

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202507008

朱周俊, 明永钟, 饶雪, 等. 2026. 梵净山尖连蕊茶花粉育性与形态比较研究 [J]. 广西植物, 46(4): 708–716.

ZHU Z J, MING Y Z, RAO X, et al., 2026. Comparative study on pollen fertility and morphology of *Camellia cuspidata* in Fanjing Mountain [J]. *Guihaia*, 46(4): 708–716.



梵净山尖连蕊茶花粉育性与形态比较研究

朱周俊*, 明永钟, 饶雪, 赵君茹, 苏新宇, 杨红, 杨传东

(铜仁学院农林工程与规划学院, 贵州省高等学校油茶种质资源创新与利用工程研究中心,
贵州省梵净山生物多样性保护与利用重点实验室, 贵州铜仁 554300)

摘要: 为了探究梵净山的尖连蕊茶不同优株花粉育性与形态特征差异, 以及为其杂交育种提供参考, 该研究以不同种质的 9 个尖连蕊茶优株为材料, 通过纤维素酶分解法测定花粉数量, 采用琼脂离体萌发培养法测定花粉活力, 运用扫描电子显微镜 (SEM) 观察其花粉的形态特征并基于极轴长 (P)、赤道轴长 (E)、萌发沟长 (L)、P/E 值、P × E 值及 L/P 值等数量指标进行聚类分析。结果表明: (1) 梵净山尖连蕊茶的花粉数量和花粉活力均较高。单粒花药花粉数量变化范围为 4 780~12 950 粒; 除 FJSCF9 花粉萌发率只有 71.43% 以外, 其余优株均高于 91.20%。 (2) 尖连蕊茶花粉的外壁纹饰包括穴状、网状、脑纹状、皱波-颗粒状、皱网状、皱波状 6 种纹饰类型。9 个种质尖连蕊茶花粉的形态特征差异明显: 其花粉粒大小 (P × E) 变化范围为 1 903~2 275.92 μm^2 , 花粉 L/P 值变化范围为 0.79~0.89; FJSCF3 极轴长显著高于其他种质 ($P < 0.05$), 为 64.20 μm , 然而 FJSCF12 萌发沟长显著低于其他种质 ($P < 0.05$), 为 43.77 μm 。 (3) 聚类分析显示 9 个种质尖连蕊茶可分为 3 类: 第 I 类群包含 FJSCF1、FJSCF4、FJSCF8、FJSCF9、FJSCF10、FJSCF11 共 6 份材料, 花粉中等大小; 第 II 类群包含 FJSCF12 和 FJSCF13 共 2 份材料, 花粉较小; 第 III 类群仅 FJSCF3 1 份材料, 花粉粒大, P 值和 P × E 值最大, 分别为 64.20 μm 、2 275.92 μm^2 。综上所述, 该研究中来自梵净山的 9 个种质尖连蕊茶具有较高的花粉育性, 可作为杂交育种父本材料, 其花粉粒形态特征和花粉粒表面纹饰可作为种内分类辅助参考指标。

关键词: 尖连蕊茶, 花粉数量, 花粉活力, 花粉形态, 聚类分析

中图分类号: Q944.42 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2026)04-0708-09

Comparative study on pollen fertility and morphology of *Camellia cuspidata* in Fanjing Mountain

ZHU Zhoujun*, MING Yongzhong, RAO Xue, ZHAO Junru,
SU Xinyu, YANG Hong, YANG Chuandong

收稿日期: 2025-09-14 接受日期: 2025-10-15

基金项目: 贵州省教育厅青年人才成长项目(黔教技[2024]223号); 铜仁市科学技术局博士人才项目(铜市科研[2024]2号); 贵州省大学生创新创业训练计划项目(S2024106651883)。

第一作者: 朱周俊(1989—), 讲师, 硕士研究生导师, 主要从事山茶属种质资源创新及其开发应用研究, (Email) trxyngyzzj@163.com。

*通信作者

(Guizhou Provincial Education Department Engineered Research Center for Innovation and Utilization of Oil Camellia Germplasm Resources, Guizhou Provincial Key Laboratory for Biodiversity Conservation and Utilization in the Fanjing Mountain Region, College of Agriculture and Forestry Engineering and Planning, Tongren University, Tongren 554300, Guizhou, China)

Abstract: This study aimed to investigate the variations in pollen fertility and morphological characteristics among different provenances of *Camellia cuspidata* from Fanjing Mountain, thereby providing insights for parental selection in hybrid breeding. Nine superior variety individuals of *C. cuspidata* from different provenances were used as experimental materials. Pollen number was determined using a cellulase decomposition method, pollen viability was assessed through *in vitro* agar germination assays, and pollen morphological features were observed via scanning electron microscopy (SEM). Cluster analysis was conducted based on the following quantitative traits: polar axis length (P), equatorial axis diameter (E), sulcus length (L), P/E value, P × E value, and L/P value. The results were as follows: (1) *C. cuspidata* from Fanjing Mountain exhibited high pollen productivity and viability. The number of pollen grains per anther ranged from 4 780 to 12 950. Pollen germination rate exceeded 91.20% in all genotypes except for FJSCF9, which showed a germination rate of 71.43%. (2) The exine ornamentation of *C. cuspidata* pollen included six distinct types: foveolate, reticulate, cerebroid, rugulate-granular, rugulate-reticulate, and rugulate. Considerable morphological variation was observed among the nine provenances. Pollen size (P × E) ranged from 1 903 to 2 275.92 μm², and the pollen L/P values between 0.79 and 0.89. The polar axis length of FJSCF3 (64.20 μm) was significantly greater than those of other provenances ($P < 0.05$), while the sulcus length of FJSCF12 (43.77 μm) was significantly shorter than those of other provenances ($P < 0.05$). (3) Cluster analysis classified the nine provenances into three groups: Group I comprised six accessions (FJSCF1, FJSCF4, FJSCF8, FJSCF9, FJSCF10, and FJSCF11), characterized by medium-sized pollen; Group II included two accessions (FJSCF12 and FJSCF13) with relatively small pollen; Group III consisted solely of FJSCF3, which had the largest pollen grains, along with the greatest P and P × E values (64.20 μm and 2 275.92 μm², respectively). In conclusion, the nine provenances of *C. cuspidata* from Fanjing Mountain demonstrated high pollen fertility, suggesting their potential use as paternal parents in hybridization breeding. Additionally, pollen morphology and exine sculpturing patterns can serve as auxiliary indicators for intraspecific classification and identification.

Key words: *Camellia cuspidata*, pollen number, pollen viability, pollen morphology, cluster analysis

尖连蕊茶 (*Camellia cuspidata*) 隶属于山茶科 (Theaceae) 山茶属 (*Camellia*), 为常绿灌木。山茶属植物因其具有芳香 (Jullien et al., 2008; 宋晓虹等, 2009; Fan et al., 2019)、抗花腐病 (Denton-Giles et al., 2013) 及密花等特性在束花茶花种质创新等方面的发展逐渐受到关注, 尖连蕊茶兼具生态与经济多重开发潜力, 其种子含油率约 20%, 所提油脂可作为润滑油、印刷油墨及润发油等工业原料; 根、叶、花等器官性微苦寒, 兼具传统清热解毒功效与现代抗炎药理活性; 其突出的环境适应性、耐修剪性及芳香特性, 更使其成为兼具生态修复、园林造景与抗逆育种的特色资源 (倪穗和李纪元, 2005)。贵州省梵净山地区拥有丰富的尖连蕊茶资源, 均处于野生状态, 具有很大的开发利用前景。

花粉特征是鉴定山茶属植物的有力工具。

Yin 等 (2024) 应用花和花粉形态的 11 个指标将 18 个不同基因型的油茶 (*C. oleifera*) 分为三类; Ran 等 (2024) 利用孢粉学结合解剖学及分子系统学综合分析, 明确了冬青叶山茶 (*C. ilicifolia*) 和狭叶瘤果茶 (*C. nerifolia*) 为独立物种; Xiao 等 (2024) 使用孢粉学结合分子系统学探讨了瘤果茶组 (sect. *Tuberculata*) 5 个种的分类地位; 此外, 花粉育性水平与形态特征 (包括大小、形状、外壁纹饰及萌发孔结构) 直接影响花粉-柱头识别机制及授粉成功率, 是解析植物生殖适应性、优化杂交育种策略的关键切入点 (常春义等, 2018)。在茶花种质创新中, 花粉育性与形态的系统研究可为种间鉴定、杂交亲本选配、生殖障碍突破及优良性状整合提供理论依据 (李广清等, 2005)。于波等 (2018) 探究了碳源对短柄细叶连蕊茶 (*C. parvilimba*) 花粉萌发的影响, 发现适宜碳源

是蔗糖或乳糖;常春义等(2018)则认为细萼连蕊茶(*C. tsofui*)的花粉培养的适宜碳源是蔗糖;张亚利等(2023)研究了茶属连蕊茶组(sect. *Theopsis*)和毛蕊茶组(sect. *Eriandria*)的20种(变种)的花粉形态特征,认为花粉的形态特征支持连蕊茶组和毛蕊茶组植物为单系类群的观点;李广清等(2005)以连蕊茶组6种植物花粉为研究对象,开展了花粉形态特征观察,发现花粉外壁纹饰存在一定差异,可作为组内种间的区分依据;许林等(2010)对川鄂连蕊茶(*C. rosthorniana*)花粉的形态和生活力进行了较为系统的研究,推断川鄂连蕊茶在山茶属中具有较为特殊的分类地位,在适宜的培养条件下花粉萌发率高达94.28%。当前,有关贵州梵净山尖连蕊茶的花粉育性与形态的研究鲜有报道。此外,仅少数连蕊茶种质被引种驯化并用于杂交育种,其高抗逆性和芳香性状等种质创制方面的潜力尚未充分释放。

鉴于此,本研究以9个梵净山尖连蕊茶种质的优株为材料,通过纤维素酶分解法测定花粉数量,采用琼脂离体萌发培养法测定花粉活力,运用扫描电子显微镜观察其花粉的形态特征并开展聚类分析,拟探讨以下问题:(1)9个梵净山尖连蕊茶种质的花粉数量和花粉活力差异;(2)9个梵净山尖连蕊茶种质的优株花粉形态特征;(3)基于花粉形态的9个梵净山尖连蕊茶种质的优株亲缘关系。本研究旨在为梵净山尖连蕊茶种质的鉴定、杂交育种及开发利用提供等方面提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料采自贵州省梵净山地区连蕊茶分布核心区(108°45′55″—108°48′30″E, 27°49′50″—28°01′30″N)共9个课题组前期筛选的优株,选优标准为枝条花朵数平均大于8朵、生长健壮、抗病虫害(编号分别为FJSCF1、FJSCF3、FJSCF4、FJSCF8、FJSCF9、FJSCF10、FJSCF11、FJSCF12、FJSCF13)。于2024年3月中旬,分别采集每个优株上生长良好的、大蕾期的花朵均为50朵,剥下花药,取20粒饱满、未开裂的花药用于单个花药花粉量测定;其余花药置于硫酸纸中,于80 W灯泡下烘烤3~4 h,温度保持在28℃,使花药开裂散

粉24 h后取出收集花粉于5 mL离心管中(金亦佳等,2022),拧紧管盖,用封口膜缠紧瓶口后置于-20℃冰箱中密封干燥保存,备用。

1.2 试验方法

1.2.1 不同种质尖连蕊茶花粉育性测定 (1)花粉数量测定:采用纤维素酶法测定单花药花粉量(谢再成等,2020)。每个梵净山尖连蕊茶优株分别取完整花药60枚,随机均等分成3份,分别放入1.5 mL离心管中,加入1%纤维素酶1 mL处理24 h,充分振荡,使花粉粒均匀分布于溶液中,用微量移液枪吸取5 μL溶液滴于凹面载玻片上,在光学显微镜下观察统计,重复3次。计算公式如下:

$$M = (m \times 200) / 20.$$

式中: M 为每枚花药花粉量(粒/花药); m 为载玻片上总花粉粒数;200为稀释倍数;20为花药数量。

(2)花粉活力测定:将花粉从-20℃冰箱中取出,于4℃下放置2 h,再移至室温下放置2 h,使花粉逐渐解冻,用干净毛刷蘸取少许花粉均匀抖落于提前配置好的固体培养基(10%蔗糖+5%琼脂+100 mg·L⁻¹硼酸)上,置于28℃恒温箱暗培养2 h,采用光学显微镜观察、拍照。每个样本选取3个不同视野进行统计,确保每个视野的花粉粒数≥50粒。根据萌发标准(花粉管长度超过花粉粒直径2倍判定为萌发),统计花粉萌发率,以花粉萌发率表示花粉活力。花粉萌发率(%)=(萌发花粉数/视野总花粉数)×100。

1.2.2 不同种质尖连蕊茶花粉形态测定 花粉经处理后,采用导电胶粘在样品台上,喷金后在JSM-6380 LV型(日本电子)扫描电子显微镜下观察。每个样品花粉取30粒,采用ImageJ 1.8.0软件测量供试样品花粉粒极轴长(P)、赤道轴长(E)、萌发沟长(L),计算不同花粉粒大小($P \times E$)、极轴与赤道轴比(P/E)、萌发沟长与赤道轴比(L/E),并观察其形状及外壁纹饰等特点。花粉形态的描述参考韦仲新(1997)和李广清等(2005)。

1.3 数据分析

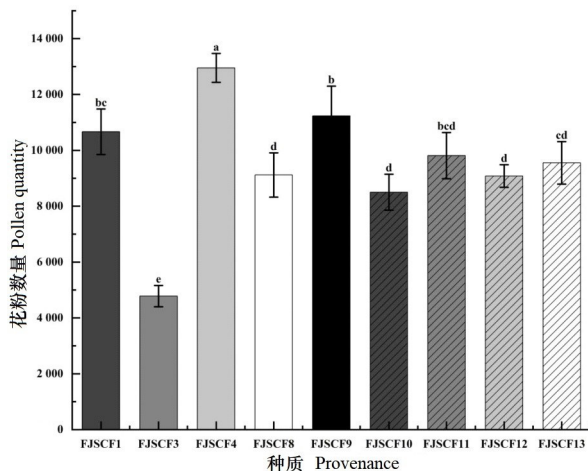
利用Excel 2021和SPSS 27统计软件进行分析,用Duncan法进行多重比较(LSD)和单因素方差分析(one-way ANOVA)。选取 P 、 E 、 L 、 P/E 、 $P \times E$ 、 L/E 6个定量指标,应用SPSS 27统计软件采用

平方欧式距离法进行系统聚类分析,并运用 Origin 2024 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同种质尖连蕊茶优株花粉育性比较

梵净山 9 个种质尖连蕊茶花粉数量存在显著性差异 ($P < 0.05$) (图 1), FJSCF4 的花粉数量 (12 951 粒) 显著高于其他优株 ($P < 0.05$), FJSCF9 花粉数量 (11 233 粒) 显著高于 FJSCF3、FJSCF8、FJSCF10、FJSCF12 和 FJSCF13, 但与 FJSCF1 和 FJSCF11 差异不显著 ($P > 0.05$)。FJSCF3 花粉数量最低, 为 4 780 粒, 比 FJSCF4 低 63.09%。



不同小写字母表示不同种质间在 0.05 水平存在显著性差异。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among different provenances at the 0.05 level. The same below.

图 1 不同种质尖连蕊茶优株花粉数量差异比较

Fig. 1 Pollen quantity variation among superior varieties of *Camellia cuspidata* from different provenances

梵净山 9 个种质尖连蕊茶花粉活力存在明显不同 (图 2)。FJSCF9 花粉活力显著低于其他种质 ($P < 0.05$), 萌发率为 71.43%, 其余 8 个种质间花粉活力差异不显著, 其萌发率均超 91.20%。综上, 梵净山 9 个种质尖连蕊茶花粉活力均表现较优。

2.2 不同种质尖连蕊茶优株花粉形态比较

9 个种质尖连蕊茶优株花粉形状为长球形, 其萌发孔类型均为 3 孔沟型, 花粉沟长达极轴且深裂, 极面观为 3 裂圆形 (图 3)。依据埃尔特曼

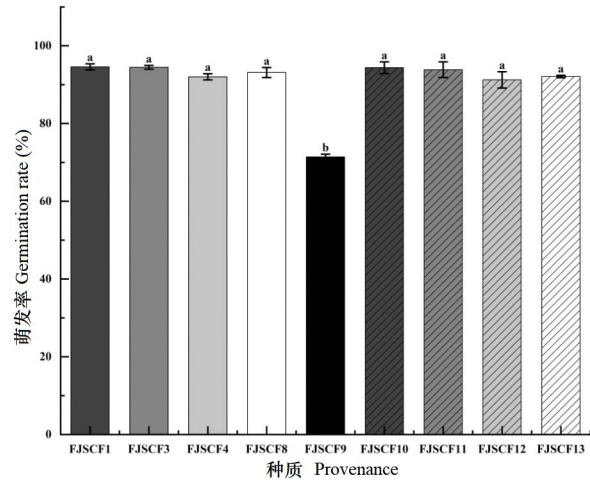
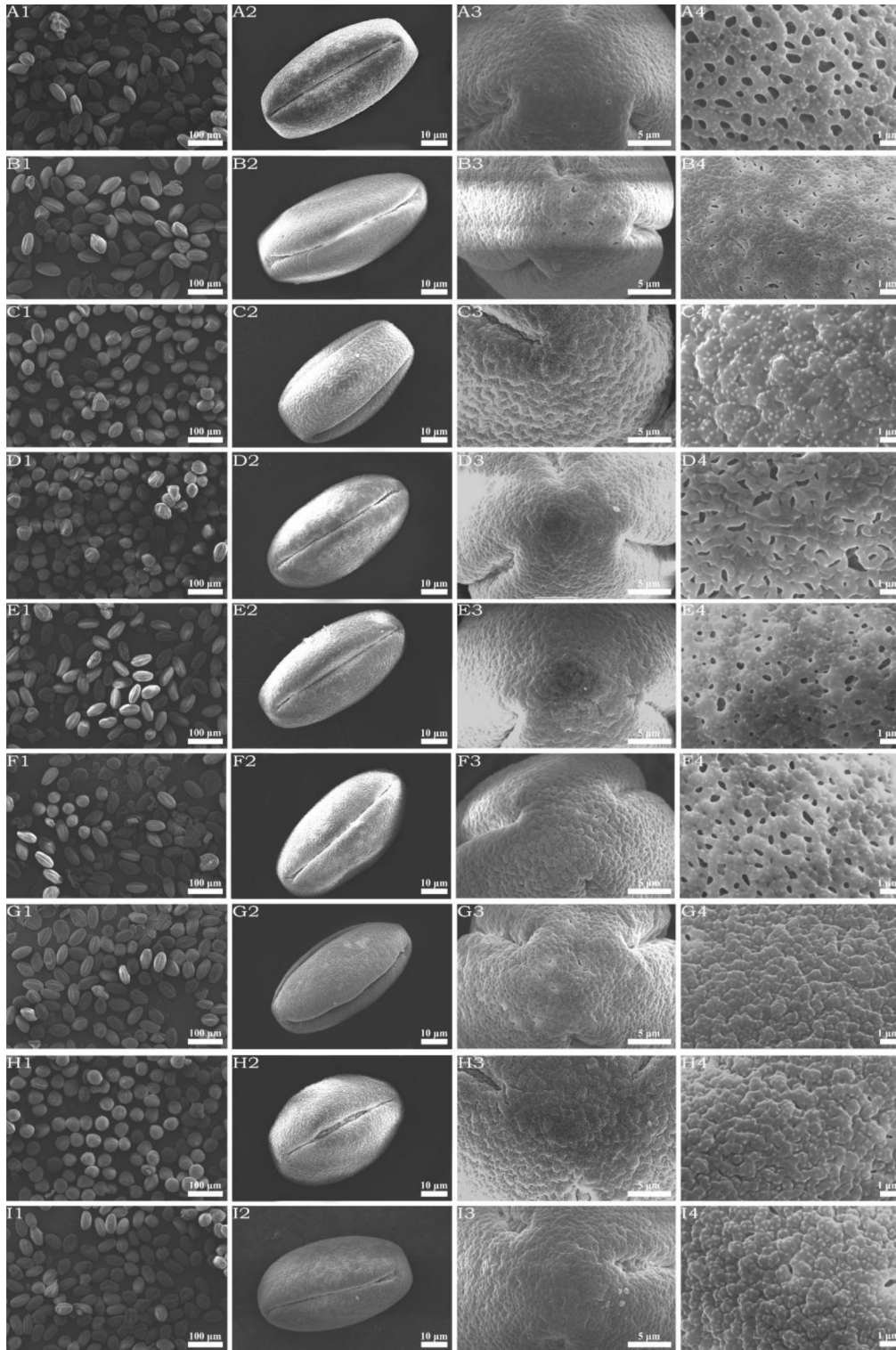


图 2 不同种质尖连蕊茶优株花粉活力比较

Fig. 2 Comparison of pollen viability differences among superior varieties of *Camellia cuspidata* from different provenances

(1978) 的 NPC 分类系统, 梵净山的尖连蕊茶花粉属于 $N_3P_4C_3$ 型。9 个种质尖连蕊茶优株花粉外壁纹饰存在明显不同, 包括穴状、网状、脑纹状、皱波-颗粒状、皱网状、皱波状 6 种纹饰类型。FJSCF1 花粉粒表面具网状纹饰, 网眼呈圆形三角形或不规则形状, 大小不一, 有疣粒, 小而密集; FJSCF3 花粉粒表面具穴状纹饰, 穴呈月牙形或不规则形状, 大小不一, 有疣粒, 极小而分布均匀; FJSCF4 花粉粒表面具皱波-颗粒状, 有疣粒, 大而密集; FJSCF8 花粉粒表面具脑纹状纹饰, 条纹粗且网脊粗细均匀, 网眼形状及大小不规则, 沟不成直线, 开口处明显变宽; FJSCF9 和 FJSCF10 花粉粒表面具不规则皱网状纹饰, 网眼为圆形或椭圆形, 大小不一, 有疣粒, 小而密集; FJSCF11 和 FJSCF12 花粉粒表面具皱波状纹饰, 轮廓为明显的凸波状, 网脊明显突出, 有小穿孔 (或小穴), 表面疣粒不明显; FJSCF13 花粉粒表面具皱波状纹饰, 轮廓为明显的凸波状, 网脊明显突出, 有月牙状穿孔, 表面疣粒明显, 分布较稀疏。

9 个种质尖连蕊茶花粉大小、形状方面均存在差异 (表 1)。FJSCF3 极轴长 (P) 显著高于其他种质 ($P < 0.05$), 为 $64.20 \mu\text{m}$; FJSCF12 P 值为 $56.04 \mu\text{m}$, 与 FJSCF4 差异不显著, 但显著低于其他种质 ($P < 0.05$)。FJSCF9 赤道轴长 (E) ($33.02 \mu\text{m}$) 显著低于 FJSCF3 ($35.43 \mu\text{m}$) 和 FJSCF4 ($34.94 \mu\text{m}$),



1-4 分别为花粉群体、极面观、赤道面观、外壁纹饰；A-I 分别为 FJSCF1、FJSCF3、FJSCF4、FJSCF8、FJSCF9、FJSCF10、FJSCF11、FJSCF12 和 FJSCF13 的花粉粒。

1-4 represent the pollen population, polar view, equatorial view, and exine ornamentation, respectively; A-I represent pollen grains of FJSCF1, FJSCF3, FJSCF4, FJSCF8, FJSCF9, FJSCF10, FJSCF11, FJSCF12, and FJSCF13, respectively.

图 3 不同种质尖连蕊茶优株花粉形态扫描电镜观察

Fig. 3 SEM observation of pollen morphology among superior varieties of *Camellia cuspidata* from different provenances

但与其他种质差异不显著 ($P>0.05$)。9 个种质尖连蕊茶花粉极轴长与赤道轴长比 (P/E) 变化范围为 1.66 ~ 1.89, FJSCF9 和 FJSCF10 的 P/E 值与 FJSCF1、FJSCF3 和 FJSCF8 差异不显著, 但显著高于 FJSCF4、FJSCF11、FJSCF12 和 FJSCF13。FJSCF10 萌发沟长 (L) 为 54.30 μm , 与 FJSCF1、FJSCF3 和 FJSCF8 差异不显著, 显著高于其余 5 个种质 ($P<0.05$); FJSCF12 L 值显著低于其他种质 ($P<0.05$), 43.77 μm , 比 FJSCF10 低 19.39%。9 个种质尖连蕊茶花粉萌发沟长与极轴长比 (L/P) 变化范围为 0.79 ~ 0.89。FJSCF3 花粉粒大小 ($P \times E$) 显著高于其他种质 ($P<0.05$), 为 2 275.92 μm^2 ; FJSCF12 $P \times E$ 值为 1 903.00 μm^2 , 与 FJSCF4、FJSCF8 和 FJSCF13 差异不显著, 显著低于其余 5 个种质 ($P<0.05$)。

2.3 不同种质尖连蕊茶优株花粉形态聚类分析

在平方欧式距离 $L=5$ 处, 可以将该 9 个种质尖连蕊茶优株分为 3 个类群 (图 4)。FJSCF1、FJSCF4、FJSCF8、FJSCF9、FJSCF10 和 FJSCF11 为第 I 类群, 花粉中等大小, 极轴长 (P)、赤道轴长 (E)、 P/E 值、萌发沟长 (L)、 L/P 值和花粉粒大小 ($P \times E$) 的平均值分别为 60.72 μm 、33.99 μm 、1.80、51.90 μm 、0.86、2 062.31 μm^2 ; FJSCF12 和 FJSCF13 为第 II 类群, 花粉较小, P 值、 E 值、 P/E 值、 L 值、 L/P 值和 $P \times E$ 值的平均值分别为 57.14 μm 、33.79 μm 、1.71、46.38 μm 、0.82、1 931.19 μm^2 ; FJSCF3 为第 III 类群, 花粉较大, 其 P 值、 E 值、 P/E 值、 L 值、 L/P 值和 $P \times E$ 值分别为 64.20 μm 、35.43 μm 、1.83、53.51 μm 、0.84、2 275.92 μm^2 。

3 讨论

花粉生物学特性是影响植物繁殖效率的关键因素, 其花粉量多寡会影响植物受精、产量和遗传信息的多样性 (张广进, 2006)。本研究发现, 梵净山尖连蕊茶单花药花粉量较多, 其单花药花粉粒数平均为 9 521 粒, 最高为 12 951 粒, 与博白大果油茶 (*Camellia gigantocarpa*) 花粉量 (9 441 粒) 相近 (何春燕等, 2009), 远高于高州油茶 (*C. gauchowensis*) (2 699 粒) 及普通油茶 (*C. oleifera*) (2 498 粒) (张鹏等, 2019)。此外, 不同品种单花的花粉量也不同。例如, 张绍铃等 (2003) 发现不同品种的沙梨 (*Pyrus pyrifolia*) 花粉数量存在很大

差异, ‘新高’梨 (*P. pyrifolia* ‘Niiitaka’) 每枚花药的花粉数仅有 1 622 粒, ‘丰水’梨 (*P. pyrifolia* cv. Hosui) 高达 10 745 粒; 李斯宇等 (2023) 对 2 个榴莲 (*Durio zibethinus*) 品种花粉数量进行比较分析, 发现 ‘干尧’ (*D. zibethinus* ‘Kanyao’) 花粉数量显著高于 ‘金枕’ (*D. zibethinus* ‘Monthong’)。本研究也发现类似现象, FJSCF4 的花粉数量显著高于其他优株, 为 12 951 粒, FJSCF3 花粉数量最低, 为 4 780 粒, 比 FJSCF4 低 63.09%。

花粉活力是反映植物花粉育性的重要指标之一, 可以根据花粉活力选择杂交亲本, 为杂交育种亲本选配提供参考资料 (Althiab-Almasaud et al., 2024)。本研究中, 梵净山的尖连蕊茶供试花粉表现出很强的花粉活力, 花粉萌发率在 90% 以上 (除 FJSCF9 花粉萌发率为 71.43% 以外), 与川鄂连蕊茶花粉活力 (最高 94.28%) 相当 (许林等, 2010), 显著高于连蕊茶组内的其他近缘物种, 如常春义等 (2018) 报道的细萼连蕊茶最高仅为 20.07%, 于波等 (2018) 报道的短柄细叶连蕊茶 16.17%。相较于山茶属其他组, 梵净山尖连蕊茶花粉活力同样展现明显优势。攸县油茶 (*Camellia yuhsienensis*) 的花粉萌发率范围为 40.68% ~ 70.13% (叶佳伟等, 2024), 威宁短柱茶 (*C. weiningensis*) 花粉萌发率为 54.00% (Wei et al., 2021), 普通油茶栽培品种 ‘华金’ ‘华鑫’ ‘华硕’ 的萌发率依次为 74.81%、86.54%、77.96% (陈雅等, 2020)。值得注意的是, 本研究结果与肖玉菲等 (2021) 对陆川油茶 (*C. vietnamensis*) 的离体萌发测定结果 (97.89%) 具有相似性, 表明不同山茶属植物种间可能存在花粉萌发特性的显著分化。此外, 于璐 (2013) 认为花粉的活力因树种和品种的不同有显著差异, 其遗传特性是导致花粉活力差异的主要因素。同样, 王玉娟等 (2014) 通过对赣无系列油茶花粉活力的研究发现, 不同油茶品种的花粉萌发率存在明显差异, 进一步证实了品种遗传特性对花粉活力的决定性影响。因此, 前期课题组筛选的尖连蕊茶种质材料具有较高的花粉活力, 未来研究拟聚焦山茶属植物遗传改良。

花粉是植物遗传信息的重要载体 (Hu & Gao, 2022), 其主要受自身基因的控制 (Hu et al., 2021), 不同种的花粉具有一定的形态识别特征, 这些形态和结构特征是鉴别植物种的依据之一。

表 1 不同种质尖连蕊茶优株花粉形态差异比较

Table 1 Comparison of pollen morphological differences among superior varieties of *Camellia cuspidata* from different provenances

种质 Provenance	极轴长(P) Polar axis (μm)	赤道轴长(E) Equatorial axis (μm)	P/E	萌发沟长(L) Germinal furrow length (μm)	L/P	P × E
FJSCF1	61.33±4.11bcd	33.89±1.93ab	1.82±0.18ab	54.01±4.09ab	0.88±0.08a	2 076.90±161.52bc
FJSCF3	64.20±3.87a	35.43±3.26a	1.83±0.19ab	53.51±3.17ab	0.84±0.08ab	2 275.92±256.90a
FJSCF4	57.96±2.42fg	34.94±2.04a	1.66±0.12c	48.57±3.46d	0.84±0.08ab	2 024.68±138.04bcd
FJSCF8	60.41±4.24cde	33.57±2.78ab	1.81±0.20ab	53.27±4.55ab	0.89±0.09a	2 027.25±216.66bcd
FJSCF9	62.13±1.98abc	33.02±1.60b	1.89±0.11a	51.39±4.80bc	0.83±0.08ab	2 051.60±116.92bc
FJSCF10	62.70±2.64ab	33.84±2.36ab	1.86±0.15a	54.30±2.73a	0.87±0.06a	2 121.97±177.45b
FJSCF11	59.79±2.36def	34.65±2.25ab	1.73±0.12bc	49.85±3.91cd	0.83±0.07ab	2 071.45±156.11bc
FJSCF12	56.04±3.57g	33.91±4.00ab	1.67±0.21c	43.77±4.68e	0.79±0.11b	1 903.00±272.99d
FJSCF13	58.25±3.36ef	33.68±2.37ab	1.74±0.18bc	48.98±2.31cd	0.84±0.08ab	1 959.39±151.00cd

注：同列不同小写字母表示不同种质间在 0.05 水平存在显著性差异。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different provenances at the 0.05 level.

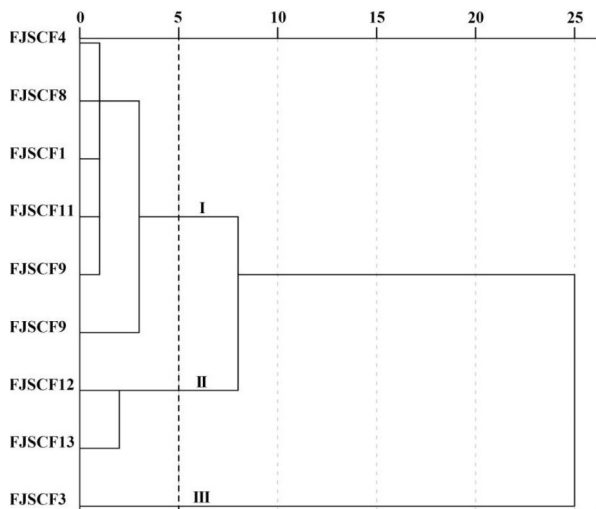


图 4 不同种质尖连蕊茶优株花粉形态分类

Fig. 4 Pollen morphological classification among superior varieties of *Camellia cuspidata* from different provenances

本研究中,9 个种质尖连蕊茶花粉 P/E 值为 1.66~1.89,为长球形花粉,符合山茶属花粉形态特征(张俊丽等,2022),与张亚利等(2023)研究连蕊茶组花粉形态基本一致。通过选取 P、E、L、P/E、P × E、L/E 6 个定量指标,聚类分析显示可分为 3 个典型类群,花粉粒大小差异比较明显。第 I 类群包括 FJSCF1、FJSCF4、FJSCF8、FJSCF9、FJSCF10

和 FJSCF11,花粉中等大小;第 II 类群包括 FJSCF12 和 FJSCF13,花粉较小;第 III 类群仅有 FJSCF3,花粉粒最大。本研究凭借孢粉学的数据在一定程度上揭示了梵净山不同种质尖连蕊茶间的花粉变异程度,下一步需在分子水平上进行验证。

连蕊茶组植物花粉纹饰描述不尽相同。韦仲新(1997)认为金屏连蕊茶(*C. tsingpienensis*)花粉外壁纹饰为皱波状类型,细尖连蕊茶(*C. parvicuspidata*)则为网状类型。李广清等(2005)将 6 种连蕊茶组植物的花粉外壁纹饰分为 4 种类型,其中桉叶连蕊茶(*C. euryooides*)花粉的表面纹饰为脑纹状,毛柄连蕊茶(*C. fraterna*)和七瓣连蕊茶(*C. septempetala*)为不规则皱网状,肖长尖连蕊茶(*C. subacutissima*)、岳麓连蕊茶(*C. handelii*)和小长尾连蕊茶(*C. parvicaudata*)为穴状。张亚利等(2023)将 13 个连蕊茶组植物花粉纹饰分为孔穴状、疣状和颗粒状 3 种纹饰类型,长管连蕊茶(*C. elongata*)为孔穴状纹饰,蒙自连蕊茶(*C. forrestii*)和尖萼蒙自连蕊茶(*C. forrestii* var. *acutisepala*)为疣状纹饰,其余 10 种(变种)均为颗粒状纹饰。本研究中,梵净山尖连蕊茶外壁纹饰可分为穴状、网状、脑纹状、皱波-颗粒状、皱网状、皱波状 6 种纹饰类型,其类型十分丰富,种内存在明显差异,这可能与花粉某些形态特征受基因型、居群及地理环境等多种因素的影响而表现出的复

杂性有关(张茜等,2023)。此外,从本研究梵净山的9个尖连蕊茶种质优株花粉大小的聚类分析结果来看,花粉大小与花粉外壁纹饰类型之间存在一定的相关性。FJSCF3单独聚为一类,具穴状纹饰,与其他优株纹饰类型明显不同。

4 结论

梵净山9个种质尖连蕊茶的花粉数量和花粉活力均较高,单个花药花粉数量变化范围为4 780~12 950粒,花粉活力均高于71.40%,可作为后续杂交育种父本。9个种质尖连蕊茶优株花粉外壁纹饰存在明显不同,包括穴状、网状、脑纹状、皱波-颗粒状、皱网状、皱波状6种纹饰类型。聚类分析显示9个种质尖连蕊茶可分为3个典型类群,能很好地区分其他种质。花粉极轴长(P)、赤道轴长(E)、P/E值、萌发沟长(L)、L/P值和花粉粒大小(P×E)、花粉粒表面纹饰等可作为种内分类辅助参考指标。

参考文献:

- ALTHIAB-ALMASAUD R, TEYSSIER E, CHERVIN C, et al., 2024. Pollen viability, longevity, and function in angiosperms: key drivers and prospects for improvement [J]. *Plant Reproduction*, 37(3): 273–293.
- CHANG C Y, ZHENG Y X, WU H L, et al., 2018. Pollen vitality and storage capacity of *Camellia tsofu* Chien [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 45(9): 28–32, 2. [常春义, 郑奕雄, 吴华玲, 等, 2018. 细萼连蕊茶花粉生活力和贮藏力研究 [J]. *广东农业科学*, 45(9): 28–32, 2.]
- CHEN Y, YUAN D Y, LI K, et al., 2020. Viability determination and preservation of pollen of *Camellia oleifera* ‘Huashuo’, ‘Huaxin’ and ‘Huajin’ [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 42(1): 118–126. [陈雅, 袁德义, 李葵, 等, 2020. 油茶“三华系列”花粉活力测定及花粉保存 [J]. *江西农业大学学报*, 42(1): 118–126.]
- DENTON-GILES M, BRADSHAW R E, DIJKWEL P P, 2013. *Ciborinia camelliae* (Sclerotiniaceae) induces variable plant resistance responses in selected species of *Camellia* [J]. *Phytopathology*, 103(7): 725–732.
- ERDTMAN G, 1978. *Handbook of palynology* [M]. Beijing: Science Press: 1–45. [埃尔特曼, 1978. 孢粉学手册 [M]. 北京: 科学出版社: 1–45.]
- FAN Z Q, LI J Y, LI X L, et al., 2019. Composition analysis of floral scent within genus *Camellia* uncovers substantial interspecific variations [J]. *Scientia Horticulturae*, 250: 207–213.
- HU Y, GAO C, 2022. The true identity of the “second pollen morphology” of *Camellia oleifera* — stomium cells [J]. *Horticulturae*, 8(4): 347.
- HU Y, GAO C, DENG Q E, et al., 2021. Anatomical characteristics of petalized anther abortion in male sterile *Camellia oleifera* plants [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 146(6): 411–423.
- HE C Y, TAN X F, YUAN D Y, et al., 2009. Determination of the pollen number and pollen germination rate of seven *Camellia* species [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 29(1): 74–78. [何春燕, 谭晓风, 袁德义, 等, 2009. 7种油茶花粉数量及花粉萌发率的测定 [J]. *中南林业科技大学学报*, 29(1): 74–78.]
- JIN Y J, YANG Y H, TIAN S Y, et al., 2022. Comparative pollen fertility and morphology of *Camellia oleifera* [J]. *Molecular Plant Breeding*: 1–13 [2025–09–28]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20220916.0932.004>. [金亦佳, 杨颖慧, 田诗义, 等, 2022. 油茶花粉育性与形态比较 [J]. *分子植物育种*: 1–13 [2025–09–28]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20220916.0932.004>.]
- JULLIEN F, GAO J Y, OREL G, et al., 2008. Analysis of tissue-specific emission of volatiles by the flowers of six *Camellia* species [J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 23(2): 115–120.
- LI G Q, SUN L, LIU Y, 2005. Pollen features of 6 species in sect. *Theopsis* of genus *Camellia* [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 13(1): 40–44. [李广清, 孙立, 刘燕, 2005. 山茶属连蕊茶组6种植物花粉形态特征研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 13(1): 40–44.]
- LI S Y, FENG X J, WANG H B, et al., 2023. Comparative study on pollen quantity and pollen viability of two durian cultivars [J]. *China Fruits*(8): 66–71. [李斯宇, 冯学杰, 王海波, 等, 2023. 2个榴莲品种花粉数量及花粉生活力的比较研究 [J]. *中国果树*(8): 66–71.]
- NI S, LI J Y, 2005. Resources of sect. *Theopsis* of *Camellia* and its ornamental prospect in China [J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 25(5): 70–73. [倪穗, 李纪元, 2005. 我国连蕊茶组植物资源及其园林应用前景 [J]. *浙江林业科技*, 25(5): 70–73.]
- RAN Z H, LI Z, XIAO X, et al., 2024. *Camellia nerifolia* and *Camellia ilicifolia* (Theaceae) as separate species: evidence from morphology, anatomy, palynology, molecular systematics [J]. *Botanical Studies*, 65(1): 23.
- SONG X H, PENG L, SHI X G, et al., 2009. The aroma components from the flowers of *Camellia rensanxiangiae* by HS-SPME [J]. *Guihaia*, 29(4): 561–563. [宋晓虹, 彭力, 石祥刚, 等, 2009. 顶空固相微萃取法分析毛药山茶花香气成分 [J]. *广西植物*, 29(4): 561–563.]
- WANG Y J, HE X S, AO W C, et al., 2014. Effects of storage conditions on pollen vitality and germination rate of Ganwu

- series in *Camellia* [J]. Non-wood Forest Research, 32(2): 152-155. [王玉娟, 何小三, 敖婉初, 等, 2014. 贮藏条件对赣无系列油茶花粉活力和萌发率的影响 [J]. 经济林研究, 32(2): 152-155.]
- WEI H L, GAO C, QIU J, et al., 2021. Flowering biological characteristics of *Camellia weiningensis* Y. K. Li [J]. HortScience, 56(11): 1331-1339.
- WEI Z X, 1997. Pollen ultrastructure of Theaceae and its systematic significance [J]. Acta Botanica Yunnanica, 19(2): 143-153. [韦仲新, 1997. 山茶科花粉超微结构及其系统学意义 [J]. 云南植物研究, 19(2): 143-153.]
- XIAO X, LI Z, RAN Z H, et al., 2024. Taxonomic studies on five species of sect. *Tuberculata* (*Camellia* L.) based on morphology, pollen morphology, and molecular evidence [J]. Forests, 15(10): 1718.
- XIAO Y F, MA J L, CAI Y, et al., 2021. Pollen storage and germination conditions *in vitro* of *Camellia vietnamensis* [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 42(7): 1971-1980. [肖玉菲, 马锦林, 蔡娅, 等, 2021. 陆川油茶花粉贮藏和离体萌发条件研究 [J]. 热带作物学报, 42(7): 1971-1980.]
- XIE Z C, ZHONG P X, WEI B Z, et al., 2020. Screening of *Camellia* cultivars disposition in 'Ganzhouyou' series [J]. Non-wood Forest Research, 38(3): 9-15. [谢再成, 钟培星, 魏本柱, 等, 2020. '赣州油'系列油茶品种配置筛选 [J]. 经济林研究, 38(3): 9-15.]
- XU L, DU K B, CHEN F Z, et al., 2010. Pollen morphology, vitality and storage capacity of *Camellia rosthorniana* Hand.-Mazz. [J]. Acta Horticulturae Sinica, 37(11): 1857-1862. [许林, 杜克兵, 陈法志, 等, 2010. 川鄂连蕊茶花粉的形态, 生活力及贮藏力研究 [J]. 园艺学报, 37(11): 1857-1862.]
- YE J W, GAO X L, ZHOU X, et al., 2024. Anatomical study on the compatibility of distant hybridization in *Camellia yuhsienensis* [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 46(3): 558-571. [叶佳伟, 高晓磊, 周璇, 等, 2024. 攸县油茶远缘杂交亲和性的解剖学研究 [J]. 江西农业大学学报, 46(3): 558-571.]
- YU B, ZHU Y, HUANG L L, et al., 2018. Effects of carbohydrates and temperature on the pollen viability of *Camellia parviliba* Merr. et Metc. var. *Brevipes* Chang [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 38(9): 24-29. [于波, 朱玉, 黄丽丽, 等, 2018. 糖与温度对短柄细叶连蕊茶花粉活力的影响 [J]. 热带农业科学, 38(9): 24-29.]
- YU L, 2013. Studies on anther culture and pollen viability of different tomato varieties [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [于璐, 2013. 不同番茄品种花药培养和花粉活力的研究 [D]. 南京: 南京农业大学.]
- YIN Q, PAN Z F, LI Y M, et al., 2024. Pollen and floral organ morphology of 18 oil-tea genotypes and its systematic significance [J]. Horticulturae, 10(5): 524.
- ZHANG G J, 2006. Collection, classification and evaluation of cultivars of *Rosa multiflora* [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University. [张广进, 2006. 蔷薇品种资源的汇集、分类及评价 [D]. 泰安: 山东农业大学.]
- ZHANG J L, LIN J B, LI T F, et al., 2022. Research advances in pollen morphology of *Camellia* [J]. Southeast Horticulture, 10(6): 470-475. [张俊丽, 林剑波, 李彤丰, 等, 2022. 山茶属植物花粉形态研究进展 [J]. 东南园艺, 10(6): 470-475.]
- ZHANG P, YANG Y, XI R C, et al., 2019. Pollen characteristics of *Camellia gauchowensis* Chang [J]. Forest Research, 32(1): 90-96. [张鹏, 杨颖, 奚如春, 等, 2019. 高州油茶花粉形态及其贮藏特征 [J]. 林业科学研究, 32(1): 90-96.]
- ZHANG S L, XIE W N, CHEN D X, et al., 2003. The differences of pollen content and pollen germination and tube growth among eight species of fruits trees [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 19(3): 67-69. [张绍铃, 谢文暖, 陈迪新, 等, 2003. 8种果树花粉量及花粉萌发与生长的差异 [J]. 上海农业学报, 19(3): 67-69.]
- ZHANG X, ZHAO Q Y, GU Z J, et al., 2023. Studies on pollen micromorphology of impatiens plants in Southwest Sichuan [J]. Acta Horticulturae Sinica, 50(8): 1664-1678. [张茜, 赵秋燕, 谷志佳, 等, 2023. 四川西南地区凤仙花属植物花粉微形态研究 [J]. 园艺学报, 50(8): 1664-1678.]
- ZHANG Y L, YANG N Y, SONG Y, et al., 2023. Pollen morphological characters of 20 species from *Camellia* sect. *Theopsis* and sect. *Eriandria* [J]. Bulletin of Botanical Research, 43(3): 470-480. [张亚利, 杨耐英, 宋垚, 等, 2023. 20种山茶属尖连蕊茶组和毛蕊茶组植物的花粉形态特征研究 [J]. 植物研究, 43(3): 470-480.]

(责任编辑 周翠鸣)