

荔枝、龙眼与其属间杂种的茎、叶解剖结构比较

张永福¹, 刘成明²

(1. 昆明学院农学院, 昆明 650214; 2. 华南农业大学园艺学院, 广州 510642)

摘要: 为比较荔枝(*Litchi*)和龙眼(*Dimocarpus*)与其属间杂种的茎、叶解剖结构, 采用徒手切片法、组织离析法和石蜡切片法对茎、叶片结构进行观察比较。结果表明, ‘杂种 A’和‘杂种 B’的髓率、树皮率均居于父母本之间, 而木质部率、导管总面积/木质部面积的比值、导管分子内径则表现出显著的超亲优势; ‘杂种 C’和‘杂种 D’的树皮率和射线宽度均小于父母本。‘杂种 A’和‘杂种 B’导管分子无尾和两端水平的频率居于父母本之间, ‘杂种 C’和‘杂种 D’的导管分子形态特征较接近其母本‘石峡’, ‘杂种 D’的导管分子长度显著大于父母本。4 个杂种的叶主脉厚均居于父母本之间, ‘杂种 D’的叶脉突起度和‘紫娘喜’的栅栏组织/海绵组织厚度比值均显著大于其他试材。4 个属间杂种叶片表皮细胞的大小、垂周壁的形态均居于父母本之间; 荔枝和龙眼叶片表皮特征差异明显, 可以作为两属的鉴别特征。4 个属间杂种的解剖结构总体上呈现出较明显的偏母遗传效应。

关键词: 荔枝; 龙眼; 属间杂种; 解剖结构; 导管分子

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.05.007

Comparisons of Anatomical Structures of Stem and Leaf among *Litchi*, *Dimocarpus* and Genus Hybrids

ZHANG Yong-fu¹, LIU Cheng-ming²

(1. School of Agriculture, Kunming University, Kunming 650214, China; 2. College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to compare the anatomical structures of stem and leaf among *Litchi*, *Dimocarpus* and genus hybrids, the structures of stem and leaf were observed by free hand section, tissue segregation procedure and paraffin. The results showed that pith rate and bark rate of ‘Hybrid A’ and ‘Hybrid B’ were between male parent and female parent, whereas xylem rate, the ratio of total vessel area to xylem area and vessel element internal diameter showed obvious better-parents advantage. Bark rate and ray breadth of ‘Hybrid C’ and ‘Hybrid D’ were less than those of parents. Frequencies of vessel element without tail and with horizontal both ends were between male parent and female parent in ‘Hybrid A’ and ‘Hybrid B’. The Morphological characteristics of vessel element also were more close to female parent ‘Shixia’ in ‘Hybrid C’ and ‘Hybrid D’. Vessel element length of ‘Hybrid D’ was significantly greater than that of its parents. Leaf midvein thickness of four hybrids was between male parent and female parent. Vein protuberant degree of ‘hybrid D’ and the ratio of palisade tissue to spongy tissue of ‘Ziniangxi’ were significantly greater than those of others. Size of leaf epidermal cell and shape of anticlinal wall in four hybrids were between male parent and female parent. Significant differences in leaf epidermal characteristics between *Litchi* and *Dimocarpus* might use as identification of the two genera. The anatomical structure of the four genus hybrids showed a more obvious partial genetic effect.

Key words: *Litchi*; *Dimocarpus*; Genus hybrid; Anatomical structure; Vessel element

收稿日期: 2015-12-17

接受日期: 2016-03-24

基金项目: 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目资助

This work was supported by the Key Disciplines (Ecology) Project of Yunnan Education Department.

作者简介: 张永福, 博士, 副教授, 研究方向为果树生理及遗传育种。E-mail: 123017360@qq.com

荔枝属 (*Litchi* Sonn.) 和龙眼属 (*Dimocarpus* Lour.) 为无患子科 (Sapindaceae) 的两近缘属。其中, 荔枝属有两种, 仅荔枝 (*L. chinensis* Sonn.) 作为果树栽培, 龙眼属约有 20 种, 仅龙眼 (*D. longana* Lour.) 为栽培种^[1]。荔枝和龙眼在生物学上具有许多相似之处, 并在果实成熟期、果实大小、抗逆性等方面具有很多互补的有利基因, 如果能把这些基因进行交流重组, 可望对其种质改良和创新产生深远的影响。20 世纪 90 年代后获得了‘荔枝×龙眼’的属间杂种苗^[2-3], 但反交组合‘龙眼×荔枝’却一直未见有成功报道。

自 2006 年以来, 本课题组分别以荔枝、龙眼为亲本, 创建了‘荔枝×龙眼’、‘龙眼×荔枝’的属间杂种, 以克服龙眼、荔枝各自的缺陷, 培育出具有特殊品质和高抗逆性的新种质。其中, 2007 年通过‘紫娘喜’荔枝×‘石硖’龙眼所获得的 1 号(杂种 A) 和 6 号(杂种 B) 杂种单株通过 SRAP 标记分析证实为真杂种^[1], 真杂种小叶的形状接近母本, 大小接近父本、数目居于父母本之间; 反交组合‘石硖’龙眼×‘紫娘喜’荔枝所获得的 2 号(杂种 C) 和 9 号(杂种 D) 杂种单株也通过 SRAP 标记分析具有明显父本特征带, 两个杂种单株表现出较强的生长势^[4]。

张永福等^[5-6]曾报道荔枝和龙眼的茎、叶解剖结构差异明显, 易于区分。然而荔枝和龙眼属间杂种的茎、叶解剖结构比较研究目前还未见报道。因此, 本研究通过观察属间杂种与其亲本的解剖结构, 分析属间杂种解剖结构的特征, 进一步从解剖结构上鉴定杂种的真实性, 以期对无患子科植物的属间杂种及远缘杂种新品种选育和开发利用奠定基础。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 品种‘紫娘喜’和龙眼 (*Dimocarpus longana* Lour.) 品种‘石硖’及其属间杂种‘紫娘喜×石硖’的 1 号单株(杂种 A) 和 6 号单株(杂种 B), 及‘石硖×紫娘喜’的 2 号单株(杂种 C) 和 9 号单株(杂种 D), 种植于广州市华南农业大学燕山区荔枝龙眼种质圃, 生长环境及水肥管理条件完全一致。选取生长一致、无病虫害、成熟、健壮、向阳的叶片和茎段进行试验。

1.2 方法

茎的切片 枝条分割成 1.5 cm 左右的小段,

置于 FAA 中固定 48 h, 醋酸-H₂O₂ 软化 48 h 左右, 保存于甘油-酒精中待用。徒手切片, 梯度酒精脱水, 番红染色, 二甲苯透明, 中性树胶封片, Olympus 光学显微镜观察。

茎导管离析 枝条小段固定后置于 10% 铬酸-硝酸离析液中离析 48 h 左右, 漂洗到材料颜色变白, 梯度酒精脱水, 番红染液染色, 二甲苯透明, 中性树胶封片, Olympus 光学显微镜观察。

叶石蜡切片 叶片剪成 1.0 cm×0.5 cm 的小块, 置于 FAA 中固定 48 h, 转入甘油-酒精中软化 60 d 左右, 梯度酒精脱水, 番红整体染色, 二甲苯透明, 常规石蜡制片法包埋及切片, 切片厚 8~10 μm, 纯二甲苯脱蜡, 中性树胶封藏, Olympus 光学显微镜观察。

叶表皮制片 叶材料经 FAA 固定后, 用上述离析液离析 24 h, 梯度酒精脱水, 番红染色, 二甲苯透明、中性树胶封片, Olympus 光学显微镜观察。

1.3 数据分析

Olympus DP 系统显微摄影, OLYSIA BioReport 软件测量, 各解剖结构随机测量 50 个。叶脉突起度 (VPD, Vein protuberant degree) = 叶主脉厚/叶片厚; 气孔指数 = 1 个视野气孔数/(该视野中气孔数 + 表皮细胞数)。数据用 SPSS 11.5 软件进行 Duncan 氏新复级差检测 ($P < 0.05$) 和用 Excel 2003 作柱状图。

2 结果和分析

2.1 茎横切面

荔枝、龙眼及属间杂种的茎横切面可见, 由外到内依次为周皮、皮层、维管组织、髓和射线(图 1)。表皮由 1 层圆形或扁圆形细胞组成, 排列整齐、紧密。皮层中靠近表皮的数层细胞为厚角组织, 细胞较小且排列紧密; 皮层内为薄壁细胞, 细胞排列疏松, 间隙较大; 形成层的内方为木质部, 由导管和木纤维群组成, 导管细胞紧密排列成一圆环。髓位于茎的中央, 由大型薄壁细胞构成, 靠近外部的细胞较小, 由中部向内细胞逐渐增大。

在 4 个属间杂种及其亲本中, ‘杂种 D’的髓率最大, 达 28.07%, 但与‘杂种 C’和‘石硖’无显著差异; ‘紫娘喜’的髓率显著小于其余种质, 为 5.30%。‘杂种 B’的木质部率最大, 为 49.95%, ‘石硖’最小, 为 38.68%, 差异显著。树皮率以‘紫娘喜’最大, 达

50.11%, ‘杂种 C’和‘杂种 D’的最小, 种质间差异显著。‘紫娘喜’的导管密度显著高于其它种质, ‘杂种 C’次之。‘杂种 A’的导管总面积/木质部面积的比值显著大于其它种质。‘石峡’和‘杂种 B’的射线宽度最大, 而‘杂种 C’和‘杂种 D’的最小, 差异显著(表 1 和图 1)。

4 个属间杂种茎的解剖特征总体呈现出偏母性

遗传效应, 但有部分特征是居于父母本之间的, 也有部分特征具有超亲优势。如‘杂种 A’和‘杂种 B’的髓率和树皮率均居于父母本之间, 而木质部率、导管总面积/木质部面积的比值、导管分子内径则表现出显著的超亲优势; ‘杂种 C’和‘杂种 D’的树皮率和射线宽度均小于其亲本。

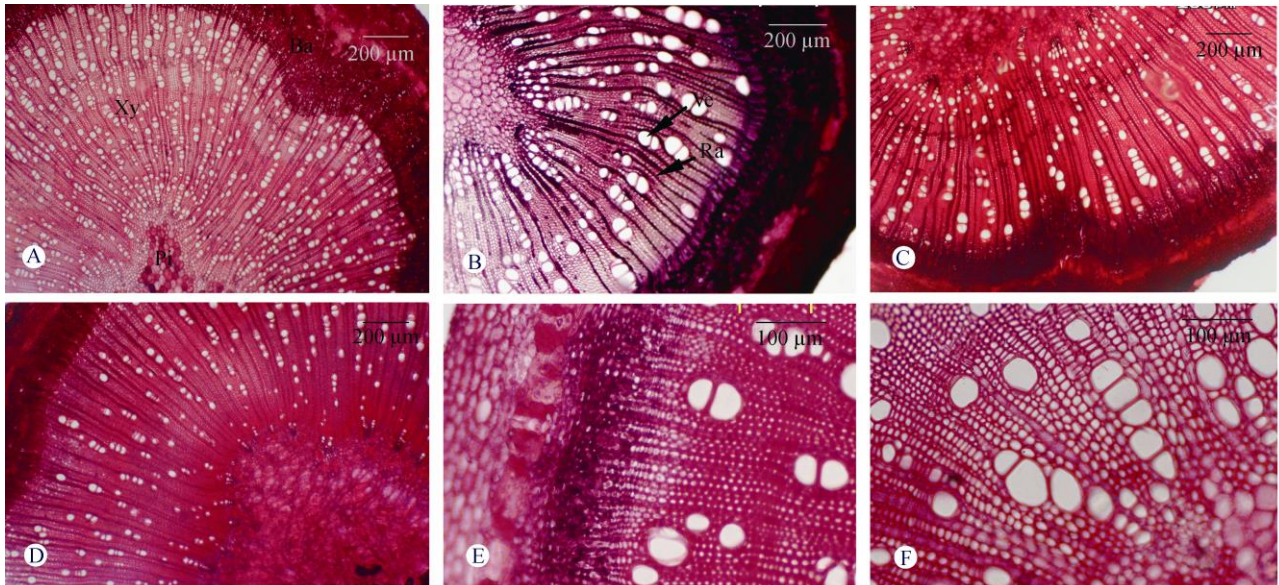


图 1 茎横切面结构。A: 紫娘喜; B: 石峡; C: 杂种 A; D: 杂种 B; E: 杂种 C; F: 杂种 D; Pi: 髓; Xy: 木质部; Ba: 树皮; Ra: 射线; Ve: 导管。标尺: A~D: 200 μm; E~F: 100 μm

Fig. 1 Transverse structure of stem. A: Ziniangxi; B: Shixia; C: Hybrid A; D: Hybrid B; E: Hybrid C; F: Hybrid D; Pi: Pith; Xy: Xylem; Ba: Bark; Ra: Ray; Ve: Vessel. Bars: A-D: 200 μm; E-F: 100 μm

表 1 荔枝、龙眼与其属间杂种茎解剖特征

Table 1 Stem anatomic characteristics of intergeneric hybrids and their parents in *Litchi* and *Dimocarpus*

	髓率 Pith rate (%)	木质部率 Xylem rate (%)	树皮率 Bark rate (%)	导管密度 Vessel density (mm ⁻²)	导管总面积/木 质部面积 Total vessel area/ xylem area (%)	射线宽度 Ray width (μm)	导管分子内径 Vessel element internal diameter (μm)	导管分子长 Vessel element length (μm)
‘紫娘喜’ ‘Ziniangxi’	5.30c	44.59b	50.11a	326.18a	11.18b	14.13b	24.05c	189.59c
‘石峡’ ‘Shixia’	26.27a	38.68c	35.05d	134.38c	9.13b	17.73a	28.82b	213.75b
杂种 A Hybrid A	10.74b	46.20ab	43.06b	125.44c	13.73a	13.69b	31.02a	194.33c
杂种 B Hybrid B	11.78b	49.95a	38.27d	133.59c	13.69a	18.68a	30.17a	191.81c
杂种 C Hybrid C	26.07a	44.16b	29.77e	181.01b	10.63b	8.30c	26.82bc	194.33c
杂种 D Hybrid D	28.07a	42.57bc	29.36e	136.34c	9.37b	7.07c	30.26a	245.89a

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)(Duncan 氏新复级差检验)。下表同。

Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.05 level by Duncan’s multiple range test. The same is following Tables.

2.2 导管分子类型

从参试材料茎的木质部中离析出不同类型的导管分子。导管分子绝大多数属于孔纹式或网纹式, 极少数为螺纹式或梯纹式。孔纹导管分子的纹孔均为互列式, 纹孔口的缝隙外展。‘紫娘喜’的导

管分子内径显著小于其它试材, ‘杂种 D’的导管分子显著长于其它试材, ‘杂种 D’的导管分子内径和长度均表现出显著的超亲优势(表 1 和图 2)。

从尾的有无来看, 6 份参试材料的导管分子有的两端具尾、有的一端具尾、有的两端无尾, 其中以一

端具尾的比率最大。从导管分子端壁倾斜特征来看,有的两端均倾斜、有的一端倾斜、有的两端均水平,其中以两端均倾斜的比率最高。6 份试材的导管分子侧

壁穿孔出现频率不同,其中最高的是‘杂种 B’(4.96%),最低的是‘紫娘喜’(0);仅‘杂种 A’和‘杂种 B’具有侧壁双穿孔,其频率分别为 1.0%和 0.8%(图 3)。



图 2 茎导管分子形态

Fig. 2 Vessel element shapes of stem

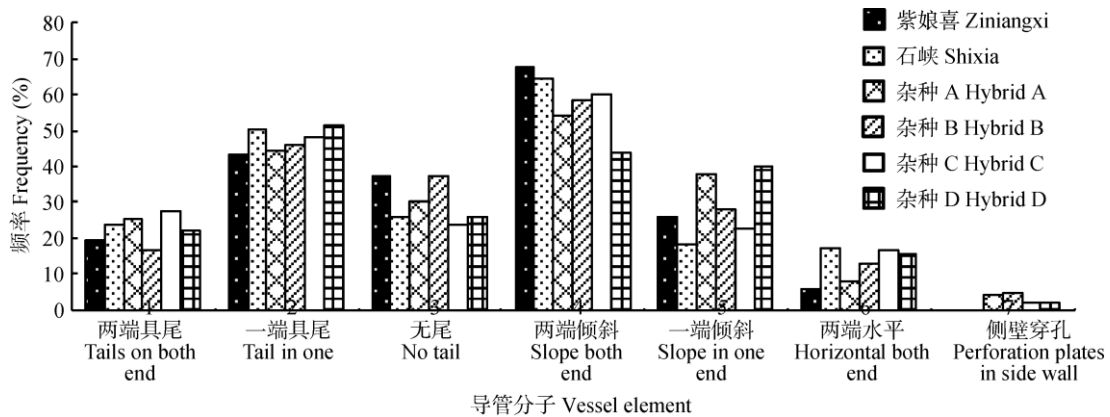


图 3 茎导管分子不同特征端壁出现的频率

Fig. 3 Frequency of different characteristics of vessel element end wall in stem

2.3 叶横切结构

从荔枝、龙眼与其属间杂种叶的横切面来看,均为异面叶,分为表皮、叶肉和叶脉 3 部分(图 4)。叶主脉由外到内由表皮、薄壁组织、厚壁组织、木质部和韧皮部组成。上表皮为 1 列长圆形、椭圆形的表皮细胞,外被厚的角质层;下表皮为 1 列长圆形或短圆形细胞,外被薄的角质层。叶肉分化出栅栏组织和海绵组织,主脉在远轴面突出,维管束外的中柱鞘呈环状;木质部轮廓近半圆形,其内部的导管排列成行;韧皮部半环状,包围在木质部外方。维管组织发达,由维管束和机械组织构成环状结构。

‘石峡’的中脉厚度显著大于其它种质,达

1032.30 μm,近轴面略微突起,远轴面近似半圆;‘紫娘喜’则显著小于其它种质,仅为 472.70 μm,近轴面形态较平,远轴面为圆三角形,叶脉突起度显著小于其它种质;4 个属间杂种的叶脉厚度居于父母本之间,且差异显著,形态接近于其母本,但‘杂种 B’的叶脉近轴面和‘杂种 D’的叶脉远轴面形态近似于父本,‘杂种 D’的叶脉突起度显著大于其它种质(表 2 和图 4)。

叶片厚度最大的是‘杂种 B’,最小的是‘杂种 D’,差异显著;‘紫娘喜’的上表皮厚度显著大于其它种质;‘紫娘喜’的栅栏组织约占横切面的 1/2,由 2~3 层长圆形或椭圆形细胞组成,靠近上表皮的

1~2 层细胞排列紧密, 下方细胞排列略为疏松且相对较小; 海绵组织由 3~5 层圆形或椭圆形细胞组成, 间隙大。‘石峡’的叶表皮细胞厚度显著小于‘紫娘喜’, 下表皮密被表皮毛(表 3), 栅栏组织约占横切面的 2/5, 由 2~3 层长短不一的长条形细胞紧密

排列而成, 海绵组织由 6~8 层圆形、椭圆形细胞组成, 细胞空隙较大。4 个属间杂种叶横切面细胞的基本特征接近于母本, 如‘杂种 C’和‘杂种 D’的下表皮具有表皮毛, 但表皮毛的密度和长短均小于其母本‘石峡’(图 4: MT, 图 5)。

表 2 荔枝、龙眼与其属间杂种的叶横切面结构

Table 2 Leaf transverse structure of genus hybrids and their parents in *Litchi* and *Dimocarpus*

	厚度 Thickness (μm)						叶脉突起度 VPD	P/S
	中脉 Midvein	叶 Leaf	上表皮 Upper epidermis	下表皮 Lower epidermis	栅栏组织 Palisade tissue (P)	海绵组织 Spongy tissue (S)		
‘紫娘喜’ ‘Ziniangxi’	472.70e	213.91b	22.09a	17.42b	95.61a	96.74bc	2.21d	0.99a
‘石峡’ ‘Shixia’	1032.30a	210.26b	14.17cd	11.16c	80.91b	118.13b	4.91b	0.69bc
杂种 A Hybrid A	674.78d	195.46c	17.86b	18.18ab	71.80c	101.37bc	3.45c	0.71b
杂种 B Hybrid B	703.31d	253.81a	18.43b	19.10a	87.43ab	137.49a	2.77d	0.64c
杂种 C Hybrid C	857.12c	172.62d	13.48d	6.94d	61.27d	88.39c	4.96b	0.69bc
杂种 D Hybrid D	903.56b	164.76e	12.08e	7.15d	56.01e	77.17d	5.48a	0.73b

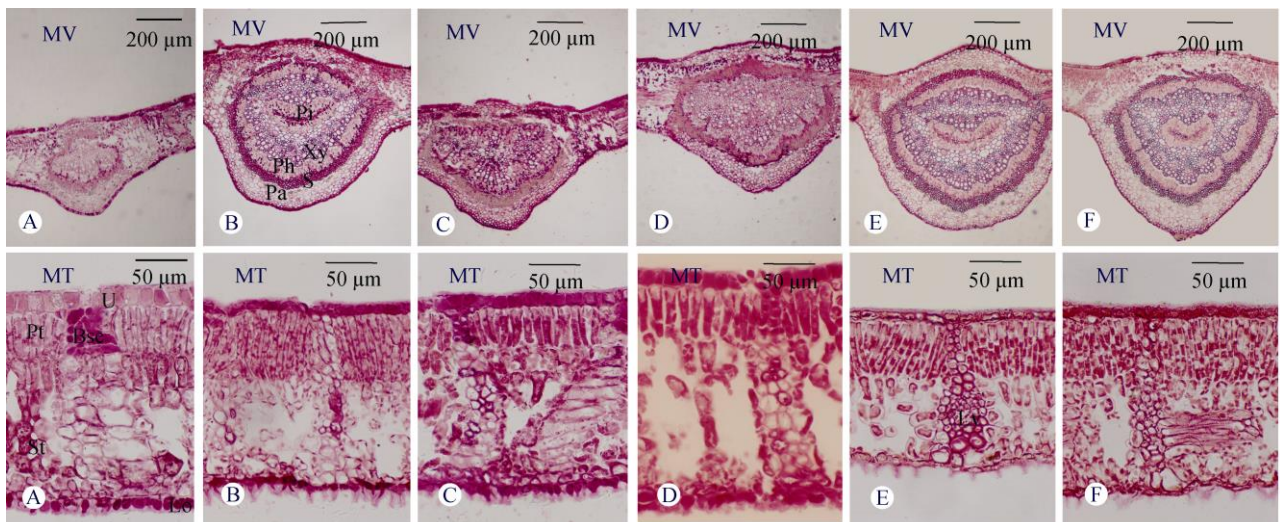


图 4 叶片横切面结构。MV: 主脉; MT: 叶肉组织; A: ‘紫娘喜’; B: ‘石峡’; C: 杂种 A; D: 杂种 B; E: 杂种 C; F: 杂种 D; Pi: 髓; Xy: 木质部; Ph: 韧皮部; S: 厚壁组织; Pa: 薄壁组织; U: 上表皮; Pt: 栅栏组织; St: 海绵组织; Bse: 束鞘延伸; Lo: 下表皮; Lv: 侧脉。

Fig. 4 Transsection structure of leaf. MV: Main vein; MT: Mesophyll tissue; A: ‘Ziniangxi’; B: ‘Shixia’; C: Hybrid A; D: Hybrid B; E: Hybrid C; F: Hybrid D; Pi: Pith; Xy: Xylem; Ph: Phloem; S: Sclerenchyma; Pa: Parenchyma; U: Upper epidermis; Pt: Palisade tissue; St: Spongy tissue; Bse: Bundle sheath extension; Lo: Lower epidermis; Lv: Lateral vein.

2.4 叶表皮结构特征

由图 4 可看出, 所有种质的叶表皮细胞均为 1 层, 排列紧密。上表皮细胞呈扁平泡状, 较小, 排列整齐, 无气孔; 下表皮细胞也呈扁平泡状, 排列不整齐, 分布着不同密度的气孔。

‘紫娘喜’的表皮细胞最小, 多边形, 垂周壁弧形, 下表皮气孔器呈不规则肾形, 由两个保卫细胞构成大小不一的缝隙。‘石峡’的表皮细胞最大, 不规

则形, 垂周壁深波状, 下表皮具乳突, 气孔椭圆形, 其密度显著大于其它种质。‘杂种 A’和‘杂种 D’的气孔密度低于其父母本, 但与‘紫娘喜’的差异不显著; 4 个杂种的气孔指数居于父母本之间, 且与父母本差异显著。气孔开度受环境的影响较大, 总体表现为‘紫娘喜’的气孔开度较小, ‘石峡’则较大(表 3 和图 5)。4 个属间杂种的叶表皮特征总体上呈现明显的偏母遗传效应, 但也有一些特征是居于父母本

表 3 荔枝、龙眼与其属间杂种的叶表皮特征

Table 3 Leaf epidermal characteristics of genus hybrids and their parents in *Litchi* and *Dimocarpus*

	细胞形态 Cell shape	细胞大小 Cell size ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	垂周壁 Anticlinal Wall	气孔开度 Stoma openness ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	气孔密度 Stoma density (mm^{-2})	气孔指数 Stomatal index (%)	气孔类型 Stomatal type
‘紫娘喜’ ‘Ziniangxi’	多边形 Polygonal	8.21c \times 5.23c	弧形 Arcuate	3.47d \times 1.54c	12.78bc	2.30d	不规则肾型 Irregular kidney type
‘石硤’ ‘Shixia’	不规则形 Irregular	19.78a \times 12.41a	深波 Sinuate	5.40a \times 2.02ab	57.76a	9.09a	椭圆型 Elliptic type
杂种 A Hybrid A	多边形 Polygonal	15.50b \times 10.57b	弧形 Arcuate	4.29c \times 2.05a	10.99c	6.12c	不规则肾型 Irregular kidney type
杂种 B Hybrid B	多边形 Polygonal	14.27b \times 9.84b	弧形 Arcuate	4.67bc \times 1.92b	19.28b	5.77c	不规则肾型 Irregular kidney type
杂种 C Hybrid C	不规则形 Irregular	14.16b \times 9.59b	波状 Undulate	4.87ab \times 2.00ab	21.29b	7.00b	椭圆型 Elliptic type
杂种 D Hybrid D	不规则形 Irregular	18.12a \times 10.94b	波状 Undulate	3.81d \times 1.56c	11.14c	7.32b	椭圆型 Elliptic type

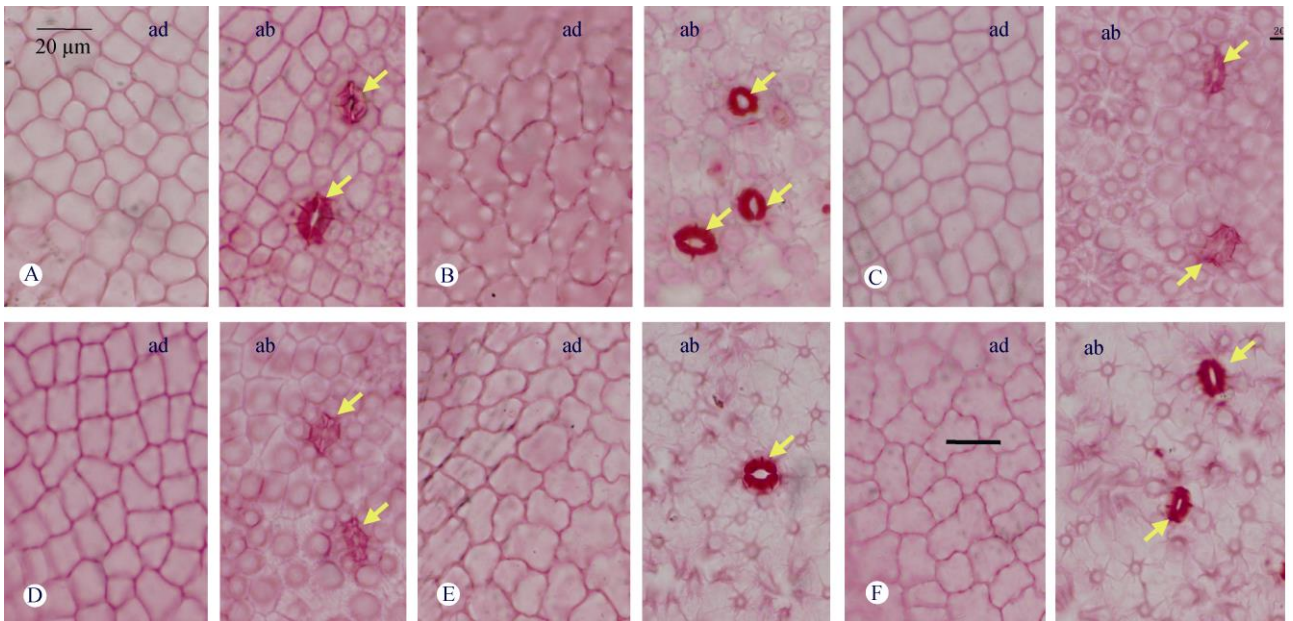


图 5 叶表皮结构。Ad: 上表皮; ab: 下表皮; A: ‘紫娘喜’; B: ‘石硤’; C: 杂种 A; D: 杂种 B; E: 杂种 C; F: 杂种 D; 箭头示气孔器; 标尺适用于所有图。

Fig. 5 Epidermis structure of leaf. Ad: Upper epidermis; ab: Lower epidermis; A: ‘Ziniangxi’; B: ‘Shixia’; C: Hybrid A; D: Hybrid B; E: Hybrid C; F: Hybrid D; Arrows showing stomatal apparatus. Scale bar applies to all Figures.

之间的, 少数性状还表现出超亲遗传效应。

3 讨论

3.1 茎的横切结构异同

植物分类学上属与属之间的杂交属于远缘杂交, 通过远缘杂交可以把不同种、属的特征结合起来, 突破种、属的界限, 扩大遗传变异, 创造出新的变异类型或新物种。植物枝条的解剖结构, 特别是次生木质部的解剖特征, 可应用于植物分类^[7], 目前在无患子科^[5]、甘蔗属(*Saccharum*)^[8]及金缕梅科(*Hamamelidaceae*)^[9]等均有用茎的解剖结构来进

行种属鉴别的报道。但对属间杂种茎解剖结构的研究较少, 汪琼等^[10]对夏腊梅 [*Sinocalycanthus chinensis* (Cheng et S Y Chang) Cheng et S Y Chang] 和美国腊梅(*Calycanthus floridus* Linn.)及其属间杂种‘红运’的茎解剖结构进行了观察, 杂种‘红运’的髓面积最小, 而茎直径、皮层细胞层数、木质部厚度、维管束面积等均高于其亲本。本研究结果相似, ‘杂种 A’和‘杂种 B’的髓率和树皮率均居于其亲本之间, 而木质部率、导管总面积/木质部面积的比值、导管内径则显著大于俩亲本, 表现出超亲效应; ‘杂种 C’和‘杂种 D’的树皮率和射线宽度则小于亲本。总体上, 4 个属间杂种茎的横切特征呈现偏母

性遗传效应。

3.2 茎的导管分子类型异同

被子植物输导水分和无机营养的组织主要是木质部导管,不同导管分子之间靠穿孔连接,穿孔的形态特征对水分和无机营养的运输产生较大的影响。由于不同环境因子对次生木质部导管分子在分化和形成过程中具有较大的影响,故导管分子有多种样式。然而,仅形成层在初级细胞分化活动中的可塑性分裂形成导管,因此物种的基本结构特征仍然稳定。目前普遍认为,在被子植物导管分子中,由梯状穿孔板的横纹消失演化得到单穿孔板,因此单穿孔板是较为进化的类型^[11]。陈树思^[12]认为,荔枝导管分子尾部的演化是从两端具长尾到一端具尾再到两端均无尾;端壁倾斜度的演化是从倾斜度很大经过渡类型演化到水平或近水平;此外,荔枝导管分子在发育中长度逐渐缩短而宽度逐渐加大。

目前,还未见属间杂种导管分子特征报道。相近的研究表明,两个体细胞杂种‘红橘+粗柠檬’和‘红橘+枳’的导管分子直径和长度均比亲本大,可见体细胞融合后可能会使杂种的导管长度和直径增加,但其导管分子形态较亲本原始,呈现“返祖现象”^[13]。在本研究中,除杂种的导管分子内径总体上大于两亲本外,并未出现上述“返祖现象”;‘紫娘喜’无尾的频率最高,无侧壁穿孔,这些是较为进化的特征,但‘紫娘喜’植株却表现出矮化特征^[14],这可能是由于其导管分子内径较小及端壁倾斜频率较大的原因;‘杂种 A’和‘杂种 B’的导管分子无尾和两端水平的频率居于父母本之间或接近于其母本‘紫娘喜’,但其导管内径和导管总面积/木质部面积的比值均较大,因此植株并不表现矮化特性;属间杂种的导管内径除‘杂种 C’居于父母本之间外,其余3个均显著大于其父母本;‘杂种 D’的导管分子长度也显著大于其亲本。‘杂种 C’和‘杂种 D’的导管分子形态也比较接近其母本‘石峡’,其中‘杂种 C’导管分子两端具尾和倾斜的频率较高,内径较小,导致了树势相对较弱。其余3个杂种单株,特别是‘杂种 D’则表现出极强的树势,这可能是由于其杂种导管分子内径加大使茎的输导能力增强而产生的杂种优势。

3.3 叶的解剖结构异同

叶片对环境的反应敏感,但其内部结构稳定,

如各组织层厚度及比值等特征具有遗传特性,不同种之间差异较大,可作为植物分类的依据^[7]。如在赖草属(*Leymus Hochst.*)^[15]、柑橘体细胞杂种^[16],荔枝和龙眼^[17]上均有相关报道。各组织层及厚度比是植物叶片结构上的特征,相对功能而言,第一性的是结构,这些结构特征是植物遗传上的反映。汪琼等^[18]报道,美国蜡梅与夏蜡梅及其属间杂种在叶主脉横切面的栅栏组织层和海绵组织层分化程度、表皮毛的长度及散生位置、主脉中柱鞘排列等方面均存在差异,在叶的大小、轮廓、表皮毛、横切面及脉序等特征上也存在一定差异,杂种叶特征介于两亲本之间。在荔枝和龙眼及其属间杂种叶片的解剖结构特征,一定程度上反映了属的遗传特性。从本研究结果来看,4个杂种的叶主脉厚度均居于父母本之间,叶片的厚度则有较大的分离,4个杂种的上、下表皮厚度均接近于其母本,栅栏组织的厚度均低于‘紫娘喜’;‘杂种 D’的叶脉突起度显著高于其父母本及其它杂种单株,而‘紫娘喜’的栅栏组织厚度/海绵组织厚度的比值则显著高于其它参试种质。在叶的横切结构上,总体表现出较大的分离,也呈现出一定的偏母性遗传效应。

叶表皮性状在一定程度上能够反映分类群间的系统发生,可用于科下属间关系的探讨,对葡萄科(*Vitaceae*)^[19]、无患子科^[20]及凤仙花科(*Balsaminaceae*)^[21]的研究均表明,叶表皮特征可作为植物分类和系统演化的重要依据。吉利等^[22]对‘紫花含笑×灰岩含笑’(‘*Michelia crassipes*×*M. calcicola*’)的F₁及其亲本叶片表皮微形态和横切结构进行观察,杂种F₁在叶上下表皮形态、表皮毛特征、角质层厚度、叶肉组织厚度及气孔开度等方面均介于两亲本之间;杂种F₁个体间变异较大,为数量性状遗传,各项指标有介于父母本之间或超亲效应。此外,在杂种鹅掌楸(*Liriodendron*)^[23]、玉米(*Zea mays*)杂交种^[24]等的研究也表明,杂种后代气孔密度和开度均明显大于其亲本。本研究表明,4个属间杂种的表皮特征总体上呈现偏母性遗传效应,但也有一些接近于父本的特征。此外,荔枝和龙眼表皮特征差异明显,可作为两属的鉴别特征之一。

参考文献

- [1] LIU Y H, LUO X R, WU R F, et al. *Flora Reipublicae Popularis Sinicae*, Tomus 47(1) [M]. Beijing: Science Press, 1985: 26–32.
刘玉壶, 罗献瑞, 吴容芳, 等. 中国植物志, 第47卷第1分册 [M].

- 北京: 科学出版社, 1985: 26–32.
- [2] McCONCHIE C A, VITHANAGE V, BATTEN D J. Intergeneric hybridization between litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) and longan (*Dimocarpus longana* Lour.) [J]. *Ann Bot*, 1994, 74(2): 111–118. doi: 10.1006/anbo.1994.1100.
- [3] ZHAO Y H, HU Y L, GUO Y S, et al. Inter-generic hybrids obtained from cross between litchi and longan cultivars and their molecular identification [J]. *J Fruit Sci*, 2008, 25(6): 950–952.
- 赵玉辉, 胡又厘, 郭印山, 等. 荔枝、龙眼属间远缘杂种的获得及分子鉴定 [J]. *果树学报*, 2008, 25(6): 950–952.
- [4] ZHANG Y F. Studies on traits and mechanism of dwarfing and cold resistance of germplasm resources in litchi and longan [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2011: 94–110.
- 张永福. 荔枝龙眼种质资源的矮化和抗寒特性及机理研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2011: 94–110.
- [5] ZHANG Y F, HAN L, HUANG H P, et al. Comparisons of stem anatomical structures among litchi, longan and longli [J]. *Plant Sci J*, 2014, 32(6): 551–560. doi: 10.11913/PSJ.2095–0837.2014.60551.
- 张永福, 韩丽, 黄鹤平, 等. 荔枝、龙眼及龙荔的茎解剖结构比较 [J]. *植物科学学报*, 2014, 32(6): 551–560. doi: 10.11913/PSJ.2095–0837.2014.60551.
- [6] ZHANG Y F, HUANG H P, YIN L X, et al. Analysis of relationship among three Sapindaceae fruit trees based on leaf anatomical characteristics [J]. *Guihaia*, 2016, 36(6): 679–685. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201401024.
- 张永福, 黄鹤平, 银立新, 等. 基于叶片解剖特征分析三种无患子科果树的亲缘关系 [J]. *广西植物*, 2016, 36(6): 679–685. doi: 10.11931/guihaia.gxzw201401024.
- [7] HU Z H. The prospect and progression of the plant comparative anatomy during fifty years in China [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2003, 23(2): 244–355. doi: 10.3321/j.issn:1000–4025.2003.02.029.
- 胡正海. 植物比较解剖学在中国 50 年的进展和展望 [J]. *西北植物学报*, 2003, 23(2): 244–355. doi: 10.3321/j.issn:1000–4025.2003.02.029.
- [8] CHEN Y P, LI X, ZHANG Y H, et al. A comparative study of *Saccharum* and its related plants based stem anatomy [J]. *J Yunnan Univ*, 1998, 20(4): 573–576.
- 陈严平, 李信, 张跃华, 等. 甘蔗属及近缘植物茎的比较解剖研究 [J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 1998, 20(4): 573–576.
- [9] LI J, WANG B Y, HAN L J, et al. Comparative anatomical studies on the secondary xylem of twelve genera in Hamamelidaceae [J]. *Acta Sci Nat Univ Nankai*, 2003, 36(4): 100–105. doi: 10.3969/j.issn.0465–7942.2003.04.020.
- 李晶, 王布云, 韩丽娟, 等. 中国金缕梅科 12 属植物次生木质部的比较解剖 [J]. *南开大学学报: 自然科学版*, 2003, 36(4): 100–105. doi: 10.3969/j.issn.0465–7942.2003.04.020.
- [10] WANG Q, SHI Y Y, YAO Q J, et al. Comparison of anatomical structure characteristics of vegetative organs of *Sinocalycanthus chinensis*, *Calycanthus floridus* and intergeneric hybrid *S. chinensis* × *C. floridus* ‘Hongyun’ [J]. *J Plant Resour Environ*, 2011, 20(3): 62–68. doi: 10.3969/j.issn.1674–7895.2011.03.010.
- 汪琼, 史云云, 姚青菊, 等. 夏腊梅和美国腊梅及属间杂种‘红运’营养器官解剖结构特征比较 [J]. *植物资源与环境学报*, 2011, 20(3): 62–68. doi: 10.3969/j.issn.1674–7895.2011.03.010.
- [11] FAHN A. Translated by WU S M, LIU D Y. *Plant Anatomy* [M]. Tianjin: Nankai University Press, 1990: 1–497.
- FAHN A. 吴树明, 刘德仪, 译. *植物解剖学* [M]. 天津: 南开大学出版社, 1990: 1–497.
- [12] CHEN S S. Study on the vessel elements and perforation plate of secondary xylem in *Litchi chinensis* [J]. *Guihaia*, 2007, 27(3): 397–400. doi: 10.3969/j.issn.1000–3142.2007.03.003.
- 陈树思. 荔枝次生木质部导管分子及穿孔板观察研究 [J]. *广西植物*, 2007, 27(3): 397–400. doi: 10.3969/j.issn.1000–3142.2007.03.003.
- [13] LIU X, PENG S A, GUO W W. Comparative studies on anatomical structure of roots in three citrus seedling rootstocks and their two somatic hybrids [J]. *Acta Hort Sin*, 2008, 35(9): 1249–1254. doi: 10.3321/j.issn:0513–353X.2008.09.001.
- 刘霞, 彭抒昂, 郭文武. 三种柑橘实生砧木及其两种体细胞杂种根系解剖结构的比较 [J]. *园艺学报*, 2008, 35(9): 1249–1254. doi: 10.3321/j.issn:0513–353X.2008.09.001.
- [14] ZHANG Y F, LU B B, PAN L J, et al. Dwarfing related mechanisms of dwarf cultivars in *Litchi chinensis* [J]. *J Fruit Sci*, 2011, 28(4): 624–629.
- 张永福, 卢博彬, 潘丽佳, 等. 荔枝矮化品种的相关机制研究 [J]. *果树学报*, 2011, 28(4): 624–629.
- [15] CAI L B, ZHANG T L. Genetic relationship between *Leymus* and its related taxa in terms of the anatomical characteristics of their leaves [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2006, 26(3): 537–543. doi: 10.3321/j.issn:1000–4025.2006.03.019.
- 蔡联炳, 张同林. 根据叶解剖特征试论赖草属及其相关类群间的亲缘关系 [J]. *西北植物学报*, 2006, 26(3): 537–543. doi: 10.3321/j.issn:1000–4025.2006.03.019.
- [16] LI X M, DENG X X, DENG B X. Studies on the leaf structure characteristics of citrus somatic hybrids [J]. *J Huazhong Agri Univ*, 1999, 18(3): 272–276. doi: 10.3321/j.issn:1000–2421.1999.03.020.
- 李小梅, 邓秀新, 邓伯勋. 柑橘体细胞杂种的叶片结构特征 [J]. 华

- 中农业大学学报, 1999, 18(3): 272–276. doi: 10.3321/j.issn:1000-2421.1999.03.020.
- [17] WANG X Y, HE H L, XIAO D X. Studies on the leaf epidermal structure of *Litchi chinensis* and *Dimocarpus longana* [J]. Acta Hort Sin, 2006, 33(4): 825–828. doi: 10.3321/j.issn:0513-353X.2006.04.026.
- 王心燕, 何惠玲, 肖德兴. 荔枝、龙眼叶片表皮结构的研究 [J]. 园艺学报, 2006, 33(4): 825–828. doi: 10.3321/j.issn:0513-353X.2006.04.026.
- [18] WANG Q, YAO Q J, XUE Z L, et al. Comparison of leaf shape and structure of *Sinocalycanthus chinensis*, *Calycanthus floridus* and intergeneric hybrid [J]. Jiangsu Agri Sci, 2011, 39(5): 206–208. doi: 10.3969/j.issn.1002-1302.2011.05.084.
- 汪琼, 姚青菊, 徐增莱, 等. 夏腊梅、美国腊梅及其属间杂种叶片形态与结构比较 [J]. 江苏农业科学, 2011, 39(5): 206–208. doi: 10.3969/j.issn.1002-1302.2011.05.084.
- [19] REN H, PAN K Y, CHEN Z D, et al. Structural characters of leaf epidermis and their systematic significance in Vitaceae [J]. Acta Phytotax Sin, 2003, 41(6): 531–544.
- 任辉, 潘开玉, 陈之端, 等. 葡萄科植物叶表皮特征及其系统学意义 [J]. 植物分类学报, 2003, 41(6): 531–544.
- [20] CAO L M, XIA N H. Structural characters of leaf epidermis and their systematic significance in Sapindaceae from China [J]. Acta Bot Yunnan, 2008, 30(4): 405–421. doi: 10.3969/j.issn.2095-0845.2008.04.003.
- 曹丽敏, 夏念和. 中国无患子科的叶表皮特征及其系统学意义 [J]. 云南植物研究, 2008, 30(4): 405–421. doi: 10.3969/j.issn.2095-0845.2008.04.003.
- [21] ZHANG X X, ZHANG H Y, XU W B, et al. Leaf epidermal characters and their taxonomic significance in Balsaminaceae, China [J]. Guihaia, 2013, 33(4): 528–537. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.04.018.
- 张晓霞, 张海燕, 许为斌, 等. 中国凤仙花科植物叶表皮特征及其分类学意义 [J]. 广西植物, 2013, 33(4): 528–537. doi: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.04.018.
- [22] JI L, ZHAO X F, SUN W B. A study on leaf anatomy and epidermal micromorphology of *Michelia crassipes* Law (♀), *M. calcicola* C. Y. Wu (♂) and their F₁ hybrids [J]. J Wuhan Bot Res, 2009, 27(1): 12–18. doi: 10.3969/j.issn.2095-0837.2009.01.003.
- 吉利, 赵兴峰, 孙卫邦. 紫花含笑(♀)与灰岩含笑(♂)及其杂种 F₁ 代叶表皮微形态和叶结构的比较观察 [J]. 武汉植物研究, 2009, 27(1): 12–18. doi: 10.3969/j.issn.2095-0837.2009.01.003.
- [23] YE J S, WANG Z R. A study on leaf abaxial epidermis micromorphology of interspecific F₁ hybrid and parents in *Liriodendron* genus [J]. Sci Silv Sin, 1998, 34(3): 47–50. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.1998.03.007.
- 叶金山, 王章荣. 鹅掌楸属种间 F₁ 杂种与亲本的叶下表皮微形态研究 [J]. 林业科学, 1998, 34(3): 47–50. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.1998.03.007.
- [24] WANG X L, ZHAO M, WANG Q X, et al. Leaf stomatal characters of maize inbred lines and their F₁ hybrid [J]. Acta Agron Sin, 2004, 30(3): 293–296. doi: 10.3321/j.issn:0496-3490.2004.03.020.
- 王秀玲, 赵明, 王启现, 等. 玉米杂交种及亲本自交系气孔特征 [J]. 作物学报, 2004, 30(3): 293–296. doi: 10.3321/j.issn:0496-3490.2004.03.020.