

蒋雅婷, 段国敏, 田敏, 王彩霞, 张莹. 无距虾脊兰营养器官解剖结构及其生态适应性[J]. 植物科学学报, 2019, 37(3): 271-279  
Jiang YT, Duan GM, Tian M, Wang CX, Zhang Y. Anatomical structure of the vegetative organs of *Calanthe tsoongiana* and their ecological adaptation[J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(3): 271-279

# 无距虾脊兰营养器官解剖结构及其生态适应性

蒋雅婷, 段国敏, 田敏\*, 王彩霞, 张莹

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400)

**摘要:** 采用石蜡切片法对无距虾脊兰(*Calanthe tsoongiana* T. Tang et F. T. Wang)营养器官解剖结构进行研究。结果显示, 无距虾脊兰叶为等面叶, 与一般植物相比, 表皮毛和气孔器较少, 均分布在下表皮, 气孔器稍外凸, 叶片维管束分化程度不一, 木质部厚度远大于韧皮部。假鳞茎由表皮、基本组织和维管束组成, 基本组织发达, 含有丰富的内含物。维管束散生于基本组织中; 根主要由根被、皮层和中柱组成, 根被通常可见4层, 皮层由8~10层薄壁细胞组成, 菌丝体通过破坏根被细胞侵入皮层。除正对木质部脊的中柱鞘细胞外, 其余中柱鞘通道细胞全面增厚, 维管束类型为辐射维管束, 中柱中央为薄壁细胞组成的髓。无距虾脊兰营养器官的解剖特征表现出阴生植物的特点, 引种栽培过程中应注意适当遮荫和通风。

**关键词:** 无距虾脊兰; 营养器官; 解剖结构; 生态适应性

中图分类号: Q949.71+8.43

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2019)03-0271-09

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2019.30271

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Anatomical structure of the vegetative organs of *Calanthe tsoongiana* and their ecological adaptation

Jiang Ya-Ting, Duan Guo-Min, Tian Min\*, Wang Cai-Xia, Zhang Ying

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China)

**Abstract:** The anatomical characteristics of the vegetative organs of *Calanthe tsoongiana* T. Tang et F. T. Wang were studied by paraffin sectioning to explore their ecological adaptation. Results showed that the leaf was isobilateral. Furthermore, compared with general plants, the leaves had less epidermal hair and fewer stomata, which were both distributed in the lower epidermis. The stomatal apparatus was slightly convex. The differentiation degree of the vascular bundles in the leaf was varied, and the xylem was much thicker than the phloem. The pseudobulb consisted of epidermis, ground tissue, and vascular bundles, and the ground tissue was well developed with abundant inclusions. The vascular bundles were scattered throughout the basic tissue. The root was mainly composed of the velamina, cortex, and stele. The velamina consisted of four layers of cells and the cortex was composed of 8 - 10 layers of parenchymal cells. The mycelium infected the cortex by destroying the velamina cells. The middle columnar channel cells were thickened on all sides, except the pericycle cells facing the xylem ridge. The vascular bundles were of radiative type and the pith, which was located in the center of the stele, consisted of parenchymal cells. Thus, the anatomical structures of the nutritive organs of *C. tsoongiana* showed features of a shade plant. Shade treatment and

收稿日期: 2018-08-27, 退修日期: 2018-09-25。

基金项目: 浙江省农业新品种选育重大科技项目(2016C02056-13-2)。

This work was supported by a grant from the Breeding of New Variety Project of Zhejiang Province(2016C02056-13-2)。

作者简介: 蒋雅婷(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为兰科植物生理及分子生物学(E-mail: jcaf129@163.com)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: tmin115@163.com)。

well-ventilated conditions should be provided in the processes of introduction and cultivation.

**Key words:** *Calanthe tsoongiana*; Vegetative organ; Anatomical structure; Ecological adaptation

无距虾脊兰(*Calanthe tsoongiana* T. Tang et F. T. Wang)为兰科虾脊兰属多年生草本植物,是我国特有的二级保护植物。喜阴湿、腐殖质丰富、排水良好的土壤。近年来,由于适生环境的破坏和人为采挖,无距虾脊兰野生居群正日趋减少。无距虾脊兰植株洒脱飘逸,花朵清秀雅致,具有作为林下观赏植物的优良特性。已有研究表明,从虾脊兰属植物中提取的化合物和活性成分在抑制癌细胞生长<sup>[1]</sup>、抗白血病<sup>[2]</sup>、抗菌、消炎、抗毒素<sup>[3]</sup>等方面具有重要作用。李丹平等<sup>[4]</sup>研究表明,虾脊兰(*C. discolor* Lindl.)、剑叶虾脊兰(*C. davidii* Franch.)、钩距虾脊兰(*C. graciliflora* Hayata)等 4 种虾脊兰属植物为鄂西土家族传统中药药材来源。有关无距虾脊兰药用价值的研究目前还未见报道。

植物各营养器官既有各自特定的功能和结构,又相互协调和贯通,是植物对陆生环境长期适应及自然选择的结果。以往对阴生植物营养器官的研究中,发现叶片通常表现出相似的耐荫结构特征,如:叶肉细胞排列疏松,细胞间隙大,角质层不发达,气孔分布于下表皮且向外凸起<sup>[5, 6]</sup>等,而根的解剖结构在不同植物中存在较大的差异。兰科植物为单子叶植物中的第一大科,在陆生环境中广泛分布,是被子植物中进化程度最高的类群之一<sup>[7]</sup>。假鳞茎为兰科植物适应特殊生境的组织构造,在兰花的生存和繁衍中发挥至关重要的作用。当前少有从营养器官的内部结构特征探究兰科植物与环境的适应关系,解剖学研究重点集中于菌根生态学的研究<sup>[8]</sup>。本研究通过对无距虾脊兰营养器官的解剖结构进行观察和分析,以探讨其对生态环境的适应机制,为日后引种保护工作奠定科学基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

无距虾脊兰野生居群采于浙江西天目山国家级自然保护区内(海拔 550 m, 北纬 30°21′、东经 119°25′)。天目山区为北亚热带气候,年均气温 14.8 ~ 8.8℃, 年均降水量达 1390~1870 mm。无距虾脊兰居群分布在山体的西南坡,分布区植被为

混交阔叶林,林分郁闭度为 0.2 ~ 0.5, 林内地面有散射光,无直射光分布<sup>[9]</sup>。

### 1.2 实验方法

选取 5 株健康、长势良好的无距虾脊兰成熟植株,取叶片中部切成 0.5 cm × 0.5 cm 的小块;取根中部和根尖,切成 0.5 cm 左右的小段;取假鳞茎边缘和中部切成 0.5 cm × 0.5 cm × 0.5 cm 的小块。将材料迅速置于 FAA 固定液中(固定 24 h 以上)备用。采用常规石蜡切片法制片,切片厚度 8 ~ 13 μm,用番红-固绿对染和苏木精整体染色,中性树胶封片<sup>[10]</sup>。叶片表皮气孔观察参照王宏等<sup>[11]</sup>的直接撕取法,下表皮用番红染色。每种营养器官选取 10 个样本,每个样本观察 5 个视野,在 Olympus CX41 光学显微镜和 Olympus SZ61 变焦体式显微镜下观察并拍照。用 Image-Pro Express 6.0 软件测量大叶脉厚度、小叶脉厚度、叶片厚度、根皮层面积/根横切面面积、根中柱面积/根横切面面积、导管孔径<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 无距虾脊兰叶片解剖结构

无距虾脊兰通常具 2 片下垂基生叶,倒卵状披针形或长圆形,由表皮、叶肉和叶脉组成,叶脉为平行脉。

#### 2.1.1 叶片横切面特征

从横切面上看,大叶脉处叶片平均厚度为 759.37 μm(图版 I: 1, 表 1),小叶脉平均厚度为 357.99 μm(图版 I: 2, 表 1),叶片平均厚度为 194.81 μm(图版 I: 3、4, 表 1)。上、下表皮各 1 层,排列较为紧密,上表皮细胞多呈长方形,向内凸起,下表皮细胞呈不规则长方形或长椭圆形至圆形,具角质层(图版 I: 2)。上表皮细胞稍大于下表皮细胞,外切向壁较厚,有些下表皮细胞的外壁向外突起并伸长形成表皮毛(图版 I: 5)。气孔稍突出于叶表面,孔下室较大(图版 I: 6)。叶肉由 4~6 层大小不一、含细胞间隙的薄壁细胞组成,无海绵组织和栅栏组织的分化,为等面叶,叶肉中有少量碳酸钙晶体和圆形气腔存在(图版 I: 7、8),薄壁细胞中的叶绿体沿细胞壁分布(图版

表 1 无距虾脊兰叶片解剖指标测定

Table 1 Measurement of anatomical indices of *Calanthe tsongiana* leaves

指标 Index	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average	标准差 Standard deviation
大叶脉厚 (μm) Large vein thickness	808.57	720.22	759.37	26.41
小叶脉厚 (μm) Small vein thickness	372.12	345.01	357.99	8.24
叶片厚度 (μm) Leaf thickness	217.05	171.15	194.81	16.23

I：2)。无距虾脊兰叶脉向背面凸出，大叶脉维管束为有限维管束，韧皮部被厚壁组织覆盖呈半圆形，居远轴面。木质部由原生木质部和后生木质部组成，位于近轴面，导管口径较小的原生木质部紧接着韧皮部分布，后生木质部导管口径较大，不同管径大小的导管中夹杂着小型木薄壁细胞。大叶脉中木质部占维管组织的面积为韧皮部的 5 倍以上，维管组织最外层包围着细胞壁显著增厚的厚壁组织(图版 I：1)。

侧脉维管束与主脉维管束相比，除侧脉维管束更小、机械组织没有主脉维管束发达外，其他无差异。相邻两侧脉之间存在一些更细小的叶脉，维管束发育程度较低(图版 I：3)或者仅由几个管胞构成(图版 I：4)。

2.1.2 叶表皮特征

上表皮细胞形状不规则，差异较大，无表皮毛和气孔器分布(图版 I：9)。下表皮细胞为不规则多边形，彼此紧密嵌合，垂周壁平直，有少量表皮毛和气孔器分布，叶脉处的下表皮细胞为细长矩形，较长的一边与叶的长轴平行呈纵行排列(图版 I：10)。气孔器为椭圆形，由气孔和一对保卫细胞构成，保卫细胞内有叶绿体分布(图版 I：11)，每个气孔器与 4 或 5 个表皮细胞相邻，叶片中部气孔密度平均为 52 个/mm<sup>2</sup>。

2.2 无距虾脊兰根的解剖结构

无距虾脊兰成熟植株根直径平均为 1.65 mm，长度可达 40 cm 以上，簇生于假鳞茎上，肉质。根尖呈乳白色，根冠由数层核大的薄壁细胞组成，覆盖在分生区的外端，分生区细胞分裂旺盛(图版 II：1)，成熟区细胞无明显的根毛形成，根尖细胞中可观察到晶体存在(图版 II：2)。

根中部横切面显示，根由根被、皮层、中柱 3

部分组成(图版 II：3)。根被由 4~5 层薄壁细胞组成，覆盖在根的最外围，细胞排列紧密，无细胞间隙，为死细胞，最外层根被细胞常磨损脱落(图版 II：3，4)。第 2 层根被细胞外切向壁近平直，明显长于径向壁，第 3、第 4 层细胞多为等径细胞，最内层根被由不规则的多边形细胞构成(图版 II：4)。数量较少的最外层根被外切向壁向外突起形成根毛(图版 II：4)。皮层具显著的外皮层、皮层薄壁细胞和内皮层之分，外皮层细胞稍呈径向伸长，为全面或马蹄形增厚的五边形或六边形细胞(图版 II：5)。皮层薄壁细胞由 8~10 层组成，占根部横切面积的 60% 以上，细胞间隙明显可见，其中含有大量的淀粉粒、晶体(图版 II：3，4，5)。某些外皮层细胞中可见菌丝的侵染。本实验还观察到疑似因细菌侵入导致表皮和根被细胞被破坏、部分薄壁细胞异常增大并呈套环状的现象，中间为被破坏、挤压的薄壁细胞(图版 II：4，13)。内皮层细胞类纺锤形或矩形，除正对木质部脊处的内皮层细胞为薄壁的通道细胞外，其余内皮层细胞的细胞壁全面增厚(图版 II：6)。

由横切面可见，中柱由中柱鞘、维管组织和髓组成，中柱面积占根横切面总面积的 5%~5.5%(图版 II：3)。中柱鞘为一层由厚壁细胞和薄壁细胞组成的结构，环绕在中柱最外方，紧靠内皮层，正对木质部脊处的中柱鞘细胞为薄壁通道细胞，与内皮层处的通道细胞相接(图版 II：6)。中柱中央为较小的圆形薄壁细胞组成的髓，含细胞空隙(图版 II：6)。维管组织包括木质部和韧皮部，韧皮部与木质部相间排列，呈辐射状；木质部发育方式为外始式，由原生木质部和后生木质部组成，导管孔径不一，靠近髓部的后生木质部导管孔径较大，最大可达 24.61 μm；韧皮部靠近中柱鞘分布，细胞较小，排列成团状。木质部和韧皮部束数通常为 8 束或 9 束，存在少数木质部位于韧皮部内部的排列方式，此时木质部为 10 束。厚壁的维管束鞘细胞充满整个中柱，起到重要的支撑作用(图版 II：6)。

2.3 无距虾脊兰假鳞茎解剖结构

成熟植株假鳞茎为椭圆形至圆形，高(18 ± 3.9) mm，粗(14 ± 2.1) mm。假鳞茎由表皮、基本组织和维管束组成(图版 II：7，8)。表皮通常由 1 层排列紧密的长方形细胞组成，具明显的角质层(图版 II：8)。从横切面看，基本组织由大小不



等、圆形至椭圆形或卵状多角形的薄壁细胞组成,胞间隙小,薄壁细胞中含有大量淀粉粒,几乎充满整个薄壁细胞,含晶细胞较大,晶体形态各异(图版Ⅱ:9)。大小不一、发育程度不同的维管束散生在基本组织中,发育类型属外韧有限维管束(图版Ⅱ:7)。从横切面可见,韧皮部由一些细胞较大、呈多边形的筛管和一些细胞较小呈三角形或梯形的伴胞组成,维管束鞘呈帽状覆盖在韧皮部周围,维管束鞘细胞强烈木质化增厚(图版Ⅱ:10)。木质部由导管和少量木薄壁细胞组成(图版Ⅱ:10),显微观察可见导管侧壁发生增厚(图版Ⅱ:11,12)。

### 3 讨论

#### 3.1 假鳞茎解剖特征对生境的适应性

植物的形态和结构与其生长的环境构成一个统一的整体,植物营养器官的内部结构特征是自身对环境长期适应的结果<sup>[13]</sup>。无距虾脊兰叶基生,无直立茎和根状茎,只有生长在地下的肉质假鳞茎,无距虾脊兰野外种群的更新和繁殖主要通过假鳞茎的无性繁殖。每年秋季,当年生植株基部开始长出新的假鳞茎,老假鳞茎为新的假鳞茎输送养分,等到新的假鳞茎萌芽、开花、结实、抽叶后,老株叶片逐渐枯萎死去。假鳞茎的繁殖和更新为种群的保持和延续奠定了坚实的基础,因此假鳞茎具有发达的薄壁组织细胞,能够储藏丰富的养分和水分并提供给叶片生长发育以度过严冬酷暑。假鳞茎表面覆盖的角质层有助于防止病菌侵入,防止生长磨损等外界不利干扰。薄壁组织细胞中散生的大量维管束促使水分和养分在地上和地下高效流通,此外还能起到一定的支持作用,使得假鳞茎坚硬,抵抗山体流水冲刷、支撑叶片的生长。薄壁细胞中的晶体具有特殊的生理功能,如:钙离子的吸收和转运,植物防御和保护,缓解生物胁迫等<sup>[14]</sup>,无距虾脊兰假鳞茎、根和叶片中都有晶体存在,这可能是其适应野外不良环境的一种自我保护方式。

#### 3.2 根的解剖特征对生境的适应性

无距虾脊兰根毛稀疏,不够发达,根和假鳞茎无形成层,无法进行次生生长,维管组织在其中占比较小,与沙地植物沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang)<sup>[15]</sup>、旱生植物木棉(*Bombax ceiba* L.)和坡柳(*Dodonaea viscosa* L.)<sup>[16]</sup>

相比,其木质部导管数量较少,孔径明显较细,输导组织不发达,因而地下部分的吸水和输导水分能力较弱。有研究表明,外皮层和内皮层的细胞壁增厚可以防止水分散失,某些单子叶植物特有的根被具有被动吸水 and 贮水的功能<sup>[17]</sup>,能够减少皮层中水分的丧失,并兼具机械保护的功能,如:铁皮石斛(*Dendrobium candidum* Wall. ex Lindl.)气生根的根被在周围环境含水量降低时还能够增加层数以抵御干旱<sup>[18]</sup>。本研究发现,无距虾脊兰具有的4层根被组织弥补了假鳞茎和根输导组织不发达的劣势,这是它对外界环境中降水量多、土壤含水量丰富的一种响应特征。此外,皮层与中柱的比率较大,内皮层和中柱鞘的通道细胞与木质部的导管相接,有利于水分从皮层快速进入导管向上运输。与许多兰科植物类似,无距虾脊兰根中可见共生真菌的侵入,但未见可供共生菌入侵的薄壁通道细胞,推测其共生真菌可能是通过破坏根被细胞侵入皮层定殖。

兰科植物根木质部脊数从5~30束不等,无距虾脊兰同一植株上具有不同的维管束数,通常为8~9束,较之于春兰(*Cymbidium goeringii* (Rchb. f.) Rchb. f.) (14束)、墨兰(*Cymbidium sinense* (Jackson ex Andr.) Willd.) (14束)、长距石斛(*Dendrobium longicornu* Lindl.) (21束)、流苏石斛(*Dendrobium fimbriatum* Hook.) (15~17束)<sup>[19]</sup>等较少,但又多于扇脉杓兰(*Cypripedium japonicum* Thunb.) (4~8束)<sup>[20]</sup>、大花杓兰(*Cypripedium macranthum* Sw.) (5, 8, 9束)<sup>[21, 22]</sup>。无距虾脊兰根维管束数相对偏少、导水效率相对低下的特征,与发达的皮层组织、根被以及不够发达的根毛相互适应。维管束数不同是植株对生长环境长期适应的演化特征,有些兰花的木质部脊数存在较大的波动幅度<sup>[23]</sup>,这一现象与其自身遗传特征或者与周围环境中的水分、光照、CO<sub>2</sub>等生态因子是否存在关联还需要通过进一步实验论证。

#### 3.3 叶的解剖特征对生境的适应性

叶片的形态结构能够直观反映出植物对生态环境的适应特点<sup>[24]</sup>。无距虾脊兰唯一暴露在空气中的营养器官即为叶片,本研究显示,其叶片较薄、上表皮无表皮毛、薄壁细胞具细胞间隙可减少光量子投射损失,叶肉中散布的气腔有助于减少光量子

扩散的阻力,叶片能够高效利用林下散射光进行光合作用,气孔稍凸出于表面以提高叶片的气体交换能力、增强光合作用,这些特征都是叶片对林下低光、低CO<sub>2</sub>浓度环境的适应,与前人对一些阴生植物的研究结果类似<sup>[21, 25, 26]</sup>。无距虾脊兰保卫细胞中含有叶绿体有助于表皮细胞对光的吸收,气孔仅分布在下表皮,这与袁王俊等<sup>[27]</sup>对阴生植物黄连(*Coptis chinensis* Franch.)、张泽宏和吴小霞<sup>[26]</sup>对阴生蕨类植物的研究结果一致。有研究表明,生长在低光强下的植物相比于高光强下的植物具有较低的气孔密度<sup>[26]</sup>,本研究发现,无距虾脊兰气孔密度小,平均为52个/mm<sup>2</sup>(大部分植物为100~300个/mm<sup>2</sup><sup>[28]</sup>),且叶片上表皮细胞的细胞壁增厚,这些结构特征大大降低了蒸腾作用,提高了水分利用效率,角质层存在于下表皮还能够防止水分的非气孔性丢失<sup>[29]</sup>,这也是叶片对弱光环境的响应。

无距虾脊兰大叶脉具较宽大的木质部,有利于水分在叶片内快速流通,但侧脉木质部导管孔径较小,数量较少,更小的侧脉甚至尚未发育完全,当温度升高,光照强度增加,维管组织会因为无法快速为叶片提供充足的水分,使叶片的蒸腾作用不能正常进行,以致叶片温度过高而枯死。机械组织不发达,而构成维管束鞘的厚壁组织在叶片中起到了主要支撑作用。维管束鞘细胞小型、不含叶绿体,细胞外围无花环状结构,因此,无距虾脊兰为C<sub>3</sub>植物,具有较弱的CO<sub>2</sub>固定能力、光合作用能力及有机物生成能力,在荫蔽环境下能够生长良好,但植株生长速度缓慢。

## 4 结论

综上所述,我们认为:(1)无距虾脊兰营养器官的解剖结构表现出对阴生环境的适应;(2)根毛不发达、营养器官的维管组织较小导致其吸收和输导水分的能力较弱,难以抵抗高温、强光照天气,这是其濒危的潜在原因之一;(3)光照强度可能是影响其生长的主要因素,引种栽培过程中应给予适当的遮荫和通风,为无距虾脊兰的生长繁殖创造有利的环境。

## 参考文献:

- [1] Lee CL, Kyoko NG, Yu DL, Liu YN, Bastow KF, et al. Cytotoxic calanquinone A from *Calanthe arisanensis* and its first total synthesis[J]. *Bioorg Med Chem Lett*, 2008, 18(15): 4275-4277.
- [2] 关璟,王春兰,肖培根,郭顺星.地生型兰科药用植物化学成分及其药理作用研究[J].*中国中药杂志*, 2005, 30(14): 1053-1061.
- [3] Guan J, Wang CL, Xiao PG, Guo SX. Studies on chemical components and pharmacological activities of geobiontic type medicinal plants in Orchidaceae family[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2005, 30(14): 1053-1061.
- [4] Park SY, Muthy HN, Paek KY. *In-vitro* seed germination of *Calanthe sieboldii*, an endangered orchid species[J]. *J Plant Biol*, 2000, 43(3): 158-161.
- [5] 李丹平,陈雨洁,万定荣,李敏伦.鄂西土家族常用兰科植物药[J].*中南民族大学学报(自然科学版)*, 2009, 28(1): 48-50.
- [6] Li DP, Chen YJ, Wan DR, Li ML. Common West Hubei Tujia medicinal Orchidaceae plants[J]. *Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2009, 28(1): 48-50.
- [7] 刘雄盛,肖玉菲,蒋隼,李娟,林建勇,梁瑞龙.闽楠营养器官的解剖结构及其生态适应性[J].*植物科学学报*, 2018, 36(2): 153-161.
- [8] Liu XS, Xiao YF, Jiang Y, Li J, Lin JY, Liang RL. Anatomical structures of the vegetative organs of *Phoebe bournei*(Hemsl.) Yang and ecological adaptability[J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(2): 153-161.
- [9] 周毅,黄衡宇,李菁.蛇足石杉生态适应性研究 I. 茎叶解剖特征的比较[J].*植物研究*, 2010, 30(2): 157-163.
- [10] Zhou Y, Huang HY, Li J. Ecological adaptation of *Huperzia serrata* I. Leaf and stem anatomical characteristics[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2010, 30(2): 157-163.
- [11] 张玉武,杨红萍,陈波,杨晓梅,沈峥华.中国兰科植物研究进展概述[J].*贵州科学*, 2009, 27(4): 78-85.
- [12] Zhang YW, Yang HP, Chen B, Yang XM, Shen ZH. Research progress Orchidaceae in China[J]. *Guizhou Science*, 2009, 27(4): 78-85.
- [13] 盖雪鸽,邢晓科,郭顺星.兰科菌根的生态学研究进展[J].*菌物学报*, 2014, 33(4): 753-767.
- [14] Gai XG, Xing XK, Guo SX. Ecological research of orchid mycorrhizae: a review[J]. *Mycosystema*, 2014, 33(4): 753-767.
- [15] 连静静,钱鑫,王彩霞,李全健,田敏.中国特有植物无距虾脊兰生物学特性及花部形态观察[J].*植物资源与环境学报*, 2013, 22(3): 100-106.
- [16] Lian JJ, Qian X, Wang CX, Li QJ, Tian M. Observation of biological characteristics and floral morphology of Chinese endemic species *Calanthe tsoongiana* Tang et Wang

- [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2013, 22(3): 100–106.
- [10] 李正理. 植物制片技术[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 10–15.
- [11] 王宏, 申晓辉, 郭瑛. 中国北方鸢尾属植物叶片解剖结构特征及分类学价值研究[J]. *植物研究*, 2008, 28(1): 30–37.
- Wang H, Sheng XH, Guo Y. Anatomical structures of leaves and taxonomic values in *Iris* from the north of China [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28(1): 30–37.
- [12] 赵祥, 董宽虎, 张垚, 朱慧森, 杨武德, 杨美红. 达乌里胡枝子根解剖结构与其抗旱性的关系[J]. *草地学报*, 2011, 19(1): 13–19.
- Zhao X, Dong KH, Zhang Y, Zhu HS, Yang DW, Yang MH. Drought resistance and root anatomy of *Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl [J]. *Acta Agrestis Sinica*, 2011, 19(1): 13–19.
- [13] 周智彬, 李培军. 我国旱生植物的形态解剖学研究[J]. *干旱区研究*, 2002, 19(1): 35–40.
- Zhou ZB, Li PJ. A review on the phytotomy research of xerophytes in China [J]. *Arid Zone Research*, 2002, 19(1): 35–40.
- [14] 朱广龙, 马茵, 韩蕾, 霍张丽, 魏学智. 植物晶体的形态结构、生物功能及形成机制研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(22): 6429–6439.
- Zhu GL, Ma Y, Han L, Huo ZL, Wei XZ. Current status of research on morphological structure, biological function and formation mechanism of plant crystals [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6429–6439.
- [15] 艾绍水, 李秧秧, 陈佳村, 陈伟月. 陕北沙地3种典型灌木根木质部解剖结构及水力特性[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3277–3284.
- Ai SS, Li YY, Chen JC, Chen WY. Root anatomical structure and hydraulic traits of three typical shrubs on the sandy lands of northern Shaanxi Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3277–3284.
- [16] 葛雯, 黄冬, 马焕成, 王彦淇, 丁岩. 干热河谷两种植物的旱生结构特征与其分布规律的关系[J]. *西部林业科学*, 2016, 45(4): 107–113.
- Ge L, Huang D, Ma HC, Wang YQ, Ding Y. The relationship between xeromorphic structures and distributions of two plants in Dry-hot Valley [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2016, 45(4): 107–113.
- [17] 朱秉琼, 徐艳霞, 招礼军, 袁娟, 杨丽梅. 喀斯特地区莎叶兰的解剖构造及其环境适应性[J]. *广西植物*, 2016, 36(10): 1179–1185.
- Zhu LQ, Xu YX, Zhao LJ, Yuan J, Yang LM. Anatomical structure and environmental adaptability of *Cymbidium cyperifolium* in karst area [J]. *Guihaia*, 2016, 36(10): 1179–1185.
- [18] 陈连庆, 王小明, 裴致达. 石斛气生的兰科菌根组织结构及其对御旱研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(1): 160–164.
- Chen LQ, Wang XM, Pei ZD. Tissue structure of aerial orchidaceous mycorrhiza and its effect on drought resistance of *Dendrobium* [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1): 160–164.
- [19] 郑艳, 徐璐珊, 王峰涛. 11种药用石斛根的形态组织学研究[J]. *中草药*, 2005, 36(11): 1700–1703.
- Zhen Y, Xu LS, Wang ZT. Morphology and histology of eleven medicinal plant roots of *Dendrobium* Sw. [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2005, 36(11): 1700–1703.
- [20] 钱鑫, 李全健, 连静静, 王彩霞, 田敏. 珍稀植物扇脉杓兰营养器官的解剖学研究[J]. *植物研究*, 2013, 33(5): 540–545.
- Qian X, Li QJ, Lian JJ, Wang CX, Tian M. Vegetative anatomy of the rare plant *Cypripedium japonicum* Thunb. [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2013, 33(5): 540–545.
- [21] 李柏年, 高金城. 大花杓兰根结构的扫描电镜研究[J]. *甘肃科学学报*, 1993, 5(2): 64–67.
- Li BN, Gao JC. The root structure of *Cypripedium macranthos* SW. observed by the scanning electron microscopy [J]. *Journal of Gansu Sciences*, 1993, 5(2): 64–67.
- [22] 王长宝, 徐增奇, 王鹤, 唐番. 濒危植物大花杓兰(*Cypripedium macranthos* SW.)地下器官的形态解剖学研究[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2015, 47(3): 111–115.
- Wang CB, Xu ZQ, Wang H, Tang F. Morphological and anatomical study on underground organs of endangered plant *Cypripedium macranthos* SW. [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, 47(3): 111–115.
- [23] 侯晓强, 郭顺星. 20种石斛属植物根解剖结构特征与种间分类研究[J]. *中国药理学杂志*, 2014, 49(21): 1885–1888.
- Hou XQ, Guo SX. Anatomical structures and taxonomic features of roots of twenty *Dendrobium* species [J]. *Chin Pharm J*, 2014, 49(21): 1885–1888.
- [24] 张金玲, 李玉灵, 庞梦丽, 朱辰光, 毕志乐. 臭柏异形叶解剖结构及其抗旱性的比较[J]. *西北植物学报*, 2017, 37(9): 1756–1763.
- Zhang JL, Li YL, Pang ML, Zhu CG, Bi ZL. Comparison of drought resistance of anatomical structure in the heterophylly mechanism of *Sabina vulgaris* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(9): 1756–1763.
- [25] 邵财, 刘继永, 张浩, 王振兴. 吉林延龄草营养器官解剖结构和光合生理特性对环境适应性研究[J]. *东北农业大学*



学报, 2015, 46(5): 32–37.

Shao C, Liu JY, Zhang H, Wang ZX. Study on environment adaptation of vegetative organs anatomical structure and photosynthetic physiological characteristic of *Trillium kamtschaticum* Pall. ex Pursh [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(5): 32–37.

[26] 张泽宏, 吴小霞. 5 种蕨类植物叶片解剖结构及其对阴生环境的适应性研究 [J]. 华中师范大学学报 (自然科学版), 2013, 47(6): 840–843.

Zhang HY, Wu XX. Study on the anatomy structure of five species of fern leaves and its adaptability to sciophyte environment [J]. *Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences)*, 2013, 47(6): 840–843.

[27] 袁王俊, 张维瑞, 尚富德. 黄连营养器官解剖结构与其阴生环境相关性研究 [J]. 河南大学学报 (自然科学版), 2007, 37(2): 184–186.

Yuan WJ, Zhang WR, Shang DF. Study on the anatomical structure of vegetative organs of *Coptis chinensis* and its pertinence to sciophyte conditions [J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2007, 37(2): 184–186.

[28] 刘穆. 种子植物形态解剖学导论 [M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2010: 67–85.

[29] Riederer M, Schneider G. The effect of the environment on the permeability and composition of *Citrus* leaf cuticles; II. Composition of soluble cuticular lipids and correlation with transport properties [J]. *Planta*, 1990, 180: 154–165.

图版说明

图版 I：无距虾脊兰叶的解剖结构。1. 叶片横切面，示大叶脉结构；2~3. 叶片横切面，示小叶脉结构；4. 叶片横切面，示小叶脉管胞；5. 叶片横切面，示表皮毛；6. 叶片横切面，示气孔器；7. 叶片横切面，示晶体；8. 叶片横切面，示气腔；9. 叶上表皮；10~11. 叶下表皮。

图版 II：无距虾脊兰根和假鳞茎解剖结构。1. 根尖纵切，示根尖结构；2. 根尖纵切，示根尖中晶体；3. 根横切，示根被、皮层和中柱；4. 根横切，示淀粉粒、菌丝和根毛；5. 根横切，示外皮层和晶体；6. 根横切，示中柱结构；7. 假鳞茎纵切，示基本组织和散生维管束；8. 假鳞茎横切，示表皮和角质层；9. 假鳞茎纵切，示晶体；10. 假鳞茎横切，示维管束结构；11~12. 假鳞茎纵切，示导管类型；13. 根横切，示菌丝侵染方式。

SC. 厚壁组织；PH. 韧皮部；X. 木质部；AE. 上表皮；CU. 角质层；CH. 叶绿体；T. 管胞；EH. 表皮毛；STO. 气孔；C. 晶体；AC. 气腔；VE. 根被；S. 中柱；COR. 皮层；RH. 根毛；H. 菌丝；SG. 淀粉粒；EX. 外皮层；P. 髓；PE. 中柱鞘；PC. 通道细胞；ED. 内皮层；VB. 维管束；FT. 基本组织；EP. 表皮；VBS. 维管束鞘；CC. 伴胞；ST. 筛管；XP. 木薄壁细胞；VS. 导管。

Explanation of plates

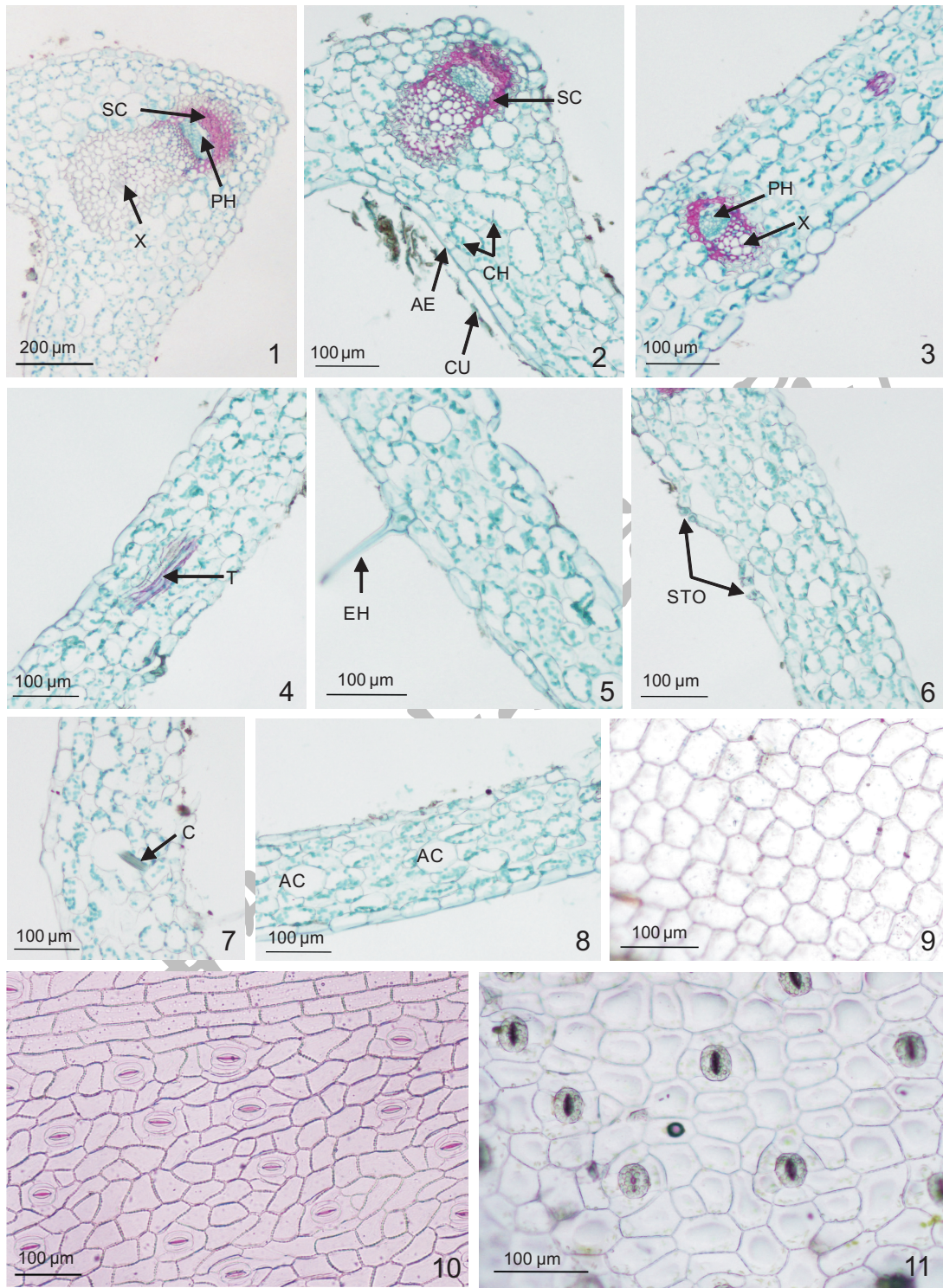
Plate I : Anatomical structures of *Calanthe tsoongiana* leaf. 1. Transverse section of leaf showing structure of large vein; 2–3. Transverse section of leaf showing structure of small vein; 4. Transverse section of leaf showing tracheid of small vein; 5. Transverse section of leaf showing epidermal hair; 6. Transverse section of leaf showing stomatal apparatus; 7. Transverse section of leaf showing crystal; 8. Transverse section of leaf showing air cavity; 9. Leaf upper epidermis; 10–11. Leaf lower epidermis.

Plate II : Anatomical structures of *Calanthe tsoongiana* root and pseudobulb. 1. Longitudinal section of root tip showing structure of root tip; 2. Longitudinal section of root tip showing crystal contained in root tip; 3. Transverse section of root showing velamina, cortex, and stele; 4. Transverse section of root showing starch grain, hypha, and root hair; 5. Transverse section of root showing exodermis and crystal; 6. Transverse section of root showing structure of stele; 7. Longitudinal section of pseudobulb showing fundamental tissue and scattered vascular bundles; 8. Transverse section of pseudobulb showing epidermis and cuticle; 9. Longitudinal section of pseudobulb showing crystal; 10. Transverse section of pseudobulb showing structure of vascular bundle; 11–12. Longitudinal section of pseudobulb showing type of vessel; 13. Transverse section of root showing infection pathway of hypha.

SC. Sclerenchyma; PH. Phloem; X. Xylem; AE. Adaxial epidermis; CU. Cuticle; CH. Chloroplast; T. Tracheid; EH. Epidermal hair; STO. Stoma; C. Crystal; AC. Air cavity; VE. Velamina; S. Stele; COR. Cortex; RH. Root hair; H. Hypha; SG. Starch grain; EX. Exodermis; P. Pith; PE. Pericycle; PC. Passage cell; ED. Endodermis; VB. Vascular bundle; FT. Fundamental tissue; EP. Epidermis; VBS. Vascular bundle sheath; CC. Companion cell; ST. Sieve tube; XP. Xylem parenchyma; VS. Vessel.

蒋雅婷等：图版 I

Jiang Ya-Ting *et al.*: Plate I

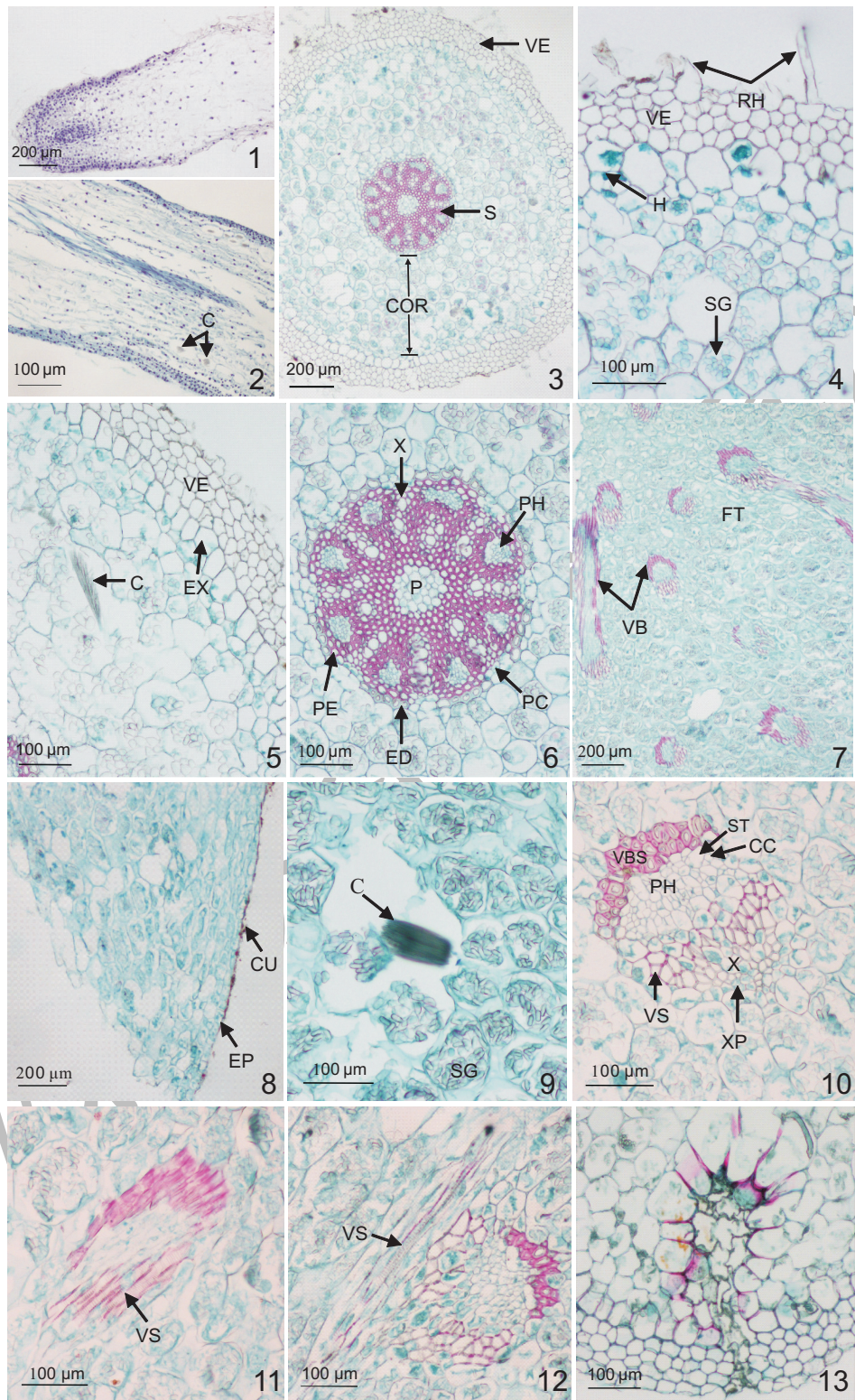


See explanation at the end of text



蒋雅婷等：图版 II

Jiang Ya-Ting *et al.*: Plate II



See explanation at the end of text