

美国黄松、班克松和油松的抗寒性比较*

龚月桦¹ 周永学² 樊军锋^{2*} 刘迎洲¹ 庞珂佳¹(¹ 西北农林科技大学生命科学院, 陕西杨凌 712100; ² 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 通过人工冰冻和电导率测定, 对黄土丘陵沟壑区引种栽培的美国黄松、班克松和乡土树种油松的抗寒性进行了鉴定, 并探讨其抗寒机理. 结果表明, 班克松的抗寒性比油松强, 而美国黄松的抗寒性比油松弱. 班克松的束缚水/自由水比值高达 7.0, 组织中 ABA 含量高达 164.3 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW; 但可溶性糖和 K^+ 含量较低, 分别为 12.0% 和 2 450 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ DW. 油松则是可溶性糖、 K^+ 和 ABA 含量都较高, 分别为 18.68%、4 538 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ DW 和 95.8 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW; 束缚水/自由水比值较低, 为 2.58. 美国黄松的可溶性糖含量较高, 18.05%; 但束缚水/自由水比值、 K^+ 和 ABA 含量都较低, 分别为 2.18、2 275 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ DW 和 63.3 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW, 可能是其抗寒性较弱的原因. 班克松较低叶绿素含量和较高类胡萝卜素/叶绿素比值对其抗寒性也有贡献. 说明 3 种树种虽然都是抗寒树种, 但其内在机理仍有差异.

关键词 美国黄松 班克松 油松 抗寒性 ABA

文章编号 1001-9332(2006)08-1389-04 中图分类号 Q945.7 文献标识码 A

Cold hardiness of *Pinus ponderosa*, *P. banksian* and *P. tabulaeformis*. GONG Yuehua¹, ZHOU Yongxue², FAN Junfeng², LIU Yingzhou¹, PANG Kejia¹ (¹College of Life Science, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; ²College of Forestry, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(8): 1389 ~ 1392.

By the method of artificial freezing, this paper made a comparative study on the cold hardiness of *Pinus ponderosa*, *P. banksiana* and *P. tabulaeformis*, with their inherent mechanisms approached. The results showed that the cold hardiness of these three species was in the sequence of *P. banksiana* > *P. tabulaeformis* > *P. ponderosa*. *P. banksiana* had high bound water/free water ratio (7.0) and ABA content (164.3 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) but low K^+ (2 450 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ DW) and soluble sugar (12.0%), *P. tabulaeformis* had higher contents of ABA (95.8 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW), K^+ (4 538 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ DW) and soluble sugar (18.68%) but low bound water/free water ratio (2.58), while *P. ponderosa* had high soluble sugar content (18.05%) but low bound water/free water ratio (2.18) and K^+ (2 275 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ DW) and ABA (63.3 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ FW) contents. These differences might be the reasons resulting in the different cold hardiness of these three species. Low chlorophyll content and high carotenoid/chlorophyll ratio might also contribute to the cold hardiness of *P. banksiana*. Therefore, though the test species are all of cold hardiness, their inherent mechanisms may be different.

Key words *Pinus ponderosa*, *P. banksiana*, *P. tabulaeformis*, Cold hardiness, ABA.

1 引言

20 世纪 70 年代中期至 80 年代初期, 为了丰富黄土高原树种资源, 加速黄土高原森林植被和城市森林生态体系建设, 陕西省开始了针叶树引种工作. 延安树木园先后收集引种松属 16 个种和变种, 其中表现较好的有油松 (*Pinus tabulaeformis*)、樟子松 (*P. sylvestris* var. *mongolica*)、奥地利黑松 (*P. nigra*)、美国黄松 (*P. ponderosa*)、花旗松 (*Pseudotsuga menziesii*)、班克松 (*P. banksiana*) 等. 国外有关美国黄松和班克松半致死温度研究已有一些报道^[12, 16], 但抗寒力不仅与植物种类有关, 还与生长环境有关^[1]. 这些树种引种到黄土高原后抗寒力如何? 一般认为, 在秋季日照逐渐变短、气温逐渐降低过程中, 多年生木本植物总含水量逐渐降低, 束

缚水含量升高, 细胞内大量累积可溶性溶质(可溶性糖、氨基酸、 K^+ 等), ABA 大量合成, 植物生长停止、进入休眠, 抗寒性大大提高^[20]. 因此, 本文以早期延安树木园引种的美国黄松、班克松和乡土树种油松为材料, 探讨了其抗寒性机理, 进一步掌握美国黄松、班克松的生理生态特性, 为扩大引种奠定理论基础.

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

引种区位于陕西省延安市宝塔区杨家湾(100°31'E, 36°36'N). 该地属黄土丘陵沟壑区暖温带大陆性季风气候, 年平

* 国家林业局“948”技术引进项目和陕西省林业厅西部造林工程资助项目.

** 通讯联系人. E-mail: fanjf@public.xa.sn.cn

2005-07-29 收稿, 2006-06-05 接受.

均气温 9.4 °C, 极端最高气温 39.9 °C, 极端最低气温 -28.5 °C, ≥10 °C 积温 3 268.4 °C, 1 月平均气温 -6.7 °C, 7 月平均气温 22.9 °C. 年平均降水量 550 mm, 年蒸发量 1 585 mm, 年平均相对湿度 62%, 无霜期 180 d, 年日照时数 2 515 h, 最大冻土深 76 cm. 土壤母质为黄土, 土壤以黄壤为主, pH 8.4, 土层达 100 cm 以上^[27].

2005 年 1 月中旬在引种地延安树木园, 取美国黄松、班克松和油松针叶供试.

2.2 研究方法

1) 相对电导率(电解质渗出率)测定: 将样品针叶分别置于 -10、-20、-30 和 -40 °C 低温冰箱(温度波动范围 ±1 °C)中处理 12 h, 然后用电导仪法测定^[21]; 2) 叶绿素和类胡萝卜素含量测定: 80% 丙酮黑暗中浸提 24 h, 在 663、646 和 470 nm 处比色测定吸光度, 用 Lichtenthaler 公式计算叶绿素和类胡萝卜素含量^[11]; 3) ABA 含量测定: 称取鲜样 0.5 g, 放入 3 ml 80% 甲醇中, 于 -40 °C 低温保存备用. 采用间接免疫吸附检测法(ELISA)测定 ABA^[22], 试剂盒由中国农业大学激素研究室提供; 4) 可溶性糖含量测定: 采用酚-噻酮法^[5], 游离氨基酸总量测定采用茚三酮法^[5], 自由水和束缚水含量测定采用马林契克法^[5], K⁺ 含量测定采用原子吸收分光光度法. 以上测定均重复 3 次.

2.3 数据处理

通过 Excel 2003 和 SPSS 11.5 统计分析软件处理数据, 采用 Duncan's 新复极差检验差异显著性.

3 结果与分析

3.1 低温处理后不同树种针叶的电导率及抗寒性

由表 1 可以看出, 各树种针叶的相对电导率随处理温度降低而明显上升. 经 Logistic 方程拟合, 3 个回归模型均差异显著 (P < 0.05); 用拟合的 Logistic 方程的拐点温度表示组织的半致死温度 LT₅₀ (表 2), 结果表明, 班克松的 LT₅₀ 为 -28.2 °C、美国黄松为 -11.3 °C、油松为 -15.2 °C. 说明 3 个树种中, 班克松抗寒性最强, 油松次之, 美国黄松较弱.

表 1 不同低温处理各树种针叶的电导率
Table 1 Conductivity of pine conifer at different low temperature

树种 Species	电导率 Conductivity (%)			
	-10 °C	-20 °C	-30 °C	-40 °C
A	40.42 ± 2.71	45.87 ± 2.02	48.68 ± 2.54	57.98 ± 1.45
B	47.35 ± 1.92	61.62 ± 0.23	79.13 ± 2.12	80.61 ± 2.71
C	37.44 ± 1.93	58.95 ± 2.08	63.39 ± 3.15	65.66 ± 2.73

A: 班克松 *P. banksiana*; B: 美国黄松 *P. ponderosa*; C: 油松 *P. tabulaeformis*. 下同 The same below. * 表示 3 次测定平均值 ± 标准误差 Data = mean ± SE.

3.2 不同树种针叶的自由水和束缚水含量

由表 3 可以看出, 3 个树种的水含量远低于一般新鲜植物组织 70% ~ 80% 的水含量, 而且束缚水含量较高, 自由水含量较低. 但树种间差异仍较大: 班克松总含水量较低, 自由水含量最低, 束缚水含量

最高, 因而束缚水/自由水比值很大; 而美国黄松和乡土树种油松相似, 其自由水含量相对较高, 束缚水含量较低, 因而束缚水/自由水比值低.

表 2 各树种低温电导率回归模型及离体组织半致死温度 (LT₅₀)
Table 2 Regression models of conductivity and the tissue's median lethal temperature (LT₅₀) of pines

树种 Species	回归模型 Regression model	R ²	P	LT ₅₀ (°C)
A	$y = \frac{99.2}{1 + e^{0.625 + 0.022687x}}$	0.7591	0.0002	-28.2 a
B	$y = \frac{87.3}{1 + e^{0.6869 + 0.08717x}}$	0.9298	0.0000	-11.3 c
C	$y = \frac{67.5}{1 + e^{1.2221 + 0.14977x}}$	0.9174	0.0003	-15.2 b

* LT₅₀ 通过模拟法检验 LT₅₀ have been tested by simulation. 不同字母表示差异显著 Different letters meant significant difference at 0.05 level.

表 3 不同树种针叶中自由水和束缚水含量
Table 3 Free water and bound water content of pine conifer

树种 Species	自由水 Free water content (%)	束缚水 Bound water content (%)	总含水量 Total water content (%)	束缚水/ 自由水 Bound water/ free water
A	5.88 b	41.21 a	47.08 b	7.00 a
B	16.64 a	36.29 b	52.93 a	2.18 b
C	14.61 a	37.72 b	52.32 a	2.58 b

* Duncan's 新复极差测验 Data have been tested by Duncan's shortest significant ranges (SSR). 下同 The same below.

3.3 不同树种针叶中可溶性糖、游离氨基酸和 K⁺ 含量

植物在遭受水分亏缺、寒冷或盐渍等逆境时, 可以通过累积可溶性溶质进行渗透调节来增强对逆境的适应能力, 如可溶性糖、氨基酸、K⁺、Cl⁻ 等^[15, 23]. 测定结果(表 4)表明, 3 个树种针叶中累积的可溶性糖和 K⁺ 含量都较高, 但游离氨基酸总量很低, 说明可溶性糖和 K⁺ 在 3 个树种的抗寒性中起较大作用. 其中油松的 K⁺ 含量很高, 美国黄松和油松的可溶性糖含量都较高, 而抗寒性最强的班克松可溶性糖和 K⁺ 含量却相对较低.

表 4 不同树种针叶可溶性糖、游离氨基酸和 K⁺ 含量
Table 4 Content of soluble sugar, free AA and K⁺ in pine conifer

树种 Species	可溶性糖 Soluble sugar content (%)	游离氨基酸总量 Free AA content (ng g ⁻¹ DW)	K ⁺ 含量 K ⁺ content (μg g ⁻¹ DW)
A	12.00 b	0.36 a	2450 b
B	18.05 a	0.40 a	2275 b
C	18.68 a	0.37 a	4538 a

3.4 不同树种针叶中叶绿素和类胡萝卜素含量

由表 5 可以看出, 3 个树种的类胡萝卜素含量无差异, 但班克松的叶绿素含量最低; 班克松类胡萝卜素和叶绿素的比值最高, 美国黄松最低.

3.5 不同树种针叶中 ABA 含量

一般植物体内 ABA 含量很低^[20]. 由图 1 可

表 5 不同树种针叶中叶绿素和类胡萝卜素含量
Table 5 Content of chlorophyll and carotenoid in different pine conifers

树种 Species	叶绿素含量 Chlorophyll content (mg g ⁻¹ DW)	类胡萝卜素含量 Carotenoid content (mg g ⁻¹ DW)	Car/Chl
A	7.758 b	2.390 a	0.308 a
B	11.948 a	2.324 a	0.194 c
C	10.598 a	2.695 a	0.254 b

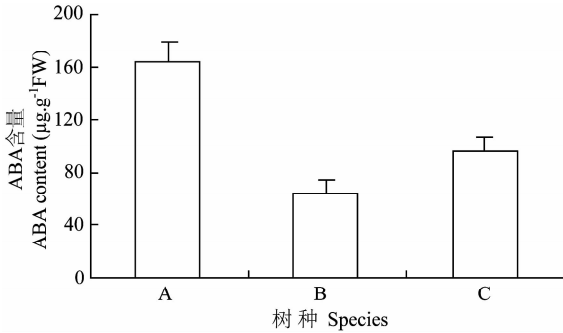


图 1 不同树种针叶中 ABA 含量

Fig. 1 Content of ABA in different pine conifers.

A: 班克松 *P. banksiana*; B: 美国黄松 *P. ponderosa*; C: 油松 *P. tabulaeformis*.

以看出, 1 月份取样 3 个松树树种 ABA 含量都较高. 这与其经历了自然界从秋到冬逐渐降温锻炼有关. 但是不同树种的 ABA 含量仍有较大差异: 美国黄松的 ABA 含量最低 ($63.3 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)、油松显著高于美国黄松 ($95.8 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$), 而班克松最高, 为 $164.3 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$.

4 讨 论

4.1 不同树种间的抗寒性

松属树木广泛分布在北半球, 其适应性强, 耐干旱贫瘠, 能耐 $-60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温或 $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温^[25]. 但不同树种间的抗寒性仍有差异, 因此在引种工作中仍需要对其抗寒性进行鉴定. Sukumakan 等^[18]提出以电解质渗透率 50% 时的温度作为组织半致死温度 (LT_{50}), 在植物抗寒性鉴定中已广泛应用^[14, 17, 21, 26]. 也有人认为, 用 Logistic 方程对电解质渗透率 (电导率) 进行拟合, 用拐点温度表示组织半致死温度, 与真实情况较为接近, 受浸泡时间影响很小^[28]. 差热分析方法十分简单, 结果也较可信^[19]. 而以电导率确定植物的冷害致死温度是一项成熟的技术, 本文仍以人工冰冻和电导法对引种 20 年后的班克松、美国黄松和乡土树种油松的电导率进行测定, 然后用 Logistic 方程进行拟合, 用拐点温度表示组织半致死温度. 测算班克松的半致死温度 (LT_{50}) 最低, 抗寒性最强; 美国黄松的 LT_{50} 最高, 抗

寒性较弱.

Boyce 等^[16]报道美国黄松的半致死温度为 $-12 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 本研究测算的结果 ($-11.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 与之非常接近; 国外研究班克松的致死温度低于 $-80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[12], 而本研究测算班克松的半致死温度为 $-28.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 差异较大. 其原因可能是班克松原产地北缘在加拿大北部近北回归线地区, 其常年最低温度低于 $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[12, 20], 经受了充分的低温锻炼, 所以抗寒性很强, 测算的致死温度很低; 引种到我国黄土高原的 20 年间, 已适应了当地温暖的气候, 未曾得到充分的低温驯化, 其抗寒能力没有充分表现出来, 所以测算的致死温度差异较大. 靳月华等^[9]报道, 油松在 $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时电导率已超过 50%, 是因试验在 9 月份 (沈阳) 进行, 油松并未经历完全的低温锻炼; 而本试验是在深冬进行, 油松已经历了从秋到冬充分的低温锻炼, 测算班克松的半致死温度为 $-15.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 应该是合理的. 对经过充分寒冷锻炼的越冬植物来说, 抗寒性测定的试验结果经常不一致^[8]. 所以, 植物抗寒能力不仅与植物的种类、来源有关, 还与生长地区的环 境和经历有关.

4.2 不同树种间的抗寒机理

在自然条件下, 木本植物分两个阶段获得抗寒性: 第 1 阶段, 初秋的低温和短日照使植物生长停止, 累积可溶性糖等溶质和 ABA, 抗寒力增强, 细胞可以忍耐 $-5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的低温; 第 2 阶段, 木本植物经几天 $-5 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温刺激, 抗寒力进一步增强, 可忍耐 $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 甚至更低的温度. 在第 1 阶段, ABA 对抗寒性的提高有重要作用. 它可以促使生长停止, 还会诱导与抗性有关的基因表达; 而溶质的累积可以降低冰点, 防止结冰. 在第 2 阶段抗冻的机制主要是抑制冰核形成, 细胞质中的水分就不会结冰, 细胞经历过冷 (supercooling)^[2, 21].

对 3 个松树树种抗寒性机理的研究结果表明, 其总含水量都较低, 束缚水含量较高, 组织 K^+ 、可溶性糖和 ABA 含量都较高. 但不同树种间仍有较大差异: 班克松的 ABA 含量很高, 使其秋冬季节生长停止早, 诱导其抗寒性增强; 束缚水/自由水比值非常高, 束缚水多而自由水非常少 (5.88%), 低温时少量自由水容易撤退到细胞外, 而束缚水不能结冰却可以稳定细胞质, 致使细胞内可结冰的水非常少, 所以虽然溶质 (可溶性糖和 K^+) 较少, 但冰点仍会很低, 所以耐冻性很强. 油松和美国黄松的 ABA 含量相对较低, 虽然可溶性糖或 K^+ 含量较高, 但束缚水/自由水比值较低, 自由水含量明显较高, 冰点

相对也较高,抗寒性相对较弱.因此,对3个松树树种来说,ABA和束缚水含量升高及自由水含量降低对抗寒性的贡献较大,而可溶性溶质增加对抗寒性的贡献次之.

此外,过冷现象也是导致3种松树抗寒性差异的原因之一,尤其是班克松.

4.3 色素与抗寒性的关系

试验中发现,松树是常绿越冬植物,一般在冬天应是绿色,但班克松的针叶明显发黄;推测是类胡萝卜素含量较高.因为类胡萝卜素除了可以吸收光能用于光合作用外,还是植物体内的保护物质,可以清除逆境过程中累积的自由基和活性氧^[3,4,7].测定结果表明,班克松的类胡萝卜素含量并不高,但其叶绿素含量显著低于其它两个松树种.说明班克松是抗寒性非常强的树种^[12].

叶绿素是光合作用光反应中吸收光能的主要色素,而光反应是物理过程,对温度不敏感;碳同化却是酶促反应,很容易受低温抑制^[13,20].因此,越冬常绿植物在冬季气温很低时,光合碳同化的能力很弱,而较多的叶绿素会吸收较多光能,容易发生光抑制,产生活性氧,对植物造成伤害^[2,6,13].班克松的叶绿素含量较低而类胡萝卜素/叶绿素比值较高,可以避免或减少低温下光抑制的发生,减轻对植物的伤害,由此分析其对班克松耐受低温伤害可能也有一定贡献.靳月华等^[10]也报道,耐寒性强的松树冬季叶绿素含量下降,在1月时最低,以后又回升,说明叶绿素一定程度分解有利于耐冻性的提高.

一般认为,低温时植物叶绿素含量较高,可以保持一定的光合速率,合成一定的有机物,对抗寒性有贡献^[24].本研究结果表明,在不同环境和不同植物中,叶绿素含量的高低与抗寒性的关系有所差异.对于一般植物(如小麦、油菜),在 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的低温情况下,叶绿素含量较高,还能有一定程度的光合作用,合成有机物质,可以维持呼吸需要,也利于形成可溶性糖等溶质进行渗透调节,对抗寒有利;但对于处在极端低温环境的植物,降低叶绿素含量是其适应低温环境之一.

参考文献

- Beck EH, Heim R, Hansen J. 2004. Plant resistance to cold stress: Mechanisms and environmental signals triggering frost hardening and dehardening. *J Biosci*, **29**: 449 ~ 459
- Bigras FJ, Colombo SJ. 2001. *Conifer Cold Hardiness*. Dordrecht: Kluwer. 165 ~ 186
- Chen P-Z (陈屏昭), Wang L (王磊), Dai X (代勋). 2005. Dissipation mechanism of excessive energy in umbilical orange under phosphorus deficiency and strong light stress. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **16** (6): 1061 ~ 1066 (in Chinese)
- Feng Y-L (冯玉龙), Zhang Y-J (张亚杰), Zhu C-Q (朱春全). 2003. Relationship between photo-inhibition of photosynthesis and reactive oxygen species in leaves of poplars suffering root osmotic stress. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **14** (8): 1213 ~ 1217 (in Chinese)
- Gao J-F (高俊凤). 2000. *Experiment Technology of Plant Physiology*. Xi'an: World Books Press. (in Chinese)
- Gillies SL, Vidaver W. 1990. Resistance to photo damage in evergreen conifers. *Physiol Plant*, **80**: 148 ~ 153
- Gilmore AM. 1997. Mechanistic aspects of xanthophylls cycle dependent photoprotection in higher plant chloroplasts and leaves. *Physiol Plant*, **99**: 197 ~ 209
- Gusta LV, Fowler DB. 1976. Effects of temperature on dehardening and rehardening of winter cereals. *Can J Plant Sci*, **56**: 673 ~ 678
- Jin YH, Tao DL, Hao ZQ. 2003. Environmental stresses and redox status of ascorbate. *Acta Bot Sin*, **45**: 795 ~ 801
- Jin Y-H (靳月华), Tao D-L (陶大立), Du Y-J (杜英君). 1990. Freezing tolerance, pigments and SOD of five conifers in Shenyang. *Acta Bot Sin (植物学报)*, **32** (9): 702 ~ 706 (in Chinese)
- Li H-S (李合生). 2000. *Experiment Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry*. Beijing: Higher Education Press. 134 (in Chinese)
- Marchand PJ. 1996. *Life in the Cold: An Introduction to Winter Ecology*. Hanover, New Hampshire: New England University Press.
- Öquist G, Huner NPA. 2003. Photosynthesis of overwintering evergreen plants. *Annu Rev Plant Biol*, **54**: 329 ~ 355
- Pan X-Y (潘晓云), Wang G-X (王根轩), Cao D-Q (曹东平). 2002. Winter injury index and lethal low temperature for introduced America almond in Lanzhou, China. *Acta Horti Sin (园艺学报)*, **29** (1): 63 ~ 65 (in Chinese)
- Ren H-X (任红旭), Chen X (陈雄), Wang Y-F (王亚馥). 2000. Response of wheat seedlings with different resistance to water deficiency and NaCl. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **11** (5): 718 ~ 722 (in Chinese)
- Royce EB, Barbour MG. 2001. Mediterranean climate effects II. Conifer growth phenology across a Sierra Nevada ecotone. *Am J Bot*, **88**: 919 ~ 932
- Shi Q-H (史清华), Gao J-S (高建社), Wang J (王军). 2003. Determination and evaluation of cold resistance of 5 poplar clones. *Acta Bot Boreali-Occident Sin (西北植物学报)*, **23** (11): 1937 ~ 1941 (in Chinese)
- Sukumakan NP, Weiser CJ. 1972. Method of determining cold hardiness by electrical conductivity in potato. *Hortic Sci*, **7**: 467 ~ 468
- Su W-A (苏维埃), Pan L-W (潘良文). 1994. Research on the mechanism of supercooling in flower buds of *Camellia oleifera*. *Sci China (Series B) (中国科学·B辑)*, **24** (5): 503 ~ 510 (in Chinese)
- Taiz L, Zeiger E, eds. 2002. *Plant Physiology*. 3rd edition. Sunderland, MA, USA: Sinauer Associates Inc. 607 ~ 611
- Tang J-L (唐季林), Xu H-C (徐化成). 1989. Research on the relation between the cold resistance and provenance of Chinese pine. *J Beijing For Univ (北京林业大学学报)*, **11** (1): 53 ~ 60 (in Chinese)
- Tang Z-C (汤章城). 1999. *Experiment Guide of Modern Plant Physiology*. Beijing: Science Press. 283 (in Chinese)
- Thomashow MF. 2001. So what's new in the field of plant cold acclimation? Lots! *Plant Physiol*, **125**: 89 ~ 93
- Wang R-F (王荣富). 1987. The kind of plant hardiness criteria and their application. *Plant Physiol Commun (植物生理学通讯)*, (3): 49 ~ 55 (in Chinese)
- Wu Z-L (吴中伦). 1983. *An Introduction to Foreign Tree Species Introduction*. Beijing: Science Press. 85 ~ 150 (in Chinese)
- Yang M-S (杨敏生), Wang C-H (王春花), Pei B-H (裴保华). 1997. Cold resistance of hybrid clone of white poplar. *J Northeast For Univ (东北林业大学学报)*, **25** (4): 20 ~ 23 (in Chinese)
- Zhao Z (赵忠), Li P (李鹏), Wang N-J (王乃江). 2000. Distribution patterns of root systems of main planting tree species in Weiwei Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **11** (1): 37 ~ 39 (in Chinese)
- Zhu G-H (朱根海), Zhu P-R (朱培仁). 1984. Seasonal variations of cold hardiness in winter wheat and its relation to temperature. *J Nanjing Agric Coll (南京农学院学报)*, (2): 9 ~ 17 (in Chinese)

作者简介 龚月桦,女,1971年生,博士,副教授.主要从事植物抗性生理方面的研究,发表论文20余篇.邮编:029-87091290; E-mail: gongyh01@163.com

责任编辑 李凤

