

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2016.20182

赵芸玉, 夏晓飞, 熊彪, 祖奎玲, 赵良成. 臭椿不同发育阶段叶片表面结构特征[J]. 植物科学学报, 2016, 34(2): 182~190

Zhao YY, Xia XF, Xiong B, Zu KL, Zhao LC. Leaf epidermal features of *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle in different development stages [J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(2): 182~190

## 臭椿不同发育阶段叶片表面结构特征

赵芸玉<sup>1</sup>, 夏晓飞<sup>3</sup>, 熊彪<sup>2</sup>, 祖奎玲<sup>2</sup>, 赵良成<sup>2\*</sup>(1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083;  
3. 北京自然博物馆, 北京 100050)

**摘要:** 利用光学显微镜和扫描电子显微镜技术, 对臭椿(*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle)叶片从叶芽到成熟叶4个发育阶段(叶芽、幼叶、近成熟叶和成熟叶)的4种叶表面结构(表皮毛、气孔器、角质层、腺体)进行了详细地观察和比较。结果显示: 叶片上、下表面具单细胞非腺毛和头状腺毛两种表皮毛, 其密度在叶芽阶段最大, 之后随着叶片的生长和展开表皮毛密度逐渐降低; 气孔器主要分布于下表面, 叶片近成熟时气孔器密度最大; 角质层具有条纹状结构, 其隆起程度在近成熟叶阶段达到最大; 叶片基部两侧具锯齿状突起, 每个突起上有一个腺体, 腺体发育成熟后可分泌透明黏液。说明叶片表面各结构特征是臭椿对环境长期适应的结果。

**关键词:** 臭椿; 叶表面结构; 发育

中图分类号: Q944.56

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2016)02-0182-09

## Leaf Epidermal Features of *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle in Different Development Stages

ZHAO Yun-Yu<sup>1</sup>, XIA Xiao-Fei<sup>3</sup>, XIONG Biao<sup>2</sup>, ZU Kui-Ling<sup>2</sup>, ZHAO Liang-Cheng<sup>2\*</sup>(1. College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;  
2. College of Nature Reservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;  
3. Beijing Museum of Nature History, Beijing 100050, China)

**Abstract:** The leaf epidermal features of *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, including epidermal hairs, stomatal apparatus, cuticles and glands, were examined at different development stages (leaf bud, young, near-mature and mature leaf) under light microscopy (LM) and scanning electron microscopy (SEM). We observed two kinds of epidermal hairs on both sides of the leaf, that is, single-celled non-glandular hairs and capitate glandular hairs. Hair densities were greatest in the leaf bud, then decreased gradually with leaf development. The stomatal apparatus was mostly found on the lower leaf epidermis, and stomatal density was greatest in the near-mature leaf. The leaf epidermis was covered with striated cuticles, which showed maximum swelling degree in the near-mature leaf. Leaves had serrated protuberances on the leaf basal part. Each protuberance had one gland, which produced transparent mucus when mature. The epidermal features of *A. altissima* leaves reflect their adaptation to environments during long-term evolution.

**Key words:** *Ailanthus altissima*; Leaf epidermal structure; Development

收稿日期: 2015-11-12, 退修日期: 2015-12-12。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31370213); 北京市自然科学基金资助项目(5133036); 北京市园林绿化局项目(CEG-2015-01)。

This work was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (31370213), Beijing Natural Science Foundation (5133036) and Beijing Municipal Bureau of Landscape and Forestry (CEG-2015-01).

作者简介: 赵芸玉(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为植物生长发育与系统进化(E-mail: zhaoyunyu19@163.com)。

\* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: lc Zhao@bjfu.edu.cn)。

臭椿(*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle)隶属于苦木科(Simaroubaceae)臭椿属,曾用名樗,又名椿树和木樗树,因其能挥发出刺鼻的特殊气味而得名。臭椿为落叶乔木,树干通直高大、枝叶繁茂,生长迅速,抗性强,病虫害少,是一种优良的用材、绿化、水土保持和造林树种<sup>[1]</sup>。臭椿在中国分布广泛,是重要的乡土树种,在世界各地也广为栽培,常被称为天堂之树(tree-of-heaven)。

近年来,国内外对臭椿开展了很多研究,主要涉及形态学、生理学、植物化学及繁育技术等方面,特别是其化学成分及药用价值方面有大量的研究报道。臭椿叶、枝和树皮的主要成分为黄酮和苦木苦味素类物质,其次为甾醇类、萜类等化合物,具有清热解毒、消炎、抗疟疾等作用,有很高的药用价值<sup>[2-4]</sup>。此外,臭椿叶与树皮的提取物还有杀菌、除虫等功效<sup>[2]</sup>。在臭椿结构发育和解剖学方面,目前的报道较少,主要是关于其分泌道的研究。徐青和王俊<sup>[5]</sup>对臭椿初生结构中的分泌道进行了发育、结构及分布规律的研究,史宏勇等<sup>[6]</sup>对臭椿茎中分泌道的结构进行了发育及其组织化学的研究。臭椿的叶片结构较为独特,不仅基部具有独特的腺体,叶表面也有腺毛<sup>[7]</sup>等其他附属结构,但有关臭椿叶片表面结构特征的研究目前还未见详细报道。

我们利用光学显微镜和扫描电子显微镜技术,对臭椿叶片表面4种结构(表皮毛、气孔器、角质层、腺体)分阶段进行了详细地观察研究,以期揭示这些结构的形态和发育特征及其在不同发育阶段的变化规律,为进一步研究臭椿叶结构、探讨其生理生态学功能以及开展臭椿叶片黏液分泌规律及化学物质合成等研究提供新的资料和证据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

叶片采自北京林业大学校园内成年(胸径33.10 cm)栽培臭椿(*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle)。于3月至9月分4个不同发育阶段采集同一株臭椿树同一高度、同一朝向的叶片,分别用FAA固定液和戊二醛固定液进行固定。4个发育阶段为叶芽、幼叶、近成熟叶和成熟叶,包括了臭椿叶片从叶芽尚未展开到叶片不再变大、完全成熟的整个过程。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 光学显微镜解剖观察

选取4个不同发育阶段的新鲜叶片,在体视显微镜Olympus SZX16下,观察叶片上表面(近轴面)和下表面(远轴面)结构的形态特征及其变化,记录并通过与体视镜相连的Olympus DP72拍照。

### 1.2.2 石蜡切片观察

取FAA固定液中固定24 h以上的4个不同发育阶段的叶片,通过真空抽气、梯度酒精脱水、二甲苯透明、浸蜡、包埋、修块、Leica RM2126RT切片机切片(切片厚度6~8 μm)、粘片、展片、脱蜡、甲苯胺蓝O染色、中性树胶封片,置于Olympus BX51光学显微镜下观察并照相。

### 1.2.3 扫描电子显微镜观察

取出戊二醛固定液中固定约8 h的4个不同发育阶段的叶片,经磷酸缓冲液清洗3遍、再经叔丁醇I、II、III、IV梯度脱水,于4℃冰箱中放置12 h(置于100%叔丁醇中),然后用Hitachi E-2030冷冻干燥仪冷冻干燥、粘样,Hitachi E-1010离子溅射仪喷金,最后于Hitachi S-3400扫描电子显微镜下观察并照相。

## 2 观察结果

本研究按臭椿叶片4个不同发育阶段观察了叶表面的4种结构,即:表皮毛、气孔器、角质层和叶基部腺体,并对腺体进行了重点观察。

### 2.1 叶片性状统计及方差分析

将臭椿4个不同发育阶段的叶片进行性状统计和方差分析,结果显示,复叶长度、小叶长度、小叶宽度和小叶片柄长度之间均差异显著( $P < 0.01$ ,表1)。

### 2.2 表皮毛

臭椿叶片表皮毛分为非腺毛(无分泌细胞)和腺毛(有分泌细胞)(图版I: 1、2)两种类型。各发育阶段叶片的上表面和下表面均有非腺毛和腺毛着生,表皮毛的密度在不同发育阶段有所不同。

#### 2.2.1 非腺毛

非腺毛为单细胞表皮毛(图版I: 3),细胞基部较宽,顶部呈尖形,丝状或近柱状,其长度差异较大,在50~900 μm之间。

叶芽阶段:叶芽内,小叶未完全分化时已有非腺毛发生。该阶段非腺毛分布密集;在较大的叶芽

表1 叶片不同发育阶段的性状统计及方差分析  
Table 1 Leaf character and variance analysis at different development stages

发育阶段 Development stages of leaf	复叶长度 Length of compound leaf (mm)	小叶长度 Length of leaflet (mm)	小叶宽度 Width of leaflet (mm)	小叶叶柄长度 Length of petiolules (mm)
叶芽 Leaf bud	4.17 ± 0.30	-	-	-
幼叶 Young leaf	181.80 ± 11.44	47.59 ± 1.60	17.28 ± 1.13	2.68 ± 0.06
近成熟叶 Near-mature leaf	293.04 ± 14.37	90.70 ± 3.90	36.91 ± 2.25	7.45 ± 0.84
成熟叶 Mature leaf	651.14 ± 18.58	143.43 ± 3.41	62.68 ± 2.08	14.10 ± 1.01
F值 F value	436.57 **	234.94 **	146.07 **	57.10 **

注: \*\* 表示在 0.01 水平差异显著。

Note: \*\* significant difference at the 0.01 level.

内, 复叶几乎完全被非腺毛覆盖, 非腺毛的长度在 50 ~ 900 μm 之间, 大部分为 300 ~ 600 μm(图版 I : 7、8)。

幼叶阶段: 小叶片已完全展开, 此时小叶的非腺毛密度低于叶芽阶段, 非腺毛主要沿各级叶脉分布, 长度约 50 ~ 400 μm(图版 I : 9、10)。

近成熟叶阶段: 非腺毛随着叶片的伸展发育而逐渐脱落, 密度逐渐降低, 与幼叶阶段相同, 非腺毛主要分布于叶脉处, 长度在 50 ~ 400 μm 之间(图版 I : 11、12)。

成熟叶阶段: 成熟叶片上、下表面的非腺毛大多数脱落, 非腺毛长度与近成熟叶阶段变化不大(图版 I : 13、14)。

## 2.2.2 腺毛

腺毛为头状腺毛, 成熟头状腺毛包括基细胞、柄细胞和头部。头部呈不光滑圆球型, 由多个分泌细胞辐射状排列组成, 成熟腺毛的头部直径为 65.07 ± 7.29 μm(图版 I : 4、5)。

叶芽阶段: 与非腺毛一样, 叶芽内小叶尚未完全分化时已有腺毛发生。此阶段复叶的上、下表面腺毛分布密集(图版 I : 7、8), 且随叶芽发育和小叶的分化, 头状腺毛逐渐长大, 由无色透明逐渐变为粉红色至深红色(图版 I : 1)。

幼叶阶段: 腺毛主要沿各级叶脉分布, 在幼叶上能观察到不同发育程度(不同大小、不同颜色)的腺毛。小叶上表面的腺毛密度高于下表面(图版 I : 9、10)。

近成熟叶阶段: 头状腺毛随叶片生长而逐渐发育为深红色(图版 I : 2), 且头部出现皱缩、干瘪现象, 部分脱落(图版 I : 11、12), 可观察到腺毛头部脱落后的柄部(图版 I : 6)。

成熟叶阶段: 头状腺毛更加稀疏, 数量比近成

熟叶阶段更少, 且未观察到新腺毛的发生(图版 I : 13、14)。

## 2.3 气孔器

臭椿叶片的下表面密布气孔器, 上表面气孔器仅见于叶脉、腺体与叶尖周围。气孔器由两个肾形保卫细胞和气孔组成, 没有副卫细胞, 为无规则型(图版 I : 15 ~ 18)。

在形态上, 叶片各发育阶段气孔器皆呈椭圆形, 长轴长度明显大于短轴。叶芽、幼叶阶段气孔器相对于表皮略凸起(图版 I : 15、16); 而近成熟、成熟叶表皮角质层隆起结构围绕着气孔, 致使部分气孔器略有下陷(图版 I : 17、18)。气孔器密度在叶片近成熟阶段达到最大。叶片各发育阶段气孔器的大小及密度见表 2。

表2 叶片不同发育阶段气孔器的大小及密度

Table 2 Stomatal apparatus size and density of leaves at different development stages

发育阶段 Development stages of leaf	气孔器特征 Stomatal apparatus features	
	气孔器长轴长 Length of major axis (μm)	气孔器密度 Density of stomatal apparatus on lower leaf epidermis (个/mm <sup>2</sup> )
叶芽 Leaf bud	16.37 ± 1.31	-
幼叶 Young leaf	18.42 ± 0.83	86.70 ± 8.18
近成熟叶 Near-mature leaf	18.62 ± 1.09	370.48 ± 20.61
成熟叶 Mature leaf	25.98 ± 0.89	209.74 ± 14.29

## 2.4 角质层

臭椿叶片的表皮细胞为近正方形或多边形, 排列紧密。叶芽阶段, 叶片上表面、下表面的表皮细胞外壁都近光滑(图版 II : 19、20), 但从幼叶开始, 叶片表面每个表皮细胞的外壁都有不同程度加厚, 呈条状隆起, 形成条纹状角质层(striated cuticle)(图版 II : 21、22), 至近成熟叶阶段, 条

纹隆起程度达到最大(图版Ⅱ: 23、24)。成熟叶阶段, 因叶面积显著增长, 角质层隆起程度略微下降(图版Ⅱ: 25、26)。4个发育阶段叶片的下表面角质层隆起程度皆大于上表面, 部分隆起以气孔为中心呈放射状向四周分布(图版Ⅰ: 18)。

## 2.5 腺体

臭椿叶片两侧基部具有锯齿状突起, 每个突起边缘有一个扁圆形腺体, 腺体数目多为2~4个, 有时可达6~9个, 偶尔可达十几个。腺体位于侧脉末端, 由分泌孔、分泌组织及与其相连的维管组织、薄壁组织等组成, 周围有完整的表皮细胞。在叶芽阶段腺体已发育成型, 之后随着叶片的生长腺体继续发育成熟, 成熟腺体可分泌透明黏液(图版Ⅱ: 31)。

叶芽阶段: 可观察到腺体颜色较透明, 分泌孔处泛红(图版Ⅱ: 27)。切片显示, 小叶未分化完全时叶缘有明显的扩张区域, 由分生组织和原表皮细胞组成。此阶段的细胞排列紧密, 细胞质浓厚, 细胞核大而明显, 并伴随着强烈的细胞分裂、分化(图版Ⅱ: 32)。随着小叶的发育, 腺体逐渐发育成型, 分泌孔的朝向和与之相连的大侧脉末端朝向相同(图版Ⅲ: 33)。

幼叶阶段: 小叶展开, 腺体逐渐变为深绿色, 分泌孔逐渐朝向小叶下表面(图版Ⅱ: 28)。切片观察可见, 腺体区域逐渐扩大, 近下表皮的细胞逐渐特化成柱状分泌细胞(甲苯胺蓝染色成绿色), 形成圆周式隆起, 中间为近圆形不规则凹陷的分泌孔, 近上表皮处分化出栅栏组织(图版Ⅲ: 34)。

近成熟叶阶段: 此阶段分泌孔朝向小叶下表面, 和与之相连的大侧脉几乎成90度。分泌孔颜色逐渐变深, 为红褐色(图版Ⅱ: 29)。随分裂、分化的继续进行, 靠近绿色柱状分泌细胞的周围出现含晶体的细胞, 临近上表皮部位分化出具有大型液泡的多边形薄壁细胞(图版Ⅲ: 35)。腺体逐渐发育成熟。横切面观察可见, 有一至多个侧脉末端伸入腺体(图版Ⅲ: 36)。

成熟叶阶段: 腺体和分泌孔内凹处的颜色随叶的整体颜色加深而变深(图版Ⅱ: 30)。此时腺体体积继续增大, 直径约0.8~1.2 mm, 但形状变化不大, 切片显示其显微结构也无大的变化(图版Ⅲ: 37)。

## 3 讨论

植物在长期进化过程中逐渐形成了与其生长环境相适应的形态特征、解剖结构和生理习性。叶片是植物光合作用的重要器官, 与外界直接接触, 受环境因子的影响较大<sup>[8]</sup>。臭椿叶片表面各结构特征是其对环境长期适应的结果。

臭椿叶片的上、下表面均具表皮毛, 分为非腺毛和腺毛两种。非腺毛为普通的单细胞表皮毛, 不具分泌功能。非腺毛在叶芽阶段密度最大, 排列紧密, 且相互交叠, 几乎覆盖整个复叶表面, 可以有效抵抗寒冷和保持温度, 有利于叶芽越冬。随着叶片的发育、成熟, 非腺毛逐渐脱落、密度逐渐降低, 可减少对光的反射, 有利于成熟叶片进行光合作用。据报道, 很多树种的叶片也具有类似的表皮毛特征和功能, 如中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)<sup>[9]</sup>、翅果油树(*Elaeagnus mollis* Diels)<sup>[10]</sup>、伯乐树(*Bretschneidera sinensis* Hemsl.)<sup>[11]</sup>等。

腺毛是植物分泌和积累次生代谢产物的重要器官之一, 其分泌物中所含的化学成分通常与植物的自我防御相关, 可保护其免受食草动物的啃食、病毒和微生物的攻击以及紫外线的损伤等<sup>[12-14]</sup>。臭椿叶片上的腺毛在叶芽内就开始发育, 为头状腺毛, 头部由多个分泌细胞组成。叶片上、下表面均有腺毛分布, 在幼叶时分布密集, 随着叶片的生长发育腺毛逐渐成熟并干瘪、脱落。对臭椿叶片挥发性物质的提取与分析结果表明, 其多种成分具有解毒、抑菌、杀虫等作用<sup>[15]</sup>。在生产实践上, 臭椿叶的提取液对许多种类的害虫具有驱避、毒杀、抑制等作用。臭椿叶片上分布的腺毛可能与这些重要化学成分的分泌、挥发相关。这些腺毛主要在叶片幼嫩时期发生、发育, 推测其对臭椿幼嫩叶片能起到良好的保护作用。

植物叶片的气孔密度与光照强度密切相关。一般情况下, 阴生植物气孔密度低于100个/mm<sup>2</sup>, 阳生植物为100~200个/mm<sup>2</sup><sup>[16]</sup>。臭椿叶片气孔主要分布于下表面, 在叶芽阶段, 由于表皮毛分布十分密集, 无法精确计算气孔器密度; 幼叶阶段气孔密度较低, 平均为86个/mm<sup>2</sup>; 从幼叶到近成熟叶阶段, 气孔发生、发育迅速, 但叶片面积增长缓慢, 所以气孔密度显著增大, 并且在近成熟叶

阶段达到最大值，为370个/mm<sup>2</sup>；从近成熟叶到成熟叶阶段，叶片面积增长迅速，所以气孔密度有所降低，平均为209个/mm<sup>2</sup>，表明臭椿为喜光性强的阳生树种。

臭椿叶片表皮细胞排列紧密，叶芽表皮细胞外壁近光滑，但从幼叶开始，叶片表面表皮细胞的角质层都有不同程度的条状加厚隆起。植物的角质层可以使植物体免受外界微生物的侵染，抵抗不利的环境因子，如强紫外线照射、机械损伤等<sup>[17-19]</sup>。臭椿叶片加厚隆起的角质层对叶片也能起到类似保护功能。除此之外，叶片角质化程度高，能很好地控制水分蒸腾、减少水分散失<sup>[20]</sup>，通过调控水分的运输来调节暴晒下植物的体表温度<sup>[21]</sup>。臭椿叶片角质层在叶片近成熟时期加厚程度达到最大，而且下表面的隆起程度大于上表面，此阶段正好是下表面气孔密度最大、水分蒸腾最大的时期，因而其可能还具有避免温度过高导致叶片干燥的作用。

臭椿叶片基部具有锯齿状突起，每个突起的背面着生一个腺体，该腺体是臭椿属植物一种特有的分泌结构。腺体在叶芽阶段就已出现，之后随叶片生长腺体继续发育。切片观察可见腺体内有大量的分泌细胞，它们是化学物质合成和黏液分泌非常活跃的场所。随着叶片的生长，腺体也逐渐发育成熟，此时可观察到分泌孔有透明黏性液体流出，这些黏液可能起到一定的化学防御作用，保护叶片免受病虫害、病菌侵染或食草动物的啃食，也可能还具有一些其他功能，这需要对其化学成分作进一步深入研究。

## 参考文献：

- [1] 申洁梅, 刘占朝, 张万钦, 范增伟, 刘国顺. 臭椿研究综述 [J]. 河南林业科技, 2008, 28(4): 27-29.  
Shen JM, Liu ZC, Zhang WX, Fan ZW, Liu GS. Review on *Ailanthus altissima* [J]. *Journal of Henan Forestry Science and Technology*, 2008, 28(4): 27-29.
- [2] Martino LD, Feo VD. Chemistry and biological activities of *Ailanthus altissima* Swingle: a review [J]. *Pharmacogn Rev*, 2008, 2(4): 339-350.
- [3] Mastelic J, Jerkovic I. Free and glycosidically bound volatiles of *Mentha longifolia* growing in Croatia [J]. *Chem Nat Compd*, 2002, 38(6): 561-564.
- [4] Zhou R, Yazdi AS, Menu P, Tschoop J. A role for mitochondria in NLRP3 inflammasome activation [J]. *Nature*, 2011, 469(7329): 221-225.
- [5] 徐青, 王俊. 臭椿初生结构中泌道的发育解剖学研究 [J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 1999, 20(4): 371-373.
- [6] Xu Q, Wang J. Developmental and anatomic studies of the secretory ducts in the primary structure of *Ailanthus altissima* [J]. *Journal of Ningxia University: Natural Science Edition*, 1999, 20(4): 371-373.
- [7] 史宏勇, 周亚福, 郭建胜, 刘文哲. 臭椿茎中分泌道的发育及其组织化学研究 [J]. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1291-1296.  
Shi HY, Zhou YF, Guo JS, Liu WZ. Development and cytochemistry of secretory ducts in *Ailanthus altissima* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, 31(7): 1291-1296.
- [8] Lange BM, Turner GW. Terpenoid biosynthesis in trichomes—current status and future opportunities [J]. *Plant Biotechnol J*, 2013, 11(1): 2-22.  
Lange BM, Turner GW. Terpenoid biosynthesis in trichomes—current status and future opportunities [J]. *Plant Biotechnol J*, 2013, 11(1): 2-22.
- [9] 陈洁, 李玉双, 庞莉莉, 王庆亚. 江苏不同居群狗尾草叶片解剖特征的比较研究 [J]. 植物科学学报, 2015, 33(4): 448-457.  
Chen J, Li YS, Pang LL, Wang QY. Comparative studies on leaf anatomical characteristics of *Setaria viridis* in different populations in Jiangsu [J]. *Plant Science Journal*, 2015, 33(4): 448-457.
- [10] 张吉科, 张小民, 张国伟. 中国沙棘表皮毛的形态分布和类群研究 [J]. 林业科学, 1995, 31(5): 408-413.  
Zhang JK, Zhang XM, Zhang GW. A study on morphology distribution and classification of downiness of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *Sinensis* Rousi [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1995, 31(5): 408-413.
- [11] 曹志勇, 魏学智, 杨瑞林, 卢英梅, 刘子文. 翅果油树叶表皮毛发育的研究 [J]. 植物研究, 2008, 28(6): 663-667.  
Cao ZY, Wei XZ, Yang RL, Lu YM, Liu ZW. The development on leaves' trichomes of *Elaeagnus mollis* Diels [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28(6): 663-667.
- [12] 涂蔷, 吴涛, 赵良成, 刘羽成, 刘仁林, 张志翔. 伯乐树不同发育阶段叶片表面附属结构特征 [J]. 植物分类与资源学报, 2012, 34(3): 248-256.  
Tu Q, Wu T, Zhao LC, Liu YC, Liu RL, Zhang ZX. Features of leaf appendages of *Bretschneidera sinensis* in different development stages [J]. *Plant Diversity and Resources*, 2012, 34(3): 248-256.
- [13] Karban R, Baldwin IT. Induced Responses to Herbivory [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1997: 47-167.
- [14] 员梦梦, 李保印, 刘会超, 周秀梅. 香薷叶表皮腺毛及其分泌黄酮类物质的组织化学研究 [J]. 西北植物学报, 2015, 35(6): 1129-1134.  
Yuan MM, Li BY, Liu HC, Zhou XM. Glandular hairs on the leaf epidermis of *Elsholtzia ciliata* (Thunb.) Hyland and the process of secreting flavonoids by the glandular hairs based on histochemistry method [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2015, 35(6): 1129-1134.
- [15] 彭励, 胡正海. 甘草腺毛的形态发生和组织化学研究 [J]. 分

- 子细胞生物学报, 2008, 40(6) : 395–402.
- Peng L, Hu ZH. Morphogenesis and histochemical investigation of peltate glandular trichomes on *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. leaves [J]. *Journal of Molecular Cell Biology*, 2008, 40(6) : 395–402.
- [15] 李大鹏, 曹逸霞, 陈乃中, 马菲, 于艳雪, 李志红, 陈洪俊. 固相微萃取和同时蒸馏萃取法分析臭椿叶挥发性组分的初步研究 [J]. 植物检疫, 2013, 27(1) : 1–6.
- Li DP, Cao YX, Chen NZ, Ma F, Yu YX, Li ZH, Chen HJ. Studies on volatiles compounds from leaf of *Ailanthus altissima* extracts by simultaneous distillation extractor and solid phase micro-extraction [J]. *Plant Quarantine*, 2013, 27(1) : 1–6.
- [16] 杨世杰. 植物生物学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2010: 105.
- Yang SJ. Plant Biology [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2010: 105.
- [17] Nawrath C. Unraveling the complex network of cuticular structure and function [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2006, 9 (3) : 281–287.
- [18] Jeffree CE. The fine structure of the plant cuticle [M]// Riederer M, Müller C, eds. Plant Reviews: Vol. 23: Biology of the Plant Cuticle. Oxford: Blackwell Publishing, 2007: 11–125.
- [19] Leide J, Hildebrandt U, Vogg G, Riederer M. The positional sterile (ps) mutation affects cuticular transpiration and wax biosynthesis of tomato fruits [J]. *J Plant Physiol*, 2011, 168(9) : 871–877.
- [20] 陈健辉, 缪绅裕, 黄丽宜, 王厚麟. 海桑和无瓣海桑叶片结构的比较研究 [J]. 植物科学学报, 2015, 33(1) : 1–8.
- Chen JH, Miao SY, Huang LY, Wang HL. Comparative study on the leaf structures of *Sonneratia caseolaris* and *S. apetala* [J]. *Plant Science Journal*, 2015, 33(1) : 1–8.
- [21] Heredia-Guerrero JA, de Lara R, Domínguez E, Heredia A, Benavente J, Benítez JJ. Chemical-physical characterization of isolated plant cuticles subjected to low-dose  $\gamma$ -irradiation [J]. *Chem Phys Lipids*, 2012, 165(8) : 803–808.

### 图版说明

**图版 I : 臭椿叶片不同发育阶段的非腺毛、腺毛和气孔特征。** 1. 非腺毛和腺毛的分布 (NGH. 非腺毛; GH. 腺毛)。2. 非腺毛和腺毛。3. 单细胞表皮毛。4、5. 头状腺毛。6. 腺毛头部脱落后的柄部。7. 叶芽阶段叶芽内的复叶。8~14. 非腺毛与腺毛的分布: 8. 叶芽阶段的复叶; 9. 幼叶阶段叶片上表面; 10. 幼叶阶段叶片下表面; 11. 近成熟叶阶段叶片上表面; 12. 近成熟叶阶段叶片下表面; 13. 成熟叶阶段叶片上表面; 14. 成熟叶阶段叶片下表面。15~18. 气孔器: 15. 叶芽; 16. 幼叶; 17. 近成熟叶; 18. 成熟叶。

**图版 II : 臭椿叶片不同发育阶段的角质层和腺体特征。** 19~26. 角质层: 19. 叶芽阶段叶片上表面; 20. 叶芽阶段叶片下表面; 21. 幼叶阶段叶片上表面; 22. 幼叶阶段叶片下表面; 23. 近成熟叶阶段叶片上表面; 24. 近成熟叶阶段叶片下表面; 25. 成熟叶阶段叶片上表面; 26. 成熟叶阶段叶片下表面。27~30. 腺体: 27. 叶芽; 28. 幼叶; 29. 近成熟叶; 30. 成熟叶。31. 腺体分泌透明黏液。32. 腺体结构, 叶芽纵切。

**图版 III : 臭椿叶片不同发育阶段的腺体结构。** 33~37. 腺体结构: 33. 叶芽, 横切; 34. 幼叶, 纵切; 35. 近成熟叶, 纵切 (EC. 表皮细胞; SC. 分泌细胞; Cr. 晶体; SA. 气孔器; PT. 栅栏组织; VB. 维管束; PC. 薄壁细胞); 36. 近成熟叶, 横切; 37. 成熟叶, 纵切。

### Explanation of plate

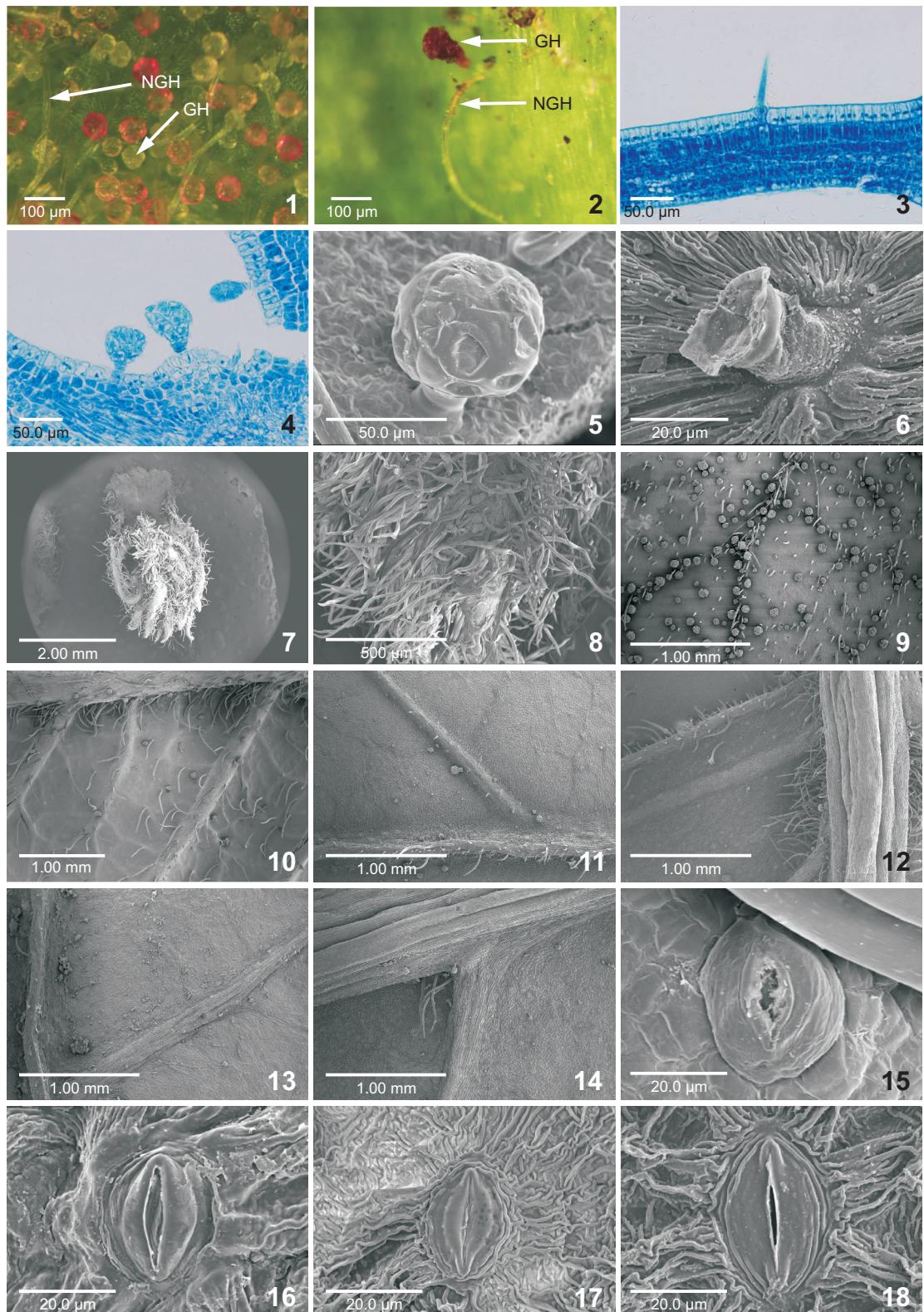
**Plate I : Features of non-glandular hair, glandular hair and stomatal apparatus of the *Ailanthus altissima* leaf at different development stages.** 1. Distribution of non-glandular hairs and glandular hairs (NGH. Non-glandular hair, GH. Glandular hair). 2. Non-glandular hair and glandular hair. 3. Single-celled non-glandular hair. 4, 5. Capitate glandular hair. 6. Remaining stalk cells of glandular hair. 7. Compound leaf in leaf bud. 8~14. Distribution of non-glandular hairs and glandular hairs; 8. Leaf bud; 9. Upper epidermis of young leaf; 10. Lower epidermis of young leaf; 11. Upper epidermis of near-mature leaf; 12. Lower epidermis of near-mature leaf; 13. Upper epidermis of mature leaf; 14. Lower epidermis of mature leaf. 15~18. Stomatal apparatus; 15. Leaf bud; 16. Young leaf; 17. Near-mature leaf; 18. Mature leaf.

**Plate II : Features of cuticles and glands of the *Ailanthus altissima* leaf at different development stages.** 19~26. Cuticle: 19. Upper epidermis of leaf bud; 20. Lower epidermis of leaf bud; 21. Upper epidermis of young leaf; 22. Lower epidermis of young leaf; 23. Upper epidermis of near-mature leaf; 24. Lower epidermis of near-mature leaf; 25. Upper epidermis of mature leaf; 26. Lower epidermis of mature leaf. 27~30. Gland: 27. Leaf bud; 28. Young leaf; 29. Near-mature leaf; 30. Mature leaf. 31. Mucus of gland. 32. Structure of gland, Leaf bud, longitudinal.

**Plate III : Gland structure of the *Ailanthus altissima* leaf at different development stages.** 33~37. Structure of gland: 33. Leaf bud, transverse; 34. Young leaf, longitudinal; 35. Near-mature leaf, longitudinal (EC. Epidermal cell; SC. Secretory cell; Cr. Crystal; SA. Stomatal apparatus; PT. Palisade tissue; VB. Vascular bundle; PC. Parenchyma cell); 36. Near-mature leaf, transverse; 37. Mature leaf, longitudinal.

赵芸玉等: 图版 I

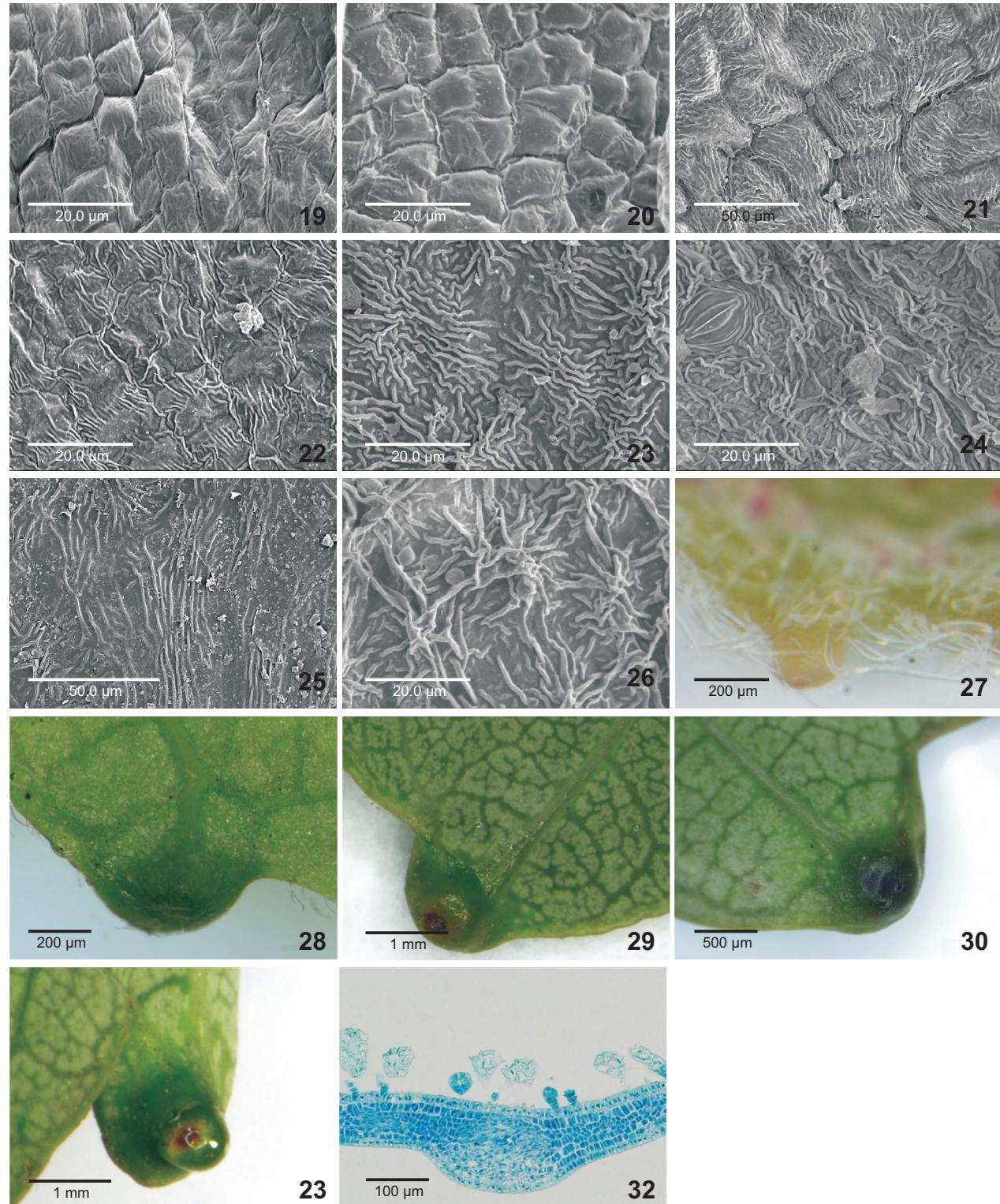
Zhao Yun-Yu et al.: Plate I



See explanation at the end of text

赵芸玉等：图版Ⅱ

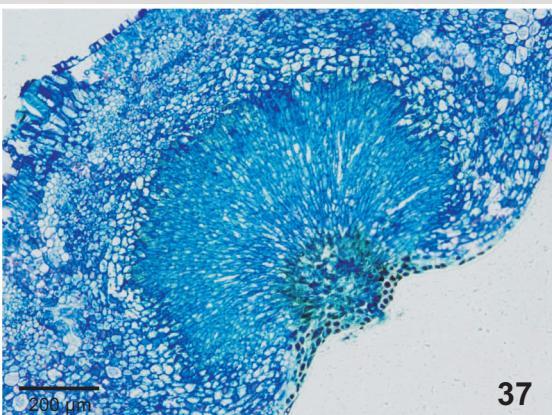
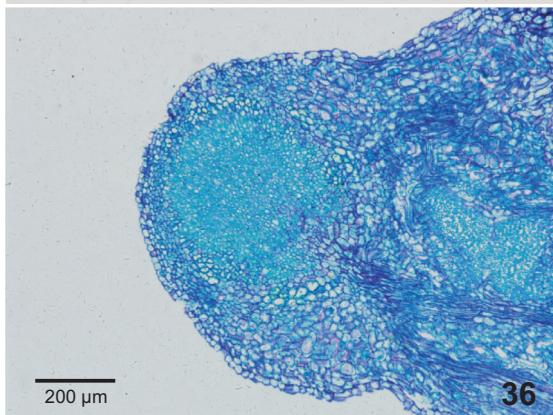
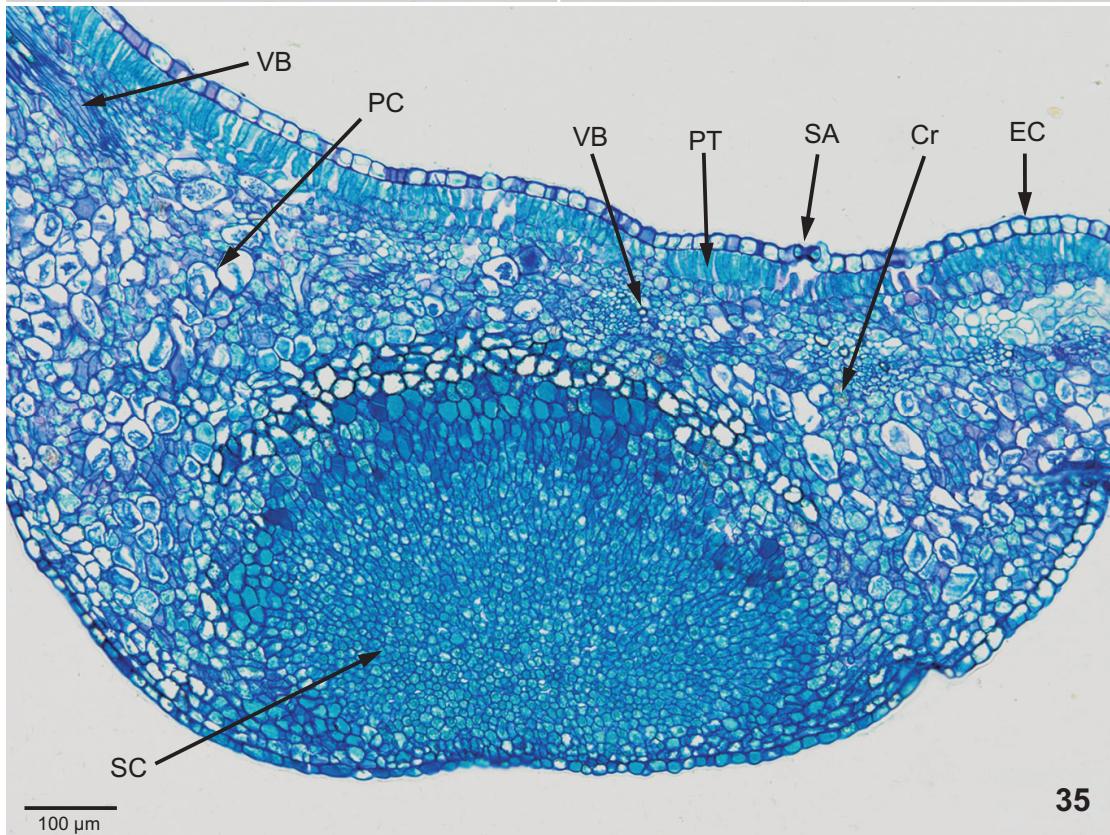
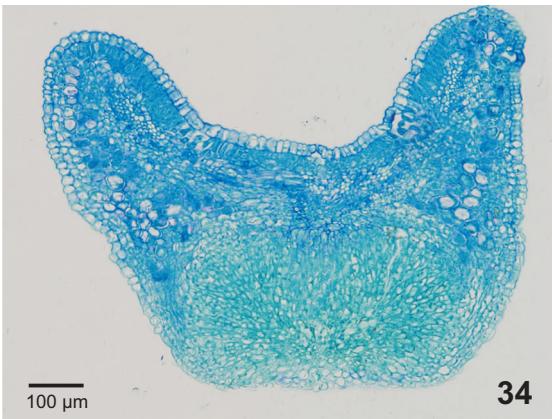
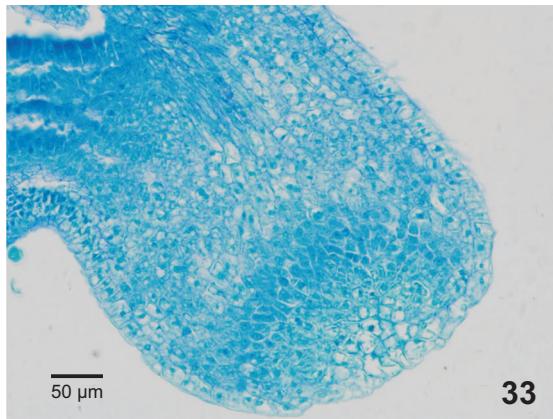
Zhao Yun-Yu et al.: Plate Ⅱ



See explanation at the end of text

赵芸玉等: 图版III

Zhao Yun-Yu et al.: Plate III



See explanation at the end of text

(责任编辑:张平)