

植物硅酸体研究及应用

国家自然科学基金资助项目

王永吉 吕厚远 著

海洋出版社

1993年·北京

第一章 绪 论

第一节 植物硅酸体的一些基本概念

植物硅酸体研究是一门新兴的边缘学科,是研究高等植物细胞中发育的硅质颗粒的学科。在英文中称为:Phytolith, Plant opal, Opal phytolith, Grass opal, Biogenic opaline silica, Silica body 等。日文中称为植物硅酸体。

植物体内的硅是通过根系从土壤中吸收,经维管束传送,在细胞内腔或细胞之间以水合硅($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)的形式出现,在植物体内形成难溶的硅酸形态,这就是植物硅酸体。以这种形式存在的硅,占植物体硅总量的 90% 以上。

Simpson 和 Volcani(1981)认为:植物硅酸体是指“维管束植物含有的各种形态、各种大小的硅体,而不包括海棉类、硅藻类、放射虫类及类似物种中的硅”。近藤 鍊三(1986)认为:“植物硅酸体是指在苔藓植物门、维管束植物门等高等植物细胞组织中充填的非晶质含水硅酸($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)。因此,单细胞藻类、低等植物细胞膜中的含水硅质体,不能称植物硅酸体,而放射虫、海绵、硅藻等动物体内非晶质含水硅质体也不能称“硅酸体。”

不同土壤性质直接影响植物中硅的含量。在土壤溶液中的硅是以单硅酸(H_4SiO_4)形式存在。因此,植物体中硅含量与土壤中单硅酸浓度呈正相关。而土壤中单硅酸含量又受很多因素影响,如 pH 值及某些元素的赋存量。在植物灰分中,硅的含量一般变化在 3.1% ~ 80.2% (SiO_2),并与 K, Ca, P 等元素呈负相关。

土壤中植物硅酸体(植物体死亡后遗留下来)含量差别较大。据 D. M. Hart(1988)计算,澳大利亚南威尔士一块 7500m² 的沼泽地里,被 2250m² 的 *Gahnia sieberana* 的植物所覆盖,每年产出 19kg 的植物硅酸体。近藤 鍊三(1988)做了日本土壤硅酸含量分析,禾本科草原每年每公顷生产 100~850kg 硅酸体;针叶树林为 4~15kg 硅酸体;阔叶树林为 10~160kg 硅酸体。

目前还没有定性的理论说明哪种土壤最有可能含有最多或最少的植物硅酸体。这除了与植物的生产量有关外,如前所述还与土壤环境要素有关。据记载,植物硅酸体在需氧和厌氧的土壤中均很稳定。土壤 pH 值在 3.5~9.8 之间,硅酸体能完整的保留下来(Bartoli and wilding, 1980; Powers, 1987)。Jones 和 Handreck(1967)记录了土壤 pH 值在 9 以上时的植物硅酸体的溶解情况,在 pH>9 的情况下, pH 值越高硅酸体溶解度也越高。Bartoli 和 Wilding(1980)还在实验室里做过实验:将置于热蒸馏水中(90℃)几小时的硅酸体同放入冷蒸馏水中 30 天的植物硅酸体进行比较,得到了一些有关植物硅酸体溶解速度的记录。实验表明,温度对硅酸体的溶解将起着重要作用。

植物硅酸体的形状,依赖于原来植物细胞的形状和细胞之间的空隙。禾本科的表皮细胞是由短细胞、长细胞、机动细胞、毛状细胞等组成。短细胞硅酸体在植物发育过程中的作

用,目前还仅仅是推论。但是,它们在植物生长初期就已经形成了,常常可作为分类的指标,如亚铃状、帽状、星状、长鞍状、短鞍状等等。长细胞中发育的是各种形状的棒状硅酸体。初步认为,它在植物中起支撑作用。机动细胞除了帮助叶伸展外,还可能具有防止水份蒸发作用。它们常常排列于叶脉之间,呈大小不同、形状不完全相似的扇形或方形,不同属种常有一定差别。毛状细胞也是一种大型细胞,形成如高尔夫棒状、长颈瓶状、管状、腕骨状等等形态的硅酸体。它们在植物发育中的功能还不十分清楚。

除叶以外的植物体其它部分,硅酸体含量相对较少,研究得也不够充分。

部分针叶树叶部和草本中的机动细胞和长细胞硅酸体有十分相似之处。常呈不规则的多面体形。黄杉的星状厚膜状硅酸体和其它硅酸体有明显区别。阔叶树中如山毛榉科、木兰科维管束细胞硅化后呈Y字形或L形。榆科、桑科、忍冬科等表皮细胞中,有中空的犀牛角状硅酸体。许多阔叶树硅酸体发育有4~5角板状多边形。樟科则是球状、多边形的板状,它们在古老的土壤中难以保存下来。棕榈科叶部表皮细胞中,则以金米糖状硅酸体为特点,由细颗粒“堆砌”而成。莎草科的叶部表皮细胞中,则有由颗粒状突起物排列成扁状形,Menra 和 Sharma 命名为莎草科型。蕨类植物中的木贼、石松等硅含量很高,但大部份是难以鉴定的碎片,但其中棒状硅酸体断面呈三角形。

目前,国外学者做过植物硅酸体研究的植物种属还没有一个准确的数字。据 G. Scurfield(1974)提供的资料,Amos 研究了 32 个科的植物硅酸体;而 Chattaway 研究了 64 个科的植物硅酸体。

植物硅酸体研究所涉及内容较为广泛,土壤学家、植物学家、地质学家、考古学家等从不同角度和需要对植物硅酸体进行了研究,概括起来,可分为基础研究与应用研究两方面,据 D. Bowdery(1989)和近藤 鍊三(1986)的资料,可综合如下:

基础研究

形态分类研究

生理作用研究

理化性质研究

其它(如统计方法、原生与次生沉积、表土硅酸体分析等)

应用研究

植物学

某些植物的分类基础

植物群落的构成

植物群落的生产力

动物学

野生动物的食性和摄食量

动物的驯化过程

农业

栽培植物的传播路线

作物体系变迁

作物与光合作用的关系

森林及草原火史迹象

牧草成份比例的估算

土壤

植被对土壤发育的影响

腐植层的成因

腐植层积年数的推测

腐植层年代的推测

古土壤层序的判别

古施肥量的推测

地质学

古植被、古环境的恢复

古动物食性鉴定

地层的确认

考古学

土器产地的确认

农作物起源

农耕期开始的推测

古人类生活方式与生活环境的推测

其它

药类鉴定

疾病(如食道癌)原因的推测

罪犯证据的寻找

把植物硅酸体正式的应用在地质学特别是第四纪地质学,时间不长。尽管它仍然存在许多问题有待深入研究,地质学家们仍然利用它在恢复古环境、地层时代的确认等方面进行了尝试,特别是在不含其它化石情况下。目前,国外在古土壤、沼泽沉积、黄土、冰碛物、尘土、火山灰、泥炭、湖泊沉积、海洋沉积等,都做过硅酸体的分析工作。利用硅酸体中所含微量碳做 ^{14}C 测年(Wilding, 1967);对硅酸体进行电子自旋共振(ESR)测年(Ikeya and Golson, 1985)和热发光测年(Rowlette and Pearsall, 1988)等都取得了可信的年代学数据。

植物硅酸体存在最老的地层是澳大利亚犹他州的 Horth Horn 和 Flagstaff 岩层古新世沉积物(Baker, 1980 b)。在维多利亚州 Hamlfon 以西 6km 的 Grange Burn 的上新世地层中,也发现较多的硅酸体。其上覆盖的玄武岩层,钾氩法测年为 4.35×10^6 年(E. D. Gell, 1967)。

据 I. Rovner 在 1991 年国际第十三届第四纪地质会议期间提供的资料,目前世界上有 31 个国家和地区进行过植物硅酸体调查研究工作。把它应用在地质学和考古学的大约有七八个国家。

植物硅酸体作为一门新兴学科,它具有以下的一些特点:

1. 植物硅酸体个体小(一般在 $2-2000\mu\text{m}$),产量大。这一点类似孢粉,因而为研究和

应用提供了方便。从高山到平原,湖泊到海洋,热带森林到寒冷的苔原,凡有植被的地方就有植物硅酸体存在。

2. 硅酸体在 $<700^{\circ}\text{C}$ 加热,其物理、化学性质不会有大的变化。Shizuoki Arimura (1965)在 900°C 温度下,对硅酸体加热 12 小时,光谱才显示出从非晶质向结晶矿物方向转化。Jones(1966)认为,加热到 1050°C 时,硅酸体才能达到结晶程度。这种耐高温的特性,使它在考古学中大有作为。红烧土、陶片、铸范等都可进行硅酸体分析。而这些经过高温处理过的考古样品往往不含有其它任何种类的化石。

由于硅酸体是硅质的,抗分解的能力强,在某些情况下,它能提供孢粉等化石所不能提供的资料。I. Rovner(1971)认为:“利用丰富而独立的植物硅酸体研究史前人类生存环境的潜力是极为明显的。”

3. 植物硅酸体主要存在于植物茎叶中,它不像孢粉那样易于搬运而且飘扬很远,因此,对原生沉积来说,应用它恢复植物群落特别是草本群落及恢复古环境时,受外来混杂成份的影响较小。

4. 硅酸体本身可以直接用于年代学测定或其它提供环境信息的化学元素测定,如可直接进行 ^{14}C 测年及稳定同位素研究,探讨植被演替和气候变化。这一点孢粉无法做到。

第二节 植物硅酸体研究历史

自从植物硅酸体被发现以来,至今已有 180 余年。从 19 世纪初到 19 世纪中期,有一个研究空白期。大约在 20 世纪中期以后,硅酸体研究进入了一个新的发展阶段,发表了大量文章。据 I. Rovner 1991 年提供的资料,从植物学、土壤学、考古学、地质学角度发表的硅酸体文章约有千余篇。据目前掌握的文献,植物硅酸体的研究历史大致经历了如下过程。

1. 自 1804 年至 20 世纪中期可以认为是发现和探索阶段。这一阶段发现了植物硅酸体,并对它有一个初步认识。1804 年 de Saussure 发现了植物体内有硅成分(D. Bowdery, 1989)。此后,植物能从土壤中吸收硅的习性逐渐获得早期植物界的公认。1862 年 Sachs 正式提出硅是否参与营养过程问题。1847 年和 1854 年,微体古生物先驱 Ehrenberg 把空气尘土、雨水、泥炭、硅藻土进行了分离,发现了形态不同的硅质体,他认为这是某些植物所特有的,后来他又分析了某些食草动物的粪便,也发现了这些硅质体(近藤 鍊三, 1986)。1866 年俄国人 Pynneut 在欧洲针茅和黑钙土表层中发现了这些硅质体,并把它称为 Phytolith。1872 年 Duval-Jouve 和 1884 年 Westermaier 先后对莎草科表皮的硅质细胞进行了研究,观察了 12 个属 57 个种表皮中的“特征硅质锥体”,这使植物体内部的硅酸体研究工作向前迈了一步。1899 年 Halm 在 Westermaier 启发下,研究了北美莎草科植物硅酸体。1907 年 Hanausek 指出大麦壳表皮细胞强烈硅化。1914 年 Haberlandt 和 1926 年 Chermazone 也注意了莎草科中“独特的强烈硅质化的圆锥形突起”。1936 年 Hector 指出大麦鞘皮和内麸表皮细胞呈硅化状态;同年 Part 研究了禾本科某些种属的硅酸体,进行了简单的分类,并研究了它们在某些种属之间的差别。1943 年 Oosov 观察了俄国土壤中

生物堆积形成的硅质体。1952年 Amos 列举了分布在 32 个科 144 个属 440 种树的木质中的硅细胞。1955 年 Chattaway 又观察了 62 个科 114 个属 230 个种木质中硅质体,他们俩人的工作推动了树木硅酸体的研究。

但是,直到 20 世纪中期,仍然有些学者对存在于植物体以外的硅酸体持怀疑态度。Van Rummelen(1953)描述了印度尼西亚土壤中各向同性的硅质棒和管状物,他认为无机成因的,可以用沉淀在植物根须(后来分解掉)或土壤毛细管内形成的理论加以解释。日本学者 Ichiro Kanno 也在此时把日本火山灰土壤中非晶质的各种形态硅质颗粒,全部认为是“火山泪”。后来他研究了 *Imperata* sp. *Sasa*、*Miscanthus sinensis* 等植物体硅成份之后,才知道这些“火山泪”是生物成因的。

2. 从 20 世纪中期到 1982 年,硅酸体研究进入了一个新阶段。这 30 余年,是植物硅酸体研究蓬勃发展时期,从分析方法、术语、分类、应用解释都已逐步发展成为一个独立的分支学科。蕨类、草本、木本中很多科属的硅酸体形态及理化性质,现代土壤、古土壤、火山灰、泥炭、黄土堆积、冰碛物、湖沼相沉积、浅海沉积、深海沉积等硅酸体都进行了研究。进行过硅酸体调查研究的国家和地区有日本、澳大利亚、美国、新西兰、巴拿马、墨西哥、英国、前苏联、印度、以色列等。这一阶段代表性的研究成果和学者有很多。

在形态研究方面,1956 年馆岡亚绪从解剖学角度研究了画眉草亚科、黍亚科的硅酸体。1959 年 G. Baker 研究了燕麦表皮细胞中硅酸体的分布。1961 年 Bonnett 对燕麦颖片、鞘皮做硅酸体分析,并研究了它们在组织中的分布状况。1965 年 P. N. Mehra 等研究了 13 个属 60 余个种莎草科的硅酸体。同年, L. H. P. Jones 做了竹亚科一些属种的硅酸体分析,并用 X 射线光谱和电子显微镜做了成分分析与鉴定。1966 年 D. W. Parry 等做了禾本科 3 个种的花序(苞片、颖片、内麸、外麸等)的硅酸体分析。1968 年 R. W. Drum 研究了桦属中木质细胞中的硅化作用。1974 年 G. Scurfield 用扫描电镜观察了 20 余个属木本茎中的硅酸体,并研究了酚类化合物对硅酸体的影响。1976 年近藤 鍊三研究了棕榈科、松科、柏科、木兰科、山毛榉科、榆科、桑科、樟科、木犀科、忍冬科等植物中一些属种的硅酸体,最后认为榆、桑、山毛榉、木兰等科中硅酸体含量最高,可以和禾本科某些属相“匹敌”。针叶树和某些阔叶树硅酸体含量少,阔叶树中常绿阔叶比落叶阔叶含量高,同一树种年令老的含量高。1978 年 J. W. Geis 研究了禾本科中的 3 个属的硅酸体,把硅酸体分为充填于长细胞、短细胞、毛细胞、气孔细胞、泡状细胞、硅化脉状组织、细胞间的硅组织等几大类,还研究了不同形态硅酸体在植物不同部位的分布量。1978 年藤原宏志专门研究了一种形态——扇形的硅酸体,描述了它在禾本科 11 个种间的生态差异和野生稻、日本稻、外国稻的形态差异(a 与 b 轴比例关系)。1980 年 H. G. Richter 从樟科 40 个属 750 个种中做了 1500 个木本标本,其中 20% 含有硅酸体,根据它们的生长方式、大小、分离程度、出现的部位,描述了樟科内的种属差别,并对樟科与木兰科、胡椒科、肉豆蔻科的亲缘关系做了探讨。1981 年高桥英一等对稻亚科 22 个种、黍亚科 30 个种、画眉草亚科 8 个种及其它亚科共计 211 个种(均取自于京都植物园内)的硅含量进行了分析,并用 X 荧光做了化学成分鉴定。同年,他又采用相同的研究方法,研究了莎草科、鸭跖草科、灯芯草科、蓴蓴科、葫芦科中硅含量特征。最后,他把上述植物分为强硅酸型、中间硅酸型、弱硅酸型、非硅酸型(如百合科)四种类型。

这一阶段中,采用了各种方法,分析了硅酸体的理化性质。如1963年R. L. Jones和A. A. Milne对伊里诺州土壤和对燕麦中的硅酸体采用X衍射和光谱法进行了化学成分分析。1965年有村玄洋等分析了稻亚科中18个种的化学组成(Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti, Qrg, H₂O等)、硬度、比重、折光率、表面积等等。1974年G. Scurfield等采用了上述同样方法对32个种木本植物中的硅酸体理化性质做了分析,所得到的结果证明,木本中硅酸体理化性质与草本区别不大。1980年F. Bartoli等描述了硅酸体溶解率同表面积、土壤中Al离子含量及硅酸体含结晶水多少等相关性。1980年我国学者邹邦基论述了硅酸体在植物体内的存在形式及生理作用,并认为硅也是植物生长中的一个必需元素。硅酸体理化性质,目前已较为清楚,各学者研究的结果差别不大,80年代以后,这类文章已不多见。

这一阶段中,硅酸体的分类研究较多,并且在植物学、土壤学、考古学、地质学等方面得到了一些应用。分类是应用的基础。50年代有些学者对禾本科某些属的硅酸体进行了简单的形态分类(G. L. Amos, 1952; G. L. Baker, 1959; L. Benson, 1957)。1962年加藤芳朗对日本火山灰中的硅酸体进行了分类,对扇形、竹节型、哑铃型分得较细。Twiss(1969)的分类奠定了禾本科硅酸体的分类基础。1970年E. Blackman分析了英国阿尔伯特南部草原牧区的硅酸体,对组成该草原10个属的草本硅酸体进行了详细的分类,从硅酸体特征探讨了羊茅属与黍属的关系,指出了一些归属有争议的种。1978年J. W. Geis对禾本科内3个属的硅酸体进行了分类。1981年近藤 鍊三把树叶中的硅酸体分为8大类60余种类型。1982年他又把草本硅酸体分为70余种形态。同年,D. A. Brown把美国中部草原植物的硅酸体进行了四级分类(I, A, l, a),把硅酸体分为100余种形态,这是目前已知最详细的分类方案。

3. 从1982年至今,硅酸体研究进入了一个新的阶段,这个阶段植物硅酸体研究特点是:成立了植物硅酸体研究的国际组织,并定期出版了刊物;新技术、新手段应用到硅酸体的研究中;在基础理论研究及应用方面,比以前更加深入和广泛。

从1982年开始,美国编辑出版了"Phytolitharien Newsletter",至1990年已出版了6卷18期。1988年,在美国成立了"The Society for Phytolith"组织。此外,随着科学技术的发展,新的技术方法开始应用到硅酸体的研究中,扫描电镜已成为较普遍应用的观察手段,除前面已提到的先进测试方法外,稳定同位素技术(F. Eugene, 1991)对硅酸体进行了尝试,取得了满意的结果。1983年P. Dayanandan用染色法研究了植物中的硅酸体。1985年M. V. Cheshire等据实验室分析结果,绘出了山毛榉与松属硅酸体的分子结构式。1989年D. Bowdery探讨了硅酸体原生沉积、次生沉积及埋藏学等问题。1984年河室公康利用电镜研究了日本9种野生禾本科硅酸体形态特征。1987年A. L. Ollendorf用电镜研究了莎草属和蕨草属中9个种的硅酸体,描述了光学显微镜下不易观察到的一些特征。在火山灰和考古学的应用上,这个阶段发展较快,发表了大量论文。前者日本工作做的最多;后者澳大利亚、美国工作做的最多。在火山灰地层学和考古学研究中,硅酸体研究与各种测年数据相结合,获取了大量有价值的研究成果。1988年美国费城Temple大学的人类考古学家Dolores R. Piperno写了"Phytolith Analysis"一书。这是一本系统介绍这门新学科的专著。全书共分8章,书后有12个清晰的黑白图版。I. Rovner曾对此书写过书评。北京大

学地质系的姜钦华已把此书译成中文,不久将问世。美国 Plenum 出版社,1992 年出版了由 George Rapp 和 Susan C. Mulholland 主编的 "Phytolith Systematics" 一书,该书共发表了 14 篇有关硅酸体分类研究的最新成果。该书最后介绍了 400 余篇研究硅酸体英文文献目录及内容摘要,很有参考价值。

第二章 植物硅酸体的理化性质、生理作用及形成

第一节 植物硅酸体的理化性质

一、硅酸体的物理性质

植物硅酸体最小的为 $2\mu\text{m}$ ，最大的为 $2000\mu\text{m}$ 左右。一般是在 $20\sim 200\mu\text{m}$ 范围内，在透射光下硅酸体无色或浅肉红色，有时为褐色，这是因为草地、森林中的火灾或者样品在灰化处理时碳元素附着在表面上造成的。土壤中的硅酸体有时呈黄褐色，这是氧化铁污染的结果，在进行脱铁处理后，仍呈现出原来的无色状态（在反射光线下为灰或乳白色，在正交偏光镜下全消光）。在光学上硅酸体为各向同性，通过 X 衍射图谱可以看出，是非晶质的（图 2-1、2-2）。

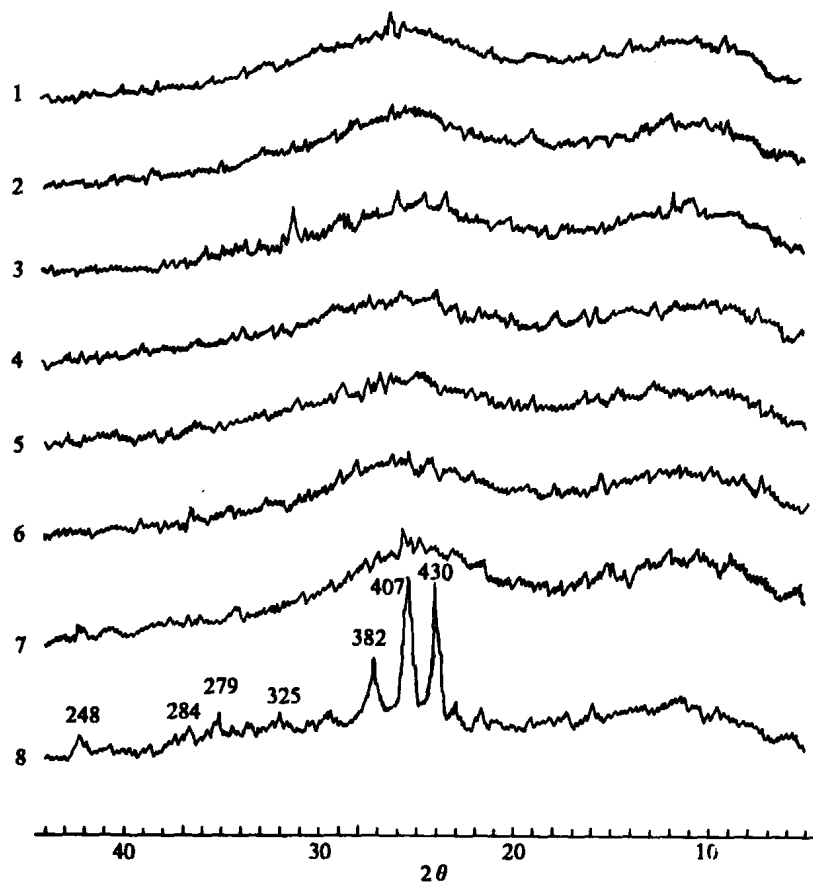


图 2-1 从 Humic Allophane 土壤的细砂中分离出的硅酸体 X 衍射曲线（据 S. Arimura, 1965）

1. Kanoya 0-20cm 土壤层硅酸体的衍射曲线
2. Kanoya 20-50cm 土壤层硅酸体的衍射曲线
3. Kanoya 107-150cm 土壤层硅酸体的衍射曲线
4. Miyakonojo 0-20cm 土壤层硅酸体的衍射曲线
5. Miyakonojo 20-60cm 土壤层硅酸体的衍射曲线
6. Miyakonojo 265-295cm 土壤层硅酸体的衍射曲线
7. 6 号样品加热到 900°C12 小时的硅酸体衍射曲线
8. 6 号样品熔化并加 Na_2CO_3 (1:1) 硅酸体衍射曲线

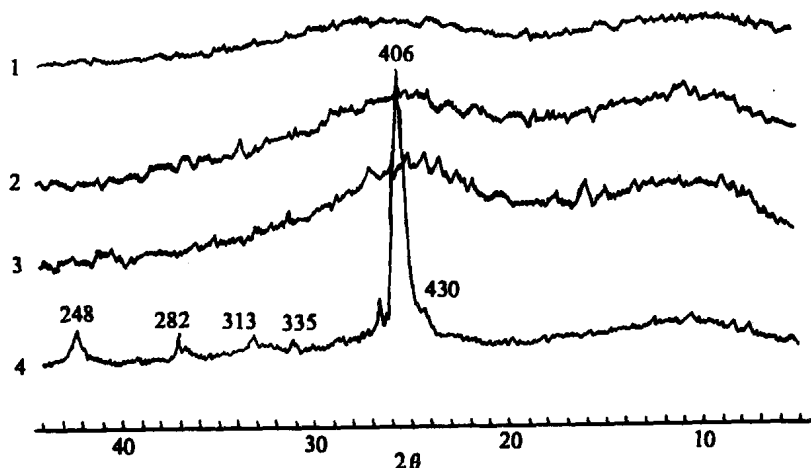


图 2-2 *Sasa* 属和 *Miscanthus sinensis* 属硅酸体衍射曲线 (据 S. Arimura, 1965)

1. 高氯酸钾和氮混合液处理后的 *Sasa* 属硅酸体衍射曲线
2. 加热 600°C12 小时后的 *Sasa* 属硅酸体衍射曲线
3. 加热 800°C10 小时后的 *Sasa* 属硅酸体衍射曲线
4. 加热 900°C12 小时后的 *Miscanthus sinensis* 属硅酸体的衍射曲线

表 2-1 是植物硅酸体与石英、燧石类的比重、折射率、重折射率、含水量、硬度的平均值,可以看出植物硅酸体与石英、燧石类是有差别的。表 2-2 是不同学者研究的土壤中的植物硅酸体及现代植物不同处理方法所得到的结果,总的来说差别不大。如果加热到 900°C 或加入 Na_2CO_3 , 比重和折射率等都要增大,但其表面积却大大降低 (L. H. P. Jones, 1963)。从图 2-1、图 2-2 中曲线 8 和曲线 4 也可以看出这种变化,有一部分硅酸体将变成结晶质。

表 2-1 某些硅质物与载片介质的物理性质

物 质	比 重	平均折射率	重折射率	含水量	硬 度
石 英	2.65	1.55	0.009	0	7
燧石类	2.62	1.55	0.009	痕量	7
植物硅	2.15	1.43	0	最大 10%	5.5—5.6
加拿大树脂		1.54			
水		1.33			

(据 F. Smithson, 1965 和 D. Bowdery, 1989)

表 2-2 植物硅酸体的折射率及比重

植物硅酸体	折射率	比 重	检测者
物质来源:			
土 壤	1.43	2.15	Smithson(1966)
土 壤	1.44—1.45	2.0—2.3	Beavers and Stephen(1958)
土 壤	1.447	2.11	Kanno and Arimura(1958)
土 壤	1.43—1.44 (av. 1.437)		Kato(1960)
土 壤	1.40—1.465 (av. 1.458)	1.50—2.30 (av. 2.10)	Jones and Beavers(1964)
植 物*	1.45		Lanning et al. (1958)
植 物*	1.45	2.10—2.15	Kato(1960)
植 物	1.406—1.420		
植物(450°)*	1.476—1.480	2.00	} Jones and Mine(1963)
植物(550°)*	1.439—1.480	2.02	
植 物**	1.427—1.440	2.04	
植 物*	1.440—1.448	2.0—2.2	Baker(1961)

* 干灰化法 ** 湿式法

二、硅酸体的化学性质

硅酸体的化学成分及含量与样品的处理过程有关,灰化法、湿法、加化学溶剂等不同方法,得出的结论稍有差别。一般来说,对植物进行硅酸体分析时,硅的含量是湿法>干法>加溶剂法。

表 2-3 某些植物硅酸体化学组成

植物种属	化 学 成 分										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	OrgC	+H ₂ O
<i>Fagus silvatica</i>	66.5	3.1	0.42	1.4	0.33	2.55	0.50	2.7	0.3	5.6	11.0
<i>Abies pectinata</i>	74.8	5.3	3.2	1.3	0.90	0.25	0.25	2.4	0.5	4.5	3.0
<i>Pinus silvatica</i>	80.0	8.6	3.3	0.03	0.55	0.35	0.70	3.0	0.8	0.3	2.4
<i>Calluna vulgaris</i>	71.0	4.0	2.0	0.4	1.35	0.31	0.22	3.3	0.4	4.5	8.0
<i>Festuca silvatica</i>	77.0	3.5	2.1	4.2	0.52	0.15	0.15	2.3	0.4	0.4	9.3
<i>Sasa apoiensis</i>	91.0	0.45	tr	0.01	0.06	0.19	0.24	0.12	0.03		
<i>Miscanthus sinensis</i>	89.0	0.50	tr	tr	0.06	0.55	0.16	0.44	0.02		
<i>Phramites communis</i>	91.2	0.31	tr	tr	0.01	0.14	0.34	0.28	0.05		

*tr 微量

(据近藤 鍊三等,1988)

表 2-3 是综合了近藤 鍊三(1988)和 Bartoli(1977)等人的分析结果。可以看出,硅含量一般是禾本科最多,针叶树其次,落叶阔叶树最少。表 2-4 为燕麦硅酸体化学成分,硅的含量是湿法>干法,当把硅酸体焙烧到 1150℃ 时,硅含量几乎都>95%,而其中的结晶水全部损失掉。图 2-3 为山毛榉和松的硅酸体分子结构,图中除 Si, H, O 外,还有少量六价铝,解释了硅酸体对一些有机分子的“吸附作用”。

表 2-4 燕麦硅酸体化学成分

重 量 百 分 比						
成 分	干 法			湿 法		
	灰化温度(450℃)		灰化温度 (550℃)			
		焙 烧 (1150℃)			焙 烧 (1150℃)	
Si ₂ O	82.76	95.01	83.96	94.95	86.66	97.72
Na ₂ O	0.65	0.75	0.43	0.44	0.003	0.003
K ₂ O	0.62	0.62	0.59	0.54	0.068	0.063
CaO	0.42	0.49	0.62	0.75	<0.014	<0.016
MgO	0.49	0.57	0.56	0.65	0.005	0.006
Fe ₂ O ₃	0.0237	n. d	0.0320	nd	<0.002	nd
MnO	0.0201	n. d	0.0303	nd	0.0015	nd
H ₂ O(+100℃)	4.00		4.31		6.40	
		1.97		2.09		2.35
H ₂ O	4.80		4.22		7.10	
C	5.78		5.06			
总 计	99.56	99.41		99.42	100.24	100.14

nd—未确定

(据 L. H. P. Jones, 1961)

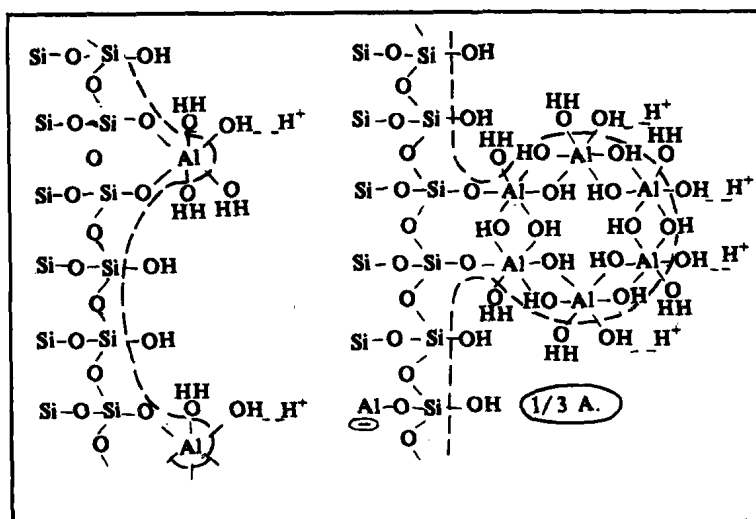


图 2-3 据实验室分析绘出的山毛榉与松属植物硅酸体分子结构式

(据 M. V. Cheshire 等, 1985)

在土壤及地层中所见到的硅酸体经常有被溶蚀现象。出现这种现象的因素取决于多方面的,如土壤的环境要素(温度、水分、pH 值等)和土壤的化学成分。在酸性环境下,硅酸体可与铝的氢氧化物或者水铝石英起反应。此外,硅酸体种类、表面积大小等也影响溶解度。一般说来,温度越高溶解度越大,如图 2-4 所示,在热蒸馏水中,溶解的硅普遍高于冷水。另外,它们都有一个急剧溶解阶段,在冷水中是在 5 天之内,在热蒸馏水中是在 0.5 小时之内,在此之后,溶解量逐渐平稳。F. Bartoli(1980)认为:落叶阔叶树起源的硅酸体更易水合(含结晶水较多),具较低的铝含量,较高的表面积,较大的溶解量。禾本科起源的硅酸体则在落叶阔叶和针叶树之间。

铝对硅酸体的溶解起着明显作用,这个问题将在有关章节中论述。

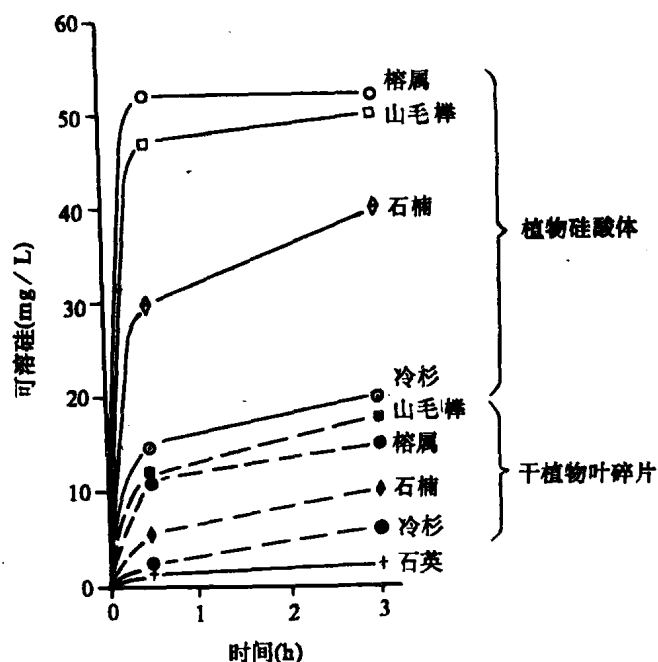


图 2-4 在冷(a)热(b)蒸馏水中植物硅酸体的溶解度
(据 F. Bartoli, 1980)

第二节 硅及硅酸体在植物中的生理作用

硅在地壳中的含量仅次于氧,占地壳重量的 28%左右。在不同的生物体中硅的含量差别很大,有些生物有机体中硅的含量只有几个 ppm(10^{-6})。而在某些禾本科植物的茎叶灰分中,约有 10%—20%左右的硅。

自然界中植物生长发育所必需的营养元素如 C, H, O, N, P, K, Cu, Mg, Fe 及微量元素中的 B, Mn, Zn, Cu, Me 等,过去研究得较多。对硅在植物中的作用,相当长一段时间内,没有人去研究,甚至认为硅对植物是一种可有可无的元素,植物可以在完全无硅的环

境下生长发育。70年代初期,人们曾对生物中硅的精确化学机理有过很多讨论,认为大多数生物所必需的元素,在体内都有一定的结合中心,例如结合在蛋白质上。但硅在生理条件下没有发现这种“有机”中心的存在。现在仅知道,硅作为一种元素,它在植物体生长发育中,具有重要地位(王岳定,1964)。

一、生长效应

硅对许多植物有生长效应,在水稻方面实验报道最多,人们发现缺硅的水稻植物生长受到阻碍,降低了稃性,根与地上部分都较正常的短。谷粒产量降低,穗子的干重仅为正常植物的一半或2/3。每穗穗小,成熟谷粒的干粒重与总重都减少。如果让水稻吸收一定的硅则能增加水稻植株高度、叶与茎数、枝梗数,谷粒、叶子变大,增加茎秆中的维管束数与伸长了的最低节间的厚度,并发现水稻褐斑病的发生和叶子硅含量低有关。另外,某些研究者认为,水稻缺硅时叶片象柳条一样下垂,供给硅能增加叶片的厚度,保持直立。在木贼科植物上也观察到缺硅时的“垂柳般表现”的明显症状。

某些旱地禾本科植物,如大麦、燕麦、小麦与黑麦,生长在缺硅条件下产量会显著降低。有人对甘蔗进行液体培养,发现硅可以增加蔗秆与蔗糖的产量,而缺硅的植株则出现了叶斑症,这种现象在美国夏威夷的一些土壤上经常见到。

长期以来,人们仅在一些含硅量较高的植物中看到对硅的效应,而含硅量极低的植物如番茄,在日本学者三宅靖人与高桥英一等的努力下,终于发现了番茄缺硅的典型症状:在第一花序开花期,生长点停止生长,新叶出现畸形小叶,这是由于栅栏组织加厚和海绵组织破坏的结果;叶片缺绿而黄化,下位叶片上出现坏死部分,并逐渐累及上位叶片,随着症状的进展,坏死区扩大,下位叶枯死;花药退化,花粉粒败育等状况。

二、抗病虫害和抗倒伏性

硅能增强禾谷类植物抵抗真菌病害,如水稻的稻瘟病、褐斑病与茎腐病,麦类的白粉病。表2-5是浙江嵊县施加硅肥对水稻抗病增产效果的研究结果。

表 2-5 硅肥对水稻的抗病增产效果

试验年分	地 点	品 种	处 理	剑叶含硅 (干物%)	病情指数(%)		产 量	
					叶瘟	穗颈瘟	斤/亩	%
1976	奖山八宿屋	科桂优	对照	7.45	—	12.38	442	100.0
			施硅	9.51	—	9.11	506	114.5
	平山中叶村	东方红	对照	11.91	—	32.38	415	100.0
			施硅	15.30	—	20.00	435	104.8
1977	奖山八宿屋	科桂优	对照	10.27	—	20.36	437	100.0
			施硅	13.28	—	7.91	525	120.0
	毫石石道地	矮林5	对照	9.92	20.5	43.00	260	100.0
			施硅	12.36	4.8	29.30	380	146.0
	毫石毛岭	矮林5	对照	6.42	32.3	56.40	175	100.0
			施硅	9.51	16.6	31.00	325	185.7
	剡源董村	东方红	对照	10.3	—	14.28	442	100.0
			施硅	12.76	—	3.17	506	114.5

(据秦遂初,1980)

Yoshida 等人认为硅胶充满细胞壁纤维素微团的孔后,构成硅-纤维素膜,以保植物免遭病虫害袭击。亦有人报道当水稻植物体内硅含量高时,茎螟幼虫的上颚会受损伤。硅在抗昆虫方面的作用可能纯粹是一种机械性防护作用,对真菌也可能主要是这种作用,因为菌丝必须通过表皮细胞壁侵入寄主内部,而硅正好在此构成一道机械屏障。但有人认为硅可能影响真菌对细胞壁的酶降解,或者茎叶中的硅酸化合物本身对病菌有一定的毒性,因为有人避开硅质化表皮的屏障接种,菌丝的生长亦受阻碍。

在抗倒伏方面,最早李比西等(1840)就认为缺硅是茎秆强度不良的原因。Jones 等证明茎秆中厚壁组织的细胞壁的厚度不仅与木质素有关,而且与硅有关。Cho(1976)在大麦田间试验中,也看到施硅酸盐减少了茎秆(特别是第4节间)的长度,增加了茎壁的厚度与茎秆的外径。一定程度上硅酸体在植物体中起到骨骼作用。

三、蒸腾作用

据1958年Yoshida等研究,无硅处理的水稻其蒸腾率比有硅处理高出30%以上。硅减少蒸腾作用的本质,通过对水稻表皮组织的电子显微镜的切片观察,发现有硅处理的水稻表皮层外周可以区分为角质层、硅层以及填满硅质的外细胞膜,它们被称之为“角质双硅层”(Cuticlesilicon double layer)。这种角质双硅层随硅化程度的强弱,其厚薄、密实度也互有差异,但这种表皮硅化细胞的共同特点使渗透性显著地差了,因此能在一定程度上限制了水分借表皮层而散失。

植物的蒸腾作用除了大部分通过气孔的开启而进行外,小部分则是由表皮细胞和角质层而散失的。特别是在植物蒸腾强烈或水分吸收不利的情况下,这种角质蒸腾就显得很重要。就水稻的生育期而言,当水稻成穗之后,由于颖壳的表皮层没有气孔,因此穗部蒸腾主要表现为角皮蒸腾作用。由于角皮蒸腾不如气孔那样有自动调节能力,因此在生产实践中,对作物喷施低粘度的硅酸盐,对提高作物抗旱是有作用的。

植物硅酸体中水分的含量是随环境而调节的,含量最高可以达到30%以上,一般在10%左右,这类非晶质矿物具有其它结晶矿物所没有的分子筛,还可以储存和过滤水分。尤其是在一些谷物壳体中的细胞几乎全部硅化(稻壳的50%左右都是二氧化硅),形成一个坚硬的保护层,这种保护层在一些旱作物及有关植物中也可能同时起到一种昼夜水分调节器作用。

植物硅酸体的机械功能被认为具有调节水分的机能,主要是排列于叶脉之间的、形成扇形硅酸体的机动细胞,主管叶的伸展,当阳光过份强烈时,使叶片卷曲,从而防止水分蒸发。

四、光合作用

蒸腾减弱的结果,避免了叶片在强光下过度失水萎蔫,从而提高了光合作用,使干物质增多。有人发现多施硅肥增加了群体状态水稻的光合能力,认为这还和硅能使叶片呈直立状态,减少互相遮荫,增大受光面积有关。这种效果在多施氮肥叶片过于繁茂的情况下更为显著。

最近的研究认为植物硅酸体的形态还可以起到一种透镜作用,透过这种透镜的散射

光的强度比通过未硅化的绿色细胞的光强度大 10 倍以上,使叶身内部有较好的透光度,可以促进光合作用的进行。

第三节 植物体中硅与其它营养元素的关系

一、硅和氮、磷的关系

施用硅酸能略为抑制水稻对氮素的吸收,表现在氮素的分配上,茎叶部含氮量减少,穗部含氮量增加。显然,这对于幼穗形成和成熟有着良好的效果,茎叶的氮素向穗部移动后,有利于蛋白质和淀粉的形成,使水稻穗大粒多,特别是对于氮素施用水平较高的情况下,硅酸一定程度上能抑制水稻的呼吸作用,促进体内有机物质向合成方向进行。由于氮素(特别是高氮)常常加重病虫害,因此作物体内 SiO_2/N 值越大,作物越能健壮发育。

施用硅酸盐可以促进植物对磷的吸收,其原因可以归结为二个方面:(1)硅酸盐促进了土壤中难溶性磷酸盐的溶解,有利于植物吸收利用。(2)硅酸盐代替了磷酸盐离子以及硅酸离子置换了土壤胶体上 OH^- 离子,相对减少有效磷被土壤固定的机会,从而提高了土壤中磷的有效性。

二、硅和铁、锰的关系

奥田东和高桥英一发现在 1×10^{-6} — $140 \times 10^{-6}\text{Fe}$ 或 0.4×10^{-6} — $140 \times 10^{-6}\text{Mn}$ 的培养液中,加入硅后减轻了高 Fe 和 Mn 处理的毒害,并增加了产量,其原因是由于硅的增加减轻了植物对 Fe 和 Mn 的吸收,但这种减轻机制是否具有和 Al 一样降低生物利用度的功能尚不清楚。有人认为吸入植物体内的硅能提高根系对 Fe^{2+} , Mn^{2+} 的氧化力,使之变成更多的氧化物沉淀在根表面的缘故。

三、硅和锆的关系

锆在理化性质上和硅相似,但它对植物的作用却与硅相反,甚至在低浓度下也是有毒的。需要硅的植物,容易受锆抑制,加入较高浓度的硅能使这种抑制逆转,高桥英一的一系列研究指出,植物对硅和锆的吸收机制是相同的,容易吸收硅的植物也容易吸收锆。增加硅的浓度可以使锆的吸收受到抑制。

四、硅和钙的关系

SiO_2 和 CaO 是植物灰分组成中变化最大的两个氧化物,它们的含量具有相互间负相关的关系。据 41 种不同植物灰分中元素分析来看, SiO_2 和 CaO 的相关系数达 -0.756 , ($P \leq 1\%$),显著负相关(臧惠林,1985)。这可能与它们在植物体内生理上作用的相似性有关,硅和钙除了它们各自的特殊生理功能外,都大量充填或附着在细胞组织上起一定的机械作用,在植物体内均具有一定程度的不可转移性。臧惠林(1985)把 SiO_2/CaO 的重量比为 1 左右或小于 1 的称之为钙性植物,主要是一些双子叶植物。

植物对硅、钙所具有的不同选择吸收特性与植物的进化过程有密切联系,而这种联系

又受到各个地质时期土壤环境条件的影响。有人把构成植物体的各种元素按其含量顺序排列,发现硅在单细胞藻类中占第3位,在蕨类植物中占第7位,在被子植物中则推后到第14位。在植物进化比较早期的蕨类植物及被子植物中的禾本科植物,灰分中的硅的含量都很高,而双子叶植物中的十字花科植物和裸子植物中的针叶树,灰分组成中的CaO含量均大于SiO₂。植物类群间灰分含量中硅、钙的这种差别,乃是植物演化过程中土壤环境条件作用的结果。当然植物中硅、钙含量影响因素是非常复杂的,土壤条件、气候环境及系统发育是植物体硅、钙含量的最重要的影响因素。

五、硅和铝的关系

T. D. Birchall(1990)认为硅可以降低铝的生物利用度,如果有过量的硅酸存在并生成羟基硅铝酸盐((OH)₃Al₂O₃ · Si(OH)),其中Si/Al比为0.5,铝的生物利用率会降低,而生物缺硅就有可能使铝变成生物能利用的物质。铝与生物体系是相敌对的,或者说铝是生物体系的“有毒”元素,因为它与一些“难”配位体如细胞膜中的磷酸盐、DNA、ATP以及细胞内信息传导过程中的肌醇磷酸酯都很容易亲合。它与这些配位体的集合力要比Mg²⁺强几个数量级,且配位体的交换速率极低,比Mg²⁺慢10⁴倍,比Ca²⁺慢10⁷倍,生物无机化学的一个新的重要观点认为,生物体的进化,乃是通过碱性和不可少的过量硅酸的缓冲来防止铝“中毒”的。Coombs(1967)对一种淡水硅藻观察到RNA、蛋白质、碳水化合物与叶绿素的合成作用在除去硅酸后5—7小时就停止,但DNA与脂质的合成还要延长几小时。Werner(1968)更证明海水硅藻在无硅基质中,细胞内的α—酮戊二酸含量在60分钟内减少到正常值的1/3。谷氨酸含量在3小时内减少到原来的20%,蛋白质合成受到抑制。

第四节 植物硅酸体的形成

对单硅酸在植物发育中通过什么途径逐渐形成硅酸体,目前仅是大致了解,详细过程并不十分清楚。有一点是肯定的,不同种属植物、植物的不同器官,其形成过程是有差别的,硅酸体含量也是不同的。禾本科植物大量富集在叶的表皮细胞中,少量在栅状肉质细胞及导管中,木本植物硅酸体主要分布于维管束、表皮毛、表皮毛基部及叶部表皮细胞。从显微镜下能见到的植物组织细胞被硅化方式有以下几种:

a. 各种细胞完全或近乎完全被充填而形成固体状的内部细胞铸型;b. 在一些植物细胞的内壁上沉淀一些硅质薄膜,形成不完全的内膜,当植物分解,这些植物硅酸体衬板极易破碎,脆裂成棱角状、盘状以及大量不定型的碎屑;c. 植物细胞壁完整彻底被置换,这一类型中活植物的细胞组织被矿物质详细保存下来,这一过程是植物的部分自身硅化过程,因为在活植物中这种过程一般不会广泛发生,只有小块的这种置换被观察到,偶尔这些构造中会显示出棒状植物硅酸体仍然连结在这一组织的某些被置换的细胞壁上;d. 植物毛、钩、刺及类似构造被矿化;e. 细胞间的二氧化硅沉积、细胞间的空隙被SiO₂充填可以形成复杂的几何图案;f. 细胞外硅酸体沉积,即产生硅酸体的表皮细胞壁被硅酸体渗透。上述所讲的大部分细胞可以是植物的根系、茎、鞘、叶、颖片、果壳、花,可以是表层细胞、叶肉组