

中国特有珍稀濒危植物小溪洞杜鹃的解剖结构特征

李丹丹, 刘 杰, 李晓花, 张乐华^①

(江西省、中国科学院庐山植物园, 江西 庐山 332900)

摘要: 为了从解剖学角度探究中国特有珍稀濒危植物小溪洞杜鹃(*Rhododendron xiaoxidongense* W. K. Hu)的环境适应性机制和濒危机制,采用扫描电镜对其花粉特征及种子表面纹饰进行观察,并运用常规石蜡切片法对其叶片、幼茎、侧根和幼果的解剖结构进行研究。结果表明:小溪洞杜鹃的花粉为复合型四合体,单粒花粉近球形,表面具黏丝,并具3个萌发沟。种子表面具肋纹且有明显的背腹面之分,两端具明显的翅。幼果的心皮边缘内卷,将子房分为8个心室,胚珠沿中轴胎座排列于两侧。叶为典型的异面叶,上表皮为复表皮,由2层排列紧密的不规则扁长方形表皮细胞组成,栅海比为0.49,而下表皮则由1层椭圆形表皮细胞组成,并分布有气孔;主脉仅有1个维管束,近圆形,并向叶片上表皮延伸形成维管束鞘延伸区,木质部位于维管束鞘中心位置且较为发达,韧皮部位于木质部四周,属于周韧维管束型。茎由表皮、皮层、次生韧皮部、次生木质部和髓组成,薄壁组织细胞内含有晶簇,无周皮,处于初生结构向次生结构的过渡阶段。侧根维管柱位于栓内层内,次生韧皮部面积较小,次生木质部较发达,木射线细胞在次生木质部呈放射状环绕排列。综上所述,小溪洞杜鹃为杜鹃花属(*Rhododendron* Linn.)植物的原始类群,营养器官和生殖器官的解剖结构特征既是该种的分类参考依据,也是其适应生境的一种表现。

关键词: 小溪洞杜鹃; 解剖结构; 形态分类; 生态适应性; 原始类群

中图分类号: Q945.34; Q945.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7895(2025)02-0089-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.02.10

Anatomical structural characteristics of the Chinese endemic rare and endangered plant *Rhododendron xiaoxidongense* LI Dandan, LIU Jie, LI Xiaohua, ZHANG Lehua^① (Lushan Botanical Garden, Jiangxi Province and Chinese Academy of Sciences, Lushan 332900, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(2): 89-96

Abstract: In order to explore the environmental adaptation mechanism and endangered mechanism of *Rhododendron xiaoxidongense* W. K. Hu, a rare and endangered plant endemic to China, from an anatomical perspective, the pollen characteristics and seed surface ornamentations were observed by using a scanning electron microscope, and the anatomical structures of its leaves, young stems, lateral roots, and young fruits were studied by using routine paraffin section method. The results show that the pollen of *R. xiaoxidongense* is a compound tetrad, and the single pollen is nearly spherical, with sticky silk and three germination furrows on the surface. The seed surface has a ribbed pattern and a distinct dorsal-ventral division, and both ends of the seeds have obvious wings. In young fruits, the edges of the carpels curl inwards, dividing the ovary into eight ventricles, and the ovules are arranged on both sides along the central axis placenta. The leaf is a typical dorsiventral leaf, the upper epidermis is a multiple epidermis, composed of two layers of tightly-arranged irregular oblong flat epidermal cells, the ratio of palisade tissue to spongy tissue is 0.49, while the lower epidermis is composed of one layer of oval epidermal cells and is distributed with stomata; there is only one vascular bundle in the main vein, which is nearly circular and extend towards the upper epidermis of the leaves to form a bundle sheath extension area, the xylem is located at the center of the vascular bundle sheath and is relatively developed, and the phloem is located

收稿日期: 2024-05-10

基金项目: 江西省自然科学基金项目(20212BAB215026); 江西省重点研发计划项目(20232BBF60005)

作者简介: 李丹丹(1990—),女,吉林通化人,硕士,助理研究员,主要从事杜鹃花属植物生理生化研究。

^①通信作者 E-mail: lehua07@163.com

引用格式: 李丹丹, 刘 杰, 李晓花, 等. 中国特有珍稀濒危植物小溪洞杜鹃的解剖结构特征[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(2): 89-96.

around the xylem, belonging to the peri-tough vascular bundle type. The stem consists of the epidermis, cortex, secondary phloem, secondary xylem, and pith, the parenchyma cells contain crystal clusters, there is no periderm, and the stem is in the transitional stage from the primary structure to the secondary structure. The vascular cylinder of the lateral root is located within the phelloderm, the area of the secondary phloem is relatively small, while the secondary xylem is relatively developed, and the xylem ray cells are arranged radially around the secondary xylem. In conclusion, *R. xiaoxidongense* is a primitive group of *Rhododendron* Linn. species, and the anatomical structural characteristics of vegetative and reproductive organs are both a reference for the classification of this species and a manifestation of its adaptation to the habitat.

Key words: *Rhododendron xiaoxidongense* W. K. Hu; anatomical structure; formal taxonomy; ecological suitability; primitive group

植物的解剖结构特征在其分类上扮演着重要角色,不同物种之间的解剖结构特征存在明显差异,同一物种在不同生境条件下的解剖结构特征亦表现出明显差异^[1]。例如:在干旱条件下,美国流苏树(*Chionanthus virginicus* Linn.)叶片栅栏组织和海绵组织厚度增加,叶片厚度增大^[2];随着干旱胁迫时间延长,植物叶片的气孔开度减小,气孔密度下降,但叶柄中的导管面积增大^[3-4]。

杜鹃花属(*Rhododendron* Linn.)是杜鹃花科(Ericaceae)中种类最多、分布面积最广的一个属,同时也是北半球木本植物的第1大属。杜鹃花属植物不仅是世界著名的观赏植物,还具有重要的文化、科学及生态价值,部分种类还含有类黄酮、槲皮素等抗炎和抗癌成分,是天然的药用植物资源^[5]。研究发现,随着海拔的不断升高,杜鹃花属植物叶片的上表皮厚度、栅栏组织厚度、总厚度等持续增大,海绵组织厚度逐渐减小,氮含量增加,气孔密度增大,通气组织更为发达,叶片解剖结构特征变异幅度减小,旱生形态结构更加明显^[6-8];并且,与低海拔地区相比,高海拔地区杜鹃花属植物的导管短而多^[9]。在高温胁迫下,杜鹃花属植物叶主脉维管束中的导管直径变小,栅海比和结构紧密度减小^[10-11]。叶表皮细胞形态、大小、表皮毛和气孔器等性状为杜鹃花属植物形态分类的重要依据^[12-14];为了适应外界环境变化,植物茎和根的形态和结构易发生变化^[15]。因此,探究杜鹃花属植物不同器官的显微结构特征,对于揭示其生态适应性和濒危机制具有重要意义。

小溪洞杜鹃(*R. xiaoxidongense* W. K. Hu)隶属于杜鹃花属常绿杜鹃亚属[subgen. *Hymenanthes* (Blume) K. Koch]常绿杜鹃组(sect. *Ponticum* G. Don),该种分布区域狭窄、资源稀少,曾一度被认为

已经灭绝(EX)^[16],笔者所在团队于2019年野外考察时再次发现该种。小溪洞杜鹃为中国特有的珍稀濒危植物,目前仅发现在江西与湖南交界的罗霄山脉中段海拔1 390~1 680 m的山地有少量居群分布。关于小溪洞杜鹃所属亚组存在争议,《中国植物志》^[17]将其归入云锦杜鹃亚组[subsect. *Fortunea* (Tagg) Sleumer],而最新的《中国迁地栽培植物志·杜鹃花科》^[18]则将其归入耳叶杜鹃亚组[subsect. *Auriculata* (Tagg) Sleumer]。笔者在野外观察时发现,相较于其他杜鹃花属种类而言,小溪洞杜鹃的结实率不高。本文采用常规石蜡切片法结合扫描电镜技术,观察了小溪洞杜鹃花粉形态和种子表面特征,并观察了其叶片、幼茎、侧根和幼果的解剖结构特征,以期从解剖学角度揭示小溪洞杜鹃结实率低的原因,同时揭示小溪洞杜鹃的基础形态结构特征和生态适应机制,为该种的分类和濒危机制研究及有效保护利用提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试小溪洞杜鹃的成熟花粉、幼果(授粉后约90 d)和自然散落的成熟种子均采自江西与湖南交界的罗霄山脉中段海拔约1 390 m区域的小江西勘野生居群。将采集的种子进行繁育,在2年生实生苗中随机选择3株大小、长势基本一致(株高4 cm左右)的植株(视为3个重复),在植株顶部向下第2层中选取健康叶片2枚,用于叶片解剖结构观察;选取植株的幼嫩茎段及侧根(直径小于2 mm的一级侧根),用于茎和侧根的解剖结构观察。凭证标本存放在江西省、中国科学院庐山植物园标本馆(LBG)。

1.2 方法

取自然干燥的花粉及成熟饱满的种子,用双面胶粘在导电胶的样品台上,喷金后使用 JSM-7610FPlus 扫描电子显微镜(日本 JEOL 公司)观察花粉形态及种子的外观、端翅、肋纹等微形态特征,并拍照。

采用指甲油印模法^[19]观察小溪洞杜鹃叶片上、下表皮的解剖结构。将透明无色指甲油薄薄地涂在叶片上、下表面,待薄膜完全干燥后,用镊子轻轻撕下薄膜,制成水装片,用 Olympus BX53 光学显微镜(日本 Olympus 公司)观察、拍照。

采用常规石蜡切片法^[20]观察小溪洞杜鹃叶、茎、侧根和幼果的显微结构。选取叶片中段,剪成面积 1 cm×1 cm 且含主脉和侧脉的小方块,并将幼嫩茎段及侧根切成长约 0.5 cm 的小段;用 FAA 固定液 [V(体积分数 50% 乙醇):V(甲醛):V(冰乙酸) = 90:5:5] 固定 24 h,经过乙醇梯度脱水、石蜡包埋、LeicaRM 切片、番红-固绿染色等环节制成永久切片,用 Olympus BX53 光学显微镜观察、拍照。

1.3 数据统计分析

利用 Photoshop CS 7.0 软件制图,同时测量叶片厚度以及上表皮、下表皮、栅栏组织和海绵组织的厚度,并计算栅海比(叶片栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值)、组织结构紧密度(叶片栅栏组织厚度与

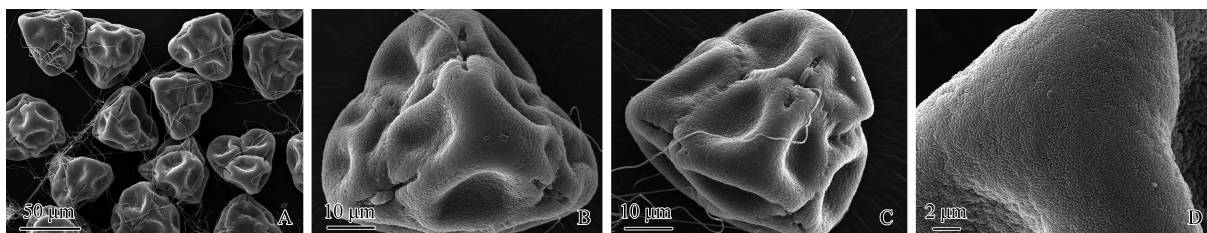
叶片厚度的比值)和组织结构疏松度(叶片海绵组织厚度与叶片厚度的比值)。利用 EXCEL 2010 软件处理数据,所有数据均为 30 个视野的平均值。

2 结果和分析

2.1 生殖器官解剖结构特征

2.1.1 花粉形态特征 观察(图 1)发现,小溪洞杜鹃的花粉为复合型四合体,单粒花粉近球形;四合体呈正四面体排列,直径 50.80~61.37 μm ,平均值为 56.59 μm ,表面具黏丝;四合体间缝较浅,表面均具 3 个萌发沟,萌发孔呈长条形,长 13.05~20.88 μm 、宽 0.80~3.21 μm ,平均值分别为 16.95 和 1.65 μm ;相邻花粉粒的萌发沟相连通,沟内充满内含物;花粉粒外壁具细而致密的颗粒状突起,萌发沟周围近光滑,沟膜下陷,与外壁其他部位的纹饰无明显差异。

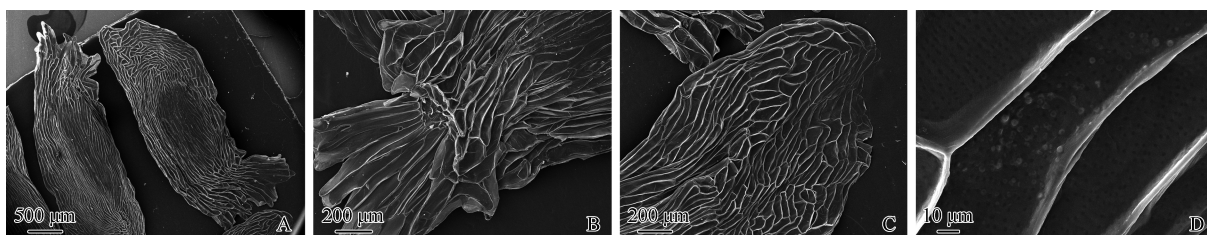
2.1.2 种子表面特征 小溪洞杜鹃种子扁平,呈肾形至长卵形,有明显的背腹面之分,腹面较为平坦,背面微突起(图 2-A);种子长(纵径)约 0.73 mm、宽(横径)约 1.00 mm。种子两端具明显的翅,种脐端翅收缢,末端有撕裂,具 4~5 裂纹,似鱼尾状(图 2-B);合点端翅较为平整,无撕裂(图 2-C)。种皮有明显的纵条肋,肋密生且隆起程度相似;肋间沟较深,呈长



A: 整体观 Holistic view; B: 极面观 Polar view; C: 赤道面观 Equatorial view; D: 外壁纹饰 Exine ornamentation.

图 1 小溪洞杜鹃的花粉形态特征

Fig. 1 Morphological characteristics of pollens of *Rhododendron xiaoxidongense* W. K. Hu



A: 种子外观 Seed appearance; B: 种脐端翅 Hilum terminal wing; C: 合点端翅 Chalaza terminal wing; D: 肋 Rib of seed.

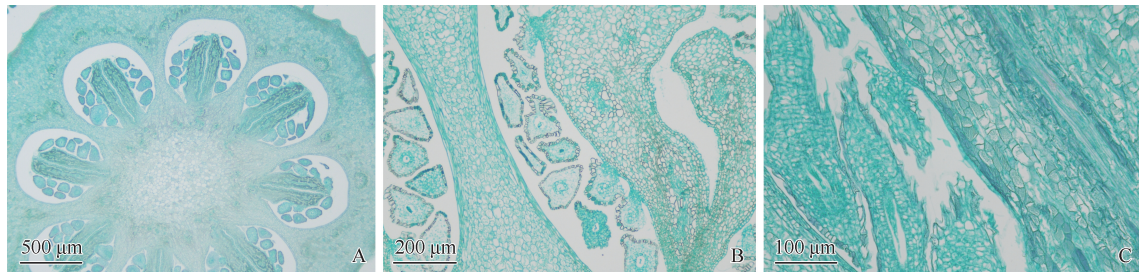
图 2 小溪洞杜鹃的种子表面特征

Fig. 2 Surface characteristics of seeds of *Rhododendron xiaoxidongense* W. K. Hu

圆状,近平行排列,肋的表面均匀分布有圆形凹点,并散布质粒,肋呈不规则的网状分布(图 2-D)。

2.1.3 幼果解剖结构特征 小溪洞杜鹃幼果的子房主要由子房壁、心室、胎座及胚珠等组成,子房壁由多层排列紧密的薄壁细胞组成,局部表皮细胞木栓化,外表皮层覆有腺毛;心皮边缘内卷,将子房分为 8 个

心室,每个心室的胚珠数量不等,均沿中轴胎座密集排列于两侧(图 3-A);子房壁中心皮维管束沿着心室四周规律分布。胚珠呈不规则长卵形,内含大量胚乳细胞,最外层由 1 层珠被细胞包裹(图 3-B);极核位于胚珠中心,中央维管束沿胚珠排列方向平行延伸(图 3-C)。



A: 果实横切面 Fruit transverse section; B: 心室和胚珠横切面 Ventricular and ovule transverse section; C: 心皮和胚珠纵切面 Carpel and ovule longitudinal section.

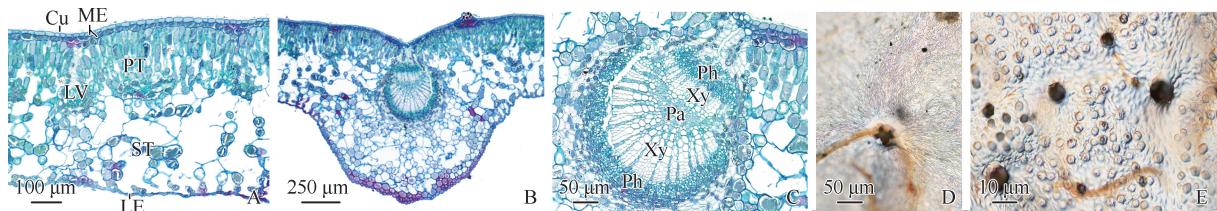
图 3 小溪洞杜鹃的幼果解剖结构

Fig. 3 Anatomical structure of young fruits of *Rhododendron xiaoxidongense* W. K. Hu

2.2 营养器官解剖结构特征

2.2.1 叶解剖结构特征 小溪洞杜鹃的叶为典型的异面叶,依次由上表皮、栅栏组织、海绵组织、下表皮组成(图 4-A),叶平均厚度 423.01 μm 。上表皮外面覆盖 1 层薄且透明的角质层,平均厚度 5.98 μm ;上表皮为复表皮,由 2 层排列紧密的不规则扁长方形细胞组成,平均厚度 27.02 μm 。栅栏组织由 4~5 层长柱形薄壁细胞组成,平均厚度 165.70 μm ,上面 2 层

细胞排列整齐而紧密,且有晶细胞镶嵌其中,下面 2~3 层细胞排列较为松散。海绵组织由多层形状不规则的薄壁细胞组成,平均厚度 340.11 μm ,细胞排列疏松,多个由维管束和机械组织构成的侧脉分布其中。栅栏组织与海绵组织分化明显,栅海比为 0.49,组织结构紧密度为 0.32,组织结构疏松度为 0.66。下表皮由 1 层椭圆形表皮细胞组成,平均厚度 9.74 μm ,内层有拟泡状细胞向外突出,有气孔分布。



Cu: 角质层 Cuticle; ME: 复表皮 Multiple epidermis; LE: 下表皮 Lower epidermis; PT: 栅栏组织 Palisade tissue; ST: 海绵组织 Spongy tissue; LV: 侧脉 Lateral vein; Pa: 薄壁组织 Parenchyma; Xy: 木质部 Xylem; Ph: 韧皮部 Phloem.

A: 侧脉横切面 Transverse section of lateral vein; B: 主脉横切面 Transverse section of midrib; C: 主脉横切面的髓部 Pith on transection section of midrib; D: 上表皮 Upper epidermis; E: 下表皮和气孔 Lower epidermis and stomata.

图 4 小溪洞杜鹃的叶解剖结构

Fig. 4 Anatomical structure of leaves of *Rhododendron xiaoxidongense* W. K. Hu

叶主脉仅有 1 个维管束,近圆形,且细胞排列紧密;近轴面微凹,横切面呈“V”字形,远轴面明显凸起,呈半圆形,叶脉维管束嵌插分布于栅栏组织和海

绵组织之中(图 4-B,C)。其中,维管束鞘排列呈圆形,并向叶上表皮延伸,形成维管束鞘延伸区;木质部位于维管束鞘的中心位置且较为发达,中央由多层薄

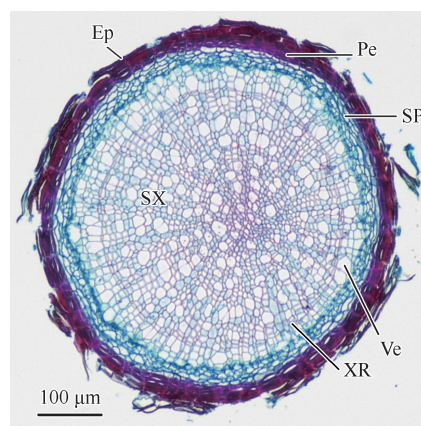
壁细胞构成,具6~8层呈放射状分布的导管;韧皮部位于木质部四周,由多层形态较小的细胞紧密排列而成,属于周韧维管束类型,韧皮部与周围薄壁细胞内均有晶簇分布;主脉维管束的平均高度为150.64 μm 。

肉眼观察发现,小溪洞杜鹃叶的上、下表皮均密被长腺毛。显微观察发现,小溪洞杜鹃叶的上表皮细胞为不规则细波状,大小不等,无气孔器分布,附有表皮毛(图4-D);下表皮散生大量气孔,气孔为椭圆形或近圆形,围绕表皮毛四周随机分布(图4-E)。气孔器为平列型,由2个半月形保卫细胞构成,气孔中间膨大,两端狭窄,较表皮稍凸出,四周无排列整齐的细胞围绕,气孔长约14.98 μm 、宽约13.67 μm 、周长约为28.96 μm 。

2.2.2 茎解剖结构特征 显微观察(图5)发现,小溪洞杜鹃的茎由表皮、皮层、次生韧皮部、次生木质部和髓组成。表皮位于最外层,由1层不规则长方形或近圆形小细胞紧密排列组成,表皮外部被刚毛状腺毛;皮层中的厚角组织由1~2层不规则椭圆形细胞组成,薄壁组织由多层大小不一的细胞紧密排列组成,细胞内含有晶簇,维管柱位于皮层内,包括次生韧皮部、次生木质部、髓和髓射线,次生韧皮部不发达,次生木质部较厚,占茎次生结构的绝大部分;生长轮不明显,导管呈辐射状环绕髓分布;髓占比较大,位于维管柱的中心,由大小不等、排列疏松的大型薄壁细胞组成。

2.2.3 侧根解剖结构特征 小溪洞杜鹃为须根系植物,侧根由内到外分别为次生木质部、次生韧皮部、周

皮和表皮(图6)。其中,表皮为由不规则的扁平的长方形细胞组成,且细胞彼此嵌合、排列紧密;表皮位于最外层,并有不同程度的脱落。周皮由木栓细胞层(4~6层)、木栓形成层(1层)和栓内细胞层(3~4层)构成;根系内导管大小相等且分布均匀,为散孔材。维管柱位于栓内层内,由次生韧皮部、次生木质部、木射线组成。其中,次生韧皮部面积较小,不发达;次生木质部较发达,多由孔径较大、管壁较薄的单管孔的导管组成,呈不规则的环状排列;木射线细胞数量较多,在次生木质部呈放射状环绕排列;木质部导管大小不等、形态多样,射线薄壁细胞内有淀粉颗粒。



Ep: 表皮 Epidermis; Pe: 周皮 Periderm; SP: 次生韧皮部 Secondary phloem; SX: 次生木质部 Secondary xylem; Ve: 导管 Vessel; XR: 木射线 Xylem ray.

图6 小溪洞杜鹃的侧根解剖结构

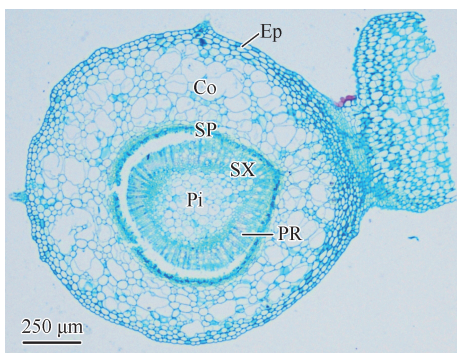
Fig. 6 Anatomical structure of lateral roots of *Rhododendron xiaoxidongense* W. K. Hu

3 讨论和结论

3.1 小溪洞杜鹃生殖器官的结构特征

杜鹃花属植物的分类主要依据花器官特征,但近缘种的花器官特征差异较小,且小溪洞杜鹃从开花到果实成熟需要150 d左右,因此,该种的分类研究往往受到花期限制。鉴于野外小溪洞杜鹃的结实率低,笔者认为有必要对小溪洞杜鹃的花粉、果实、种子等生殖器官进行解剖结构特征研究。

花粉是植物分类和亲缘关系鉴定的重要依据。研究表明:花粉不能作为区分杜鹃花属及其亚属的主要特征,但可以作为杜鹃花属同一亚属内不同组或亚组间的分类依据^[21]。小溪洞杜鹃花粉为复合型四合



Ep: 表皮 Epidermis; Co: 皮层 Cortex; SP: 次生韧皮部 Secondary phloem; SX: 次生木质部 Secondary xylem; Pi: 髓 Pith; PR: 髓射线 Pith ray.

图5 小溪洞杜鹃的茎解剖结构

Fig. 5 Anatomical structure of stems of *Rhododendron xiaoxidongense* W. K. Hu

体,表面具黏丝,促使花粉黏连成团,从而减少花粉散落,提高植株的授粉率。小溪洞杜鹃的花粉具有3个萌发沟,萌发孔为长条形,更容易受外界环境的影响,这可能是造成其结实率低的一个主要原因;但小溪洞杜鹃花粉的萌发沟内充满内含物,能够为后期花粉萌发提供所需的物质和能量,对花粉活力影响较大^[22]。小溪洞杜鹃的花粉粒外壁具有细而致密的颗粒状突起,萌发沟周围呈波状突起,符合王玉国等^[23]对20种杜鹃花属植物花粉基本形态特征的描述,但与同一亚属不同组或亚组间的花粉形态仍存在一定差异。因此,针对小溪洞杜鹃在亚组归类中存在的争议,后续应重点比较其花粉微形态特征与同一亚属内云锦杜鹃亚组和耳叶杜鹃亚组种类间的差异,为小溪洞杜鹃的系统位置划分提供孢粉学依据。

相关研究表明:植物的种子发育主要受基因控制,受环境饰变的影响较小^[24],但种子的表型特征并不稳定,易受环境变化影响,其表面纹饰特征可作为植物系统发育与进化的重要证据,为植物种类鉴定提供依据^[25]。小溪洞杜鹃种子扁平,两端具发达的翅,表皮具明显纵条肋,肋间沟较深且平滑,由此可见,该种属于森林类型(forest type)杜鹃花^[26],可归为有翅类的云锦杜鹃型(*R. fortunei*-type)^[27]。并且,该种的种子表面微形态特征符合“常绿杜鹃亚属作为杜鹃花属原始类群”的观点^[28]。

石蜡切片观察结果显示:小溪洞杜鹃子房壁多层,与同亚属大白杜鹃(*R. decorum* Franch.)的子房壁结构特征相似^[29],但与牛皮杜鹃(*R. aureum* Franch.)果实具5个心室的结构特征明显不同^[30],说明杜鹃花属植物的果实结构特征在同一亚属不同种类之间具有一定的相似性,而在不同亚属或同一亚属不同亚组种类之间存在较大差异,果实结构特征是杜鹃花属植物对生境的适应性表现。小溪洞杜鹃幼果子房壁中的心皮维管束围绕心室周围规律分布,这样的维管束分布格局利于种子发育期间水分、无机盐和有机物等的运输^[31]。小溪洞杜鹃幼果子房有8个心室,每个心室的胚珠数量不均匀,但胚珠均密生于中轴胎座周围,推测胚珠数量及位置与种子产量及系统发育息息相关^[32],有助于更好地了解小溪洞杜鹃的分类位置及濒危机制。

3.2 小溪洞杜鹃营养器官的结构特征

植物营养器官的解剖结构特征是研究植物多样性与分类的重要依据^[33]。叶对环境变化较为敏感,

植物在不同环境条件下的叶形态特征和解剖结构会发生改变,能够反映植物为适应环境而表现出的趋同性演化趋势^[34]。研究发现,6种杜鹃花属植物的叶表皮特征存在明显差异,但同一种类不同居群间的叶表皮特征无明显差异,说明叶表皮特征可作为杜鹃花属植物的种间分类依据^[35]。小溪洞杜鹃的叶为典型的异面叶,叶上表皮由2层细胞构成,与大树杜鹃(*R. protistum* var. *giganteum* (Forrest ex Tagg) D. F. Chamb.)的叶较为相似,由此推测小溪洞杜鹃可能是常绿杜鹃亚属由西南原始分布中心向华东地区分化的一个类群^[36]。小溪洞杜鹃叶上表皮的角质层厚度为5.98 μm ,明显薄于薄毛海绵杜鹃(*R. aganniphum* var. *schizopeplum* (Balf. f. et Forrest) T. L. Ming)(27.94 μm)^[8]、牛皮杜鹃(10.20 μm)^[37]、云锦杜鹃(*R. fortunei* Lind.) (6.97 μm)^[38]和猴头杜鹃(*R. simiarum* Hance) (7.34 μm)^[38],由此推断小溪洞杜鹃的耐旱性和御寒性均较弱。小溪洞杜鹃叶上表皮为复表皮,下表皮由单层细胞构成,且上、下表皮细胞排列紧密,上、下表皮密被长腺毛,可有效防止水分大量散失,也能有效抵御强光照对叶肉组织的伤害。同时,长腺毛可黏住粉虱、蚜虫、螨虫等小型昆虫,抵御害虫取食,这很可能是小溪洞杜鹃为了适应环境而进化出的一种生存策略。另外,小溪洞杜鹃叶的上表皮细胞形状不规则,气孔仅分布于下表皮,围绕表皮毛随机分布,与同亚属都支杜鹃(*R. shanii* Fang)的表皮结构相似^[39]。解剖结构观察结果显示:小溪洞杜鹃叶主脉维管束发达,为周韧维管束,这种维管束处于中脉维管束演化的初始阶段^[40];叶的栅栏组织细胞排列紧密,而海绵组织细胞层数较多,但排列较为疏松,且栅栏组织在叶肉细胞中分化程度明显,符合王桂芹等^[39]对杜鹃花属原始解剖结构特点的描述,由此推断小溪洞杜鹃为杜鹃花属植物的原始类群。潘学军等^[41]发现,植物叶片的栅海比与其耐寒性和耐旱性密切相关,栅海比数值越大,表明耐寒性和耐旱性越强。小溪洞杜鹃叶片的栅海比仅为0.49,明显低于牛皮杜鹃(1.64)、毛毡杜鹃(*R. confertissimum* Wahlenb) (1.24)和苞叶杜鹃(*R. redowskianum* Rehder et E. H. Wilson) (1.65)^[37],结合野外调查发现小溪洞杜鹃野生居群多分布于距离水源较近的路旁或沟谷林下,笔者认为小溪洞杜鹃对于旱、寒冷等逆境的适应力较差。

植物茎内导管的大小和数量直接决定了植物的

输导能力,导管越大、越多,表示植物的输导能力越强,反之则输导能力越弱^[42]。小溪洞杜鹃茎的皮层薄壁细胞中存在晶体,导管数量较多,导管直径和薄壁细胞均较大;茎中无周皮结构,表明此时小溪洞杜鹃的茎正处于初生结构向次生结构的过渡阶段;幼茎表面被腺毛,这些结构特征均可增强小溪洞杜鹃的水分利用效率,调节茎表面温度,促进气体在茎中的扩散^[32],是小溪洞杜鹃对高海拔冷寒环境的一种适应性表现。

根的形态和结构能直接反映植物的功能状态及环境适应性^[43],根周皮是植物发育过程中形成的次生保护组织^[44]。小溪洞杜鹃的根周皮较发达,可以减轻植物在生长过程中受到的生物和非生物胁迫;根的维管柱中次生木质部发达,占次生结构的绝大部分面积,导管数量多、直径大、管壁薄,显示出较强的输导能力,有助于淀粉、脂肪、矿物质等的运输,可增强植物体的抗逆性^[45]。然而,小溪洞杜鹃根的次生韧皮部不发达,导致有机物从根部向地上部的运输较慢^[46],植株生长较为缓慢,不利于种群的繁育及扩大。

3.3 结论

综上所述,小溪洞杜鹃的营养器官和生殖器官均具有一定的中生植物特征,其解剖结构均表现出高山植物对生存环境的适应性特征。本着强化就地保护与迁地保护相结合的原则,在小溪洞杜鹃引种栽培时最好选择海拔较高、无阳光直射、水分充足的环境进行种植。然而,本研究仅对各个器官某一时期的解剖结构进行了观测,并不能全面反映小溪洞杜鹃的生态适应性和濒危机制,后续应对不同发育时期小溪洞杜鹃各器官的解剖结构进行系统研究。同时,应将小溪洞杜鹃的孢粉学、形态学、细胞学性状与基因组学特性相结合进行遗传多样性分析,以期进一步明确小溪洞杜鹃的系统分类位置。

参考文献:

- [1] ALAFAG J I, NAPALDET J T. Taxonomic and ecological notes on *Gaultheria cumingiana* S. Vidal (Ericaceae) from the Cordillera Central Range, Northern Philippines[J]. Taiwan, 2022, 67(4): 497–509.
- [2] 韩睿婷,韩丽霞,张鸽香. 干旱胁迫对美国流苏树幼苗光合特性和叶片结构的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(3): 61–70.
- [3] 高晓宁,赵冰,刘旭梅,等. 4个杜鹃花品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(4): 597–607.
- [4] HORIKE H, KINOSHITA T, KUME A, et al. Responses of leaf photosynthetic traits, water use efficiency, and water relations in five urban shrub tree species under drought stress and recovery[J]. Trees, 2023, 37: 53–67.
- [5] GAUTAM S, CHAUDHARY K. Evaluation of anti-diabetic and anti-hyperlipidemic activity of *Rhododendron arboreum* bark extract against streptozocin induced diabetes in rats[J]. Journal of Medicinal Herbs and Ethnomedicine, 2020, 6: 11–16.
- [6] 曹晓娟,刘建军,杨梅. 太白山5种杜鹃属植物叶片光合特性及解剖结构的生态适应性研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(12): 2483–2491.
- [7] SOSNOVSKY Y, NACHYCHKO V, PROKOPIV A, et al. Leaf anatomical trends in a temperate evergreen dwarf shrub, *Rhododendron myrtifolium* (Ericaceae) along elevational and exposure gradients in the northeastern Carpathian Mountains[J]. Folia Geobotanica, 2021, 56: 27–42.
- [8] 郭文文,卓么草,方江平,等. 藏东南色季拉山薄毛海绵杜鹃叶解剖结构特征与环境适应性[J]. 西北植物学报, 2020, 40(5): 811–818.
- [9] PATHAK M L, SHRESTHA B B, JOSHI L, et al. Anatomy of two *Rhododendron* species along the elevational gradient, Eastern Nepal[J]. Banko Janakari, 2019, 28(2): 32–44.
- [10] 邱毅敏,王伟,胡杏,等. 杜鹃叶片解剖结构与植株耐热性的关系[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(4): 69–81.
- [11] 梁雯,赵冰,黄文梅. 热锻炼对杜鹃花耐热性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(2): 284–290.
- [12] 徐静静,赵冰,申惠翡,等. 15个杜鹃花品种叶片解剖和表型数量分类研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 142–149.
- [13] 唐光大,吴海求,庄雪影. 杜鹃花属5种植物叶表皮结构解剖及分类意义初探[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2010, 28(4): 371–374.
- [14] 王玉国,李光照,张文驹,等. 中国杜鹃花属的叶表皮特征及其系统学意义[J]. 植物分类学报, 2007, 45(1): 1–20.
- [15] LIU H, YE Q, SIMPSON K J, et al. Can evolutionary history predict plant plastic responses to climate change?[J]. New Phytologist, 2022, 235(3): 1260–1271.
- [16] 覃海宁,赵莉娜,于胜祥,等. 中国被子植物濒危等级的评估[J]. 生物多样性, 2017, 25(7): 745–757.
- [17] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第五十七卷第二分册[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 19–213.
- [18] 张乐华,邵慧敏,马永鹏. 中国迁地栽培植物志·杜鹃花科[M]. 北京: 中国林业出版社, 2022: 260–263.
- [19] 张秀芳,石东里,张兰. 观察植物气孔结构的简易方法[J]. 生物学通报, 2002, 37(6): 42.
- [20] 李正理. 植物制片技术[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 129–137.
- [21] 高连明,张长芹,李德铎,等. 杜鹃花属花粉形态及其系统学意义[J]. 云南植物研究, 2002, 24(4): 471–482.

- [22] LIU R S, QIU Y L, WEI D M, et al. Distribution of starch and neutral lipids in the developing anthers of *Ipomoea cairica* [J]. *Annales Botanici Fennici*, 2011, 48: 256–262.
- [23] 王玉国, 李光照, 漆小雪, 等. 杜鹃花属植物花粉形态及其分类学意义[J]. *广西植物*, 2006, 26(2): 113–119.
- [24] LI Z, LIU Q, ZHAO K, et al. Dynamic DNA methylation modification in peanut seed development [J]. *iScience*, 2023, 26: 107062.
- [25] BARTHOLOTT W. Epidermal and seed surface characters of plants: systematic applicability and some evolutionary aspects [J]. *Nordic Journal of Botany*, 1981, 1(3): 345–355.
- [26] 沈立欣, 陈训, 周凤娇, 等. 贵州树形杜鹃亚组及两个杂交种的种子形态研究[J]. *贵州科学*, 2011, 29(3): 56–58, 63.
- [27] 王玉国, 李光照, 张文驹, 等. 果皮和种皮微形态特征在杜鹃花属系统学研究中的应用[J]. *植物分类学报*, 2007, 45(1): 21–38.
- [28] 闵天禄, 方瑞征. 杜鹃属的系统发育与进化[J]. *云南植物研究*, 1990, 12(4): 353–365.
- [29] 宋杰, 马绍宇, 蔡艳飞, 等. 大白杜鹃子房解剖结构及其生态意义[J]. *江西农业学报*, 2018, 30(3): 49–53.
- [30] 丁洪玲, 宫宇, 李美善, 等. 牛皮杜鹃植株解剖结构的研究[J]. *延边大学农学报*, 2008, 30(2): 90–97.
- [31] 谢兆森, 杜鸿儒, 项殿芳, 等. 蓝莓果实不同发育期维管束解剖结构与水分运输变化[J]. *植物生理学报*, 2018, 54(1): 45–53.
- [32] YUAN S, ZENG G, BARRETT S C H, et al. A comparative analysis of gamete production in distylous *Primula*: associations with floral traits and elevation [J/OL]. *Journal of Systematics and Evolution*, 2024: 1–13. (2024–12–18) [2025–02–23]. <https://doi.org/10.1111/jse.13146>.
- [33] WAJID Z, SEONJOO P. Taxonomic significance of anatomical and micro-morphological characteristics of *Silene takesimensis* Uyeki & Sakata [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2023, 86(11): 1542–1547.
- [34] MENDES M M, GAZARINI L C, RODRIGUES M L. Acclimation of *Myrtus communis* to contrasting Mediterranean light environments effects on structure and chemical composition of foliage and plant water relations [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2001, 45(2): 165–178.
- [35] WANG X W, MAO Z, CHOI K, et al. Significance of the leaf epidermis fingerprint for taxonomy of genus *Rhododendron* [J]. *Journal of Forestry Research*, 2006, 17(3): 171–176.
- [36] 申仕康, 张新军, 吴富勤, 等. 极小种群野生植物大树杜鹃的解剖结构研究[J]. *植物科学学报*, 2016, 34(1): 1–8.
- [37] 王艳萍, 刘胜利, 陈玉珍, 等. 3种长白山高山杜鹃叶片结构及其对环境的适应性[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(4): 18–25.
- [38] 邓贤兰, 刘鑫, 曹裕松, 等. 井冈山山顶矮林优势种云锦杜鹃和猴头杜鹃叶片解剖结构比较[J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(4): 583–589.
- [39] 王桂芹, 刘艳然. 都支杜鹃茎、叶解剖特征与环境的适应性[J]. *植物研究*, 2012, 32(5): 532–536.
- [40] 熊子仙, 杜青, 王启德. 国产杜鹃花叶解剖与分类群[J]. *广西植物*, 2000, 20(4): 335–338, 389.
- [41] 潘学军, 张文娥, 杨秀永, 等. 喀斯特山区野生葡萄实生苗叶片解剖结构与抗旱性的关系[J]. *贵州农业科学*, 2010, 38(9): 176–178, 182.
- [42] CHEN W, MOU X L, MENG P P, et al. Anatomical responses of leaf and stem of *Catalpa bungei* C. A. Mey. to nitrogen application and *Rhizophagus intraradices* inoculation [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2023, 209: 105308.
- [43] SAUTER J J. Xylem: structure and function [J]. *Progress in Botany*, 1986, 48: 388–405.
- [44] OLGA S, PEKKA A M, HETHERINGTON A J, et al. The making of plant armor: the periderm [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2022, 73(1): 405–432.
- [45] 黄萍, 沈俊辉, 顾东亚, 等. 小花山桃草营养器官解剖结构及其生态适应性研究[J]. *植物研究*, 2009, 29(4): 397–401.
- [46] GIAI P, DARIO Z, BENJAMIN H D, et al. No xylem phenotypic plasticity in mature *Picea abies* and *Fagus sylvatica* trees after five years of throughfall precipitation exclusion [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(15): 4668–4683.

(责任编辑: 佟金凤)