.158	-0.359	0.760	-0.827	0.298	1.001	13
A32	1.435	1.017	-0.074	-1.208	1.491	0.924	14
A22	2.831	-2.719	0.923	-0.425	0.078	0.831	15
A41	-0.533	4.574	2.007	-1.248	-0.968	0.811	16
A05	1.166	-0.841	2.673	0.892	-0.339	0.729	17
A34	1.236	-0.242	0.079	-0.706	-0.050	0.488	18
A01	-1.165	4.390	-1.148	0.362	0.719	0.400	19
A09	0.909	-0.879	-0.358	1.352	-0.673	0.287	20
A13	-0.418	1.133	-0.517	2.165	0.462	0.244	21
A36	1.795	-2.028	-1.124	-0.939	0.367	0.232	22
A06	-1.193	2.157	0.185	0.914	-0.122	0.008	23
A12	0.836	-2.211	2.086	-0.731	-0.692	0.005	24
A03	-0.319	2.348	-2.198	-0.062	-2.241	-0.027	25
A42	-0.556	0.012	-0.798	1.943	1.233	-0.076	26
A28	-0.138	-1.922	1.031	1.787	1.232	-0.133	27
A44	0.485	-1.574	-2.326	1.517	0.353	-0.200	28
A15	-0.446	0.355	0.745	-0.880	-1.304	-0.240	29
A30	-0.989	0.167	0.888	0.987	-0.192	-0.271	30
A48	-0.761	-0.492	-0.075	0.460	2.140	-0.291	31
A19	-0.456	0.199	-0.007	-1.602	0.331	-0.310	32
A38	0.472	-3.075	0.651	0.714	-0.378	-0.363	33
A24	-0.347	-0.589	-1.348	0.033	0.362	-0.421	34
A43	-0.441	-1.899	-0.164	0.619	0.350	-0.584	35
A31	-0.992	-0.686	0.568	-1.505	0.587	-0.686	36
A16	-1.106	-1.139	-0.138	1.000	0.322	-0.699	37
A50	0.134	-3.230	0.137	1.592	-2.700	-0.707	38
A37	-0.723	0.185	-1.878	-2.209	-0.810	-0.790	39
A33	-1.883	-0.241	-0.023	0.246	0.174	-0.946	40
A46	-1.622	-0.190	-0.057	-2.137	0.160	-1.042	41
A27	-1.575	-0.662	0.353	-0.727	-1.565	-1.075	42
A40	-1.468	-1.770	-1.839	0.861	-0.572	-1.284	43
A02	-1.202	-1.910	-1.709	0.449	-1.620	-1.290	44
A29	-3.807	1.866	0.284	-1.645	0.403	-1.542	45
A25	-2.743	-2.371	-0.102	-2.453	0.165	-2.129	46
A14	-4.183	-1.698	1.150	-0.099	-0.256	-2.350	47
A17	-4.314	-1.539	0.404	-0.248	0.438	-2.421	48
A26	-6.787	2.313	1.875	-0.110	1.125	-2.529	49
A39	-8.462	0.991	-1.802	-0.469	0.152	-4.159	50

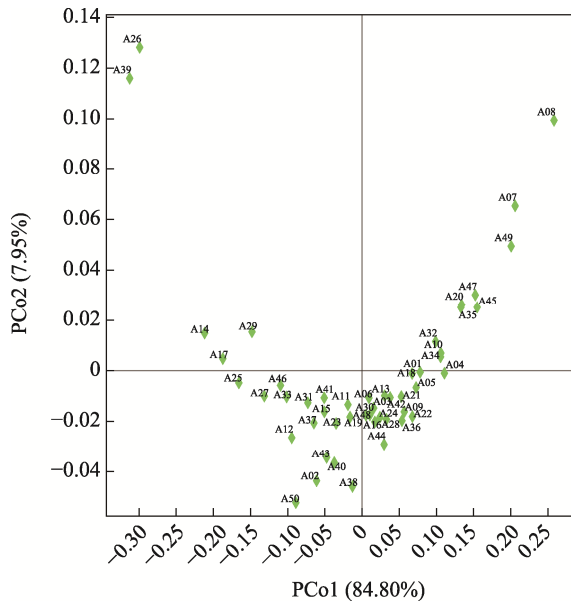


图 4 50 份茶树品种 (系) 的 PCoA 主坐标分析图
Fig. 4 PCoA principal coordinates analysis plot of 50 tea accessions

产力指数 (N) 和栅栏组织厚度 (TP) 可知, 软枝乌龙 ($N=6181.74$ 、 $TP=0.76$) 和黄旦 ($N=5268.01$ 、 $TP=0.60$) 表现最优, 桂红 4 号 ($N=1362.94$ 、 $TP=0.02$) 最低, 与苏印泉等^[25]、唐茜^[20]的研究结果一致, 即生产力水平和栅栏组织厚度呈正相关关系。尤其是发现栅栏组织与海绵组织厚度比值 (P/S) 与净光合速率呈显著正相关 (相关系数高达 0.9 以上), 说明栅栏组织在提高光合能力方面具有关键作用^[22]。

本研究的相关性分析表明, 茶树叶片厚度与上表皮角质层厚度、栅栏组织厚度及海绵组织厚度之间存在显著正相关关系, 这意味着茶树在应对环境胁迫时倾向于通过增加叶片各结构层次的厚度和细胞组织的紧密程度来实现保护作用。这一结论与 CHEN 等^[26]的研究结果相似: 即在干旱胁迫下, 茶树新叶和成熟叶的角质层会明显加厚, 叶表蜡质沉积增加, 从而有效降低叶片的非气孔失水速率, 提高茶树的抗旱能力。

叶片解剖结构在抵御多种逆境中发挥重要功能。首先, 在低温胁迫下, 较厚的叶片和发达的栅栏组织有助于维持叶片组织的稳定, 从而增强茶树的抗寒性。XU 等^[27]比较了 2 个油茶品种的幼苗叶片结构, 发现抗冷性较强的品种其幼苗叶片栅栏组织显著较厚, 组织排列更紧密, 栅栏组织与海绵组织比例更高, 这些结构特征提高了植物在低温 ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下的耐受力。其次, 厚实的角

质层既是防止水分过度蒸腾的重要屏障, 也是抵御病原菌和害虫侵袭的第一道防线^[28]。叶片表面的角质层和蜡质不仅限制水分散失, 还可作为病虫识别植物的化学和物理屏障^[29]。据报道, 抗茶饼病 (*Exobasidium vexans* 导致的嫩芽枯萎病) 的茶树抗病品种往往具有更厚的角质层和叶片, 比感病品种拥有更多的表面蜡质和绒毛, 且气孔密度更低, 这些结构特征有效阻碍了病菌从表皮直接侵入, 提高了茶树对病害的免疫力^[30]。

此外, 叶片中存在的草酸钙结晶也可能参与植物的抗逆防御^[13]。本研究观察到草酸钙结晶含量的变异系数较高 (37.90%), 为与抗寒性评分的变异幅度 (39.10%) 相当。草酸钙晶体被认为是植物针对食叶害虫的物理防御之一, 其机械刺激和抗营养作用能在一定程度上阻碍昆虫取食^[31]。PAULA 等^[32]研究发现, 叶片草酸钙晶体密度较高的茶树品种在田间表现出更强的抗虫取食能力, 这些晶体可作为钙离子储库, 冲泡时部分 Ca^{2+} 可与儿茶素配位并改变苦涩与收敛感, 进而影响汤感顺滑度和回甘速度。因此, 不同茶树品种叶片中草酸钙结晶的差异, 可能反映其在抗虫抗逆策略上的不同。未来可结合代谢组学方法, 深入解析次生代谢物 (如草酸钙晶体等) 与叶片解剖结构在茶树环境适应中的互作机制, 以更全面地了解茶树抗逆性的结构-功能基础。

尽管本研究揭示了茶树叶片解剖结构的表型多样性及其与抗逆性和生产力之间的关联规律, 但对关键结构性状背后的分子调控机制尚缺乏明确认识。已有的转录组研究提供了一些启示, 例如 SAMARINA 等^[33]发现, 茶树在遭受冷害和干旱胁迫时, 细胞壁重塑及脂质代谢相关的基因表达显著激活, 提示茶树可能通过细胞壁的加固 (表现为叶片组织厚度增加) 及角质层的脂质调整 (表现为叶表蜡质积累与角质层结构优化) 等途径, 来提升对环境胁迫的适应能力, 同时, 转录组揭示 F3'H/F3'5'H 上调而 DFR/FLS 下调, 使儿茶素谱朝酯型与多羟基型优化, 并叠加角质层脂质储存的芳香前体, 冲泡后其汤色更亮, 滋味由苦涩转为浓醇回甘。然而, 目前尚无充分的研究将这些分子层面的变化与具体叶片解剖结构性状明确关联起来。因此, 未来研究应重点整合全基因组关联分析 (GWAS) 手段, 筛选与叶片解剖结构性状相关的候选基因, 并通过功能验证进一步明确调控栅栏组织发育的关键基因。此外, 通过田

间胁迫处理试验并动态监测叶片解剖结构参数的变化,可进一步完善茶树抗逆性评价模型,深入解析茶树叶片结构适应环境胁迫的功能机制,从而为茶树遗传改良和新品种选育提供更加坚实的理论基础。

聚类分析结果将 50 份茶树品种（系）分为 3 个类群,第 II 类群在上、下表皮角质层厚度、栅栏组织厚度等多项解剖结构性状上显著优于其他类群,提示该类群品种可能在抗逆性和生产力方面更具优势,这也与已有研究通过聚类分析筛选优良茶树品种（系）的研究成果相类似^[12]。主成分分析进一步浓缩并综合评价了叶片结构性状对茶树资源品质的影响,综合得分排名前 10 的茶树品种（系）如软枝乌龙、黄旦等,可作为优良种质在广西及类似生态区域进行重点推广与新品种选育。

参考文献

- [1] 林喜盈. 24 个福鼎地方茶树种质资源遗传多样性与亲缘关系分析[J]. 茶叶学报, 2024, 65(2): 19-26.
LIN X Y. Genetic analysis on twenty-four tea germplasms from Fuding[J]. Acta Tea Sinica, 2024, 65(2): 19-26. (in Chinese)
- [2] 束际林. 茶树叶片解剖结构鉴定的原理与技术[J]. 中国茶叶, 1995(1): 2-4.
SU J L. The principles and techniques of anatomical structure identification of tea plant leaves[J]. China Tea, 1995(1): 2-4. (in Chinese)
- [3] 周志雄, 王龙远, 郭微, 谈静, 吴伟, 许凯, 薛彬娥, 李凌飞. 7 种秋海棠属植物叶片解剖结构分析与耐热性评价[J]. 广东农业科学, 2023, 50(9): 173-180.
ZHOU Z X, WANG L Y, GUO W, TAN J, WU W, XU K, XUE B E, LI L F. Analysis on leaf anatomy of 7 begonia species and evaluation on their heat tolerance[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2023, 50(9): 173-180. (in Chinese)
- [4] 刘应嘉, 李彩, 雷成功, 党江波. 十二个油橄榄品种的叶片保水能力及解剖结构分析[J]. 南方农业, 2024, 18(7): 48-53.
LIU Y J, LI C, LEI C G, DANG J B. Analysis of water retention capacity and anatomical structure of leaves of twelve olive accessions[J]. South China Agriculture, 2024, 18(7): 48-53. (in Chinese)
- [5] 曾宪海, 焦云飞, 廖子荣, 潘登浪, 林位夫. 广东不同地区油棕叶片解剖结构观察与评价[J]. 热带作物学报, 2018, 39(11): 2176-2185.
ZENG X H, JIAO Y F, LIAO Z R, PAN D L, LIN W F. Observation and evaluation of leaf anatomical features of oil palm introduced in different regions in guangdong province[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(11): 2176-2185. (in Chinese)
- [6] 李孝伟, 靳秀丽, 梁彦生. 两地区南方红豆杉叶片解剖结构观察[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2007(3): 38-41.
LI X W, JIN X L, LIANG Y S. Observation of dissecting constructs of taxus mariei in two areas[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2007(3): 38-41. (in Chinese)
- [7] 陈荣冰. 茶树不同品种叶片的解剖结构观察[J]. 茶叶科学简报, 1989(3): 29-33.
CHEN R B. Observation of the anatomical structure of leaves from different accessions of tea plants[J]. Acta Tea Sinica, 1989(3): 29-33. (in Chinese)
- [8] 覃秀菊, 李凤英, 何建栋, 廖少卯, 邓慧群, 罗晓梅, 彭有兵. 广西茶树新品种品系叶片解剖结构特征与特性关系的研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(10): 36-39.
QIN X J, LI F Y, HE J D, LIAO S M, DENG H Q, LUO X M, PENG Y B. The relations between the blade anatomical structure and characters of the new tea accessions in Guangxi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(10): 36-39. (in Chinese)
- [9] 杨亚军, 杨素娟, 杨跃华, 曾建明. 早生优质适制名优绿茶新品种——中茶 108 选育研究[J]. 中国茶叶, 2003(2): 12-13.
YANG Y J, YANG S J, YANG Y H, ZENG J M. Research on the breeding of a new early-birth high-quality and suitable variety of gamous green tea - Zhongcha 108[J]. China Tea, 2003(2): 12-13. (in Chinese)
- [10] 李凤英, 邱勇娟, 邓慧群, 韦慧娜, 赖兆荣, 罗小梅. 广西姑辽野生茶树叶片解剖结构及特性分析[J]. 广东农业科学, 2014, 41(24): 33-36.
LI F Y, QIU Y J, DENG H Q, WEI H N, LAI Z R, LUO X M. Study on anatomy structures and characteristics of leaves of wild tea *Camellia sinensis* from Guangxi[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(24): 33-36. (in Chinese)
- [11] 王飞权, 李纪艳, 冯花, 罗盛财, 林美菁, 李少华, 张见明, 张渤, 陈荣冰. 武夷名丛茶树种质资源叶片解剖结构分析[J]. 热带作物学报, 2019, 40(12): 2375-2389.
WANG F Q, LI J Y, FENG H, LUO S C, LIN M J, LI S H, ZHANG J M, ZHANG B, CHEN R B. Analysis of leaf anatomical structure of Wuyi Mingcong tea accessions[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(12): 2375-2389. (in Chinese)
- [12] 李佼, 李豆豆, 王令, 吴军舰, 席彦军, 王思梅, 蒲国涛, 陈钦. 43 份汉中茶树种质资源叶片解剖结构分析[J]. 西北农业学报, 2023, 32(1): 62-71.
LI J, LI D D, WANG L, WU J J, XI Y J, WANG S M, PU G

- T, CHEN Q. Analysis of leaf anatomical structure of 43 tea plant (*Camellia sinensis*) germplasm resources in Hanzhong[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2023, 32(1): 62-71. (in Chinese)
- [13] 杨春, 苏胜峰, 杨代星, 梁思慧, 郭燕, 郭灿, 陈正武. 贵州两地野生茶树叶片解剖结构比较及抗逆性分析[J]. *河南农业科学*, 2024, 53(1): 48-61.
YANG C, SU S F, YANG D X, LIANG S H, GUO Y, GUO C, CHEN Z W. Comparison of leaf anatomical structure and stress resistance analysis of wild tea plants in Panzhou city and Sandu county, Guizhou province[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2024, 53(1): 48-61. (in Chinese)
- [14] 董方, 涂娟, 杨菲颖, 董越, 吴月坤, 陈勤操, 金玲莉, 谢枫. 基于叶片解剖结构性状的 17 份江西茶树种质资源综合评价[J]. *江西农业大学学报*, 2024, 46(2): 328-339.
DONG F, TU J, YANG F Y, DONG Y, WU Y K, CHEN Q C, JIN L L, XIE F. Comprehensive evaluation of 17 tea accessions in Jiangxi based on leaf anatomical structure characteristics[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2024, 46(2): 328-339. (in Chinese)
- [15] 宁静, 刘振, 杨拥军, 杨阳, 沈程文, 张曙光, 肖敦旺, 马良元. 城步岷茶资源主要生化成分遗传多样性分析[J]. *茶叶通讯*, 2019, 46(3): 269-275.
NING J, LIU Z, YANG Y J, YANG Y, SHEN C W, ZHANG S G, XIAO D W, MA L Y. Genetic diversity analysis for main biochemical components of Chengbu Dong tea accessions[J]. *Journal of Tea Communication*, 2019, 46(3): 269-275. (in Chinese)
- [16] 骆颖颖, 梁月荣. 茶树抗寒性的间接鉴定[J]. *茶叶科学技术*, 1998(3): 1-7.
LUO Y Y, LIANG Y R. Indirect identification of cold resistance in tea plants[J]. *Acta Tea Sinica*, 1998(3): 1-7. (in Chinese)
- [17] 张馨方, 郭燕, 张树航, 李颖, 刘金雨, 范丽颖, 王广鹏. 210 份板栗种质资源坚果表型性状多样性分析[J]. *中国农业大学学报*, 2025, 30(1): 90-103.
ZHANG X F, GUO Y, ZHANG S H, LI Y, LIU J Y, FAN L Y, WANG G P. Diversity analysis of nut phenotypic traits of 210 Chinese chestnut germplasm resources[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(1): 90-103. (in Chinese)
- [18] 高香凤, 李慧玲, 王庆森. 茶树叶片组织结构及次生物质与抗虫性关系研究进展[J]. *茶叶科学技术*, 2011(2): 7-11.
GAO X F, LI H L, WANG Q S. Research progress on the relationship between leaf tissue structure, secondary metabolites and insect resistance in tea plants[J]. *Acta Tea Sinica*, 2011(2): 7-11. (in Chinese)
- [19] 刘燕, 罗文敏, 段如雁, 李芸, 杨秀忠. 威宁地区茶树种质资源的抗旱性研究[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(3): 530-535.
LIU Y, LUO W M, DUAN R Y, LI Y, YANG X Z. Study on drought-resistant tea cultivars in Weining county[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(3): 530-535. (in Chinese)
- [20] 唐茜. 川西茶区主栽品种光合强度与叶片结构相关关系的研究[J]. *四川农业大学学报*, 1997(2): 48-53.
TANG Q. Study on the relationship between photosynthetic intensity and leaf structure of main cultivated accessions in western Sichuan tea region[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 1997(2): 48-53. (in Chinese)
- [21] 王玉, 张金霞, 丁兆堂. ‘黄山种’自然杂交后代叶片解剖结构变异特性研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(10): 209-212.
WANG Y, ZHANG J X, DING Z T. Research on leaf anatomical structure of the natural hybrid progenies of *Camellia sinensis* ‘Huangshanzhong’[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(10): 209-212. (in Chinese)
- [22] HU Y, YANG L, GAO C, LIAO D S, LONG L, QIU J, WEI H L, DENG Q E, ZHOU Y C. A comparative study on the leaf anatomical structure of *Camellia oleifera* in a low-hot valley area in Guizhou province, China[J]. *PLoS One*, 2022, 17(1): e0262509.
- [23] 李娟, 江昌俊, 余有本. 茶树叶片解剖结构与蒸青茶适制性研究[J]. *中国茶叶加工*, 2008(4): 17-20.
LI J, JIANG C J, YU Y B. Anatomical structure of tea leaves and suitability for steamed green tea processing[J]. *China Tea Processing*, 2008(4): 17-20. (in Chinese)
- [24] ROSSATTO D R, KOLB R M. *Gochnatia polymorpha* (Less.) Cabrera (Asteraceae) changes in leaf structure due to differences in light and edaphic conditions[J]. *Acta Botanica Brasiliica*, 2010, 24(3): 605-612.
- [25] 苏印泉, 张军侠. 10 种茶树叶片比较解剖学及与抗性关系的研究[J]. *西北林学院学报*, 1998(4): 3-10.
SU Y Q, ZHANG J X. A study on comparative anatomy and relationship with resistance of tea blades of 10 species[J]. *Journal of Northwest Forestry College*, 1998(4): 3-10. (in Chinese)
- [26] CHEN M J, ZHU X F, ZHANG Y, DU Z H, CHEN X B, KONG X G, SUN W J, CHEN C S. Drought stress modify cuticle of tender tea leaf and mature leaf for transpiration barrier enhancement through common and distinct modes[J]. *Scientific Reports*, 2020(10): 6696.
- [27] XU H Y, HUANG C L, JIANG X, ZHU J, GAO X Y, YU C. Impact of cold stress on leaf structure, photosynthesis, and metabolites in *Camellia weiningensis* and *C. oleifera* seedlings[J]. *Horticulturae*, 2022(8): 494.

- [28] BARTHLOTT W, NEINHUI C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces[J]. *Planta*, 1997(202): 1-8.
- [29] EIGENHRODE D S, KARL E E. Effects of plant epicuticular lipids on insect herbivores[J]. *Annual Review of Entomology*, 1995(40): 94-171.
- [30] MAHADEVAN N, SINNI AH G D, GUNASEKARAM P, KARUNAJEEWA D G N P. How tea plant defends against blister blight disease: facts revealed and unexplored horizons[J]. *Plant Disease*, 2024(108): 2253-2263.
- [31] NAKATA P A. An assessment of engineered calcium oxalate crystal formation on plant growth and development as a step toward evaluating its use to enhance plant defense[J]. *PLoS One*, 2015, 10(10): e0141982.
- [32] PAULA P, ROSER T, ROGHIEH H, KATARINA V M, MITJA K, PRIMOZ V, PRIMOZ P, JUAN B, MARJANA R, CHARLOTTE P. Contrasting allocation of magnesium, calcium and manganese in leaves of tea (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze) plants may explain their different extraction efficiency into tea[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2020 (135): 110974.
- [33] SAMARINA L, WANG S B, MALYUKOVA L, BOBROVSKIKH A, DOROSHKOV A, KONINSKAYA N, SHKHALAKHOVA R, MATSKIV A, FEDORINA J, FIZIKOVA A, MANAKHOVA K, LOSHKARYOVA S, TUTBERIDZE T, RYNDIN A, KHLESTKINA E. Long-term cold, freezing and drought: overlapping and specific regulatory mechanisms and signal transduction in tea plant (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze)[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023(14): 1145793.