

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201507004

张珊珊, 康洪梅, 杨文忠, 等. 干旱胁迫下 AMF 对云南蓝果树叶片解剖结构的影响 [J]. 广西植物, 2016, 36(10):1265-1274

ZHANG SS, KANG HM, YANG WZ, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on anatomical structure of *Nyssa yunnanensis* leaves under drought stress [J]. Guihaia, 2016, 36(10):1265-1274

# 干旱胁迫下 AMF 对云南蓝果树叶片解剖结构的影响

张珊珊, 康洪梅, 杨文忠\*, 向振勇

(云南省林业科学院, 云南珍稀濒危森林植物保护和繁育国家林业局重点实验室, 昆明 650201)

**摘要:** 苯菌灵为杀真菌剂, 在土壤含水量为 32.32%、29.63%、25.86%、19.39%、12.93% 和 6.46% 的条件下, 分别添加苯菌灵和不添加苯菌灵, 形成“低 AMF”和“高 AMF”处理。该研究以云南蓝果树幼苗叶片为材料, 利用盆栽试验研究了干旱胁迫下丛枝菌根真菌 (AMF) 对云南蓝果树幼苗叶片解剖结构及抗旱性的影响。结果表明: 添加苯菌灵处理显著降低了不同水分处理条件下 AMF 侵染率, 随着干旱胁迫程度加剧, 云南蓝果树幼苗根部的 AMF 侵染率显著降低。轻度胁迫条件下 (土壤含水量为 29.63%), 叶片解剖结构参数未发生显著变化; 土壤含水量低于 25.86%, 云南蓝果树幼苗表现出较高的抗旱性, 苯菌灵处理可以显著影响叶片角质层厚度、栅栏组织厚度和上表皮厚度等 7 个叶片结构指标, 证明了高 AMF 可以增强代表云南蓝果树幼苗叶片抗旱性的结构性状。土壤含水量为 25.86%、19.39% 和 12.93% 时苯菌灵处理的效果较土壤含水量为 6.46% 时更显著, 这是因为 6.46% 的土壤含水量严重抑制 AMF 的侵染, 说明 AMF 侵染程度会影响云南蓝果树幼苗的抗旱性。进一步用隶属函数值法对 10 个叶片性状进行综合评价, 发现高 AMF 处理可增强云南蓝果树幼苗的抗旱性。该研究结果为 AMF 在濒危物种云南蓝果树保护过程中的合理利用提供了理论依据。

**关键词:** 云南蓝果树, 濒危植物, 干旱胁迫, 叶片解剖结构, 丛枝菌根真菌, 植物保护

**中图分类号:** Q944, S718.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2016)10-1265-10

## Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on anatomical structure of *Nyssa yunnanensis* leaves under drought stress

ZHANG Shan-Shan, KANG Hong-Mei, YANG Wen-Zhong\*, XIANG Zhen-Yong

(Key Laboratory of Rare and Endangered Forest Plant of State Forestry Administration, Yunnan Academy of Forestry, Kunming 650201, China)

**Abstract:** The objective of this study was to verify the effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on drought resistance of *Nyssa yunnanensis*, and to explore the mycorrhizal ways of plant conservation. A pot experiment was conducted to study the effects of AMF on anatomical structure characteristics of *N. yunnanensis* seedlings and their drought resistances under different water conditions. Six water conditions (soil water content) were designed in this pot experiment: 32.32%, 29.63%, 25.86%, 19.39%, 12.93% and 6.46%, and at each water treatment, both sterilization (Low AMF) and no sterilization (High AMF) were contained through adding fungicide benomyl to control AMF. The results showed that AMF colonization rate were significantly decreased in “Low AMF” treatment under different water treatments. Moreover, AMF colonization

收稿日期: 2015-10-10 修回日期: 2015-12-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(31460119, 31660164); 国家林业局珍稀濒危物种野外救护与繁育项目(2014YB1004, 2015YB1021); 云南省应用基础研究青年项目(2013FD075) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31460119, 31660164); State Forestry Administration of China (2014YB1004, 2015YB1021); Yunnan Provincial Natural Science Foundation (2013FD075)].

**作者简介:** 张珊珊 (1984-), 女, 安徽宿州人, 博士, 助理研究员, 主要从事保护生态学, (E-mail) zhang\_ss1012@163.com.

\***通讯作者:** 杨文忠, 博士, 副研究员, 主要从事保护生物学及生物多样性研究, (E-mail) yangwz2004@126.com.

rate of *N. yunnanensis* roots significantly decreased with the intensity of increased drought. No significant difference was found in anatomical structure characteristics under mild drought stress conditions (soil water content was 29.63%) whereas *N. yunnanensis* seedlings showed higher resistances under severe drought stress conditions (soil water content was less than 25.86%). Benomyl treatment significantly affected seven leaf structure indices, such as the leaf cuticle thickness, palisade tissue thickness, upside epidermal thickness, palisade tissue / spongy tissue ratio, tightness of leaf tissue structure, sponge tissue thickness and leaf institutions looseness when soil water content was less than 25.86%, suggesting that high AMF could enhance leaf structure traits on behalf of the drought resistance of *N. yunnanensis* seedlings when under severe drought stress conditions. Effects of AMF on *N. yunnanensis* seedlings under 25.86%, 19.39% and 12.93% were more significant than under 6.46% water content of soil. That was because AMF colonization was severely restrained by 6.46% water content of soil. Thus, effects of AMF on plant probably positively related to the colonization rate. Based on principal component analysis of *N. yunnanensis* 10 structure's index of leaves, and the method of membership function value, leaf traits of main structure index were comprehensively evaluated. The results demonstrated that *N. yunnanensis* seedlings showed stronger drought resistance under high AMF conditions. The experimental results provided the theoretical basis for the reasonable use of AMF in the protection of endangered species *N. yunnanensis*.

**Key words:** *Nyssa yunnanensis*, drought stress, endangered plants, anatomical structure of leaves, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), plant conservation

干旱胁迫是影响植物生长发育、生产力和光合作用等的重要环境因子 (Rigoberto et al, 2004; Smorenburg et al, 2003)。特别是随着世界气候的急剧变化,全球温室效应加剧,导致很多地区干旱发生 (Meehl & Tebaldi, 2004; Schär et al, 2004), 并引发森林天然更新困难甚至死亡 (Allen et al, 2010; Barbeta and Peñuelas, 2013)。干旱胁迫对濒危植物会产生毁灭性的影响(约下降 16%) (Bartholomeus et al, 2011), 因为濒危物种大多表现为适宜分布区狭窄、对生境要求较高及抗逆性较差等特点 (Lawler et al, 2002)。丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 在植物抗旱过程中通过改善植物的养分平衡和水分利用效率, 改善植物营养状况, 增加植物幼苗的株高和生物量等生长指标 (杨振寅和廖声熙, 2005), 增强植物的抗旱能力 (吴强盛等, 2005; 杨振寅和廖声熙, 2005)。在植物生长发育过程中叶片解剖结构特点最能反映出植物的抗旱程度, 且多项参数都与植物抗旱性相关, 如叶片角质层厚度、栅栏组织厚度和气孔数量等 (李芳兰和包维楷, 2005; 季孔庶等, 2006; 郭改改等, 2013; 任媛媛等, 2014)。那么, 干旱胁迫下 AMF 如何通过影响叶片结构进而影响其抗旱性, 尚未见有相关报道。

云南蓝果树 (*Nyssa yunnanensis*) 为蓝果树科 (Nyssaceae) 蓝果树属 (*Nyssa* Gronov ex Linn.), 现存天然种群及幼苗数量都极少, 天然更新困难, 濒临灭绝, 属于极小种群野生植物 (陈伟等, 2011)。从前期调查研究的结果看, 云南蓝果树主要分布于溪流边,

且有部分根露于溪流中, 唯一发现的幼苗也分布于溪流边。前期幼苗培育实验中发现, 云南蓝果树幼苗对土壤含水量要求较高, 当土壤含水量稍低时, 叶片即呈现下垂、萎焉状态, 严重时, 植株地上部分或是全株死亡。云南蓝果树原生境在内的大量天然林不断被橡胶、咖啡、茶叶等经济林所取代, 其适生地的小气候被改变, 因此导致云南蓝果树旁边的溪流干涸。尤其是西双版纳地区自 1974–2003 年来平均气候情况为 9 月份至次年 2 月份, 均处于旱季 (刘文杰和李红梅, 1997)。因此, 笔者假设日益干旱的气候以及导致的土壤水分含量下降, 也许是其导致灭绝的原因之一。植物叶片的结构将能准确地反映出其对生存环境适合度的高低, 然而云南蓝果树叶片应对干旱胁迫时解剖结构是否发生变化, 以及 AMF 又起到如何的调节作用, 尚未见报道。因此, 本研究以云南蓝果树幼苗叶片为材料, 利用盆栽试验研究云南蓝果树在干旱胁迫下叶片解剖结构发生的变化及 AMF 在此过程中的调节作用, 阐述云南蓝果树应对干旱胁迫的机制, 为其濒危机制研究提供理论依据。本研究选用苯菌灵为杀真菌剂, 研究干旱胁迫条件下 AMF 对极小种群野生植物云南蓝果树叶片解剖结构及抗旱性的影响, 探求云南蓝果树保护的菌根学途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

选择云南蓝果树 1 年生幼苗作为研究对象。

2013 年 4 月中旬将生长基本一致的幼苗移栽到容积为 10 L 的花盆中, 每盆 1 株, 栽培基质为云南省林业科学院苗圃红壤。用红壤于次氯酸钠 (NaClO) 中浸泡 48 h, 洗净后 120 °C 烘 8 h。

## 1.2 试验设计

研究于云南省林业科学院温室条件下进行, 自然温度和自然光照, 水分人工控制, 为 2 因子 (AMF × 水分) 试验。AMF 处理为施加苯菌灵 (低 AMF) 和不加苯菌灵 (对照, 高 AMF), 对于施加苯菌灵处理, 将 2 g 杀真菌剂苯菌灵溶于 2 L 自来水, 加到盆钵中, 每月处理 1 次, 获得低 AMF 处理的土壤, 同时在对照处理的盆钵中每次均加入相同量的自来水。基于试验土壤的田间持水量 (32.32%), 水分设置 6 个水平 (32.32%、29.63%、25.86%、19.39%、12.93% 和 6.46%), 分别用 W1, W2, W3, W4, W5 和 W6 表示, 共得到 2 (AMF) × 6 (水分) = 12 个处理, 每个处理 10 个重复, 共有 120 个盆钵。实验期限为 3 个月, 2014 年 7 月中旬采样, 测定相应指标。

## 1.3 测定指标及方法

**1.3.1 AMF 侵染率的测定** 取部分新鲜根部样品固定于 FAA 溶液中 (37% 甲醛-冰醋酸-50% 乙醇溶液, 体积比 9 : 0.5 : 0.5) 用于检测 AMF 侵染率。先将根部的固定液清洗干净, 然后浸泡在 10% 的 KOH 中, 90 °C 水浴加热 5 min, 然后用 1% 的盐酸酸化 15 min, 并用酸性品红染色过夜, 将根部剪成 2 cm 长的根段, 在显微镜下 10 倍物镜观察, 用十字交叉法计算侵染率。侵染率的计算公式:

$$\text{侵染率} = \text{侵染根段长度} / \text{根段总长度} \times 100\%$$

**1.3.2 叶片解剖结构** 实验结束后, 在幼苗第 2、第 3 叶片切取 0.5 cm<sup>2</sup> 的叶片组织进行测定, 用 FAA 固定液固定, 番红-固绿对染。在 Leica 光学显微镜下用目镜测微尺测量叶片总厚度、上表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度和下表皮厚度等结构特征, 所有观测值均为 30 个视野的平均值。

叶片组织结构紧密度 = 栅栏组织厚 / 叶片总厚度 × 100%; 叶片组织结构疏松度 = 海绵组织厚 / 叶片总厚度 × 100%。

**1.3.3 气孔密度观察** 在新鲜叶片样品下表面涂一层快干胶, 干燥后将胶膜取下, 放在干燥载玻片上, 盖好盖玻片, 在显微镜 10 倍物镜下观察。每个植株采集 3 个叶片, 每个叶片随机测定 10 个视野求其平均值, 每个处理共获得 (3 × 10 × 5) 150 个数据。

## 1.4 数据统计分析

采用双因素方差分析, 比较 AMF 处理和干旱胁迫处理对云南蓝果树幼苗叶片解剖结构的影响, 并在确定主效应是否显著的基础上, 说明水分与 AMF 之间是否对叶片结构各参数存在交互效应。方差分析时, 不满足方差齐性检验的数据通过 [arcsin] 或 [log(x + 1)] 转换以满足方差分析的要求。采用 Post-hoc Tukey 法检验变量的显著性, 如果数据不满足参数检验条件, 就采用 Kruskal-Wallis 法检验。5% 为显著水平, 1% 为极显著水平。所有数据都通过 SPSS17.0 软件进行方差分析、Pearson 相关系数分析和主成分分析。其中, 隶属函数值具体公式:

$$X(\mu) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \text{ 的绝对值。}$$

式中,  $X$  表示各指标的测定值,  $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  分别表示各处理条件下指标的最大和最小测定值。

## 2 结果与分析

### 2.1 丛植菌根真菌侵染率

表 1 显示, 施加苯菌灵处理显著降低了 AMF 对云南蓝果树幼苗根部的侵染率, 形成低 AMF 处理 ( $F = 38.141, P < 0.01$ ); 不施加苯菌灵的处理则形成高 AMF 处理。无论是高 AMF 处理还是低 AMF 处理, AMF 侵染率都随着土壤水分含量的降低显著下降 ( $F = 11.093, P < 0.01$ ;  $F = 37.175, P < 0.01$ )。

### 2.2 叶片解剖结构参数比较

不同水分处理条件下, 采集云南蓝果树苗期叶片在电镜下观察组织解剖结构特征 (表 1)。由表 1 可知, 它们在不同处理条件下所表现出的叶片组织结构特征差异显著。AMF 处理和水分处理在叶片解剖结构的 10 个指标上都差异显著, 但 AMF 处理和水分处理的交互作用只对叶片的角质层厚度、上表皮厚度、栅海比和气孔密度产生显著影响。

表 2 显示, 在测定叶片解剖结构的 10 个指标中, 无论是高 AMF 处理还是低 AMF 处理, 3 个指标 (栅栏组织厚度、栅栏组织海绵组织厚度和气孔密度) 在土壤水分 W3 处理时开始出现拐点, 2 个指标 (叶片厚度和角质层厚度) 在土壤水分 W4 处理时开始出现拐点, 3 个指标 (上表皮厚度、下表皮厚度和海绵组织厚度) 在土壤水分 W5 处理时开始出现拐点, 叶片结构紧密度不受土壤含水量的任何影响。因此, 当土壤水分分为 W3 时, 云南蓝果树叶片的结构就开始表现出对干旱胁迫的抗逆响应, 虽然各

表 1 叶片解剖性状的方差分析  
Table 1 Two-way ANOVA of anatomical characters of leaves

变量 Variables	自由度 <i>df</i>	叶片厚度 Leaf thickness	角质层 厚度 Cuticle thickness	上表皮 厚度 Upside epidermal thickness	下表皮 厚度 Downside epidermal thickness	栅栏组织 厚度 Palisade tissue thickness	海绵组织 厚度 Spongy tissue thickness	栅海比 Palisade tissue/ spongy tissue	叶片结构 紧密度 Structure tightness of mesophyll tissue (%)	叶片结构 疏松度 Structure looseness of mesophyll tissue (%)	气孔密度 Stoma density
AMF	1	** ( <i>F</i> = 11.694)	** ( <i>F</i> = 88.388)	** ( <i>F</i> = 94.046)	** ( <i>F</i> = 7.768)	** ( <i>F</i> = 34.284)	** ( <i>F</i> = 22.608)	** ( <i>F</i> = 79.595)	** ( <i>F</i> = 12.120)	** ( <i>F</i> = 33.448)	** ( <i>F</i> = 28.957)
水分 Water	5	** ( <i>F</i> = 6.059)	** ( <i>F</i> = 13.294)	** ( <i>F</i> = 10.453)	** ( <i>F</i> = 4.657)	** ( <i>F</i> = 15.474)	** ( <i>F</i> = 7.150)	** ( <i>F</i> = 26.233)	** ( <i>F</i> = 6.434)	** ( <i>F</i> = 49.971)	** ( <i>F</i> = 96.743)
AMF× 水分 Water	5	ns ( <i>F</i> = 0.098)	** ( <i>F</i> = 3.329)	* ( <i>F</i> = 3.239)	ns ( <i>F</i> = 0.338)	ns ( <i>F</i> = 0.764)	ns ( <i>F</i> = 0.196)	** ( <i>F</i> = 4.808)	ns ( <i>F</i> = 0.473)	ns ( <i>F</i> = 1.915)	** ( <i>F</i> = 14.218)

注: \* . 在 0.05 水平上相关性显著(双侧检验); \* . \* . 在 0.001 水平上相关性显著(双侧检验); ns. 在 0.05 水平上相关性不显著。下同。

Note: \* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); \* . \* . Correlation is significant at the 0.001 level (2-tailed); ns. Correlation is not significant at the 0.05 level (2-tailed). The same below.

表 2 叶片解剖结构指标的测定结果  
Table 2 Testing result of structural anatomy parameter of leaves (mean ± SE)

有无 AMF 处理 (0, 低 AMF; 1, 高 AMF) With or without AMF (0, low AMF; 1, high AMF)		W1	W2	W3	W4	W5	W6
AMF 侵染率 Root colonization rate (%)	AMF0	20.84±3.44aA	13.54±3.86bA	8.36±2.53bcA	5.14±1.47cA	2.51±0.94cA	0.78±0.05dA
	AMF1	45.66±1.30aB	43.86±1.57aB	30.10±1.66bB	20.19±2.14cB	11.62±1.70dB	10.14±3.09dB
叶片厚度 Leaf thickness (μm)	AMF0	167.82±3.92dA	175.14±2.79cdA	174.73±4.30bcdA	176.24±3.30abcA	181.82±1.25aA	180.16±3.47aA
	AMF1	178.23±3.32dA	181.78±2.87cdA	186.59±3.32bcdA	190.73±3.21abcA	195.12±2.55aA	199.32±2.09aA
角质层厚度 Cuticle thickness (μm)	AMF0	1.64±0.36bA	1.61±0.48bA	1.69±0.38bA	1.79±0.45abA	1.85±0.50abA	2.62±1.24aA
	AMF1	2.30±0.30cB	2.42±0.67cB	3.05±0.38bcB	3.86±0.56abB	4.05±0.67abB	4.95±0.65aB
上表皮厚度 Upside epidermal thickness (μm)	AMF0	21.05±2.49bA	23.22±2.35bA	24.62±1.97bA	26.05±2.62abA	27.89±1.03aA	28.16±1.72aA
	AMF1	28.62±1.83bA	32.26±1.76bB	33.48±1.76bB	36.48±1.91abB	40.25±1.99aB	45.79±2.08aB
下表皮厚度 Downside epidermal thickness (μm)	AMF0	12.46±2.33cA	12.76±1.92cA	12.81±1.88bcA	12.27±2.12bcA	14.97±2.04abA	19.32±2.18aA
	AMF1	14.25±1.63cA	14.97±1.79bcA	15.85±2.00bcA	16.03±1.72bcA	19.32±2.09abA	20.06±1.49aA
栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness (μm)	AMF0	34.08±2.66dA	39.58±1.81cdA	41.23±2.71bcA	42.88±1.70abA	47.11±0.51aA	47.37±1.44aA
	AMF1	50.56±2.08dB	52.68±2.08cdB	58.46±2.08bcB	63.26±2.31abB	66.18±2.38aB	68.05±2.21aB
海绵组织厚度 Spongy tissue thickness (μm)	AMF0	98.60±3.87aA	97.96±2.44aA	94.39±2.88aA	93.25±1.65abA	90.00±3.58bcA	82.69±3.54cA
	AMF1	92.50±2.08aA	89.45±2.00aA	85.75±2.95aB	80.50±1.97abB	75.32±2.03bcB	70.47±2.08cB
栅栏组织海绵组织厚度比 Palisade tissue/ spongy tissue	AMF0	0.38±0.11cA	0.42±0.06bcA	0.43±0.11bA	0.44±0.04bA	0.52±0.09aA	0.55±0.08aA
	AMF1	0.44±0.04cA	0.58±0.03bcB	0.67±0.04bB	0.77±0.04bB	0.85±0.05aB	0.92±0.05aB
叶片结构紧密度 Structure tightness of mesophyll tissue (%)	AMF0	20.00±4.00aA	23.00±1.00aA	24.00±4.00aA	24.00±2.00aA	26.00±1.00aA	26.00±2.00aA
	AMF1	23.00±4.00aA	28.00±3.00aB	32.00±4.00aB	35.00±3.00aB	38.00±2.00aB	42.00±2.00aB
叶片结构疏松度 Structurelooseness of mesophyll tissue (%)	AMF0	59.00±6.00aA	56.00±5.00aA	54.00±5.00aA	53.00±2.00aA	49.00±5.00aA	46.00±4.00aA
	AMF1	52.00±3.00aA	49.00±3.00aA	46.00±2.00aB	42.00±3.00aB	39.00±4.00bB	35.00±2.00bB
气孔密度(个·mm <sup>-2</sup> ) Stoma density/ (Numbers·mm <sup>-2</sup> )	AMF0	418.00±7.98aA	374.00±7.92abA	351.00±.42bcA	304.00±6.14cA	130.00±4.23dA	98.00±4.50dA
	AMF1	400±3.69aA	385±3.03abA	350±3.07bcA	300±3.41bcA	263±3.04dB	250±2.53dB

注: 同行不同小写字母表示在不同水分条件下叶片的解剖结构指标在  $P < 0.05$  水平的差异显著; 同列不同大写字母表示在不同 AMF 处理下叶片的解剖结构指标在  $P < 0.05$  水平的差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same line meant significant differences at 0.05 level; Different capital letters in the same column meant significant differences at 0.05 level.

表 3 云南蓝果树叶片解剖性状的相关系数矩阵  
Table 3 Result of Pearson test of *Nyssa yunnanensis* leaves structural anatomy parameter

相关性 Correlation	角质层 厚度 Cuticle thickness	下表皮 厚度 Downside epidermal thickness	海绵 组织 厚度 Spongy tissue thickness	栅栏 组织 厚度 Palisade tissue thickness	上表皮 厚度 Upside epidermal thickness	叶片 厚度 Leaf thickness	栅栏组织 海绵组织 厚度比 Palisade tissue/ spongy tissue	叶片结构 紧密度 Structure tightness of mesophyll tissue	叶片结构 疏松度 Structure loosenesss of mesophyll tissue	气孔密度 Stoma density	AMF 侵染率 Root coloniza- tion rate
角质层厚度 Cuticle thickness	1										
下表皮厚度 Downside epidermal thickness	-0.005	1									
海绵组织厚度 Spongy tissue thickness	-0.789 *	0.080	1								
栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness	0.592	0.130	-0.594	1							
上表皮厚度 Upside epidermal thickness	0.923 * *	0.126	-0.535	0.502	1						
叶片厚度 Leaf thickness	0.228	0.424	0.193	0.471	0.503	1					
栅栏组织海绵 组织厚度比 Palisade tissue/ spongy tissue	0.786 *	-0.132	-0.882 * *	0.827 *	0.634	0.170	1				
叶片结构紧密度 Structure tightness of mesophyll tissue	0.556	-0.460	-0.837 * *	0.593	0.297	-0.294	0.859 * *	1			
叶片结构疏松度 Structureloosenesss of mesophyll tissue	-0.765 *	-0.320	0.594	-0.855 * *	-0.787 *	-0.671	-0.794 *	-0.379	1		
气孔密度 Stoma density	0.280	-0.271	-0.049	0.002	0.469	0.220	0.268	0.248	-0.148	1	
AMF 侵染率 Root colonization rate	0.924 * *	0.282	-0.788 *	0.536	0.880 * *	0.284	0.741 *	0.424	-0.813 *	0.208	1

表 4 巴特利特球检验和 KMO 检验

Table 4 KMO and Bartlett's test

处理 Treatment	巴特利特球检验 Bartlett's test of sphericity		KMO 检验 Kaiser-Meyer- Olkin test
	检验统计量 Approx. Chi-square	概率 Sig.	KMO 值 Adequacy
AMF0	171.742	0.005	0.731
AMF1	200.090	0.000	0.787

个指标对不同水分处理的响应时间有差异。

在测定的叶片解剖结构的 10 个指标中, AMF 处理对不同土壤水分条件下幼苗叶片解剖结构指标的影响也不同(表 2)。W1 条件下 AMF 处理对 2 个

指标(角质层厚度和栅栏组织厚度)有显著影响; W2 条件下 AMF 处理对 5 个指标(角质层厚度、栅栏组织厚度、上表皮厚度、栅栏海比和叶片结构紧密度)有显著影响; W3 条件下 AMF 处理对 7 个指标(角质层厚度、栅栏组织厚度、上表皮厚度、栅栏海比、叶片结构紧密、海绵组织厚度和叶片结构疏松度)有显著影响; W4 条件下 AMF 处理对 7 个指标(角质层厚度、栅栏组织厚度、上表皮厚度、栅栏海比、叶片结构紧密、海绵组织厚度和叶片结构疏松度)有显著影响; W5 条件下 AMF 处理对 8 个指标有显著影响; W6 条件下 AMF 处理对 8 个指标(角质层厚度、栅栏组织厚度、上表皮厚度、栅栏海比、叶片结构紧密、海绵组织厚度、叶片结构疏松度和气孔密度)有显著影响。因此, AMF 处理从土壤含水量处理为 W3 时

表 5 不同 AMF 处理条件下的主成分分析表  
Table 5 Principal component analysis under different AMF conditions

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue					
	合计 Total		贡献率 Proportion (%)		累积 Accumulation (%)	
	AMF0	AMF1	AMF0	AMF1	AMF0	AMF1
1	4.660	6.983	46.604	69.831	46.604	69.831
2	2.405	2.259	24.053	22.589	70.657	92.420
3	0.965	0.758	9.650	7.580	80.307	100.000
4	0.806	6.235E-16	8.056	6.235E-15	88.363	100.000
5	0.548	1.646E-16	5.476	1.646E-15	93.839	100.000
6	0.413	1.166E-16	4.132	1.166E-15	97.971	100.000
7	0.161	-1.542E-17	1.607	-1.542E-16	99.578	100.000
8	0.042	-1.745E-16	0.421	-1.745E-15	99.999	100.000
9	0.000	-1.853E-16	0.001	-1.853E-15	100.000	100.000
10	2.069E-16	-4.268E-16	2.069E-15	-4.268E-15	100.000	100.000

表 6 不同 AMF 处理条件下的成分得分系数矩阵  
Table 6 Principal components matrix under different AMF conditions

指标 Characteristics	主成分 Principal component			
	1		2	
	AMF0	AMF1	AMF0	AMF1
栅栏组织海绵组织厚度比 Palisade tissue/ spongy tissue	0.946	0.970	-0.191	-0.240
海绵组织厚度 Spongy tissue thickness	-0.945	-0.969	0.141	-0.234
栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness	0.876	0.970	-0.432	-0.240
上表皮厚度 Upside epidermal thickness	0.613	0.208	0.339	0.972
叶片厚度 Leaf thickness	0.611	-0.188	0.511	0.979
气孔密度 Stoma density	0.550	0.945	0.232	0.315
叶片结构紧密度 Structure tightness of mesophyll tissue	0.652	0.998	-0.709	0.005
叶片结构疏松度 Structure looseness of mesophyll tissue	-0.564	0.998	-0.704	-0.039
角质层厚度 Cuticle thickness	0.453	-0.477	0.645	-0.243
下表皮厚度 Downside epidermal thickness	-0.325	-0.986	0.564	0.161

便开始显著影响叶片解剖结构指标的特征值,高 AMF 处理显著增加了云南蓝果树幼苗的抗旱性。

以上结果说明,云南蓝果树幼苗随着干旱胁迫的加剧,其叶片各组织均表现出一定抗旱响应。

表 7 叶片解剖结构抗旱性综合评分值  
Table 7 Comprehensive evaluation of the leaf anatomical structure

指标 Characteristics	W1		W2		W3		W4		W5		W6	
	AMF0	AMF1	AMF0	AMF1	AMF0	AMF1	AMF0	AMF1	AMF0	AMF1	AMF0	AMF1
叶片厚度 Leaf thickness	—	0.47	—	0.52	—	0.58	—	0.51	—	0.46	—	0.41
上表皮厚度 Upside epidermal thickness	—	0.55	—	0.60	—	0.53	—	0.46	—	0.58	—	0.64
海绵组织厚度 Spongy tissue thickness	0.39	—	0.57	—	0.40	—	0.67	—	0.60	—	0.39	—
栅栏组织海绵组织厚度比 Palisade tissue / spongy tissue	0.44	—	0.38	—	0.46	—	0.44	—	0.34	—	0.40	—
叶片结构紧密度 Structure tightness of mesophyll tissue	0.49	0.48	0.27	0.49	0.51	0.57	0.39	0.54	0.00	0.54	0.39	0.39
叶片结构疏松度 Structure looseness of mesophyll tissue	0.49	0.48	0.27	0.49	0.51	0.57	0.39	0.54	0.00	0.54	0.39	0.39
隶属函数 Average membership function	0.45	0.50	0.37	0.53	0.53	0.52	0.40	0.54	0.26	0.53	0.39	0.46

### 2.3 叶片解剖结构参数间相关性分析

由表 3 相关分析看出, (1) AMF 侵染率与角质层厚度和上表皮厚度呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.924 和 0.880; 与栅海比呈显著正相关, 相关系数为 0.741; 与海绵组织厚度和叶片结构疏松度呈显著负相关, 相关系数为 -0.813。 (2) 海绵组织厚度与角质层厚度呈显著负相关, 相关系数为 -0.789。 (3) 上表皮厚度与角质层厚度呈极显著正相关, 相关系数为 0.923。 (4) 栅海比与角质层厚度和栅栏组织厚度呈显著正相关, 相关系数分别为 0.786 和 0.827; 与海绵组织厚度呈极显著负相关, 相关系数为 -0.882。 (5) 叶片结构紧密度和海绵组织厚度呈极显著负相关, 相关系数为 -0.837; 与栅海比呈极显著正相关, 相关系数为 0.859。 (6) 叶片结构疏松度与角质层厚度、上表皮厚度和栅海比呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.765、-0.787 和 -0.794; 与栅栏组织厚度呈极显著负相关, 相关系数为 -0.855。 (7) 叶片其余解剖结构参数间虽然存在一定的或正或负的相关性, 但均未达到显著水平。

### 2.4 叶片解剖结构的主成分分析

用主成分分析法对 10 项指标进行分析, 根据各主成分中每个指标载荷量及其变异系数的大小筛选出具有代表性的指标。由表 4 可知, 低 AMF 和高 AMF 处理条件下巴特利特球度检验统计量的观测值分别为 171.742 和 200.090, 相应的概率都接近 0, 因此认为相关系数矩阵与单位阵有显著差异。

KMO 值分别为 0.731 和 0.787, 由 Kaiser 给出 KMO 度量标准可知, 原有变量都适合进行主成分分析。选择水分处理 W3 为代表进行主成分分析。

从表 5 和表 6 可以看出, 低 AMF 处理条件下, 云南蓝果树幼苗第 2 个主成分特征值为 2.405, 累计贡献率为 70.657%, 说明干旱胁迫下低 AMF 对云南蓝果树的前 2 个主因子基本上能概括 10 个变量的主要信息, 所以共提取了 2 个主成分因子。各指标对应于 1 个主成分因子得分系数有极大差异, 得分越高的指标说明其对主成分的贡献越大, 其典型性越强。表 3:a 和表 3:b 显示, 在确定主成分因子数量后, 第一主成分中, 栅海比和海绵组织得分较高, 分别是 0.946 和 -0.945; 第二主成分中, 特征向量系数按照绝对值大小依次排列, 得分最高的分别为叶片结构疏松度和叶片结构紧密度, 分别是 -0.704 和 -0.709。

从表 5 和表 6 还可看出, 高 AMF 处理条件下, 云南蓝果树幼苗第 2 个主成分特征值为 2.259, 累计贡献率为 92.420%, 说明干旱胁迫下高 AMF 对云南蓝果树的前 2 个主因子基本上能概括 10 个变量的主要信息。在第一、第二主成分中, 将 2 个主成分的特征向量系数按照绝对值大小依次排列, 第一主成分居前 2 位的分别为叶片结构疏松度和叶片结构紧密度, 得分均为 -0.998, 综合反映了云南蓝果树幼苗的抗旱能力; 第二主成分居前 2 位的分别为上表皮厚度和叶片厚度, 得分分别为 0.972 和 0.979。这些指标主要反映叶片的表皮特征和组织结构特点。

## 2.5 干旱胁迫下 AMF 对云南蓝果树幼苗抗旱性的影响

通过对上述 10 个叶片解剖结构指标的综合分析,不同处理下云南蓝果树幼苗抗旱性的隶属函数结果列于表 7。从表 7 可以看出,土壤水分含量在 W1-W6 范围时,高 AMF 处理都增加了云南蓝果树幼苗叶片解剖结构特征的隶属函数值,隶属函数值分别为 0.50、0.53、0.52、0.54、0.53 和 0.46,增强了其在各水分处理条件下的抗旱性。

## 3 讨论与结论

关于 AMF 提高植物抗旱性的机理有多种解释(唐明等,1999;徐秀梅等,2002;陈冬青等,2013;吴强盛等,2004;吴强盛和夏仁学,2005),主要通过改善植株对土壤水分的吸收和利用、增强植株对养分的吸收(Nelsen & Safir,1982;Fitter,1988)和调节细胞渗透势(Ruiz et al,2001)等过程来调控植物生长(庞杰等,2013),进而增强抗旱能力。本试验中采用苯菌灵灭菌的方法来抑制 AMF 对云南蓝果树幼苗根系的侵染(陈冬青等,2013),从而可以解释本试验中 AMF 处理导致的叶片解剖结构的差异。

叶片作为对生境变化最为敏感的器官之一,其形态结构会根据外界环境特征作出相应调整(王勋陵等,1989;王森等,2001;章英才等,2003;党晓宏等,2013)。栅栏组织越发达,叶片结构紧密度越大,植物耐旱性越强(李晓燕等,1999;杨九艳等,2009)。本研究发现,随着干旱胁迫的加剧,云南蓝果树幼苗叶片结构的 10 个指标都发生了不同程度的变化,在叶片解剖结构上主要表现为叶片增厚,细胞排列紧密,栅栏组织海绵组织厚度比增大,气孔密度减少等。轻度胁迫下差异不显著,但重度胁迫下(土壤含水量小于 25.86%)云南蓝果树叶片的解剖结构会发生显著变化,W6(6.46%)处理的叶片结构性状与 W1(32.32%)处理的解剖结构差异均显著。

AMF 可提高宿主植物的抗旱性,侵染率越高,效果越明显(唐明等,1999)。Kaya et al(2003)研究表明水分会影响丛枝菌根侵染率。但是,轻度干旱胁迫对 AMF 的侵染和菌丝的发育影响不大,只有重度干旱胁迫才会限制 AMF 的侵染,进而降低共生体的抗旱性(王曙光等,2001)。本研究表明,随着干旱胁迫的加剧,AMF 处理会显著影响越来越多的叶片结构指标。土壤含水量为 25.86%时,高 AMF 处理下的叶片角质层厚度、栅栏组织厚度、上表皮厚度、栅栏组织

海绵组织厚度比、叶片结构紧密度、海绵组织厚度和叶片机构疏松度 7 个指标开始显著高于低 AMF 处理条件下的指标值,至土壤含水量为 19.39%、12.93%和 6.46%三种水分条件为止,没有出现新的指标对 AMF 处理作出反应,意味着土壤含水量 25.86%是云南蓝果树开始表现抗旱性的水分条件阈值,可以作为对云南蓝果树幼苗进行干旱胁迫响应机理分析的依据。另外,W3(25.86%)、W4(19.39%)和 W5(12.93%)处理条件下苯菌灵处理的效果较 W6(6.46%)处理时更显著,这是因为极度干旱胁迫严重抑制 AMF 的侵染,而 AMF 侵染程度会影响云南蓝果树幼苗的抗旱性。而且,AMF 处理与云南蓝果树幼苗多个叶片解剖结构特征值之间具有显著相关性,显著增强了植株的抗旱性;AMF 侵染率与云南蓝果树幼苗叶片的角质层厚度、海绵组织厚度、上表皮厚度等 5 个叶片解剖结构性状呈显著相关,随着 AMF 侵染率的升高,角质层厚度、上表皮厚度和栅海比数值会显著增加,而海绵组织厚度和叶片结构疏松度则会显著降低,证明了高 AMF 可以增强代表云南蓝果树幼苗叶片抗旱性的形态结构性状。

主成分分析和隶属函数值法已被广泛用于植物抗逆性的综合评价(马生全等,2006;许桂芳等,2009;刘滨等,2013)。本实验通过对云南蓝果树叶片的 10 个结构指标的测定分析,发现栅栏组织海绵组织厚度比、海绵组织厚度、叶片结构疏松度和叶片结构紧密度叶片厚度是反映高 AMF 条件下抗旱性结构的主要因子,叶片结构疏松度、叶片结构紧密度、上表皮厚度和叶片厚度是反映低 AMF 条件下抗旱性结构的主要因子,而这些因子与植物的水分生理指标有着直接的关系(崔宏安等,2008;朱栗琼等,2007;江川等,2011),因此我们认为可以分别用以上指标评价植物的抗旱性。在此基础上,本研究用隶属函数值法进行了综合评价。结果显示,不管土壤水分条件如何(从 W1 到 W6),AMF 处理都显著影响了幼苗的抗旱性,即高 AMF 处理下幼苗的平均隶属函数值更高,具有更强的抗旱性。

综合分析表明,干旱以及干旱胁迫下丛枝菌根真菌共生体形成的抑制一定程度上限制了云南蓝果树的天然更新,进而导致其濒危。结合云南蓝果树逐渐干旱的原生境,以往湿润的热带雨林气候已发生明显变化,导致云南蓝果树与 AMF 共生体的形成很可能会受到严重影响,进而影响到物种本身的抗旱性。因此,轻度胁迫条件下,云南蓝果树幼苗叶片



不会表现显著抗旱性特征会导致此物种天然更新困难; 重度干旱胁迫条件下, 云南蓝果树幼苗会表现出一定的抗旱性, 但却因为生境中极低的土壤含水量会显著抑制 AMF 的侵染, 日渐减弱的抗旱效果必然会导致物种处境岌岌可危, 若不加以适当保护, 此物种必将灭绝。因此, 亟需对云南蓝果树开展科学有效的保护。虽然对云南蓝果树开展了一系列保护措施, 如就地保护、近地保护、迁地保护和回归引种等, 但保护成效并不显著。基于本研究 AMF 可以增强云南蓝果树抗旱性的研究结果, 建议对保护地的云南蓝果树施加 AMF 菌剂, 然而 AMF 菌剂应用仍然存在许多问题, 需要再作进一步研究。

## 参考文献:

- BARBETA AO, PEÑUELAS RJ, 2013. Dampening effects of long-term experimental drought on growth and mortality rates of a Holm oak forest [J]. *Global Change Biol*, 19: 3133-3144.
- BARTHOLOMEUS RP, WITTE JMW, BODEGOM PM, et al, 2011. Climate change threatens endangered plant species by stronger and interacting water-related stresses [J]. *J Grophys Res*, 116: G04023.
- CHEN DQ, HUANGPU CH, LIU HM, et al, 2013. Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis* [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(7): 2113-2120. [陈冬青, 皇甫超河, 刘红梅, 等, 2013. 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响 [J]. *生态学报*, 33(7): 2113-2120.]
- CHEN W, SHI FQ, YANG WZ, et al, 2011. Population status and ecological characteristics of *Nyssa yunnanensis* [J]. *J NE For Univ*, 39(9): 17-19, 61. [陈伟, 史富强, 杨文忠, 等, 2011. 云南蓝果树的种群状况及生态习性 [J]. *东北林业大学学报*, 39(9): 17-19.]
- CUI HA, BAI HX, DING HR, et al, 2008. Study on anatomical structure of *Platanus occidentali* [J]. *J NW Forest Univ*, 23(6): 66-68. [崔宏安, 白红霞, 丁虹茹, 等, 2008. 一球悬铃木叶结构的解剖研究 [J]. *西北林学院学报*, 23(6): 66-68.]
- DANG XH, GAO Y, YU Y, et al, 2013. Effect of drought stress on anatomical structure of leave and physiological characteristics in three *Atriplex* L. seedling [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 34(5): 976-987. [党晓宏, 高永, 虞毅, 等, 2013. 3种滨藜属牧草苗期叶片解剖结构及生理特性对干旱的响应 [J]. *西北植物学报*, 34(5): 976-987.]
- FITTER AH, 1988. Water relations of red clover *Trifolium pratense* L. as affected by VA mycorrhizal infection and phosphorus supply before and during drought [J]. *J Exp Bot*, 39: 595-603.
- GUO GG, FENG B, MA BL, et al, 2013. Leaf anatomical structures of different regional *Amygdalus pedunculata* Pall. and their drought resistance analysis [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 33(4): 720-728. [郭改改, 封斌, 麻保林, 等, 2013. 不同区域长柄扁桃叶片解剖结构及其抗旱性分析 [J]. *西北植物学报*, 33(4): 720-728.]
- JI KS, SUN ZY, FANG Y, 2006. Research advance on the drought resistant in forest [J]. *J Nanjing For Univ: Nat Sci Ed*, 30(6): 123-128. [季孔庶, 孙志勇, 方彦, 2006. 林木抗旱性研究进展 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 30(6): 123-128.]
- JIANG CH, LUO DQ, WANG LH, 2011. Drought resistant characteristics of leaf structures of five shrubs in semiarid region of Tibet [J]. *J NW For Univ*, 26(4): 13-17. [江川, 罗大庆, 王立辉, 2011. 西藏半干旱区 5 种灌木叶片结构的抗旱特征研究 [J]. *西北林学院学报*, 26(4): 13-17.]
- KAYA C, HIGGS D, KIRNAK H, et al, 2003. Mycorrhizal colonization improves fruit yield and water use efficiency in watermelon (*Citrullus lanatus*) grown under well-watered and water-stressed conditions [J]. *Plant Soil*, 253-287, 292.
- LAWLER JJ, CAMPBELL SP, GUERRY AD, et al. 2002. The scope and treatment of threats in endangered species recovery plans [J]. *Ecol Appl*, 12: 663-667.
- LI FL, BAO WK, 2005. Responses of the morphological and anatomical structure of the plant leaf to environment change [J]. *Chin Bull Bot*, 22(S1): 118-127. [李芳兰, 包维楷, 2005. 植物叶片形态解剖结构对环境变化的响应与适应 [J]. *植物学通报*, 22(S1): 118-127.]
- LI XY, LI LG, LIU ZH, et al, 1994. A study on the relation of tissue structure and drought resistance on grape leaf [J]. *J Inn Mongolia Ins Agr & Anim Husb*, 15(3): 30-32. [李晓燕, 李连国, 刘志华, 1994. 腾格里沙漠主要旱生植物旱性结构的初步研究 [J]. *内蒙古农业大学学报*, 15(3): 30-32.]
- LIU B, PENG L, ZHENG LP, et al, 2013. Drought resistance study of 10 major ornamental shrub in Ningxia [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 33(9): 1808-1816. [刘滨, 彭励, 郑丽萍, 2013. 宁夏 10 种观赏灌木叶片解剖结构及其抗旱性综合评价 [J]. *西北植物学报*, 33(9): 1808-1816.]
- LIU WJ, LI HM. 1997. Tourist climate resources in Xishuangbanna [J]. *Nat Resour*, 2: 62-66. [刘文杰, 李红梅, 1997. 西双版纳的旅游气候 [J]. *自然资源*, 2: 62-66.]
- MA SQ, GONG ZT. 2006. The research advances in fuzzy complex analysis [J]. *Math Pract & Theory*, 36(5): 200-211. [马生全, 巩增泰, 2006. 模糊复杂分析学的研究进展 [J]. *数学的实践与认识*, 36(5): 200-211.]
- MEEHL GA, TEBALDI C, 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st Century [J]. *Science*, 305: 994-997.
- NELSEN CE, SAFIR GR, 1982. The water relations of well-watered, mycorrhizal and nonmycorrhizal onion plants [J]. *J Am Soc Hortic Sci*, 107: 71-74.
- PANG J, ZHANG FL, HAO LZ, et al. 2013. Effect of drought stress on anatomical structure and photosynthesis of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. leaves in seedling [J]. *Ecol & Environ Sci*, 22(4): 575-581. [庞杰, 张凤兰, 郝丽珍, 等, 2013. 沙芥幼苗叶片解剖结构和光合作用对干旱胁迫的响应 [J]. *生态环境学报*, 22(4): 575-581.]
- REN YY, LIU YP, WANG N, et al, 2014. The relationship between leaf anatomic structure and drought resistance of nine broadleaf plants [J]. *J Nanjing For Univ: Nat Sci Ed*, 38(4): 64-68. [任媛媛, 刘艳萍, 王念, 等, 2014. 9 种屋顶绿化阔叶植物叶片解剖结构与抗旱性的关系 [J]. *南京林业大学学报·自然科学版*, 38(4): 64-68.]
- RIGOBERTO RS, JOSUE AAG, CALROS TL, et al, 2004. Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought stressed common bean cultivars [J]. *J Field Crop Res*, 85: 203-211.
- RUIZ, LOZANO JM, COLLADOS C, et al, 2001. Cloning of

- cDNAs encoding SODs from lencee plants which show differential regulation by arbuscular mycorrhizal symbiosis and by drought stress [J]. *J Exp Bot*, 52: 2241-2242.
- SCHÄRC, VIDALE PL, LÜTHI D, et al, 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves [J]. *Nature*, 427: 332-336.
- SMORENBURG K, COURREGES-LACOSTE GB, BERGER M, et al, 2003. Practical applications of chlorophyll fluorescence in plant biology [M]. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 42: 178-190.
- TANG M, CHEN H, SHANG HS, 1999. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on *Hippophae rhamnoides* drought resistance [J]. *Sci Silv Sin*, 35(3): 48-52. [唐明, 陈辉, 商鸿生, 1999. 丛枝菌根真菌对沙棘抗旱性的影响 [J]. *林业科学*, 35(3): 48-52.]
- WANG M, DAI LM, JI LZ, et al, 2001. A preliminary study on ecological response of dominant tree species in Korean pine broadleaf forest at Changbai Mountain to soil water stress and their biomass allocation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 12(4): 496-500. [王淼, 代力民, 姬兰柱, 等, 2001. 长白山阔叶红松林主要树种对于旱胁迫的生态反应及生物量分配的初步研究 [J]. *应用生态学报*, 12(4): 496-500.]
- WANG SG, LIN XG, SHI YQ, 2001. Effects of arbuscular mycorrhiza on resistance of plants to environment stress [J]. *Chin J Ecol*, 20(3): 27-30. [王曙光, 林先贵, 施雅琴, 2001. 丛枝菌根(AM)与植物的抗逆性 [J]. *生态学杂志*, 20(3): 27-30.]
- WANG XL, WANG J, 1989. Morphology and structure of plant and environment [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press: 105-138. [王勋陵, 王静, 1989. 植物的形态结构与环境 [M]. 兰州: 兰州大学出版社: 105-138.]
- WU QS, XIA RX, HU ZJ, 2005. Effects of arbuscular mycorrhiza on drought tolerance of *Poncirus trifoliata* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 16(3): 459-463. [吴强盛, 夏仁学, 胡正嘉, 2005. 丛枝菌根对枳实生苗抗旱性的影响研究 [J]. *应用生态学报*, 16(3): 459-463.]
- WU QS, XIA RX, 2004. The relation between vesiculararbuscular mycorrhizae and water metabolism in plants [J]. *Chin Agr Sci Bull*, 20(1): 188-192. [吴强盛, 夏仁学, 2004. VA菌根与植物水分代谢的关系 [J]. *中国农学通报*, 20(1): 188-192.]
- WU QS, XIA RX, 2005. Effects of AM fungi on drought tolerance of citrus grafting seedling trifoliolate orange/cara [J]. *Chin J Appl Ecol*, 16(5): 865-869. [吴强盛, 夏仁学, 2005. 水分胁迫下丛枝菌根真菌对枳实生苗生长和渗透调节物质含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 16(5): 865-869.]
- XU GF, ZHANG CY, XIANG ZX, 2009. Comprehensive evaluation of cold resistance on four *Lysimachia* plants by subordinate function values analysis [J]. *J Northwest For Univ*, 24(3): 24-26. [许桂芳, 张朝阳, 向佐湘, 2009. 利用隶属函数法对4种珍珠菜属植物的抗寒性综合评价 [J]. *西北林学院学报*, 24(3): 24-26.]
- YANG JY, YANG J, YANG MB, et al, 2009. Mechanisms of ecological adaptation of *Caragana stenophylla* to drought stress in different habitats [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 29(12): 2476-2482. [杨九艳, 杨劼, 杨明博, 等, 2009. 锦鸡儿属7种植物叶的生理生化分析 [J]. *西北植物学报*, 29(12): 2476-2482.]
- YANG ZY, LIAO SX, 2005. Advances in the research on the effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant stress resistance [J]. *World For Res*, 18(2): 26-29. [杨振寅, 廖声熙, 2005. 丛枝菌根对植物抗性的影响研究进展 [J]. *世界林业研究*, 18(2): 26-29.]
- ZHANG YC, YAN TZ, 2003. Study on relationship between anatomical structure of leaves of *Karelinia capsia* (pall) less and ecological environment [J]. *J Ningxia Agric Coll*, 24(1): 31-33. [章英才, 闫天珍, 2003. 花花草叶片解剖结构与生态环境关系的研究 [J]. *宁夏农学院学报*, 24(1): 31-33.]
- ZHU LQ, LI JY, ZHAO L, 2007. Comparison on leaf anatomical structures and drought resistance of six broad leaved plant species [J]. *Guihaia*, 27(3): 431-436. [朱栗琼, 李吉跃, 招礼军, 2007. 六种阔叶树叶解剖结构特征及其耐旱性比较 [J]. *广西植物*, 27(3): 431-436.]

(上接第1244页 Continue from page 1244)

- 影响 [J]. *核农学报*, 19(2): 88-91.]
- XING WC, YUN Q, ZHAO MA, et al, 2006. Effects of antibiotics on the formation and proliferation of *Lavandula Angustifolia* calli [J]. *J SW Agric Univ: Nat Sci Ed*, 28(4): 533-536. [邢文超, 贡强, 赵民安, 等, 2006. 抗生素对薰衣草愈伤组织诱导和生长的影响 [J]. *西南农业大学学报·自然科学版*, 28(4): 533-536.]
- XU SH, XU XL, 2004. Bacteriostic agent selection in plant genetic transformation [J]. *Bull Bot Res*, 24(4): 491-494. [徐淑红, 徐香玲, 2004. 植物遗传转化中抑菌剂的选择 [J]. *植物研究*, 24(4): 491-494.]
- YU YM, WANG JH, MA WJ, et al, 2014. Effect of the Kanmycin and Hygromycin on *Catalpa bungei* in vitro culture [J]. *Lett Biotechnol*, 6: 832-836. [于永明, 王军辉, 麻文俊, 等, 2014. 不同浓度卡那霉素、潮霉素对楸树试管苗生长的影响 [J]. *生物技术通讯*, 6: 832-836.]
- ZHAN LP, JIANG J, ZHAO X, et al, 2004. Effect of antibiotics on *Agrobacterium* and the formation rate of adventitious buds from leaves of *Populus simonii* × *P. nigra* [J]. *Plant Physiol Comm*, 40(6): 689-692. [詹立平, 姜静, 赵鑫, 等, 2004. 农杆菌抑菌剂的抑菌效果及其对小黑杨叶片不定芽产生率的影响 [J]. *植物生理学通讯*, 40(6): 689-692.]
- ZHENG J, KANG W, HONG HZ, et al, 2006. Antibiotics in the application of transgene mediated by *Agrobacterium* [J]. *Chin For Sci Technol*, 20(3): 8-11. [郑进, 康薇, 洪华珠, 等, 2006. 抗生素在农杆菌介导植物转基因中的应用 [J]. *林业科技开发*, 20(3): 8-11.]