

土壤干旱胁迫对樟树 (*Cinnamomum camphora* (L.) Presl) 苗木水力结构特征的影响

王 丁, 姚 健, 薛建辉*

(南京林业大学江苏省林业生态工程重点实验室, 江苏南京 210037)

摘要:植物水力结构特征通常用导水率(K_h)、比导率(K_s)、叶比导率(LSC)、胡伯尔值(H_v)等参数来表征。设置了 3 种土壤干旱胁迫强度和对照共 4 种处理, 每一处理 5 个重复, 采用“冲洗法”对喀斯特地区造林树种两年生樟树 (*Cinnamomum camphora* (L.) Presl) 苗木的水力结构相关参数进行测定。结果表明: 樟树苗木在正常水分和不同强度土壤干旱胁迫条件下, 其茎段导水率、比导率、叶比导率、胡伯尔值均与茎段直径呈正相关关系, 并可以用不同类型函数进行拟合。随着干旱胁迫强度的加剧, 不同处理的导水率、比导率、叶比导率降低, 胡伯尔值在不同处理间的差异不显著。这说明较粗的茎段, 其单位横截面积的导管投入与使用效率明显高于较细茎段, 且供给末端叶片水分所需要的压力梯度小于较细茎段。结果为进一步探讨土壤干旱对樟树苗木水力结构作用机理及在石漠化山地造林的适应性提供理论依据。

关键词:喀斯特; 樟树; 水力结构; 干旱胁迫

文章编号: 1000-0933(2009)05-2725-07 中图分类号: Q142, Q948, S718 文献标识码: A

Effects of soil drought stress on hydraulic architecture characteristics of camphor seedlings

WANG Ding, YAO Jian, XUE Jian-Hui*

Jiangsu Provincial Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering, Nanjing Forestry University, Jiangsu Nanjing 210037, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2725 ~ 2731.

Abstract: Hydraulic architecture characteristics of plants are usually expressed by such parameters as hydraulic conductivity (K_h), specific conductivity (K_s), leaf specific conductivity (LSC) and Huber value (H_v) and so on. In this article, Hydraulic architecture characteristic parameters of camphor seedlings (*Cinnamomum camphora* (L.) Presl) which is the important tree species in Karst afforestation was measured and analyzed by a “flushing method” with four treatments (i. e. three intensity of soil drought stress treatments and control treatment in greenhouse). Each treatment had 20 repeated samples. The result showed that the K_h , K_s , LSC and H_v was affected by the stem segment diameter both non-stress and drought stress condition. The relationship between the index and the diameter was positive correlation, and could be described in different functions. The hydraulic conductivity, specific conductivity and leaf specific conductivity of camphor seedlings evidently decreased with increase of intensity of drought stress. However, change of Huber value was not significant under different drought stress. These results indicate that the transmit efficiency of branch with wider diameter provided less pressure gradient than the thinner branch was obviously higher than that of the thinner branch.

Key Words: Karst area; camphor seedlings; hydraulic architecture; drought stress

自 20 世纪 80 年代以来, 许多学者在对林木耐旱性及其生理生态学机理的研究方面, 取得了一系列的研

基金项目: 国家十一五科技支撑计划课题资助项目(2006BAD03A0303)

收稿日期: 2008-05-27; 修订日期: 2008-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jhxue@nifu.edu.cn

究成果^[1~12],并侧重于渗透调节、膨压维持、气孔的运动、组织弹性的调整、原生质耐脱水能力等林木生理指标与抗旱性的相关性研究。李吉跃等把植物耐旱性的“本质特征”和“表现状态”相结合,提出了更为完善的林木耐旱分类体系^[13]。然而,树木的上述生理指标参数能否真正改善树木的耐旱行为仍未得到实验证实^[14]。20 世纪 70 年代 Zimmermann 提出的水力结构理论^[15],是指植物在特定的环境条件下,为适应生存竞争的需要所形成的不同形态结构和水分运输供给策略,其特征通常用导水率(Kh)、比导率(Ks)、叶比导率(LSC)和胡伯尔值(Hv)等参数来表征。树木个体在整个生长发育期间可通过改变水力结构来影响导水阻力和水分需求,从而对水分运输和水分平衡产生深刻影响。

我国西南喀斯特地区,虽地处南方湿润区,但由于岩石裸露率高,土体不连续且土层浅薄,水分的渗漏性强,常造成土壤季节性干旱和水分不足。樟树(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl)作为我国西南地区广泛分布的常绿阔叶树种,成为广泛应用于喀斯特石漠化地区重要造林树种之一。本文以盆栽两年生樟树苗木为材料,测定了干旱胁迫条件下樟树苗木水力结构参数,探讨其对水分的运输、分配策略以及内在机理,为阐明其抗旱生理机制及在喀斯特石漠化地区造林的适应性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择正常生长且均匀一致的樟树(2 年生)苗木共 20 株,于 2007 年 11 月移入花盆(23cm×26cm)栽植后正常培养,并于 2008 年 5 月开始测定相关生理参数。将测试苗木分为 A、B、C 三个不同干旱胁迫强度和对照 4 个处理,每个处理 5 个重复。处理前先充分浇水 3d,然后任其自然干旱。各处理的土壤含水量如下:

对照(正常水分) 始终保持含水量在田间持水量的 85% 以上;

A 处理(轻度胁迫) 土壤含水量为田间持水量的 75% 左右;

B 处理(中度胁迫) 土壤含水量为田间持水量的 60% 左右;

C 处理(重度胁迫) 土壤含水量为田间持水量的 45% 左右。

处理后每天用取土烘干法监测盆栽土壤含水量变化,并用称重法保持同一处理各重复间含水量相对一致。当土壤自然干旱到各处理的设定含水量时进行取样测定。

1.2 测定方法

将被测苗木截成 3cm 左右的茎段,并测定各个茎段的直径和长度,直径取上下端直径平均值,茎末端叶片干重用烘干称重法(110℃,8h)测定。采用改良的“冲洗法”测定植物水力结构参数测定^[14,15],即用溶液在一定压力梯度下冲洗枝条内部的栓塞,为避免导水率在实验过程中下降,冲洗溶液用 0.1mol/L 草酸溶液,压力梯度(ΔP)定义为加载茎段末端的压力(Mpa)除以茎段长度(L)。由于本次试验材料使用的 2 年生樟树苗木尚未形成明显的边材与心材,故以枝条直径代替功能木质部直径。

1.3 数据分析

所测数据用 excel 统计软件来处理

2 结果与分析

2.1 茎段直径对导水率的影响

单位压力梯度下的导水率(Kh)是最常测量的参数,它等于通过一个离体茎段的水流量($F, \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)与该茎段引起水流动的压力梯度($dp/dx, \text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)的比值,即:

$$Kh = F / (dp/dx) \quad (1)$$

由式 1 可见,水流量 F 与导水率 Kh 的大小成正比,而 F 值是随茎段直径的增加而上升。这说明在压力梯度一定的情况下,当离体植物茎段越粗,其单位时间内导水量越大,这是因为较粗的茎中相应含有更多的输水组织。具有较高 Kh 值的茎段,其导水率越大,导水能力较强。

结果分析表明,在正常水分条件下,樟树苗木茎段直径在 1.49~4.46mm 范围内,其木质部导水率的变化范围为 0.026~0.322 $\text{g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,木质部导水率随着茎段直径增大而增加,这是由于较粗的茎段所投

人的导管数量较多,二者关系可用指数函数较好的拟合:

$$y = 0.0108e^{0.8006x} \quad (n = 22, R^2 = 0.9703)$$

式中, y 表示导水率, x 表示被测茎段直径。

2.2 茎段直径对比导率的影响

比导率(K_s)是指单位茎段边材横截面积的导水率,将导水率除以茎段边材横截面积,便得出比导率 K_s ,它标志该茎段孔隙值的大小,则:

$$K_s = Kh / A\omega \quad (2)$$

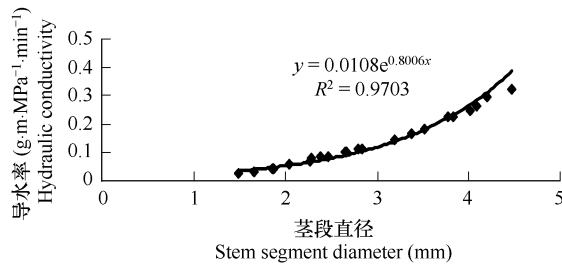


图1 茎段直径对木质部导水率的影响

Fig.1 Effect of stem segment diameter on Kh

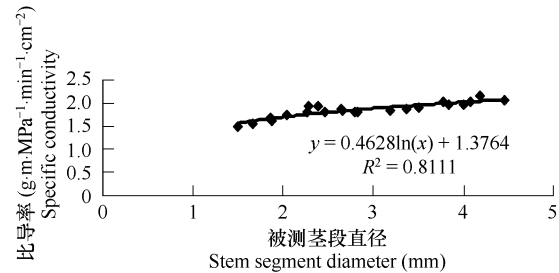


图2 茎段直径对比导率的影响

Fig.2 Effect of stem segment diameter on K_s

由此可见,如果每单位茎横截面的导管数量或导管直径增加, K_s 值就会增大, K_s 值可能随纹孔膜多孔性及导管长度的减少而降低。它反映出树木各部分输水系统的效率。在茎段边材横截面积一定的情况下, K_s 越大,则说明该部分输水效率越高,单位有效面积的输水能力越强。

在正常水分条件下,樟树苗木的比导率随被测茎段的直径增大而增加,二者关系可以用对数函数得到较好的拟合:

$$y = 0.4628\ln(x) + 1.3764 \quad (n = 22, R^2 = 0.8111)$$

由图2可以看出,茎段直径在1.49~4.46mm变化范围内时,比导率的变化范围为1.476~2.062 $\text{g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。随着被测茎段直径的增大,其比导率增大,即输水效率就越高,这说明两年生樟树苗木直径越大,木质部导管的孔隙度就越大,其对水分的运输效率就越高,这对于植物在干旱胁迫条件下对水分的运输和分配是非常重要的。当植物受到干旱胁迫时总是先牺牲那些较细的生物量积累较小的枝条从而保证较粗的主干能够得到水分,这是植物在长期进化的过程中形成的一种自我保护机制。

2.3 被测茎段直径对叶比导率的影响

叶比导率(LSC)是茎段末端叶片供水情况的重要指标,用 Kh 除以茎段末端的叶面积(LA, m^2)或叶干重(Al, g)时,可得到表明,即:

$$LSC = Kh / LA \quad (3)$$

LSC 越大,说明单位叶面积的供水情况越好。

在正常水分情况下,樟树苗木叶比导率随着茎段直径增大而增大,二者可以用线性函数得到较好的拟合:

$$y = 0.0286x - 0.0301 \quad (n = 22, R^2 = 0.9704)$$

另外,根据导水率公式及蒸腾速率的计算公式可以得出:

$$dp/dx = E / LSC \quad (4)$$

式中, E 为蒸腾速率。

由上式可以看出,在蒸腾速率相同的情况下, LSC 值越大,其茎段供水给叶子所需的压力梯度就越小,即茎段的输水能力也越强。由图3可以看出,直径为4.46mm的茎段叶比导率为0.104 $\text{g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$,是直径为1.49mm茎段的叶比导率(0.016 $\text{g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)的6倍。这说明在相同的蒸腾速率的情况

下直径为 4.46mm 的茎段给叶片供水所需要的压力梯度为直径 1.49mm 茎段的 1/6。因此在干旱条件下直径较粗的枝条会更容易获得水分补给,从而保证生物量积累较大的重要器官不受干旱胁迫造成的伤害。

2.4 茎段直径对胡伯尔值的影响

胡伯尔值是指把茎段或枝条木质部横截面积(或边材横截面积)除以所测茎段或枝条末端的叶面积或者叶干重所得的值:

$$Hv = A\omega/LA \quad (5)$$

该值表示维持每单位叶面积或干重所投入的茎段组织的多少。胡伯尔值越大,说明维持单位叶面积水分供给所需的茎干组织就越粗。就不同植物而言,其胡伯尔值是不同的。通过上述定义还可以推出:

$$LSC = Hv \cdot Ks \quad (6)$$

由此可见,植物供水情况决定于两个方面:(1)具有发达的输水组织,即茎和枝条的粗度和长度较大;(2)输水组织具有高的输水效率。

在正常水分条件下,樟树苗木胡伯尔值随着被测茎段直径的增大而增加,二者可以用线性函数得到较好的拟合:

$$y = 0.013x - 0.01 \quad (n = 22, R^2 = 0.9786)$$

测定结果表明,直径为 4.46mm 的茎段其胡伯尔值($0.051 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$)为直径 1.49mm 茎段胡伯尔值($0.011 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$)的近 5 倍,这表明随着枝条直径的增大,供给茎末端单位叶片水分所投入的导管组织就越多。

2.5 不同干旱胁迫强度对樟树苗木水力结构特征的影响分析

2.5.1 对导水率的影响

由表 1 可以看出,无论是在正常水分条件或处于干旱胁迫条件下,樟树苗木的枝条直径与导水率的关系都呈正相关关系。干旱胁迫条件下,苗木枝条直径与导水率的关系成幂函数相关关系,但随着干旱胁迫程度的增加其导水率会逐渐下降。以直径 2~3mm 的枝条导水率平均值为例,当土壤水分含量从正常水平下降到轻度胁迫时,其导水率平均值从 $0.09 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 下降到 $0.05 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,导水率损失率为 45% 左右。此时干旱胁迫程度仅为轻度干旱,而苗木枝条导水率的损失程度已经接近一半,这可能是樟树苗木在干旱胁迫初期的保护性反应,导水率的迅速丧失不利于苗木的生长,但同时也可减少蒸腾和体内水分的散失,从而有利于苗木度过干旱期。当干旱胁迫程度进一步加剧到中度胁迫程度时,导水率继续下降,从 $0.05 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 下降至 $0.0127 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$,导水率损失超过 85%,此时苗木叶片已经出现典型干旱胁迫症状。当土壤干旱胁迫强度继续加剧到重度胁迫时,樟树苗木导水率的损失已超过 98%,此时叶子开始卷曲脱落,苗木已经濒临死亡。另外还可以看出,随着干旱胁迫程度的加剧,导水率的丧失趋于缓慢,这可能有利于苗木尽可能保证其生存用水的需求。

2.5.2 对比导率的影响

比导率可以反映出苗木枝条对水分运输的效率。由表 2 可知无论是在正常水分还是在干旱胁迫条件下,樟树苗木枝条对水分的运输效率均随着枝条直径的增大而增大。在正常水分条件下,其关系呈对数函数;在 3 种干旱胁迫条件下,其关系均呈二项式函数关系。结果表明,随着干旱胁迫程度的增大,苗木比导率则相应

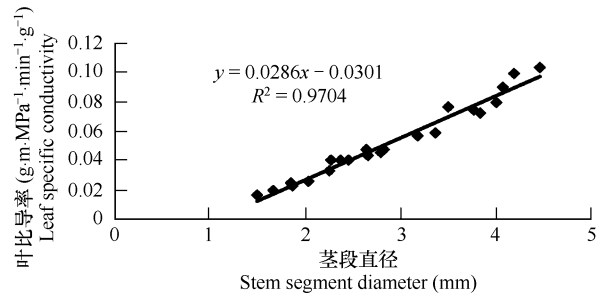


图 3 茎段直径对叶比导率的影响

Fig. 3 Effect of stem segment diameter on LSC

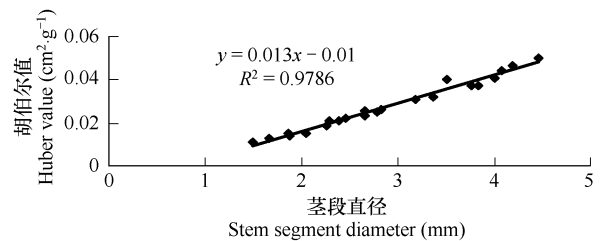


图 4 樟树苗木直径对胡伯尔值的影响

Fig. 4 Effect of stem segment diameter on Hv

的减小。以 2~3mm 直径枝条为例,当土壤水分含量从正常水平下降至轻度胁迫时,其比导率均值从 $1.8383 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 下降至 $1.0286 \text{ g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \text{cm}^{-2}$,输水效率下降 44%;当胁迫强度增大至中度或重度胁迫时,苗木输水效率分别比正常水平下降 88% 和 99%。

表 1 不同干旱胁迫条件下樟树苗木枝条直径与导水率的相关分析

Table 1 Correlation analysis between diameter of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl seedlings and K_h in different drought stress

胁迫强度 Intensity of stress	关系函数 Correlation function	相关系数 Correlation coefficient	2~3mm 导水率均值 2~3mm K_h average
正常水分($n=22$) Normal levels	$y = 0.0108e^{0.8006x}$	$R^2 = 0.9703$	0.0900 ± 0.0192
轻度胁迫($n=22$) Mild stress	$y = 0.0061x^{2.2569}$	$R^2 = 0.991$	0.0500 ± 0.0126
中度胁迫($n=23$) Moderate stress	$y = 0.0015x^{2.1775}$	$R^2 = 0.9933$	0.0127 ± 0.0032
重度胁迫($n=20$) Serious stress	$y = 0.0003x^{2.2084}$	$R^2 = 0.9894$	0.0021 ± 0.0005

n 为样本数, x 为枝条直径,其取值范围为(1~5)mm n is sample number, x is the stem segment diameter and its range from 1mm to 5mm

表 2 不同干旱胁迫条件下樟树苗木枝条直径与比导率的相关分析

Table 2 Correlation analysis between diameter of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl seedlings and K_s in different drought stress

胁迫强度 Intensity of stress	关系函数 Correlation function	相关系数 Correlation coefficient	2~3mm 比导率均值 2~3mm K_s average
正常水分($n=22$) Normal levels	$y = 0.4628\ln(x) + 1.3764$	$R^2 = 0.8111$	1.8383 ± 0.0645
轻度胁迫($n=22$) Mild water stress	$y = -0.0788x^2 + 0.5466x + 0.1553$	$R^2 = 0.786$	1.0286 ± 0.0451
中度胁迫($n=23$) Moderate stress	$y = -0.0146x^2 + 0.1037x + 0.0639$	$R^2 = 0.7095$	0.2341 ± 0.0122
重度胁迫($n=20$) Serious stress	$y = -0.0037x^2 + 0.0254x + 0.0019$	$R^2 = 0.7083$	0.0425 ± 0.0028

n 为样本数, x 为枝条直径,其取值范围为(1~5)mm n is sample number x is the stem segment diameter and its range from 1mm to 5mm

2.5.3 对叶比导率的影响

由表 3 可知,无论是在正常水分还是不同强度干旱胁迫下,其叶比导率均随苗木茎段直径的增加而提高,两者关系函数可用线性函数来表示。随着干旱胁迫强度的增加,其枝条叶比导率出现不同程度的下降趋势,在轻度、中度和重度干旱胁迫下,苗木 2~3mm 枝条的平均叶比导率分别为 0.0229、0.0056、0.0009 $\text{g} \cdot \text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \text{g}^{-1}$,分别比正常水平(对照)下降 43%、86% 和 98%。

表 3 不同干旱胁迫条件下樟树苗木枝条直径与叶比导率的相关分析

Table 3 Correlation analysis between diameter of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl seedlings and LSC in different drought stress

胁迫强度 Intensity of stress	关系函数 Correlation function	相关系数 Correlation coefficient	2~3mm 比导率均值 2~3mm LSC average
正常水分($n=22$) Normal levels	$y = 0.0286x - 0.0301$	$R^2 = 0.9704$	0.0404 ± 0.0069
轻度胁迫($n=22$) Mild water stress	$y = 0.0147x - 0.0132$	$R^2 = 0.9784$	0.0229 ± 0.0040
中度胁迫($n=23$) Moderate stress	$y = 0.0035x - 0.0033$	$R^2 = 0.9449$	0.0056 ± 0.0010
重度胁迫($n=20$) Serious stress	$y = 0.0006x - 0.0006$	$R^2 = 0.9816$	0.0009 ± 0.0001

n 为样本数, x 为枝条直径,其取值范围为(1~5)mm n is sample number x is the stem segment diameter and its range from 1mm to 5mm

2.5.4 对胡伯尔值的影响

测定结果表明,无论是在正常水分还是不同强度干旱胁迫下,其胡伯尔值均随苗木茎段直径的增加而提高,两者关系函数可用线性函数来表示。无论是在正常水分或不同程度干旱胁迫条件下,苗木的胡伯尔值变化不大。以 2~3mm 直径枝条为例,其不同处理条件下胡伯尔值的差异不显著。

3 结论与讨论

(1)樟树苗木在正常水分和不同强度土壤干旱胁迫条件下,其茎段导水率均随着茎段直径的增大而增加,其相关关系呈指数函数(正常水分)或幂函数(干旱胁迫)关系。在干旱胁迫初期,导水率迅速丧失虽不利于苗木的生长,但是也因此减少蒸腾,减少了体内水分的散失,从而有利于苗木度过干旱期,另外随着干旱胁迫

迫程度的加剧,导水率的丧失趋于缓慢则有利于苗木尽可能保证其生存用水的需求。

表 4 不同干旱胁迫条件下樟树苗木枝条直径与胡伯尔值的相关分析

Table 4 Correlation analysis between diameter of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl seedlings and H_v in different drought stress

胁迫强度 Intensity of stress	关系函数 Correlation function	相关系数 Correlation coefficient	2~3mm 比导率均值 2~3mm LSC average
正常水分 ($n=22$) Normal levels	$y=0.013x-0.01$	$R^2=0.9786$	0.0220 ± 0.0036
轻度胁迫 ($n=22$) Mild water stress	$y=0.0126x-0.0085$	$R^2=0.9793$	0.0222 ± 0.0032
中度胁迫 ($n=23$) Moderate stress	$y=0.0134x-0.0104$	$R^2=0.9553$	0.0239 ± 0.0036
重度胁迫 ($n=20$) Serious stress	$y=0.0127x-0.0094$	$R^2=0.9646$	0.0217 ± 0.0028

n 为样本数, x 为枝条直径, 其取值范围为 (1~5) mm n is sample number x is the stem segment diameter and its range from 1 mm to 5 mm

(2) 无论正常水分条件或不同强度干旱胁迫条件下, 樟树苗木的比导率和枝条直径均呈明显的正相关, 其关系函数分别呈对数函数 (正常水分) 或二项式函数 (干旱胁迫) 关系, 这表明直径较大的枝条其单位横截面积的导管投入与使用效率明显高于那些直径较小的枝条。

(3) 无论正常水分条件或不同强度干旱胁迫条件下, 樟树苗木的叶比导率和茎段直径之间均呈线性正相关, 这进一步表明了较粗的枝条相对于较细的枝条投入了更多的水分输导组织, 其供给末端单位叶片水分所需要的压力梯度相对小于较细的枝条。苗木胡伯尔值与枝条直径也呈明显的线性正相关, 即胡伯尔值随枝条直径的增大而增大, 且不同处理之间差异不明显。

(4) 随着干旱胁迫的加剧, 相同直径的苗木其导水率、比导率和叶比导率均明显下降, 而胡伯尔值变化不大。由于 $LSC = H_v \cdot K_s$, 因此可以认为, 相同直径茎段, 干旱胁迫导致 LSC 差异主要是由 K_s 的变化引起的, 即苗木的水分胁迫主要是由木质部导管空穴和栓塞的形成所致这与翟鸿波^[16]在元宝枫上的研究结果基本一致。

今后应对空穴和栓塞形成的水势临界点大小及苗木恢复水分供应后导管空穴与栓塞消失的机理等展开深入研究对于揭示树木抗旱性的生理生态学机理就有理论意义和应用价值。

References:

- [1] Tang Z C. On the study of drought ecophysiology in plants. *acta ecologica sinica*, 1983, 3(3): 195—204.
- [2] Li J Y. Preliminary of ability of drought resistance on *Pinus tabulaeformis* and *platycladus orientalis*. *Journal of Beijing Forestry University*, 1988, 10(2): 23—30.
- [3] Li J Y. An Application of PV Technique to Study Drought Resistance of *Pinus tabulaeformis* and *platycladus orientalis* Seedlings. *Journal of Beijing Forestry University*, 1989, 11(1): 3—11.
- [4] Li J Y. A Study on drought resistance of typical afforest tree in region of Taihang. *Journal of Beijing Forestry University*, 1991, Supplement(1-2): 1—24, 230—238.
- [5] Li J Y, Zhang J G, Jiang J P. Studies on Classification Models and Mechanisms of Drought Tolerance of Chief Afforestation Species in the Northern Part of China (I). *Journal of Beijing Forestry University*, 1993, 15(3): 1—9.
- [6] Li J Y, Zhang J G, Jiang J P. A Study on Water Parameter of Plantation in the Western Mountain Area of Beijing (I). *Journal of Beijing Forestry University*, 1994, 16(1): 1—12.
- [7] Li J Y, Zhang J G, Jiang J P. A Study on Water Parameter of Plantation in the Western Mountain Area of Beijing (II). *Journal of Beijing Forestry University*, 1994, 16(2): 1—9.
- [8] Li J Y, Zhang J G, Jiang J P. A Study on Water Parameter of Plantation in the Western Mountain Area of Beijing (III). *Journal of Beijing Forestry University*, 1994, 16(4): 46—54.
- [9] Wang W L. Application of Pressure Chamber on water status of plants. *Plant Physiology Communications*, 1984, (3): 52—57.
- [10] Wang M B, Li J H, Chai B F. Water Ecophysiological Characteristics of *Caragana Korshinskii*. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(6): 494—501.
- [11] Yu L F, Zhu S Q, Ye J Z. Preliminary Study on the Adaptability of Tolerate-Drought for Different Species Group in Karst Forest. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2002, 26(1): 19—22.

- [12] Li J Y, Zhang J G, Jiang J P. Mechanisms of Drought Tolerance character of *Platycladus orientalis* Source. *Scientia Silvae Sinicae*, 1997, 33(4): 1—13.
- [13] Li J Y. Mechanisms of Drought Tolerance in Plants. *Journal of Beijing Forestry University*, 1991, 13(3): 92—100.
- [14] Tyree M T, Ewers F W. The hydraulic architecture of tree and other woody plants. *New Phytologist*, 1991, 119: 345—360.
- [15] Zimmermann MH. Hydraulic architecture of some diffuse-porous trees. *Canadian Journal Botany*, 1978, 56: 2286—2295.
- [16] Zhai H B, Li J Y. Hydraulic Characters of *Acer truncatum* Seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1411—1415.

参考文献:

- [1] 汤章城. 植物干旱生态生理的研究. *生态学报*, 1983, 3(3): 195—204.
- [2] 李吉跃. 油松侧柏抗旱能力初探. *北京林业大学学报*, 1988, 10(2): 23—30.
- [3] 李吉跃. P-V 技术在油松侧柏苗木抗旱特性研究中的应用. *北京林业大学学报*, 1989, 11(1): 3—11.
- [4] 李吉跃. 太行山主要造林树种抗旱特性的研究(Ⅰ)~(Ⅵ). *北京林业大学学报*, 1991, 增刊(1-2): 1—24, 230—280.
- [5] 李吉跃, 张建国, 姜金璞. 北方主要造林树种耐旱机理及其分类模型的研究(Ⅰ). *北京林业大学学报*, 1993, 15(3): 1—9.
- [6] 张建国, 李吉跃, 姜金璞. 北京西山区人工林水分参数研究(Ⅰ). *北京林业大学学报*, 1994, 16(1): 1—12.
- [7] 张建国, 李吉跃, 姜金璞. 北京西山区人工林水分参数研究(Ⅱ). *北京林业大学学报*, 1994, 16(2): 1—9.
- [8] 张建国, 李吉跃, 姜金璞. 北京西山区人工林水分参数研究(Ⅲ). *北京林业大学学报*, 1994, 16(4): 46—54.
- [9] 王万里. 压力室在植物水分状况研究中的应用. *植物生理学通讯*, 1984, (3): 52—57.
- [10] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰. 柠条(*Caragana Korshinskii*)的水分生理生态学特性. *植物生态学报*, 1996, 20(6): 494—501.
- [11] 俞理飞, 朱守谦, 叶镜中. 喀斯特森林不同种组的耐旱适应性. *南京林业大学学报*, 2002, 26(1): 19—22.
- [12] 李吉跃, 张建国, 姜金璞. 侧柏种源耐旱特性及其机理研究. *林业科学*, 1997, 33(4): 1—13.
- [13] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理. *北京林业大学学报*, 1991, 13(3): 92—100.
- [16] 翟鸿波, 李吉跃. 元宝枫的水力结构特征. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1411—1415.