

# 两种圆柏属植物不同季节显微和超微结构变化与耐寒性的关系\*

张有福<sup>1</sup> 陈银萍<sup>2,3</sup> 张满效<sup>1,4</sup> 陈拓<sup>1\*\*</sup> 安黎哲<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; <sup>2</sup>兰州大学生命科学学院, 兰州 730000; <sup>3</sup>兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; <sup>4</sup>兰州石化职业技术学院, 兰州 730060)

**【摘要】** 以祁连圆柏和圆柏为材料,研究了圆柏属植物抗寒性与解剖结构变化,以及淀粉与可溶性糖分转化关系.结果表明,祁连圆柏和圆柏叶片下表皮细胞外覆盖一层角质膜,叶肉细胞间隙大,形成发达的通气组织.在生长季节,二者叶绿体内均积累了很多淀粉粒,在冷冻休眠季节淀粉粒消失或变小,同时叶片可溶性糖分含量增加,祁连圆柏可溶性糖分增幅高于圆柏;而休眠季节圆柏叶绿体受到低温伤害,脂质球增多,出现脂质小滴,部分叶绿体变形,祁连圆柏类囊体结构受到影响较小,脂质球减少,叶绿体形状没有发生明显变化.因此,祁连圆柏和圆柏抗寒性与发达的通气组织和淀粉粒生长季节积累有关,在低温胁迫下祁连圆柏叶绿体表现出的稳定性,通过可溶性糖分的调节力强,耐寒性增强.

**关键词** 圆柏属 显微结构 超微结构 抗寒性

文章编号 1001-9332(2006)08-1393-05 中图分类号 Q142.9, Q246.248 文献标识码 A

**Seasonal changes in foliar micro-and ultra structure of two *Sabina* species and their relationships with cold tolerance.** ZHANG Youfu<sup>1</sup>, CHEN Yiping<sup>2,3</sup>, ZHANG Manxiao<sup>1,4</sup>, CHEN Tuo<sup>1</sup>, AN Lizhe<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; <sup>2</sup>School of Life Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; <sup>3</sup>School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; <sup>4</sup>Lanzhou College of Petrochemical Technology, Lanzhou 730060, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17( 8): 1393 ~ 1397.

In this paper, the foliar micro-and ultra structure of *Sabina przewalskii* and *S. chinensis* during growth and dormancy seasons was observed under microscope and transmission electron microscope, and the foliar soluble sugar content was measured, aimed to probe into their relationships with cold tolerance. The results showed that the foliar surface cells of these two *Sabina* species were covered with thick cuticular membrane, and the well-developed arenchyma appeared in the mesophyll. In growth season, starch grains accumulated in chloroplasts, but in dormancy season, the accumulated starch grains disappeared or diminished, while soluble sugar content had a larger increase. In wintertime, the chloroplasts of *S. chinensis* were injured, with some abnormal chloroplasts, increased plastoglobuli and some lipid drops, while those of *S. przewalskii* were not obviously injured. It was suggested that the cold tolerance of the two *Sabina* species was related to their well-developed arenchyma, accumulation of starch grains in growth season, and increase of soluble sugar content in dormancy season. *S. przewalskii* had more marked increase of soluble sugar content, and its chloroplasts were more stable than *S. chinensis*.

**Key words** *Sabina*, Microstructure, Ultra structure, Cold tolerance.

## 1 引言

祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)是中国特有树种,耐寒、耐旱、耐贫瘠,而且根系发达,抗风力强,以它为建群种形成天然林集中分布在青藏高原东北部和黄土高原西部边缘<sup>[4, 7, 23]</sup>.祁连圆柏在祁连山水源涵养林中占有重要地位,是山区造林和城乡绿化优良树种,其枝、叶、皮可制造香料(如卫生香),生态效益和经济效益俱佳;圆柏(*Sabina chinensis*)是一种四季常绿、树形优美,较珍贵的绿化、美化城市树种.

目前,从植物叶片解剖结构,特别是超微结构方面研究植物抗寒(冷)机制报道较多.卢存福等<sup>[20]</sup>对唐古特红景天叶片结构观察结果表明,唐古特红景天叶片没有明显的栅栏组织,细胞间隙部分占组织总体积的比例很高. Kimball等<sup>[12]</sup>对几种抗寒性牧草的低温试验结果证实,不同物种间叶绿体

\* 国家自然科学基金项目(40301016)、国家自然科学基金中国西部环境与生态科学重大项目(90302010)、交通部西部交通建设科技项目、甘肃省科技攻关项目(GS022-A41-045)、中国科学院西部之光和甘肃省自然科学基金项目(3ZS051-A25-067)共同资助.

\*\* 通讯联系人. E-mail: chentuo@ns.lzb.ac.cn  
2005-07-11 收稿, 2006-06-04 接受.

膜结构的稳定性与植物的抗寒性成正相关. Bondada 等<sup>[3]</sup>指出,淀粉粒在叶绿体的积累改变了类囊体的膜结构. 低温胁迫条件下,叶绿体的亚微结构首先发生变化<sup>[12, 15]</sup>. 但有关常绿乔木圆柏属植物的研究尚未见报道. 本文以分布在海拔 2 600 ~ 4 000 m 的祁连圆柏和海拔 2 000 m 以下的圆柏为材料, 移栽到试验地后, 分别用光学显微镜和电子显微镜观察了其在生长季节(4 ~ 10 月)和休眠季节(11 月至翌年 3 月)的解剖结构, 并进一步探讨了解剖结构与低温胁迫的关系, 对于阐明植物寒害和抗寒机理, 以及鉴别圆柏属植物抗寒性具有重要意义.

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 自然概况

试验地位于兰州市东南 20 km 处的榆中县二阴山区(103°33'E, 36°01'N), 海拔 1 650 m. 该区属于干旱、半干旱气候区, 气候干燥, 夏季温和, 冬季寒冷; 年平均气温 7.6 °C, 极端最高气温 28.4 °C, 极端最低气温 -13.9 °C, 年平均无霜期 110 d; 年平均降水量 362 mm, 年平均空气相对湿度 59.8%, 年日照时数 2 888 h. 2004 年 8 月最高气温、最低气温和平均气温分别为 26.5 °C、18.4 °C 和 13.1 °C; 2005 年 1 月最高气温、最低气温和平均气温依次为 1.0 °C、-11.1 °C 和 -6.4 °C.

### 2.2 研究方法

**2.2.1 供试材料** 采用同属常绿木本植物祁连圆柏和圆柏为材料. 2004 年 5 月初, 将 2 种树种 3 年生实生苗移栽于试验地中. 分别在 2004 年 8 月下旬(常温生长季节)和 2005 年 1 月下旬(低温休眠季节)剪取祁连圆柏和圆柏枝条近中部的健康叶片, 用 FAA 液和 2.5% 戊二醛固定. 剪取一些叶片置烘箱中, 110 °C 杀青 10 min, 80 °C 下干燥 24 h, 供可溶性糖分测定.

**2.2.2 显微和亚微结构观察** 1) 显微结构观察参照王勋陵等<sup>[27]</sup>方法进行石蜡切片. 酒精脱水, 石蜡包埋, 按 10 ~ 12 μm 厚度切片, 番红-固绿对染, 中性树胶封片, 光学显微镜照相. 2) 亚微结构观察是将戊二醛固定的叶片用丙酮系列脱水, 环氧树脂 Epon812 浸透并包埋, LKB-V 型超薄切片机(瑞典产)切片, 厚度为 70 nm. 切片经醋酸双氧钨-柠檬酸铅双重染色后, JEM-100CX 型透射电镜(日本产)下观察并拍照.

**2.2.3 可溶性糖分测定** 采用蒽酮比色法<sup>[17]</sup>.

## 3 结果与分析

### 3.1 不同季节祁连圆柏和圆柏的显微结构

生长季节祁连圆柏叶表皮细胞壁厚. 其上表皮双层, 外层圆形, 细胞间隙大, 外被角质层, 内层细胞互相嵌合, 排列致密; 而下表皮细胞单、双层交替排列, 气孔周围为单层, 没有气孔的部分为双层, 气孔

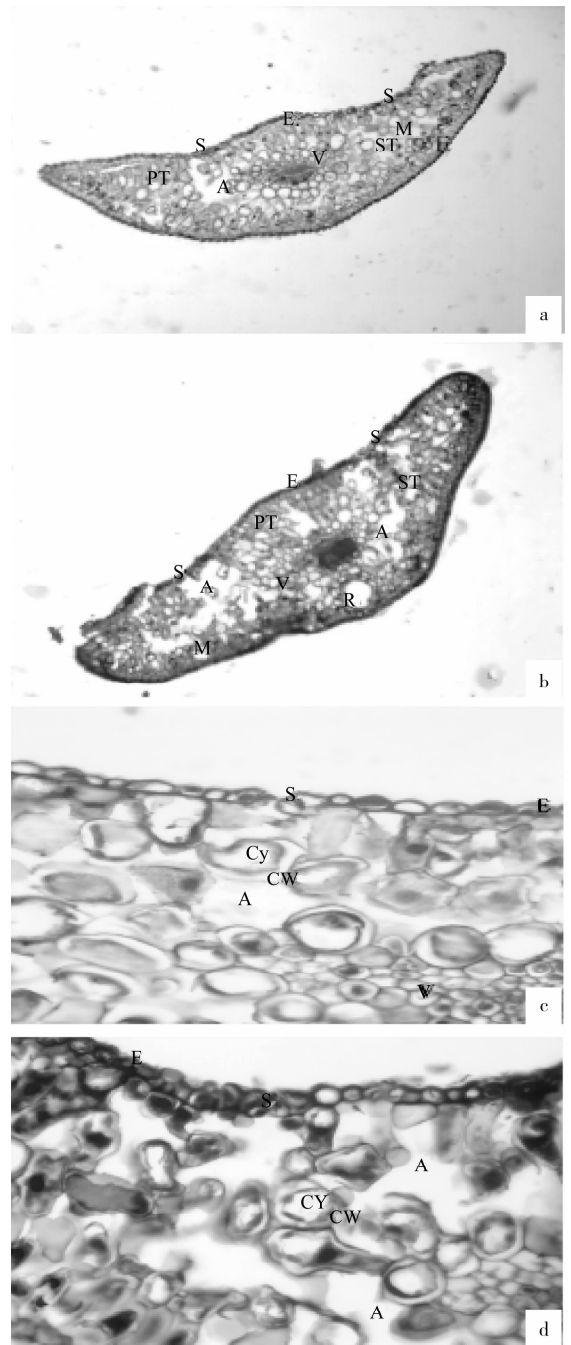


图 1 不同季节祁连圆柏和圆柏叶光镜显微照片

Fig. 1 Light micrograph of transverse leaf from *S. przewalskii* and *S. chinensis* in different seasons.

a) 生长季节祁连圆柏叶横切面, 表示发达且互相贯通细胞间隙(160 ×) Transverse leaf of *S. przewalskii* in developing season, showing communicating intercellular space (160 ×); b) 生长季节圆柏横切面, 表示发达细胞间隙(160 ×) Transverse leaf of *S. chinensis* in developing season, showing bordering intercellular space (160 ×); c) 冷冻休眠季节祁连圆柏叶横切面(640 ×) Transverse leaf of *S. przewalskii* in dormancy season, showing breakaway between cytoplasm and cell wall (640 ×); d) 冷冻休眠季节圆柏叶横切面, 表示质壁分离(640 ×) Transverse leaf of *S. chinensis* in dormancy season, showing breakaway between cytoplasm and cell wall (640 ×); R: 树脂道 Resin duct; E: 表皮 Epidermis; V: 维管束 Vascular; ST: 海绵组织 Spongy tissue; PT: 栅栏组织 Palisade tissue; M: 叶肉 Mesophyll; A: 通气组织 Aerenchyma; Cy: 细胞质 Cytoplasm; CW: 细胞壁 Cell wall; S: 气孔 Stoma.

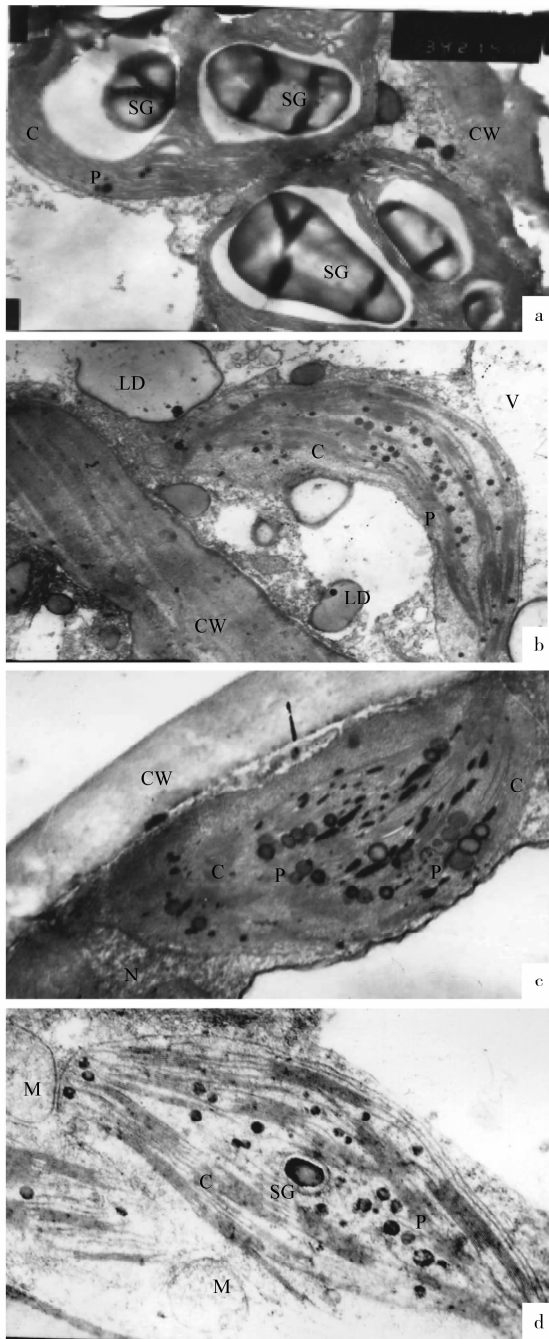


图 2 不同季节祁连圆柏和圆柏叶电镜照片

Fig. 2 Transmission electron micrographs of leaves from *S. przewalskii* and *S. chinensis* in different seasons.

a) 生长季节圆柏叶绿体内大而多的淀粉粒, 少量脂质球 (13 000 ×) Numerous and large starch grains, plastoglobuli in chloroplast of *S. chinensis* in growing season (13 000 ×); b) 休眠季节圆柏叶绿体内有较多脂质球, 变形的叶绿体 (66 000 ×) Many plastoglobuli in chloroplast of *S. chinensis* in dormancy season (66 000 ×); c) 生长季节祁连圆柏叶绿体内丰富的脂质球 (13 000 ×) Abundant plastoglobuli in chloroplast of *S. przewalskii* in growing season (13 000 ×); d) 休眠季节祁连圆柏叶绿体结构完整, 脂质球数量多 (13 000 ×) Integrity chloroplast mitochondria and many plastoglobuli *S. przewalskii* in dormancy season (13 000 ×); CW: 细胞壁 Cell wall; N: 细胞核 Nucleolus; V: 液泡 Vacuole; C: 叶绿体 Chloroplast; P: 脂质球 Plastoglobuli; SG: 淀粉粒 Starch grain; M: 线粒体 Mitochondria; LD: 油脂小滴 Lipid drop.

下陷, 存在明显的气腔. 叶肉细胞排列疏松, 气腔并相互贯通, 形成发达的通气组织, 没有明显的栅栏组织和海绵组织的分化, 是等面叶 (图 1a). 休眠季节, 除叶肉细胞收缩, 质壁分离以外 (图 1c), 其余结构没有明显的变化.

生长季节圆柏上下表皮均为双层, 外层细胞矩形, 细胞间隙小, 外被角质层, 气孔分布在下表皮, 气孔下陷, 气腔明显, 气腔周围叶肉细胞间隙大, 维管束周围叶肉部分间隙小, 细胞间隙不互相连通. 靠近上表皮有树脂道. 海面组织发达, 只有少数栅状细胞 (图 1b). 在休眠季节, 叶片的解剖结构除了叶肉细胞间隙变大、部分细胞已收缩、质壁分离以外 (图 1d), 其余结构没有明显的变化.

### 3.2 不同季节祁连圆柏和圆柏的亚显微结构

祁连圆柏叶片细胞壁厚. 在生长季节固定叶片中, 其叶绿体外膜清晰, 内部基质片层清楚, 脂质小球多, 线粒体结构完整, 且靠近叶绿体, 叶绿体内淀粉粒多 (图 2c); 而在休眠季节固定叶片中, 其叶绿体内部的脂质小球少, 淀粉粒没有或很小, 而且叶绿体内、外膜清晰, 内部基质片层排列整齐 (图 2d), 部分叶绿体互相靠近, 联合在一起.

在圆柏生长季节固定叶片中, 叶绿体外膜清晰, 内含许多淀粉粒, 叶绿体内含脂质小球较少 (图 2a). 而在休眠季节固定叶片中, 叶绿体外膜清晰, 内部基粒片层排列整齐; 部分叶绿体整体变成弓形, 脂质球增多, 并出现脂质小滴 (图 2b). 部分叶绿体互相靠近, 联合在一起.

### 3.3 不同季节祁连圆柏和圆柏的可溶性糖分含量

由图 3 可以看出, 1 月的圆柏和祁连圆柏叶片可溶性糖分含量均高于 8 月, 且圆柏可溶性糖分的含量高于祁连圆柏; 祁连圆柏的增幅较圆柏明显. 这说明气温降低时, 祁连圆柏和圆柏叶片可溶性糖分增高.

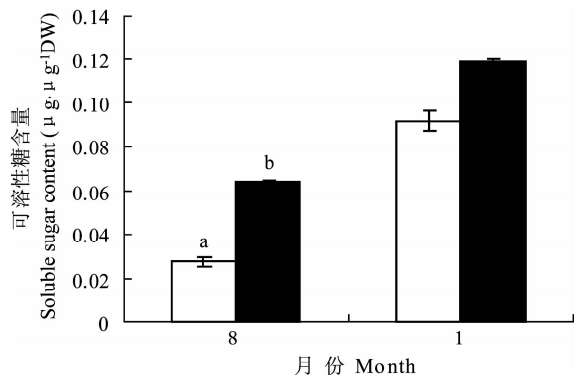


图 3 祁连圆柏 (a) 和圆柏 (b) 叶片可溶性糖分含量  
Fig. 3 Soluble sugar content in leaves of *S. przewalskii* (a) and *S. chinensis* (b).

## 4 讨 论

### 4.1 祁连圆柏和圆柏耐寒性差异

祁连圆柏天然林分布海拔较圆柏高<sup>[7]</sup>. 两种圆柏经过冬季低温后, 翌年恢复生长, 4月嫩芽和叶片颜色由冬季棕褐色变为绿色, 但圆柏部分枝条顶端着生叶发生干枯, 明显有冻伤的症状, 而祁连圆柏没有凋干枯的叶片, 可见祁连圆柏较圆柏更耐寒.

### 4.2 细胞间隙与圆柏的抗寒性

植物细胞外结冰可避免细胞内结冰, 有利于防止植物细胞结冰致死, 大的细胞外空间为细胞外结冰提供了有利的空间场所. 非洲肯尼亚高山植物 *Dendrosaeo kenicodendron* 外层叶片冰点为  $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而其能耐受  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  的低温. 冰冻叶片显微结构显示, 胞内水被挤放到细胞间隙结冰, 即便叶肉细胞 85% 的水流入周围的细胞间隙也不会使该空间完全被充满<sup>[19]</sup>. 本试验结果表明, 祁连圆柏和圆柏在生长季节的细胞间隙较大, 而冷冻季节发生质壁分离(图 1), 证明其在冬季  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下可以存活, 属常绿乔木. 而且其地上部分和叶片暴露在严冬空气中, 没有热带高山大型垫状植物外层枯叶, 更没有腋芽形成. 可见两种圆柏属植物大的细胞间隙对增强其耐寒能力具有重要作用.

### 4.3 叶绿体内淀粉粒积累与圆柏的抗寒性

在生长季节中, 圆柏和祁连圆柏叶绿体内淀粉粒较多; 而在冬季休眠季节则减少. 同时, 叶片中可溶性糖分含量增加, 表明生长季节积累淀粉, 在冬季休眠季节淀粉降解后生成可溶性糖分提高了细胞中溶质的浓度, 有利于降低冰点, 防止结冰. 这与欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 和挪威云杉 (*Picea abies*) 在休眠季节叶绿体内淀粉粒少的研究结果相一致<sup>[13, 14]</sup>. 赵天宏等<sup>[31]</sup> 研究发现, 发育良好的大豆叶绿体淀粉粒积累多, 而受损的叶绿体内淀粉粒少. 田景花等<sup>[26]</sup> 在研究黄瓜幼叶的冷稳定性时发现, 正常生长温度下黄瓜幼叶叶绿体内积累大量的淀粉粒, 而低温条件下淀粉粒消失. Nagao 等<sup>[21]</sup> 也发现, 低温条件下, 苔藓 *Physcomitrella patens* 可溶性糖分积累的同时叶绿体淀粉粒消失. 可溶性糖分作为渗透调节物质, 对冷冻引起的脱水具有减缓作用, 对细胞膜也有保护作用<sup>[16, 21]</sup>. 淀粉粒的减少或变小是低温使叶绿体受到影响的首要反应<sup>[15]</sup>. 由此可以认为, 淀粉粒消失和可溶性糖分的积累是两种圆柏属植物抗寒适应性性的表现, 而祁连圆柏可溶性糖分的增幅大

于圆柏, 表明祁连圆柏通过可溶性糖分积累提高抗冻性的调节能力强于圆柏.

研究表明, 低温处理时, 拟南芥细胞中可溶性糖分的积累并不伴随着叶绿体淀粉粒的消失<sup>[22]</sup>. 在缺氮<sup>[3]</sup>、酸雨<sup>[8]</sup>、高温<sup>[10, 29]</sup> 和低温胁迫<sup>[28]</sup> 条件下, 淀粉粒在植物叶绿体内的大量积累改变了类囊体结构, 造成对叶绿体的伤害, 影响了叶绿体内光合产物运转. 这说明叶绿体淀粉粒积累和抗性的关系受胁迫程度、物种间的差异影响较大.

### 4.4 叶绿体内脂质球积累与圆柏的抗寒性

研究表明, 类囊体降解时脂质球增多、变大, 类囊体合成时脂质球的数量减少<sup>[19]</sup>. 而且一些植物受到环境胁迫(如臭氧、干旱和酸雨等)时, 脂质球和脂质小滴数量增多和体积增大<sup>[1, 2, 11, 24]</sup>. Lichtenthaler<sup>[18]</sup> 和 Steinmüller 等<sup>[25]</sup> 研究结果显示, 脂质球的积累是类囊体受到伤害而降解的结果. 于颖等<sup>[30]</sup> 认为, 脂质球是叶绿体中类囊体降解后产生的脂类物质以脂质球的形式贮存, 未导致基粒片层和间质片层大量降解和脂质球数量增多. Ciamporová 等<sup>[5, 6]</sup> 研究发现, 冷冻胁迫下玉米叶绿体内脂质球增多. 唐华等<sup>[9]</sup> 的研究结果表明, 冬季沙冬青叶片中, 有解体现象的叶绿体周围脂质球较多, 而在发育良好的叶绿体附近较少. 本研究结果显示, 在生长季节, 两种圆柏属植物叶绿体内都有脂质球; 而休眠季节圆柏的脂质球数量增多, 并有脂质小滴, 祁连圆柏的脂质球数量减少, 没有脂质小滴(图 2). 这说明低温引起圆柏类囊体降解受阻或发生降解; 而祁连圆柏叶绿体较耐低温, 类囊体结构没有受到明显的影响. 这对维持其在冷冻条件下的正常光合作用有着重要意义.

## 参 考 文 献

- Anttonen S, Herranen J, Peura P, et al. 1995. Fatty acids and ultrastructure of ozone-exposed Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) needles. *Environ Pollut*, **87**: 235 ~ 242
- Anttonen S, Kärenlampi L. 1996. Slightly elevated ozone exposure causes cell structural changes in needles and roots of Scots pine. *Trees-Struct Funct*, **10**: 207 ~ 217
- Bondada BR, Syvertsen JP. 2005. Concurrent changes in net CO<sub>2</sub> assimilation and chloroplast ultra-structure in nitrogen deficient citrus leaves. *Environ Exp Bot*, **54**: 41 ~ 48
- Chen W-N (陈文年), Wu N (吴宁), Luo P (罗鹏). 2005. *Sabina przewalskii* community structure in the upper reaches of Minjiang River. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **16**(2): 197 ~ 202 (in Chinese)
- Čiamporová M, Trgüňová I. 1996. Ultrastructure of chloroplasts in leaves and of plastids in root tips of two maize lines differing in chilling tolerance. *Biológia (Bratislava)*, **51**: 441 ~ 447
- Čiamporová M, Trgüňová I. 1999. Modifications of plant cell ultrastructure accompanying metabolic responses to low temperatures.

- Biológia ( Bratislava)*, **54**: 349 ~ 360
- 7 Editorial Board of Forests in China (中国森林编辑委员会). 1999. Forests in China. Beijing: China Forestry Press. 1107 ~ 1142 (in Chinese)
  - 8 Gabara B, Sklodowska M, Wyrwicka A, et al. 2003. Changes in the ultrastructure of chloroplasts and mitochondria and antioxidant enzyme activity in *Lycopersicon esculentum* Mill. Leaves sprayed with acid rain. *Plant Sci*, **164**: 507 ~ 516
  - 9 Han S-H (韩晋华), Zhang H (张红), Wang S (王双). 1999. Electron microscopic observation on electron-dense structure in cytoplasm of *Ammopiathus mongolicus*. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **10**(5): 556 ~ 558 (in Chinese)
  - 10 Han X-B (韩奕冰), Li R-Q (利容千), Wang J-B (王建波). 1997. Cellular structural comparison between different thermo-resistant cultivars of *Raphanus Sativus* L. under heat stress. *J Wuhan Bot Res (武汉植物学研究)*, **15**(2): 173 ~ 178 (in Chinese)
  - 11 Holopainen T, Nygren P. 1989. Effect of potassium deficiency and simulated acid rain, alone or in combination, on the ultrastructure of Scots pine needles. *Can J For Res*, **19**: 1402 ~ 1411
  - 12 Kimball SL, Salisbury FB. 1973. Ultrastructural changes of plants exposed to low temperatures. *Am J Bot*, **60**: 1028 ~ 1033
  - 13 Kivimäenpää M, Jönsson AM, Stjernquist I, et al. 2004. The use of light and electron microscopy to assess the impact of ozone on Norway spruce needles. *Environ Pollut*, **127**: 441 ~ 453
  - 14 Kivimäenpää M, Sellén G, Sutinen S. 2005. Ozone-induced changes in the chloroplast structure of conifer needles, and their use in ozone diagnostics. *Environ Pollut*, **137**: 466 ~ 475
  - 15 Kratsch HA, Wise RR. 2000. The ultrastructure of chilling stress. *Plant Cell Environ*, **23**: 337 ~ 350
  - 16 Leslie SB, Israeli E, Lightart B, et al. 1995. Trehalose and sucrose protect both membranes and proteins in intact bacteria during drying. *Appl Environ Microbiol*, **61**: 3592 ~ 3597
  - 17 Li H-S (李合生). 2000. Principle and Technology of Plant Physiological-Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press. 114 ~ 118 (in Chinese)
  - 18 Lichtenthaler HK. 1968. Plastoglobuli and fine structure of the plastids. *Endeavour*, **27**: 144 ~ 149
  - 19 Lichtenthaler HK. 1969. Plastoglobuli und lipochinongehalt der chloroplasten von *Cereus peruvianus* (L.) Mill. *Planta*, **87**: 304 ~ 310
  - 20 Lu C-F (卢存福), Chen Y-Z (陈玉珍), Jian L-C (简隰成), et al. 2003. Roles of mucilage cells and the glycoproteins at the cell surface in the freezing tolerance of alpine plant *Rhodiola algida* var. *tangutica*. *Chin J Appl Environ Biol (应用与环境生物学报)*, **9**(1): 16 ~ 20 (in Chinese)
  - 21 Nagao M, Minami A, Arakawa K, et al. 2005. Rapid degradation of starch in chloroplasts and concomitant accumulation of soluble sugars associated with ABA-induced freezing tolerance in the moss *Physcomitrella patens*. *J Plant Physiol*, **162**: 169 ~ 180
  - 22 Ristic Z, Ashworth FN. 1993. Changes in leaf ultrastructure and carbohydrates in *Arabidopsis thaliana* (Heyn) cv. Columbia during rapid cold acclimation. *Protoplasma*, **172**: 111 ~ 123
  - 23 Shao X-M (邵雪梅), Fang X-Q (方修琦), Liu H-B (刘洪滨), et al. 2003. Dating the 1000-year-old Qilian Juniper in Mountains along the Eastern Margin of the Qaidam Basin. *Acta Geogr Sin (地理学报)*, **58**(1): 90 ~ 100 (in Chinese)
  - 24 Smith MD, Licatalosi DD, Thompson JE. 2000. Co-association of cytochrome *fc*atabolites and plastid-lipid-associated protein with chloroplast lipid particles. *Plant Physiol*, **124**: 211 ~ 222
  - 25 Steinmüller D, Tevini M. 1985. Composition and function of plastoglobuli II. Lipid composition of leaves and plastoglobuli during beech leaf senescence. *Planta*, **163**: 91 ~ 96
  - 26 Tian J-H (田景花), Zhang H (张红), Li M (李明), et al. 2002. Effect of AMP on the ultrastructure cold stability of cucumber young leaf cells. *J Chin Electr Microsc Soc (电子显微学报)*, **21**(2): 129 ~ 133 (in Chinese)
  - 27 Wang X-L (王勋陵), Wang J (王军). 1989. Plant Shape Structure and Environments. Lanzhou: Lanzhou University Press. 16 ~ 22 (in Chinese)
  - 28 Wei J (魏捷), Yu H (余辉), Kuang T-Y (匡廷云), et al. 2000. Ultrastructure of *Polygonum viviparum* L. grown at different elevations on Qinghai Plateau. *Acta Phytoecol Sin (植物生态学报)*, **24**(3): 304 ~ 307 (in Chinese)
  - 29 Xu S, Li JL, Zhang XQ, et al. 2006. Effects of heat acclimation pretreatment on changes of membrane lipid peroxidation, antioxidant metabolites, and ultrastructure of chloroplasts in two cool-season turfgrass species under heat stress. *Environ Exp Bot*, **3**: 274 ~ 285
  - 30 Yu Y (于颖), Liu Y-Y (刘元英), Luo S-G (罗盛国), et al. 2003. Effects of selenium on soybean chloroplast structure and microelement content of soybean leaves under continued cropping stress. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **14**(4): 573 ~ 576 (in Chinese)
  - 31 Zhao T-H (赵天宏), Shi Y (史奕), Huang G-H (黄国宏). 2003. Effect of doubled CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentration and their interactions on ultrastructure of soybean chloroplast. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **14**(12): 2229 ~ 2232 (in Chinese)

作者简介 张有福,男,1978年生,博士研究生.主要从事逆境植物学研究,发表论文3篇. 电话: 0931-4967373; E-mail: zylfgau@163.com

责任编辑 李凤<sup>王</sup>