

楸树品种间水分特征曲线主要参数比较与抗旱性评价

岑显超^{1,2}, 彭方仁¹, 陈隆升¹, 杨燕¹

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 江西省水土保持科学研究所, 江西 南昌 330029)

摘要: 由于自花不孕、旱地造林技术不当等因素导致楸树 *Catalpa bungei* 资源急剧下降。利用水分特征曲线测定 3 个楸树品种(金丝楸, 周楸 2 号, 圆基长果楸)的 11 个水分特征参数, 旨在为我国干旱、半干旱地区造林树种选择及进一步开发楸树资源提供理论依据。供试 1 年生楸树扦插苗分别进行 Hoagland 营养液 + 120 g·L⁻¹PEG 6000 模拟干旱胁迫处理()及 Hoagland 营养液对照处理(), 处理 1 d 后, 取茎段用 hammel 逐渐升压连续测定法进行测定。结果表明, 在饱和和含水时的渗透势 Ψ_{π}^{100} 、组织充分膨胀时的压力势 Ψ_{p100} 、质外体水 V_b 、质外体水与共质体水比值 V_b/V_f 、质外体水相对含量 C_{AW} 指标评价上金丝楸抗旱能力最强。利用抗旱性指数公式综合评价楸树品种的抗旱能力为: 金丝楸 > 周楸 2 号 > 周楸 2 号 > 金丝楸 > 圆基长果楸 > 圆基长果楸。因此旱地造林宜选用金丝楸, 其为较耐旱的类型。表 2 参 23

关键词: 树木生理学; 楸树; 水分指标; 水分特征曲线; 抗旱性

中图分类号: S718.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5692(2008)06-0760-05

Pressure-volume curves and drought resistance of *Catalpa bungei* cultivars

CEN Xian-chao^{1,2}, PENG Fang-ren¹, CHEN Long-sheng¹, YANG Yan¹

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Institute of Jiangxi Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, Jiangxi, china)

Abstract: The *Catalpa bungei* resource has greatly diminished owing to self-incompatibility and improper planting in arid lands. To provide a theoretical foundation for afforestation in arid and semi-arid regions and to exploit the *Catalpa* resource, 11 parameters of water characteristics for three *Catalpa* cultivars(‘Jin Si Qiu’, ‘Zhou Qiu’, and ‘Yuan Ji Chang Guo Qiu’) were determined using culm-water characteristic curves. Seedlings from cuttings of *C. bungei* were cultured in Hoagland nutrient solution with 120 g·L⁻¹ polyethylene glycol(PEG) 6000(treatment) to simulate draught stress and without PEG(treatment). One day after treatment application, the stems were measured by Hammel’s Method. Also draught resistance exponent functions were used for the analysis. Results from maximum osmotic potential at a water saturation point of Ψ_{π}^{100} , sufficiency expanded osmotic potential of Ψ_p^{100} , apoplastic water volume(V_b), the ratio of apoplastic water to free water (V_b/V_f), and the relative apoplast water content (C_{AW}) showed that ‘Jin Si Qiu’ was most resistant to draught stress. Exponential functions for draught resistance of *Catalpa* cultivars for treatments and were in the order: ‘Jin Si Qiu’ > ‘Zhou Qiu’ > ‘Zhou Qiu’ > ‘Jin Si Qiu’ > ‘Yuan Ji Chang Guo Qiu’ > ‘Yuan Ji Chang Guo Qiu’. So, ‘Jin Si Qiu’ was the best cultivar for planting in drought area. [Ch, 2 tab. 23 ref.]

Key words: plant physiology; *Catalpa bungei*; water indexes; culm-water characteristic curves; drought resistance

收稿日期: 2008-01-31; 修回日期: 2008-05-04

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAD24B08); 江苏省农业科技攻关项目(BE2005368)

作者简介: 岑显超, 硕士研究生, 从事人工林定向培育研究。E-mail: nicholaschao@163.com。通信作者: 彭方仁, 教授, 博士生导师, 从事经济林培育和楸树资源恢复研究。E-mail: Frpeng@njfu.edu.cn

水分是植物生命活动不可缺少的部分，是限制植物分布和生长的一个重要因子。在树木的生活史中，水分亏缺是经常发生的，是造成树木生长停滞、受伤和死亡的重要因子。植物对水分胁迫的反应，几乎包括植物生命过程的所有方面^[1]。压力室(schlander chamber)是 20 世纪 70 年代以来被国外广大生态学家和植物生理学家用来测定植物叶片和枝条水势的技术^[2,3]，植物水分特征曲线(pressure-volume curves, PV)是指植物枝叶吸水饱和后在压力室中连续加压后渗透水量的体积与平衡压的倒数之间的变化曲线^[4]，20 世纪 80 年代初介绍到我国开始研究木本植物的水分生理^[5,6]。利用 PV 曲线可以获得许多水分参数，反映树木耐旱性的特征，特别是初始失膨胀点总体渗透势具有种的稳定性高、种间可比性强等特点，在树木耐旱性评价中已被广泛应用。楸树 *Catalpa bungei* 是紫薇科 Bignoniaceae 梓树属 *Catalpa* 植物，原产我国，是我国生态幅度较大的优良乡土树种、特有的优质珍贵用材树种和著名园林观赏树种。以往楸树的研究主要集中在资源清查、良种选育、快繁技术等方面^[7-9]，而楸树水分生理状况的研究尚未开展。本文拟对不同品种楸树的 PV 曲线进行研究，阐明楸树的水分生理，以此比较不同品种楸树的耐旱性差异，为适地适树造林，恢复楸树资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为 2006 年夏在南京林业大学树木园扦插繁殖的 1 年生扦插苗，长势好，无病虫害。3 个品种分别为：周楸 2 号(周楸)、圆基长果楸(圆长)和金丝楸(金丝)。采用英国 SKYE 公司生产的便携式 SKPM-1400 压力室仪测定。试验在人工气候室进行，采用 Hoagland 培养，用 $120 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ PEG 6000 模拟干旱胁迫()，对照()不加 PEG。气候室湿度 75%，温度 25 ℃。处理 1 d 后取样测定。

1.2 测定

选择 hammel 逐渐升压连续测定法。将样品装入压力室后，通过逐渐升压促使样品逐级失水，其失水量用烘干的脱脂棉收集，通过电子天平称质量，采用平衡压测定对应的水势值，直到测定的点数足够描绘完整的 PV 曲线^[10]。步骤：①取楸树组织的中上部带叶小枝，截取小枝，称鲜质量，测初始水势，然后浸入盛有蒸馏水的容器中饱和吸水 24 h；②将水分已饱和的楸树茎干(或枝条)称量后迅速装入压力室中，在室温(20 ~ 25 ℃)条件下，以 $0.02 \sim 0.05 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度缓慢加压至平衡压，聚乙烯小管吸取被压出的水液，放入电子天平称量，同时减压 0.05 MPa 待树木枝条内部水分分配均匀后，约 10 min，重新给压力室加压，压力超过上一平衡压 0.2 ~ 1.0 MPa，收集水液称量记录平衡压和水液质量。重复上述过程 10 次。当压力达到 3 ~ 5 MPa 时，取出茎干(或枝条)，105 ℃杀青 15 min，85 ℃烘干至恒量，称干质量；③根据试验过程中每次楸树枝条鲜质量的减少，便可求出样品的渗透水量(即茎干或枝条失水量)和水分饱和和亏缺，依次测得的各平衡压的倒数为纵坐标，相对应的茎干或枝条的渗透水量为横坐标，绘制植物的 PV 曲线^[11]。由于 PV 曲线的重复性较好，故每个品种楸树只测定 1 次。

1.3 计算

采取以组织水势的倒数作为相对水分饱和和亏缺($1 - C_{RW}$)或渗透水量(V)的函数的正位图解法(hammel 法)^[10]；将回归直线部分的两端双向延长，与横坐标的交点为楸树组织共质体水 V_f 和质外体水 V_b 分界点。直线与纵坐标的交点为楸树组织充分吸水饱和膨胀时的渗透势 Ψ_{π}^{100} 的倒数，曲线部分和直线部分的交点表示楸树组织失去膨压时即发生质壁分离时的临界水分状况，该点横坐标对应的是临界渗透水量 V' ，纵坐标对应的是临界水势的倒数 Ψ' ， D_{RW0} 为临界水分饱和和亏缺，即临界渗透水量占楸树组织含水总量的百分比。参考何兴东^[4]的方法，通过求解幂函数曲线($1/\Psi_{\pi} = AV_1^b$)和回归直线($1/\Psi_{\pi} = c + dV_2$)的交点求得膨压为零时渗透势和相对水分饱和和亏缺的临界点。再计算出 V_f ， V_b ， V_f/V_f ， D_{RW0} ， Ψ_p^{100} ， ε_{\max} 等水分指标。

1.4 抗旱性指数评价

抗旱性综合评价方法有很多种^[12]。本实验选用李庆梅等^[13]和何兴东等^[4]研究方法使用的抗旱性指数法，因为所用公式在树种间的抗旱性评价方面实用性强，可靠性好^[14]。公式为：

$$I_D = \sqrt{\sum_1^n \left(\frac{P}{P_{\max}} \right)^2}$$

其中, I_D 代表综合抗旱性指数, P 为每种水分参数的测定值, Ψ_{π}^{100} , Ψ_p^{100} , V , C_{AW} , D_{RW0} , V_b , V_b/V_f , ε_{\max} 可直接代入, P_{\max} 为各楸树品种中该水分参数在各次测定中绝对值的最大值, C_{RW0p} , C_{ROW0p} , V_f 为负相关的。这几个指标用 1 减去各品种的实际值, 则 $P = 1 - \text{实际值}$, 而 $P_{\max} = (1 - \text{实际值})_{\max}$ 。

2 结果与分析

2.1 拟合回归关系

表 1 为 3 个楸树品种 PV 曲线的拟合回归关系。

表 1 3 个楸树品种 PV 曲线的拟合回归关系

Table 1 Regression equations of PV-curve for three cultivars of *Catalpa bungei*

品种	PV 曲线回归方程	R^2	直线回归方程	R^2
周楸	$1/\Psi_w = 1.412 2x^{-0.388 5}$	0.945	$1/\Psi_w = -0.056 7x + 0.988 9$	0.965
周楸	$1/\Psi_w = 0.957 0x^{-0.554 3}$	0.952*	$1/\Psi_w = -0.023 1x + 0.627 0$	0.894
金丝	$1/\Psi_w = 40.450 0x^{-0.993 6}$	0.979	$1/\Psi_w = -1.498 3x + 13.541 0$	0.724
金丝	$1/\Psi_w = 13.636 0x^{-0.803 6}$	0.989*	$1/\Psi_w = -0.615 9x + 6.540 6$	0.956*
圆长	$1/\Psi_w = 35.119 0x^{-1.641 8}$	0.998	$1/\Psi_w = -0.779 7x + 7.708 6$	0.921
圆长	$1/\Psi_w = 3.524 9x^{-0.437 5}$	0.973	$1/\Psi_w = -0.205 2x + 2.669 0$	0.991*

说明: 表中 代表对照, 代表干旱处理, * 代表在 0.05 水平上差异显著。

2.2 渗透势

植物的 Ψ_{π}^{100} 值代表的是植物充分吸水饱和时的渗透势, 反映植物维持最低膨压的极限渗透势^[15]。 Ψ_{π}^{100} 值代表了植物细胞生长阶段中可溶性物质能达到的浓度, 其值越低, 细胞液浓度就会越高, 所以植物从土壤中吸收水分的能力越强, 植物忍耐脱水的能力也越强。从表 2 中看出, 不同楸树品种不同处理的水分参数中 Ψ_{π}^{100} 值以金丝 最低, 为 0.07, 说明它是能以较低的渗透势维持膨压忍耐干旱的类型。植物的一切生命活动都是在一定的渗透环境下进行的, 当植物的渗透势低于某个值时, 将发生质壁分离, 细胞趋向死亡。 Ψ' 就是植物由生存向死亡的过渡界限, 代表植物组织细胞内部忍耐低渗透势的能力, 其值越小, 植物在干旱环境下更有利于自身调节, 其抗旱性越强。从表 2 看出, 各楸树品种不同处理中圆长 和金丝 Ψ' 值较低, 分别为 -35.8 MPa 和 -2.79 MPa, 说明圆长 和金丝 的植株耐旱性较强。

2.3 压力势

Ψ_p^{100} 代表植物组织充分膨胀时的压力势。当植物水势降低时, 能保持一定膨压是植物逆境下机体自我调整的抗旱机制^[5]。由表 2 的计算结果表明, 金丝 和圆长 具有较大的膨压, 维持膨压使植物避免过早发生质壁分离, 这种特性使它们能在干旱条件下充分利用渗透调节来抵御干旱胁迫。

2.4 质外体水、共质体水、质外体水与共质体水比值

质外体水 V_b 是指不存在于共质体溶液中的水分, 它们存在于细胞壁等不同的区隔中, 或者被大分子所牢固地束缚的水分, 所以也叫束缚水^[5], 质外体水不参与代谢作用, 但植物要求低微的代谢强度去渡过不良的外界条件, 所以质外体水与植物抗性大小有密切关系。共质体水 V_f 是可自由流动的水分, 在植物组织处于逆境环境条件下容易丢失的水分, 利用压力室测定植物 PV 曲线时累次挤压出的水分就是共质体水。共质体水参与各种代谢作用, 它的数量制约着植物的代谢强度, 如光合速率、呼吸速率、生长速度等。 V_b/V_f 通常被作为植物抗旱性强弱的重要因子, 抗旱性强的植物具有较高的 V_b/V_f 比值。从表 2 中看出, 金丝 和金丝 的 V_b 值较高, 分别为 16.2 和 12.3 g, V_b/V_f 比值也最大, 分别为 26.7 和 65.7。从质外体、共质体水分参数可以得出金丝 比其他 2 个品种抗旱性强。

表 2 不同楸树品种水分特征参数和抗旱性指数

Table 2 Parameters and drought resistance indexes of three cultivars of *Catalpa bungei*

指标	$\Psi_{\pi}^{100}/\text{MPa}$	Ψ_p^{100}/MPa	Ψ'/MPa	C_{AW}	D_{RWO}	V_f	V_b	V_f/V_i	C_{RWlp}	C_{ROWlp}	ε_{\max}	I_D	排序
周楸	1.01	0.40	0.29	0.88	4.75	0.07	0.56	7.61	0.95	0.59	19.38	6.46	3
周楸	1.59	0.36	0.19	0.86	5.94	0.13	0.77	6.00	0.94	0.58	23.10	6.72	2
金丝	0.07	25.00	2.79	0.96	0.41	0.61	16.20	26.70	0.996	0.89	1.23	5.82	4
金丝	0.15	6.62	0.62	0.99	0.32	0.19	12.30	65.70	0.997	0.79	4.36	7.96	1
圆长	0.13	28.00	35.80	0.84	1.91	2.07	11.10	5.35	0.98	0.89	30.82	5.26	6
圆长	0.38	0.80	1.95	0.74	10.2	3.34	9.42	2.82	0.898	0.61	18.03	5.29	5

说明：表中 代表对照， 代表干旱处理。

2.5 质外体水相对含量

质外体水相对含量 C_{AW} 为 V_b/V_i 的比值，在溶质不变的情况下， C_{AW} 越大植物组织渗透势越大，吸水保水力越强，植物的耐旱性就更强^[16]。表 2 表明，楸树的 3 个品种不同处理中，金丝 和金丝 C_{AW} 较大，分别为 0.96 和 0.99，其次为周楸 和周楸 ，分别为 0.88 和 0.86，最后为圆长 和圆长 ，其比值为 0.74 和 0.84。由质外体水相对含量可见，抗旱能力由强到弱排列为：金丝 > 金丝 > 周楸 > 周楸 > 圆长 > 圆长 。

2.6 临界水分饱和和亏缺

临界饱和和亏缺 $D_{RWO} = (V'/V_i) \times 100\%$ ，其值越大，说明植物在干旱胁迫时的抗旱性反应就越强。由表 2 不难看出，圆长和周楸抗旱性反应最强。说明它们在受到干旱等环境因子逆境胁迫时，内外部器官积极进行调整，外部器官也容易表现出来，例如叶开始卷曲，叶柄与枝干夹角变小等以抵御干旱。

2.7 质壁分离点的相对含水量、相对渗透水含量

质壁分离点的相对含水量 $C_{RWlp} = (V_i - V') \times V_i$ ，相对渗透水含量 $C_{ROWlp} = (V_f - V')/V_f$ 。一般认为， C_{RWlp} 、 C_{ROWlp} 与植物耐干旱胁迫的能力同样具有负相关关系。 C_{RWlp} 和 C_{ROWlp} 值越低，表明植物在较低含水量状态下才失去膨压，所以植物忍耐干旱胁迫的能力越强。表 2 表明， C_{RWlp} 值圆长 、周楸 、周楸 最低，其次为为金丝 、金丝 ，最后为圆长 ，说明了它们低水势保持膨压的能力。 C_{ROWlp} 值就基本上也是这个趋势。表明低渗透势维持膨压以减小质壁分离的发生的趋势是植物逆境下机体的自我调节反应。这种能力大小决定了植物的耐旱能力。

2.8 细胞弹性模量

植物组织的体积弹性模量 ε_{\max} 反映组织的水分含量变化与膨压变化的关系。通常认为，弹性模量 ε_{\max} 大的树种在组织含水量和水势下降时，能比低弹性组织具有更大保持膨压的能力^[17]。弹性模量 ε_{\max} 越大表明细胞越坚硬弹性越小，反之柔软弹性大。耐旱植物具有较小的细胞和较厚的细胞壁，这有利于植物维持高水势和膨压。由表 2 可见， ε_{\max} 最大的为圆长 ，其次为周楸 和周楸 ，最后为金丝 和金丝 。说明在细胞坚硬度方面，圆长细胞最厚、最坚硬，保持膨压的能力最强。

2.9 抗旱性指数

由上述分析可知，3 个楸树品种在不同的指标分析上各具优势，但植物耐旱能力是一个综合的性状，是对逆境环境反应与调整的总体耐受能力，所以通过抗旱性指数公式加权上述研究的水分指标得出，抗旱性强弱依次为：金丝 > 周楸 > 周楸 > 金丝 > 圆长 > 圆长 。由干旱条件下植物的总体反应情况来判定 3 个品种(类型)楸树抗旱性为：金丝 > 周楸 > 圆长。

3 结论

通过 PV 曲线不仅可以直观描述植物体的水势及其组成部分(膨压和渗透势)与其含水量的关系，并且可以得到楸树的许多水分状况指标：水饱和状态总体渗透势、初始失膨点总体渗透势、临界水分饱和和亏缺和初始失膨点相对渗透水含量、总体弹性模数最大值等，这些指标对植物的抗旱能力评价是

比较准确的^[18]。

总之,以不同的指标来分析植物抗旱性各具优势,各有不足,基本规律是一致的。但是应该注意的是,植物抗旱性是一个复合性状,是一种植物从形态解剖构造、细胞组成、光合器官、原生质特性到水分生理生态特征、生理生化反应的综合反映^[19-20],所以综合评价尤为重要。近年来,利用PV曲线开展了在SPAC系统内水分运输与平衡研究,运用多种评价法如聚类分析与抗旱指数结合评价,用超氧化物歧化酶(SOD)等生化指标与之联合评价抗旱性、木质部栓塞与水分参数间的关系等^[21-23]。利用抗旱性指数公式综合评价3个楸树品种的抗旱能力为:金丝楸>周楸2号>圆基长果楸。表明旱地造林金丝楸为最佳选择,其次为周楸2号,最后为圆基长果楸。

正因为植物适应干旱的机制多种多样,今后应开展不同楸树品种间的水分参数与生理生化指标、解剖构造之间的相关关系研究,进一步揭示楸树的耐旱机制。

参考文献:

- [1] 克累默尔 P J, 考兹洛夫斯基 T T. 木本植物生理学[M]. 汪振儒, 译. 北京: 中国林业出版社, 1985: 20 - 25.
- [2] JONES M M, TURNER N C. Osmotic adjustment in expanding and full expanded leaves of sunflower in response to water stress[J]. *Aust J Plant Physiol*, 1980, 7 (2): 181 - 192.
- [3] TYREE M T, HAMNE H T. The measurement of the turgor pressure and the water relations of plants by the pressure-bomb technique[J]. *J Exp Bot*, 1972, 23: 267 - 282.
- [4] 何兴东, 丛培芳, 高玉葆, 等. 利用压力-容积曲线研究4种草本植物的抗旱性[J]. 南开大学学报: 自然科学版, 2006, 39 (3): 16 - 22.
- [5] 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.
- [6] 郭连生, 田有亮. 运用PV技术对华北常见造林树种耐旱性评价的研究[J]. 内蒙古林学院学报, 1998, 20 (3): 1 - 8.
- [7] 张锦, 田菊芬. 优良乡土树种楸树种质资源及发展策略[J]. 安徽农业科学, 2003, 31 (6): 1 012 - 1 013.
- [8] 梁有旺, 彭方仁, 王顺才. 楸树嫩枝扦插试验初报[J]. 林业科技开发, 2006, 20 (1): 67 - 69.
- [9] 韩创举, 杨培华, 樊军锋, 等. 楸树组培技术研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21 (1): 80 - 81.
- [10] 郭连生, 田有亮. 压力-容积法在植物水分生理与抗旱性研究的应用进展[J]. 内蒙古林学院学报, 1990, 12 (1): 37 - 43.
- [11] 李吉跃. PV技术在油松侧柏苗木抗旱特性研究中的应用[J]. 北京林业大学学报, 1989, 11 (1): 3 - 11.
- [12] 刘萍, 康峰峰, 王旭航. 林木抗旱鉴定指标及数量分析方法研究进展[J]. 河南林业科技, 2006, 26 (2): 20 - 23.
- [13] 李庆梅. 油松PV曲线主要水分参数随季节和种源的变化[J]. 植物生态学与地植物学报, 1992, 16 (4): 326 - 335.
- [14] 王孟本, 冯彩平, 李洪建, 等. 树种保护酶活性与PV曲线水分参数变化的关系[J]. 生态学报, 2000, 20 (1): 173 - 176.
- [15] 杨吉安, 苏印泉, 张康健. 杜仲优树苗木水分生理状况的研究[J]. 西北林学院学报, 1994, 9 (4): 12 - 16.
- [16] 柴宝峰, 王孟本, 李洪建. 3树种PV曲线水分参数的比较[J]. 水土保持通报, 1996, 16 (4): 35 - 40.
- [17] RICHDER H. *Plant and Their Atomspheric Environment*[M]. New York: Academic Press, 1981: 263 - 272.
- [18] 柴宝峰, 李洪建, 王孟本. 晋西黄土丘陵区若干树种水分生理及抗旱性量化研究[J]. 植物研究, 2000, 20 (1): 79 - 85.
- [19] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰, 等. 黄土区树种抗旱性指数的研究[J]. 植物研究, 1999, 19 (3): 341 - 346.
- [20] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13 (3): 92 - 100.
- [21] 安锋, 蔡靖, 姜在民, 等. 8种木本植物木质部栓塞恢复特性及其与PV曲线水分参数的关系[J]. 西北农林科技大学学报, 2006, 34 (1): 38 - 44.
- [22] 狄晓艳, 王孟本, 陈建文, 等. 杨树无性系PV曲线水分参数的研究[J]. 西北植物学报, 2007, 27 (1): 98 - 103.
- [23] 李小军, 谭会娟, 张志山, 等. 油蒿不同部位水分关系研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27 (3): 448 - 454.