

## 8 种木本植物木质部栓塞变化与生理生态指标间关系的研究(II) ——与光合生理生态指标的关系

安 锋<sup>1,3</sup>, 蔡 靖<sup>1</sup>, 姜在民<sup>2</sup>, 张远迎<sup>2</sup>, 赵平娟<sup>1</sup>, 张硕新<sup>1</sup>\*

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 西北农林科技大学 生命学院; 3. 中国热带农业科学院 橡胶研究所, 海南 儋州 571737)

**摘 要:**选取西北农林科技大学西林校区校园内自然状况下生长良好的耐旱树种刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、元宝枫(*Acer truncatum*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、白榆(*Ulmus pumila*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、白皮松(*Pinus bungeana*)及中生树种女贞(*Ligustrum lucidum*)、柳树(*Salix matsudana* Koidz. f. *pendula*)为研究对象,测定了它们3个季节内的木质部栓塞日变化规律及其与光照强度、大气温度、气孔导度、蒸腾速率等生理生态指标的关系。结果表明:光照强度、大气湿度和大气温度主要是通过对植物气孔运动、蒸腾作用和体内水分关系的调节对木质部栓塞起作用的;木质部栓塞是植物一天生长过程中不可避免的“平常事件”,与植物的光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率间存在一定的相关关系;它的发生和恢复可能是某些植物适应水分胁迫的一种机制。

**关键词:**木质部栓塞;生态指标;生理指标

**中国分类号:**S718.43

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-7461(2006)01-0037-06

Relationships between Xylem Embolism and Ecophysiological Indexes in Eight Woody Plants *in situ* (II): -The Relationship with Photosynthetic Ecophysiological Indexes

AN Feng<sup>1,3</sup>, CAI Jing<sup>1</sup>, JIANG Zai-min<sup>2</sup>, ZHANG Yuan-ying<sup>2</sup>,

ZHAO Ping-juan<sup>1</sup>, ZHANG Shuo-xin<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Life Sciences, Northwest A&F University; 3. Rubber Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Sciences, Danzhou, Hainan 571737, China)

**Abstract:** The relationship between xylem embolism and ecophysiological indexes (i. e. photosynthetic available radiation, temperature, relative humidity, photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and water use efficiency) in eight tree species was measured *in situ*. The tree species are *Robinia pseudoacacia* L., *Acer truncatum* Bge., *Hippophae rhamnoides* L., *Ulmus pumila* L., *Pinus tabulaeformis* Carr., *Pinus bungeana* Zucc. ex Endl., *Ligustrum lucidum* Ait., *Salix matsudana* Koidz. f. *pendula* Schneid. grown well on Xi-lin campus of Northwest A&F University. The results indicated that available photosynthetic radiation, air temperature and relative humidity could affect xylem embolism by adjusting stomatal conductance, transpiration rate and water relations of a tree in one day. Embolism was a common case in the daily growth of the plants, there were some correlations between xylem embolism and photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, and water use efficiency. The embolism and re-filling might be a mechanism adaptable to water stress for some tree species.

**Key words:** xylem embolism; ecological indexes; physiological indexes

收稿日期: 2005-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(30170766); 教育部“优秀青年教师资助计划”项目

作者简介: 安 锋(1977-), 男, 陕西岐山人, 硕士, 助理研究员, 主要从事树木生理生态及农林生态系统方面的研究。

\* 通讯作者: 张硕新

木质部栓塞是植物遭遇水分胁迫时极易发生的一种“平常事件”,它的直接后果是降低了植物木质部的导水率,从而影响植物的正常生理活动<sup>[1,2]</sup>。许多研究证明,木质部栓塞具有日变化和季节变化<sup>[3~6]</sup>,但对这种日变化与植物一天中生理活动变化间关系的研究国内外均无报道。为此,本文选取6个不同耐旱类型树种和2个中生树种,分别于2002年4月、6月和8月、10月它们春季、夏季、秋季木质部栓塞状况与气孔导度、蒸腾速率、大气湿度、大气温度等生理、生态指标日变化间的关系进行了研究。

## 1 材料与方法

选取西北农林科技大学西林校区校园内自然状况下生长良好的低水势忍耐脱水耐旱树种刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和元宝枫(*Acer truncatum*)<sup>[7]</sup>、亚低水势忍耐脱水树种沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和白榆(*Ulmus pumila*)<sup>[7]</sup>、高水势延迟脱水耐旱树种油松(*Pinus tabulaeformis*)、和**乌皮松**(*Pinus bungeana*)<sup>[7]</sup>及中生树种女贞(*Ligustrum lucidum*)和柳树(*Salix matsudana*Koidz. f. *pendula*)的一年生枝条为研究对象。其中刺槐、油松、白皮松树龄为15~20 a,元宝枫、白榆、女贞、柳树为10~13 a,沙棘3 a。

每种树种选取天气晴好的日子,在同一天从早晨6时到下午6时每3 h在选定树木南部剪下粗度适中的一年生枝条5~6条,装入放有湿纸的黑塑料袋,立即带回实验室进行枝条的水势(WP, MPa)和导水率( $L$ ,  $\text{mg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )测定。每个季节测定3 d,每次测2个重复。水势WP(MPa)测定使用压力室法<sup>[8]</sup>,枝条导水率 $L$ ( $\text{mg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )测定使用冲洗法<sup>[4,9]</sup>(申卫军等, Sperry et al.),冲洗液为 $14.2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 抗坏血酸溶液。植物木质部的栓塞程度用导水率损失百分数PLC(%)来衡量,PLC的计算公式为: $\text{PLC}\% = 100 \cdot (L_{\max} - L_0) / L_{\max}$ (其中,PLC为导水率损失百分数; $L_0$ ( $\text{mg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )为冲洗之前在0.01 MPa压力梯度下测定的切段的初始导水率; $L_{\max}$ ( $\text{mg} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )为在0.125 MPa的加压溶液下反复冲洗切段后,在0.01 MPa压力梯度下测得的切段的最大导水率)。同时,每次采样前用便携式光合测定仪(LI6400型, Li—Cor., 美国)测定叶片的净光合速率 $P_n$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、蒸腾速率 $T_r$ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$ )

和气孔导度 $G_s$ ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )和水分利用效率 $WUE$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )等生理指标,用仪器自带的传感器测定光合有效辐射 $PAR$ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )、大气湿度 $RH$ (%)、大气温度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )等生态指标。

## 2 结果与分析

### 2.1 木质部栓塞状况与生态指标的关系

已有研究结果表明,木质部栓塞与温度、降水等生态因子有着密切的关<sup>[10,11]</sup>。

由图1(a、b)可看出,植物木质部水势和PLC的日变化与光合有效辐射、大气湿度及大气温度日变化规律间有一定的联系,并且在各个季节内表现出了相似的变化规律。清晨温度较低、光合有效辐射较小、相对湿度较大,所以木质部的水势较高,栓塞程度较小,伴随着光合有效辐射的增加,在9:00左右大气温度升高、湿度降低时,木质部水势有所降低、木质部栓塞程度有所增大,有些树种(如沙棘和柳树)的木质部栓塞程度在此时达到最大值;因各树种木质部栓塞恢复特性及树体内水分特征等的不同,在12:00左右光合有效辐射最大、温度继续升高、湿度继续减小的时候,刺槐、元宝枫、油松的水势在继续减小,PLC也进一步增大,而柳树、女贞(春季、夏季及平均值)、白榆(夏季、秋季及平均值)的木质部栓塞在水势有所降低的同时却有一定的恢复;在下午大气温度最高,相对湿度最小,光合有效辐射有所减小的15:00左右,柳树、女贞(春季、夏季及平均值)、白榆(秋季)的水势达到一天中的最低值,PLC也达到一天中的第二次峰值,刺槐、元宝枫、沙棘的水势依然较低,PLC也维持在较高的水平,但已开始恢复;18:00左右,伴随着温度的降低、光合有效辐射的减小以及相对湿度的回升,各树种的水势及PLC都有一定程度的恢复。

### 2.2 木质部水势和栓塞状况与生理指标的关系

张硕新等认为,温度与降水情况同木质部水势和栓塞程度间存在着密切的关系,在生长季节,主要是水分因子的影响,冬季则低温和干旱的双重影响<sup>[10]</sup>。但一天内,植物根系分布区的土壤水分状况变化一般不会很大,所以在生长季内、天气晴朗的一天中,植物水势和木质部栓塞程度的波动完全可以认为是因为光照、温度和湿度等引起植物代谢过程的变化所造成的。



图 1 8 个树种不同季节木质部栓塞及几个生理生态指标的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of xylem embolism and several ecophysiological indexes for 8 trees in different seasons

注:图中坐标横轴 1-5 表示的是每个季节从早晨 6:00 到下午 6:00 每小时测定一次的测定时间

8 个树种各生长季内木质部水势、PLC、光合速率、蒸腾速率、气孔导度及水分利用效率的日变化规律如图 1(a,c)。可以看出,属于高水势延迟脱水耐旱的针叶树白皮松和油松几乎不会发生木质部栓塞,偶尔发生的木质部栓塞与气孔导度和蒸腾速率呈一定的正相关,但在各个季节间比较时也不存在这种规律,并且也有在清晨或傍晚木质部栓塞程度增大的现象。中生的柳树和女贞,在春季和夏季清晨气孔导度和蒸腾速率较小的时候木质部栓塞程度较低;随后,伴随着气孔导度的增大和蒸腾作用的进

行,PLC 也有所增加,到 9:00 左右出现一个峰值,柳树也在此时达到一天中木质部栓塞的最大值;在 12:00 左右,气孔导度和蒸腾速率都比较大(夏季时达到一天的最大值)的时候,它们的 PLC 并没有继续增加反而出现一个低谷,然后在 15:00 左右,PLC 又会在气孔导度和蒸腾速率有所减小(柳树在春季测定中却有所增加)的时候,再次出现一个峰值,女贞在此时达到一天中 PLC 的最大值;到 18:00 左右,植物的气孔导度、蒸腾速率有所下降,水势有所升高,PLC 也再次下降,两树种在秋季的木质部栓

塞程度与其气孔导度、蒸腾速率的变化基本同步,随着气孔导度和蒸腾速率的增大木质部栓塞程度也增大,这可能与秋季测定时的水分条件较好有关。刺槐和元宝枫属于低水势忍耐脱水类型的树种,刺槐在各个季节内,一天中的木质部栓塞程度变化虽然不大,但与其叶的气孔导度和蒸腾速率表现出了很强的相关性,随着气孔导度和蒸腾速率的增减,木质部栓塞程度也在增大和减小;元宝枫清晨木质部栓塞程度不大,随着气孔的开放和蒸腾速率的增大,在9:00左右有显著的升高,然后随气孔导度和蒸腾速率的变化,木质部栓塞程度变化不大,而是一直在此水平上波动。沙棘和白榆虽然同属于亚低水势忍耐脱水耐旱类型的树种,但在木质部栓塞的日变化上却表现出了不同的特性,沙棘木质部栓塞程度随着气孔导度和蒸腾速率的增减而相应变化;白榆在春季水势较高的时候,随着气孔导度和蒸腾速率的增减木质部栓塞程度也在增减,但在水势较低的夏季和秋季,却表现出了与中生的柳树和女贞在春季和夏季相似的数据化特征,气孔导度和蒸腾速率虽为单

峰曲线,木质部栓塞程度却为双峰曲线。因光合速率的大小与气孔导度密切相关,且光合作用耗水只占植物耗水的很小一部分,各树种净光合速率日变化与木质部栓塞日变化的关系同气孔导度日变化与木质部栓塞日变化间关系基本一致。木质部栓塞的产生并不会使植物的光合作用停止,而是继续保持一定的光合积累,这与 Milburn 和 Tyree 等的研究结果一致<sup>[1,2]</sup>。对于大多数树种,水分利用效率的日变化一般与木质部水势的日变化相反,与木质部栓塞的日变化一致,即清晨和傍晚较低,上午、中午、下午较高;但它们一天中峰值出现的时间却具有一定差异,水分利用效率的最大值一般出现于9:00左右,而木质部栓塞程度最大值和水势最低值的出现时间会因树种和环境条件的不同而变化。可见,因树种和外界环境特点的不同,木质部栓塞特性与植物的光合生理特性间的关系存在一定差异。木质部水势的降低和栓塞程度的增大,对有些树木气孔的关闭和蒸腾速率的降低具有一定促进作用,如柳树、女贞和白榆。

表1 8个树种各季节内木质部栓塞及水势、净光合速率等生理指标的日平均值  
Table 1 Daily average value of xylem embolism, water potential, net photosynthesis, and other physiological indexes for the 8 tree species in different seasons

树种	季节	WP/ MPa	PLC/ %	Pn / $\mu\text{mol}$ $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Tr / $\text{mmol}$ $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Gs / $\text{mmol}$ $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	WUE / $\mu\text{mol}$ $\cdot \text{mmol}^{-1}$
柳 树 <i>S. matsudana</i>	春	-0.80	56.52	8.48	3.11	0.164	2.59
	夏	-1.27	37.93	2.47	1.85	0.057	1.14
	秋	-1.16	4.90	2.50	0.99	0.058	2.70
	均值	-1.07	33.12	4.48	1.98	0.093	2.14
女 贞 <i>L. lucidum</i>	春	-0.85	81.56	4.28	0.96	0.076	4.31
	夏	-2.22	53.19	1.34	0.33	0.015	2.10
	秋	-1.06	44.10	3.53	0.54	0.033	4.92
	均值	-1.38	59.62	3.05	0.61	0.038	3.78
白皮松 <i>P. bungeana</i>	春	-0.70	0	3.86	0.95	0.037	4.54
	夏	-1.23	2.05	1.09	0.38	0.009	3.69
	秋	-0.69	0	1.16	0.33	0.012	2.94
	均值	-0.87	0.68	2.04	0.55	0.020	3.73
油 松 <i>P. tabulaeformis</i>	春	-0.71	5.14	4.04	1.13	0.046	3.42
	夏	-1.26	0.45	1.18	0.58	0.017	2.11
	秋	-0.84	3.53	2.89	0.79	0.029	2.49
	均值	-0.94	3.04	2.70	0.83	0.031	2.68
沙 棘 <i>H. rhamnoides</i>	春	-0.91	68.87	4.25	1.07	0.060	4.15
	夏	-1.65	40.84	2.55	0.91	0.024	2.15
	秋	-1.33	32.04	6.05	1.68	0.069	2.63
	均值	-1.30	47.25	4.28	1.22	0.051	2.98
白 榆 <i>U. pumila</i>	春	-0.78	37.88	8.53	2.49	0.123	3.15
	夏	-1.58	82.97	11.60	4.62	0.274	2.24
	秋	-1.44	54.27	6.15	3.80	0.235	1.31
	均值	-1.27	58.37	8.76	3.63	0.211	2.23
刺 槐 <i>R. pseudoacacia</i>	春	-0.83	79.59	5.14	1.58	0.065	2.59
	夏	-1.86	41.04	2.90	0.99	0.032	2.81
	秋	-2.02	33.36	2.58	0.95	0.053	2.69
	均值	-1.57	51.33	3.54	1.17	0.050	2.69
元宝枫 <i>A. truncatum</i>	春	-0.91	68.55	3.31	1.11	0.047	2.42
	夏	-1.23	61.20	1.40	0.45	0.013	2.60
	秋	-1.65	22.08	1.43	1.24	0.072	1.28
	均值	-1.26	50.61	2.05	0.93	0.044	2.10

表1列出了8个树种生长季内栓塞程度、木质部水势、光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率的日平均值,可以看出:8个树种木质部栓塞程度最大的季节也正是它们气孔导度、光合速率、蒸腾速率最大,水分消耗最多的季节。容易发生木质栓塞的树种也不一定就是平均气孔导度、蒸腾速率、净光合速率较小的耗水量较小的树种,如:由于木质部栓塞脆弱性较大,白榆在各个季节内都有较大程度的木质部栓塞发生,PLC均值(58.37%)仅次于女贞(59.62%)位居8个树种的第2,但其气孔导度、光合速率、蒸腾速率均值仍然较高,是8个树种中的最大值;女贞的栓塞脆弱性最大,生长季节内的PLC均值也最大,其气孔导度、光合速率、蒸腾速率等虽然不大,却是8个树种中平均水分利用效率最大的;并且,如果不考虑不容易发生木质部栓塞的白皮松和油松,8个树种生长季内平均水分利用效率的排序(女贞>白皮松>沙棘>刺槐>油松>白榆>柳树>元宝枫)与其小枝的木质部栓塞脆弱性顺序,女贞>沙棘>刺槐>白榆>柳树>元宝枫>油松>白皮松完全一致。可见,木质部栓塞的发生和恢复可能对水分胁迫下的植物生长有利,是某些植物的一种节水策略。

### 3 结论与讨论

光照强度、大气温度和湿度都能影响植物木质部的栓塞状况。Cochard对*Fagus sylvatica*木质部栓塞对光适应的研究认为,适应了光环境的枝条对木质部栓塞更不脆弱,发生50%导水率损失的水势值要比遮荫条件下生长的枝条低<sup>[12]</sup>。Cochard等也研究了温度对*Quercus robur*木质部导水率的影响,结果表明,温度的升高可以提高木质部的导水率<sup>[13]</sup>。但在土壤水分条件变化不大的情况下,光照强度、大气温度和湿度却是影响植物气孔开张、光合速率、蒸腾速率的重要因素,光照强度、大气温度和相对湿度的变化经常都伴随着植物木质部水势、栓塞程度、气孔开张、光合速率、蒸腾速率的变化。所以,在一天中光照强度、大气温度和相对湿度等生态指标的变化主要是通过其对植物气孔运动等生理代谢过程的影响,改变植物体内的水分条件和木质部栓塞状况的,并且这种影响随树种的不同而具有差异。

很多研究证明,植物气孔的运动与木质部栓塞间存在一定关系。Jones等归纳了前人研究的11个树种开始发生木质部栓塞并有导水率下降时的水势( $\psi_t$ )与气孔导度最大时的水势( $\psi_{g_{max}}$ )的关系,发现有5个树种的 $\psi_t < \psi_{g_{max}}$ ,即其木质部栓塞并不会影

响到气孔的关闭,但也有6个树种的 $\psi_t \geq \psi_{g_{max}}$ ,即在未达到最大气孔导度之前,已经有木质部栓塞的发生和木质部导水率的下降<sup>[14]</sup>。Salleo等通过对不同光强下,供水条件良好的*Laurus nobilis*的研究证明,随着叶气孔导度的增加,其木质部水势也会同时减小到茎木质部发生栓塞的程度,当水势达到此范围并不在下降后,其气孔导度会减小25%<sup>[15]</sup>。Sperry等用空气注射法对*Betula occidentalis*诱导发生栓塞发现,木质部栓塞的发生会使气孔导度和蒸腾速率下降的现象<sup>[16]</sup>。可见有些植物木质部栓塞的发生会使植物体内的输水阻力增大、导水率减小,导致气孔关闭;气孔的关闭也会阻止了木质部张力的进一步增加,进而限制了木质部空穴和栓塞的进一步发展<sup>[17]</sup>,从而会使植物在水分亏缺情况下,通过降低木质部水分传导速率和关闭气孔保持一定程度的生物量积累,并得以存活。本研究中的柳树、女贞春季木质部栓塞的日变化与气孔导度间就存在这种关系,木质部栓塞程度的增大,促使了气孔的关闭,气孔的关闭也阻止了水势的无限下降和栓塞的进一步发展,甚至使栓塞木质部很快恢复。McCully等在玉米根系栓塞日变化中也发现了这种现象<sup>[3]</sup>。这就证明了木质部栓塞与气孔运动等一些植物生理代谢之间存在一定关系,是对体内水分条件变化的一种适应机制。但本文对其他季节和其它树种的研究,因缺乏不同水分条件下的对比,每天的测定次数也有限,无法对木质部栓塞对气孔运动的影响程度进行比较,无法给以上各学者关于木质部栓塞与气孔运动间关系的结果以直接的证据;在各个季节间比较时也只发现,夏季的高温和水分亏缺会使植物的气孔导度、光合速率等下降,与木质部栓塞程度间的关系,也因缺乏对比无法进行比较,所以建议利用盆栽控水实验,对不同水分胁迫下的木质部栓塞及植物代谢进行研究,系统弄清植物木质部栓塞的发生、恢复与植物代谢间的关系。

许多学者认为植物木质部空穴化和栓塞现象的发生会使植物木质部的导水率下降,直接影响到植物的正常生长<sup>[1,2]</sup>。但Jones等认为,由于栓塞导致的植物部分导水组织的丧失对植物体气孔的最大开张有利,从而也会使植物体的短期生产力有益<sup>[14]</sup>。张硕新等(1997)和Tyree等(2002)认为,适当的木质部栓塞可能对植物在干旱胁迫下的生长有利,并且有可能是植物体在干旱环境下节约水分的一种策略<sup>[2,18]</sup>。通过本研究对8个树种木质部栓塞特性与代谢间关系的研究可以看出,木质部栓塞一天中处于此消彼涨不断的变化之中,是植物正常生长过程中极易发生的“平常事件”;它的发生会影响到植物

的生理代谢,并引起植物气孔的关闭,但不会使气孔完全关闭,也不会使植物的生长、代谢停止,从而关系到植物的存活。在测定期内,各树种代谢活动最强的季节正是栓塞程度最大的季节,栓塞脆弱性大的树种也正是水分利用效率最高的树种。所以,木质部栓塞的发生、恢复某些植物对一天中体内水分状况改变的一种适应机制,是某些植物的一种节水策略。同时,6个容易发生栓塞的阔叶树的木质部栓塞脆弱性顺序与它们生长季内平均水分利用效率的排序一致。这无疑就验证了张硕新等和 Tyree 等的观点,说明木质部栓塞的发生、恢复是可能是某些植物的一种耐旱策略。

#### 参考文献:

- [1] Milburn J A. Water flow in plants[M]. London: Longman, 1979.
- [2] Tyree M T, Zimmermann M H. Xylem structure and the ascent of sap (second edition)[M]. New York: Springer-Verlag. 2002.
- [3] McCully M E, Huang C X, Ling E C. Daily embolism and refilling of xylem vessels in roots of field-grown maize[J]. New Phytol., 1998, 138: 327-342.
- [4] 申卫军, 张硕新, 刘立科. 几种木本植物木质部栓塞的日变化[J]. 西北林学院学报, 1999, 14(1): 22-27.
- [5] 申卫军, 张硕新, 金燕. 几种木本植物木质部栓塞的季节变化[J]. 西北林学院学报, 1999, 14(1): 28-32.
- [6] Jaquish L L, Ewers F W. Seasonal conductivity and embolism in the roots and stems of two clonal ring-porous trees, *Sassafras albidum* (Lauraceae) and *Rhus typhina* (Anacardiaceae)[J]. American Journal of Botany. 2001, 88: 206-212.
- [7] 李吉跃, 张建国. 北方主要造林树种耐旱机理及其分类模型的研究(1): 苗木叶水势与土壤含水量的关系及分类[J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(3): 1-11.
- [8] 王万里. 压力室(PRESSURE CHAMBER)在植物水分状况研究中的应用[J]. 植物生理学通讯, 1984, (3): 52-57.
- [9] Sperry J S, Donnelly J R, Tyree M T. A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem [J]. Plant Cell Environ., 1987, 11: 35-40.
- [10] 张硕新, 申卫军, 张远迎. 6种木本植物木质部栓塞化生态效应研究[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 788-794.
- [11] Brodribb T J, Hill R S. Increases in water potential gradient reduce xylem conductivity in whole plants. Evidence from a low-pressure conductivity method [J]. Plant Physiology, 2000, 123: 1021-1028.
- [12] Cochard H, Lemoine D, Dreyer E. The effects of acclimation to sunlight on the xylem vulnerability to embolism in *Fagus sylvatica* L.[J]. Plant Cell and Environment, 1999, 22: 101-108.
- [13] Cochard H, Murtin R, Gross P, et al. Temperature effects on hydraulic conductance and water relations of *Quercus robur* L.[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51: 1255-1259.
- [14] Jones H G, Sutherland R A. Stomatal control of xylem embolism[J]. Plant Cell and Environment, 1991, 14: 607-612.
- [15] Salleo S, Nardini A, Pitt F, et al. Xylem cavitation and hydraulic control of stomatal conductance in Laurel (*Laurus nobilis* L.)[J]. Plant cell and Environment, 2000, 23: 71-79.
- [16] Sperry J S, Pockman W T. Limitation of transpiration by hydraulic conductance and xylem cavitation in *Betula occidentalis* [J]. Plant Cell and Environment, 1993, 16: 279-287.
- [17] Tyree M T, Sperry J S. Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress[J]. Plant Physiology, 1988, 88: 574-580.
- [18] 张硕新, 申卫军, 张远迎, 等. 几个抗旱树种木质部栓塞脆弱性的研究[J]. 西北林学院学报, 1997, 12(2): 1-6.