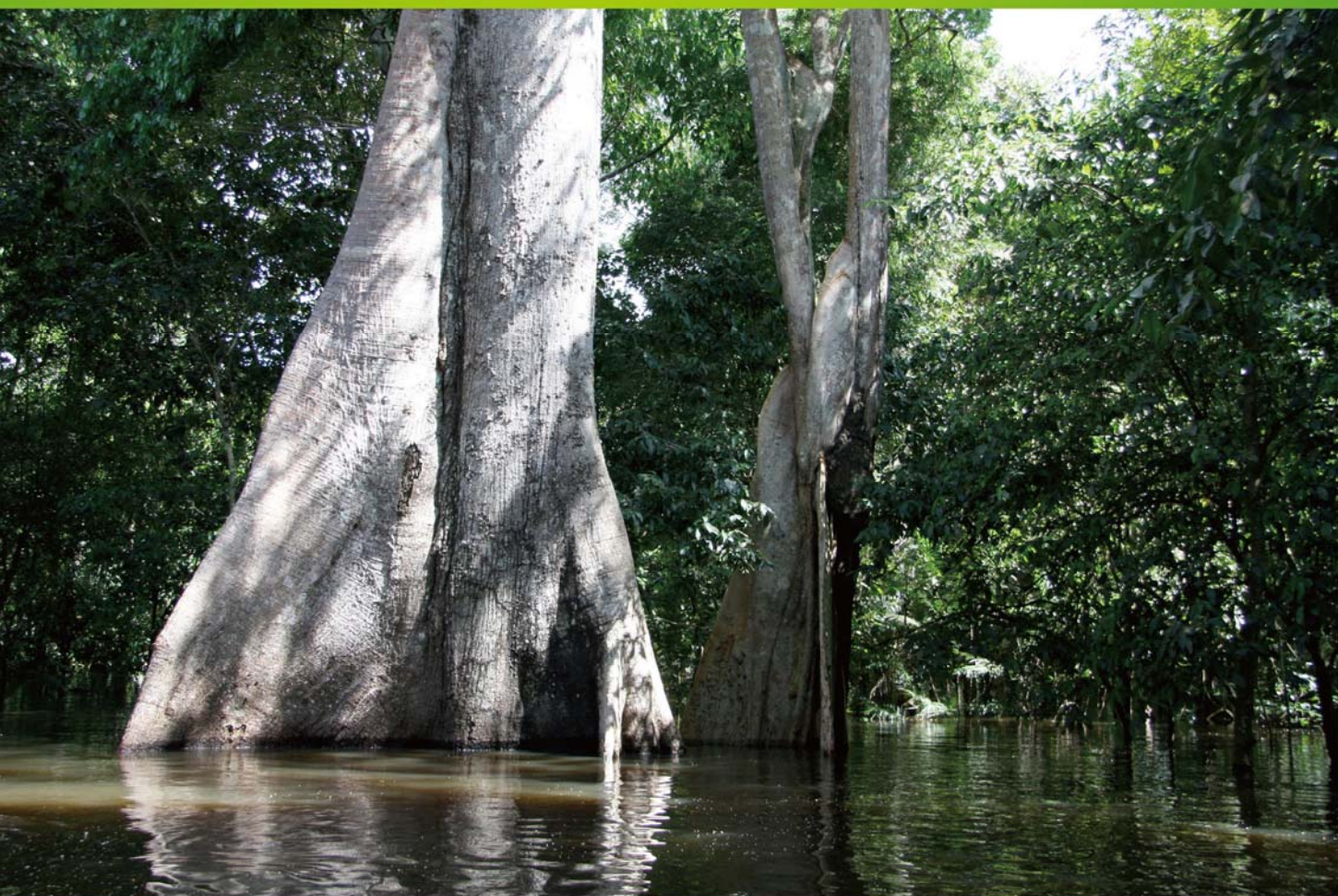


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第8期 Vol.31 No.8 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 8 期

2011 年 4 月 (半月刊)

目 次

塔里木河下游胡杨径向生长与地下水的关系·····	安红燕,徐海量,叶 茂,等 (2053)
冲积平原区高程因子对土壤剖面质地构型的影响——以封丘县为例·····	檀满枝,密术晓,李开丽,等 (2060)
臭氧胁迫对大豆叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响·····	王俊力,王 岩,赵天宏,等 (2068)
重要理化因子对小球藻生长和油脂产量的影响·····	张桂艳,温小斌,梁 芳,等 (2076)
北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应·····	程瑞梅,封晓辉,肖文发,等 (2086)
亚热带沟叶结缕草草坪土壤呼吸·····	李熙波,杨玉盛,曾宏达,等 (2096)
UV-B 辐射对马尾松凋落叶分解和养分释放的影响·····	宋新章,张慧玲,江 洪,等 (2106)
干旱胁迫下内生真菌感染对羽茅的生理生态影响·····	韩 荣,李 夏,任安芝,等 (2115)
蜜环菌对锌的耐性和富集特性·····	朱 林,程显好,李维焕,等 (2124)
干旱荒漠区狭叶锦鸡儿灌丛扩展对策·····	张建华,马成仓,刘志宏,等 (2132)
黄土高原区不同植物凋落物搭配对土壤微生物量碳、氮的影响·····	王春阳,周建斌,夏志敏,等 (2139)
内蒙古典型草原克氏针茅与冰草的生存策略·····	孙 建,刘 苗,李胜功,等 (2148)
荒漠沙柳根围 AM 真菌的空间分布·····	贺学礼,杨 静,赵丽莉 (2159)
开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究·····	董文军,邓艾兴,张 彬,等 (2169)
醉马草免培养内生细菌的多样性·····	张雪兵,史应武,曾 军,等 (2178)
河南生态足迹驱动因素的 Hi_PLS 分析及其发展对策·····	贾俊松 (2188)
禹城市耕地土壤盐分与有机质的指示克里格分析·····	杨奇勇,杨劲松,余世鹏 (2196)
旋覆花提取物对朱砂叶螨的生物活性及酶活性的影响·····	段丹丹,王有年,成 军,等 (2203)
白洋淀湖滨湿地岸边带氨氧化古菌与氨氧化细菌的分布特性·····	叶 磊,祝贵兵,王 雨,等 (2209)
干旱胁迫条件下 6 种喀斯特主要造林树种苗木叶片水势及吸水潜能变化·····	王 丁,姚 健,杨 雪,等 (2216)
桉树人工林物种多样性变化特征·····	刘 平,秦 晶,刘建昌,等 (2227)
海河流域湿地生态系统服务功能价值评价·····	江 波,欧阳志云,苗 鸿,等 (2236)
芦苇在微咸水河口湿地甲烷排放中的作用·····	马安娜,陆健健 (2245)
云南不同土壤铅背景值下大叶茶种群对铅的吸收积累特征及其遗传分化·····	刘声传,段昌群,李振华,等 (2253)
长江口和杭州湾凤鲚胃含物与海洋浮游动物的种类组成比较·····	刘守海,徐兆礼 (2263)
江西大岗山地区 7—9 月降水量的重建与分析·····	乔 磊,王 兵,郭 浩,等 (2272)
山核桃免耕经营的经济效益和生态效益·····	王正加,黄兴召,唐小华,等 (2281)
基于 GIS 的广州市中心城区城市森林可达性分析·····	朱耀军,王 成,贾宝全,等 (2290)
专论与综述	
土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性·····	杨庆朋,徐 明,刘洪升,等 (2301)
植物代谢速率与个体生物量关系研究进展·····	程栋梁,钟全林,林茂兹,等 (2312)
耕地生态补偿实践与研究进展·····	马爱慧,蔡银莺,张安录 (2321)
问题讨论	
元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性·····	刘 洁,李贤伟,纪中华,等 (2331)
研究简报	
中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响·····	胡 坤,喻 华,冯文强,等 (2341)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 296 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-04



封面图说:巴西热带雨林——美丽的巴西北部玛瑙斯热带雨林景观。位于南美洲的亚马逊河是世界上流域最广、流量最大的河流,孕育了世界面积最大的热带雨林,雨林中蕴藏着极丰富的生物资源。

彩图提供:中国科学院生态环境研究中心徐卫华博士 E-mail:xuweihua@rcees.ac.cn

干旱胁迫条件下 6 种喀斯特主要造林树种 苗木叶片水势及吸水潜能变化

王 丁^{1,2}, 姚 健², 杨 雪¹, 薛建辉^{2,*}

(1. 河南教育学院人口与生命科学系, 河南 郑州 450046; 2. 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: 水势是反映植物水分亏缺或水分状况的一个直接指标, 可用来确定植物受干旱胁迫的程度和抗旱能力高低。研究了 6 种喀斯特造林树种苗木在干旱胁迫条件下叶片水势及其吸水潜能的变化。结果表明: (1) 随着胁迫强度的增加, 6 种树种不同生长时期, 其叶片水势均表现出下降趋势, 且不同干旱胁迫强度之间差异显著 ($P < 0.002$)。在干旱胁迫下, 所有树种叶片水势均以生长旺期的下降幅度最大, 生长末期次之, 生长初期最小。在生长旺期, 6 个树种叶片水势最低值分别比对照下降了 2.21 MPa、2.14 MPa、3.57 MPa、2.89 MPa、4.02 MPa 和 3.07 MPa。(2) 侧柏苗木在生长初期轻度干旱条件下, 其叶片水势胁迫指数只有 0.150; 在中度干旱胁迫条件下, 其胁迫指数增加到 0.559; 在重度干旱胁迫条件下, 达 0.716, 叶片水势下降超过 70%。香樟苗木在生长初期轻度干旱胁迫条件下, 其叶片水势胁迫指数已达 0.603, 叶片水势下降超过了 60%; 在中度和重度干旱胁迫条件下, 其水势胁迫指数相差不大。其它树种苗木的胁迫指数亦有与侧柏或香樟相似的变化趋势。(3) 6 个树种苗木在干旱胁迫条件下平均叶片水势与土壤水势差值大小排序为, 生长初期: 刺槐 (1.261 MPa) > 香樟 (0.850 MPa) > 滇柏 (0.846 MPa) > 侧柏 (0.568 MPa) > 构树 (0.524 MPa) > 杜英 (0.219 MPa); 生长旺期: 香樟 (2.994 MPa) > 刺槐 (2.68 MPa) > 侧柏 (2.028 MPa) > 滇柏 (2.008 MPa) > 杜英 (1.824 MPa) > 构树 (1.543 MPa); 生长末期: 刺槐 (0.692 MPa) > 构树 (0.687 MPa) > 滇柏 (0.653 MPa) > 侧柏 (0.354 MPa) > 香樟 (0.338 MPa) > 杜英 (0.262 MPa)。(4) 干旱胁迫复水 24h 后, 不同生长阶段苗木叶片水势恢复指数随干旱胁迫强度的增加而逐渐减小。叶片水势恢复度按生长时期排序为: 生长末期 > 生长旺期 > 生长初期。(5) 利用隶属函数累加法将 6 个树种苗木的吸水潜能大小可排序为: 侧柏 > 滇柏 > 刺槐 > 香樟 > 构树 > 杜英。

关键词: 干旱胁迫; 苗木; 生长阶段; 叶片水势; 吸水潜能

Changes of leaf water potential and water absorption potential capacities of six kinds of seedlings in Karst mount area under different drought stress intensities: Taking six forestation seedlings in karst Mountainous region for example

WANG Ding^{1,2}, YAO Jian², YANG Xue¹, XUE Jianhui^{2,*}

1 Department of Population and Life Science, Henan Institute of Education Zhengzhou, 450046, China

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

Abstract: Water potential is a direct index to represent water status or water deficit of plants and could be used to indicate their drought stress degree and drought-tolerance capacity. In this paper, Changes of leaf water potential and water absorption potential capacities of six tree species seedlings planted in Karst areas have been investigated. The main results were described as follows: (1) With the increase of water stress intensity, leaf water potential value of all six tree species seedlings among different growing stages represented decreasing trend. Meanwhile, there existed significant differences among those under different drought stress treatment ($P < 0.002$). Under drought stress, the leaf water potential value of all seedlings came up to the largest decrease valence during fast growth stage, then the second during last growth stage and the lowest during early growth stage. During fast growth stage, the leaf water potential value of all six species seedlings

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题 (2006BAD03A0303)

收稿日期: 2010-04-17; 修订日期: 2010-09-01

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

increased by 2.21 MPa, 2.14 MPa, 3.57 MPa, 2.89 MPa, 4.02 MPa and 3.07 MPa compared with the control. (2) At early growth stage, leaf water potential stress index of *Platycladus orientalis* (Linn.) Franco was only 0.150 under light drought stress, but 0.559 under moderate drought stress. Under severe drought stress, the leaf water potential stress index reached 0.716. And leaf water potential stress index of *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl already reached 0.603 at early growth stage under light drought stress. there was small difference between those under moderate drought stress and severe drought stress. The leaf water potential stress indexes of other tree species had a similar tendency. (3) Under drought stress, the average differences between leaf water potential and silo water potential could be ordered as follows: early growth stage: *Robinia pseudoacacia* L. (1.261 MPa) > *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl (0.850 MPa) > *Fokienia hodginsii* (Dunn) Henry et Thomas (0.846 MPa) > *Platycladus orientalis* (Linn.) Franco (0.568 MPa) > *Broussonetia papyrifera* (0.524 MPa) > *Elaeocarpus sylvestris* (Lour.) Poir. (0.219 MPa); fast growth stage: *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl (2.994 MPa) > *Robinia pseudoacacia* L. (2.68 MPa) > *Platycladus orientalis* (Linn.) Franco (2.028 MPa) > *Fokienia hodginsii* (Dunn) Henry et Thomas (2.008 MPa) > *Elaeocarpus sylvestris* (Lour.) Poir. (1.824 MPa) > *Broussonetia papyrifera* (1.543 MPa); last growth stage: *Robinia pseudoacacia* L. (0.692 MPa) > *Broussonetia papyrifera* (0.687 MPa) > *Fokienia hodginsii* (Dunn) Henry et Thomas (0.653 MPa) > *Platycladus orientalis* (Linn.) Franco (0.354 MPa) > *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl (0.338 MPa) > *Elaeocarpus sylvestris* (Lour.) Poir. (0.262 MPa). (4) After 24 hours following rewating treatment, the restoration indexes of leaf water potential of six species seedlings among different growth stages decreased gradually with the increase of drought stress intensity and could be in the following order: last growth stage > fast growth stage > early growth stage. (5) Water absorption potential capacities of six tree species seedlings were comprehensively evaluated and ordered as follows: *Platycladus orientalis* (Linn.) Franco > *Fokienia hodginsii* (Dunn) Henry et Thomas > *Robinia pseudoacacia* L. > *Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl > *Broussonetia papyrifera* > *Elaeocarpus sylvestris* (Lour.) Poir.

Key Words: drought stress; seedlings; growth stage; leaf water potential; water absorption potential capacity

在我国,干旱半干旱地区占国土面积的 45%,林木的抗旱性的强弱往往成为限制林木正常生长以及成林的重要因素^[1]。尤其是在西部地区,干旱缺水问题已经成为实施“西部大开发”战略的主要限制因素^[2]。另外在南方一些地区如西南喀斯特地区,由于地形地貌的原因,也会造成一些突发性和临时性的干旱,从而造成损失^[3]。因此加强林木抗旱性研究,探明树木对干旱胁迫的响应及其机理,已经成为目前我国林业领域一个亟待解决的问题。

水势是表示植物水分亏缺或水分状况的一个直接指标^[4],它与土壤-植物-大气循环系统 (SPAC) 中的水分运动规律密切相关。国内外许多学者在研究植物水势时,都主要从土壤和大气两方面着手,研究不同的土壤供水条件或者不同的大气水分状况下植物水势的变化特征,从而了解植物的抗旱特性以及植物对环境变化的生理适应特点。如 Morte 等^[5]分析比较了与沙漠菌共生的灌木和未与沙漠菌共生的灌木,在不同干旱胁迫下的生长状况,并比较了其叶片水势。土壤供水条件良好时,有沙漠菌共生的灌木其叶水势比没有沙漠菌共生时要高 14%;而土壤水分不足时,前者比后者高 26%。干旱胁迫的末期,与沙漠菌共生的植物的存活率比未与沙漠菌共生植物的存活率高 50%。Donovan 等^[6]探讨了叶片含盐量不同的灌木黎明前茎、叶水势与土壤水势的不平衡机理,发现在不同叶片含盐量下,黎明前的茎、叶水势与土壤水势均表现出一定的不平衡状况,认为黎明前茎、叶水势不能很好的反映土壤水分状况。然而,也有研究发现与叶片水势相比,气孔导度能更好的反映土壤水分状况,认为气孔对于木质部 ABA 变化的敏感程度大于叶片水势^[7]。许多学者研究发现,叶片水势的下降与气孔导度的下降是相关联的^[8],这也表明叶片水势与土壤水分状况之间存在非常紧密的联系。因此在干旱胁迫条件下,植物叶片水势是最敏感的指标之一^[9],它代表植物水分运动的能量水平,是植物各组织水分状况的直接表现,反映植物在生长季节各种生理活动受环境水分条件的制约程度^[10]。

在植物水势与其抗旱性关系方面。20 世纪 90 年代初,郭连生等^[11]研究了 9 种阔叶树种耐旱性生理指标和叶片水势与土壤含水量的关系发现,水势和蒸腾的相关直线斜率最大的树种其抗旱力最弱。李吉跃等^[12]详细研究了北方主要造林树种叶片水势与土壤含水量的关系,将植物的耐旱类型分为 2 种类型,即“高水势延迟脱水”类型和“低水势忍耐脱水”类型并建立了 Fuzzy 识别模型。然而,树种的抗旱性是一个非常复杂的系统,它不但受到自身的遗传结构的影响,而且还与周围环境密切相关^[1]。因此利用少数指标来准确评价比较树种之间的抗旱性强弱并不能反映真实情况。另外,通过对不同树种水势及相关指标的测定并利用数学方法对树种的吸水潜能进行评价研究少有报告。因此,本研究通过对六种喀斯特造林树种在不同生长季节叶片水势的时间变化以及在干旱胁迫条件下叶片水势的测定,了解并评价不同树种的吸水潜能差异,为综合评价不同树种的耐旱性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验材料为典型喀斯特地区主要造林树种包括,针叶树种:侧柏(*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco)、滇柏(*Fokienia hodginsii* (Dunn) Henry et Thomas),常绿阔叶树种:杜英(*Elaeocarpus sylvestris* (Lour.) Poir)、香樟(*Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl),落叶阔叶树种:刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、构树(*Broussonetia papyrifera*),均采用 2 年生幼苗,其中,刺柏、滇柏购于普定县林业局苗圃;香樟、杜英、构树购于贵州省林科院;刺槐购于贵州大学林学院苗圃。于 2007 年 11 月移入花盆(23cm×26cm)栽植后正常浇水培养。培养用土壤采自贵州省普定县,处于云贵高原东侧斜坡地带是典型的喀斯特立地环境。所用土壤为黄壤土,土壤容重为 1.022g/cm³,田间持水量为 52.57%。

1.2 实验方法

在 2008 年 4 月份(生长初期)、8 月份(生长旺期)和 12 月份(生长末期)分别选取生长一致的幼苗,每树种每个生长时期各选 32 盆。根据前期预实验对苗木形态指标的观测结果,设 A、B、C 和对照 4 个处理,每个处理 5 个重复,尽量保持各组幼苗生长均匀一致。处理前先充分浇水 3d,用塑料薄膜封住盆口,防止物理蒸发,任其自然干旱。各处理如下:

对照 始终保持含水量在田间持水量的 85% 以上;

处理 A 土壤含水量为田间持水量的 75% 左右;

处理 B 土壤含水量为田间持水量的 60% 左右;

处理 C 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个重复的含水量相对一致。当土壤自然干旱到各处理的设定含水量时进行取叶样测定,测定时每盆固定样株取样,各保留 3 株进行复水 24 h 处理。

每月选取典型天气进行叶片水势日进程测定,从 06:00—22:00,每隔 2h 测定 1 次,将每月多天的日进程实测值求其平均值代表各月平均水势,研究其年进程。

1.3 主要指标测定方法

叶片水势和土壤水势均用 Psypso 水势测量系统(北京澳作生态仪器有限公司)测定,采用 THF35A 大气温湿度计(上海迈哲电子科技有限公司)测定环境温湿度。

1.4 主要指标计算方法

1.4.1 水分胁迫指数(WSI)

水分胁迫指数反映胁迫条件下各指标偏离对照的程度,可用来反映幼苗受水分胁迫的影响程度,计算公式如下:

$$WSI = 1 - X_{ws} / X_{ck}$$

式中,WSI(Water Stress Index)为水分胁迫下某指标的水分胁迫指数;

X_{ws} 为水分胁迫下某生长时期某指标的测定值; X_{ck} 为对照相应指标的测定值。

如某指标变化与植物抗旱性成负相关,则取 X_{ws}/X_{ck} 倒数计算。 WSI 值变化在 0—1 之间,其值越大,表明该指标受水分胁迫的影响越大。

1.4.2 恢复度(R_d)

恢复度是指水分胁迫解除后,各指标恢复情况与对照的贴进度。用下列公式计算:

$$R_d = X_r / X_{ck}$$

式中, R_d 为水分胁迫解除后某指标的恢复度; X_r 为水分胁迫解除后某指标测定值; X_{ck} 为对照相应指标的测定值。

如某指标变化与植物抗旱性成负相关,则取 X_r/X_{ck} 的倒数计算。 R_d 变化在 0—1 之间,其值越大,表明胁迫解除后,该指标与对照值的贴进度越高,该指标恢复情况越好。

2 结果与分析

2.1 不同生长时期苗木在干旱胁迫下的叶片水势变化特征

干旱条件下植物能够维持较高的水势能力是植物抗旱性的一个重要机制。在干旱胁迫条件下 6 种树种不同生长时期,其叶片水势均表现出下降趋势,下降程度因树种、胁迫强度和不同生长时期而异(图 1)。

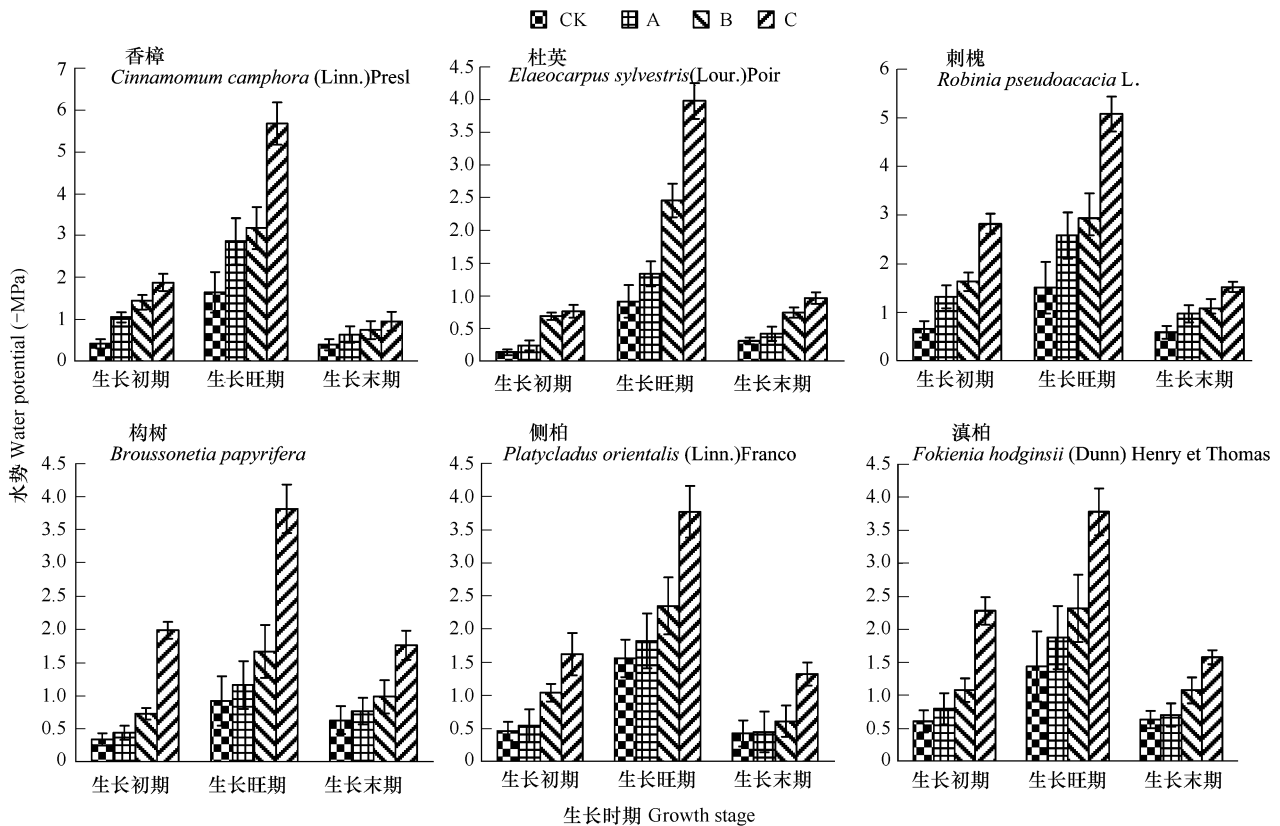


图 1 在不同干旱胁迫强度下 6 个树种苗木不同生长时期叶片水势变化

Fig. 1 The leaf water potential of six tree species seedlings under different drought stress intensities in different growth stage

方差分析结果表明,6 个树种不同生长时期在不同干旱胁迫强度之间,叶片水势变化均存在显著差异 ($P < 0.002$)。在干旱胁迫下,所有树种叶片水势均以生长旺期的下降幅度最大,生长末期次之,生长初期最小。在生长旺期,6 个树种,叶片水势最低值分别为:侧柏-3.77MPa、滇柏-3.78 MPa、刺槐-5.08 MPa、构树-3.81 MPa、香樟-5.67 MPa、杜英-3.98 MPa;分别比对照下降了 2.21 MPa、2.14 MPa、3.57 MPa、2.89MPa、4.02MPa 和 3.07MPa。在相同水分胁迫强度下,生长旺期苗木叶片水势降幅较大的主要原因是,生长旺期苗

木体内生理活动旺盛,在受到干旱胁迫时,消耗水分的能力强,能通过大幅度降低叶片水势,达到更容易从土壤中吸收水分的效果,而于生长初期和末期,植物体内生理代谢活动相对较弱,对体内水分的调节能力相对减小。

2.2 干旱胁迫指数比较

任何逆境都不可避免地会对植物造成伤害,抗逆性强的植物可通过代谢反应来阻止、降低或修复由逆境造成的伤害,使其保持正常的生理活动。因此,植物在干旱胁迫条件下的受损程度,以及修复潜力是评价植物抗旱性大小的重要指标。

干旱胁迫指数就是一个指示植物在干旱胁迫条件下,任何一个指标偏离最适条件程度的一项指标。该指标便于比较,意义明确,计算简单,不受计量单位限制,可以作为植物受损程度的指标。其变化值在 0—1 之间,其值越大,说明植物受胁迫程度越严重,偏离最适状态越远。

本研究 6 个树种在不同生长时期不同干旱胁迫梯度下,叶片水势受胁迫指数见图 2。

由图 2 可看出,6 个树种苗木不同生长期随着干旱胁迫强度的增加,其叶片水势的胁迫指数均不同程度的增大,但不同树种胁迫指数增长方式不同。

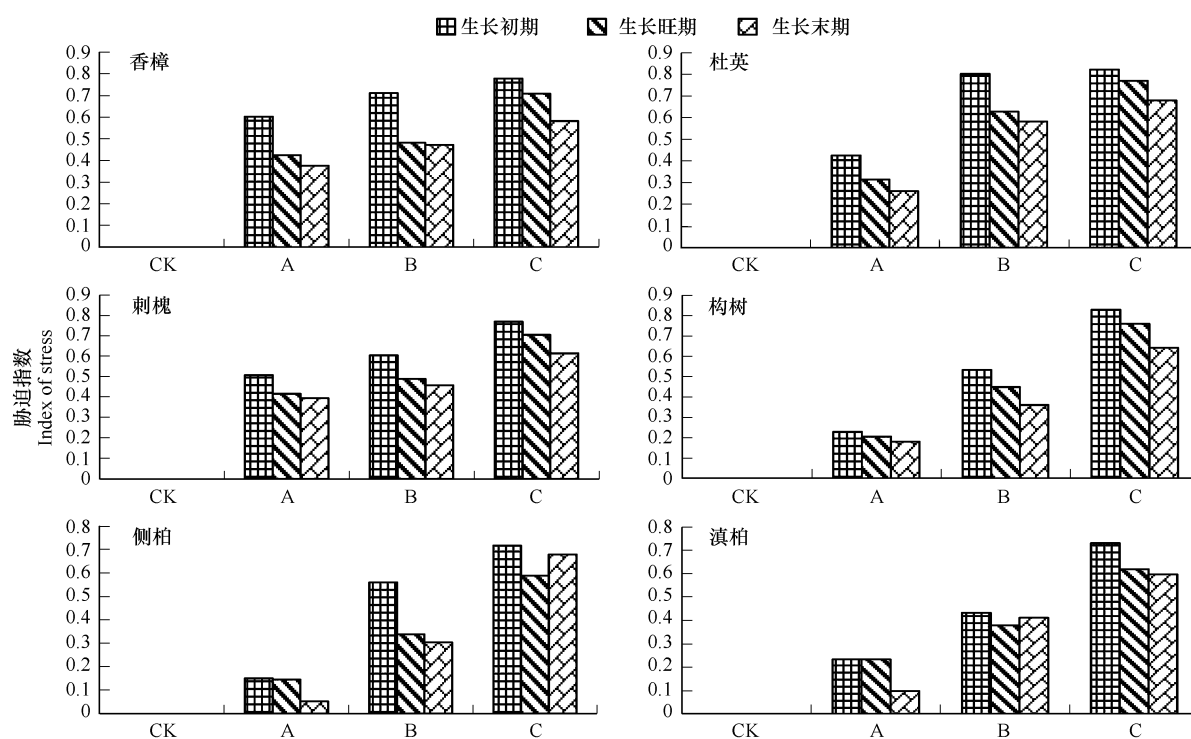


图 2 在不同干旱胁迫强度下 6 个树种苗木不同生长时期叶片水势干旱胁迫指数变化

Fig. 2 The drought stress index of six tree species seedlings under different drought stress intensities in different growth stage

侧柏苗木在生长初期轻度干旱条件下,其叶片水势胁迫指数只有 0.150;在中度干旱胁迫条件下,其胁迫指数增加到 0.559;在重度干旱胁迫条件下,达 0.716,叶片水势下降超过 70%。香樟苗木在生长初期轻度干旱胁迫条件下,其叶片水势胁迫指数就已达 0.603,叶片水势下降超过了 60%;在中度和重度干旱胁迫条件下,其水势胁迫指数相差不大,分别达到 0.710 和 0.778。这表明,侧柏和香樟对干旱胁迫的适应方式不同,侧柏对干旱胁迫的耐受能力较强,在轻度干旱胁迫条件下,其叶片有较强的耐脱水能力,只有在重度干旱胁迫条件下才对其体内生理代谢活动产生较大影响,叶片水势急剧下降;而香樟苗木在干旱胁迫初期,即轻度干旱胁迫条件下,就已经对其体内生理代谢活动产生巨大损伤,使其叶片水势大幅度下降,而到干旱胁迫中后期,苗木已经产生明显的干旱反应并开始出现叶片萎蔫脱落现象,所以胁迫指数差别不明显。其它树种苗木的胁迫指数亦有与侧柏或香樟相似的变化趋势。由图 2 还可看出,干旱胁迫对苗木叶片水势的影响均表现出从生

长初期→生长旺期→生长末期,逐渐减小的趋势,说明随着苗木的生长,其抗旱性是逐渐增强的。在整个生长期,不同干旱胁迫强度条件下,不同树种的叶片水势平均胁迫指数值见表 1。

表 1 不同干旱胁迫强度下 6 个树种苗木叶片水势平均胁迫指数

Table 1 Average drought stress index of leaf water potential of six tree species seedlings under different drought stress intensities

处理 Treatment	平均胁迫指数 Average drought stress index					
	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> (Linn.) Franco	滇柏 <i>Fokienia hodginsii</i> (Dunn) Henry et Thomas	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i> (Linn.) Presl	杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> (Lour.) Poir	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>
A	0.115	0.188	0.468	0.334	0.439	0.204
B	0.399	0.407	0.555	0.671	0.515	0.447
C	0.628	0.649	0.69	0.757	0.710	0.719
平均值 Average	0.381	0.415	0.571	0.587	0.555	0.457

由表 1 可知,在不同干旱胁迫强度下,6 个树种叶片水势的平均胁迫指数大小顺序为:杜英>香樟>刺槐>构树>滇柏>侧柏。

2.3 不同生长时期苗木叶片水势与土壤水势差的变化

苗木体内水分梯度直接影响到苗木对水分的吸收及维持体内水分平衡的能力。分析得出,不同树种苗木在不同生长时期以及不同干旱胁迫强度条件下,土壤水势与叶片水势差以及不同处理的平均值,见表 2。

表 2 不同干旱胁迫强度下 6 种苗木叶片与土壤水势差

Table 2 Difference between soil and leaf water potential of six tree species seedlings under different drought stress intensities

树种 Tree species	生长时期 Growth stage	叶片与土壤水势差值/MPa Difference between soil and leaf water potential				平均值 Average
		CK	A	B	C	
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> (Linn.) Franco	生长初期	0.452	0.525	0.984	0.312	0.568
	生长旺期	1.551	1.805	2.294	2.462	2.028
	生长末期	0.418	0.433	0.554	0.012	0.354
滇柏 <i>Fokienia hodginsii</i> (Dunn) Henry et Thomas	生长初期	0.606	0.785	1.024	0.972	0.846
	生长旺期	1.433	1.865	2.264	2.472	2.008
	生长末期	0.629	0.69	1.024	0.272	0.653
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	生长初期	0.644	1.305	1.584	1.512	1.261
	生长旺期	1.499	2.565	2.884	3.772	2.68
	生长末期	0.58	0.955	1.024	0.212	0.692
构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	生长初期	0.331	0.423	0.669	0.674	0.524
	生长旺期	0.913	1.143	1.611	2.506	1.543
	生长末期	0.621	0.751	0.927	0.449	0.687
香樟 <i>Cinnamomum camphora</i> (Linn.) Presl	生长初期	0.41	1.035	1.384	0.572	0.850
	生长旺期	1.638	2.849	3.127	4.362	2.994
	生长末期	0.39	0.621	0.697	-0.356	0.338
杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> (Lour.) Poir	生长初期	0.129	0.404	0.686	-0.343	0.219
	生长旺期	0.906	1.32	2.402	2.67	1.824
	生长末期	0.302	0.404	0.686	-0.343	0.262

由表 2 可以看出,干旱胁迫条件下,6 种苗木叶片与土壤水势差值变化规律因生长期而异。在生长初期和生长末期,中度干旱胁迫条件下,叶片和土壤水势差值最大,而在生长旺期,重度干旱胁迫条件下,苗木叶片与土壤水势差值最大。这反映出苗木在不同生长时期对干旱胁迫的适应不尽相同。在生长旺期,苗木体内生理代谢活动较旺盛,在严重干旱胁迫条件下,能通过降低叶片水势增大叶片与土壤水势差来增加对水分的吸

收能力,从而维持体内生理活动的正常进行。而在生长初期和末期,苗木的这种调节能力相对较弱。因此在严重干旱条件下受到伤害较大。香樟和杜英甚至在生长末期的严重干旱条件下,出现叶片水势大于土壤水势的情况。6个树种苗木不同生长期,在干旱胁迫条件下的平均叶片与土壤水势差值大小排序不同。生长初期:刺槐(1.261 MPa)>香樟(0.850 MPa)>滇柏(0.846 MPa)>侧柏(0.568 MPa)>构树(0.524 MPa)>杜英(0.219 MPa);生长旺期:香樟(2.994 MPa)>刺槐(2.68 MPa)>侧柏(2.028 MPa)>滇柏(2.008 MPa)>杜英(1.824 MPa)>构树(1.543 MPa);生长末期:刺槐(0.692 MPa)>构树(0.687 MPa)>滇柏(0.653 MPa)>侧柏(0.354 MPa)>香樟(0.338 MPa)>杜英(0.262 MPa)。

2.4 叶片水势的恢复指数比较

干旱胁迫复水 24h 后,不同生长阶段苗木叶片水势均有不同程度的恢复,总的趋势是随着胁迫强度的增加,其恢复指数逐渐减小(表 3)。

表 3 不同干旱胁迫处理复水 24h 后叶片水势恢复指数

Table 3 Recovery index of leaf water potential 24 hour after rewater under different drought stress intensities

树种 Tree species	生长时期 Growth stage	叶片水势恢复度 Recovery index of leaf water potential			平均值 Average
		A	B	C	
侧柏	生长初期	0.95	0.66	0.24	0.61
<i>Platycladus orientalis</i>	生长旺期	1.02	0.75	0.29	0.68
(Linn.) Franco	生长末期	1.08	0.87	0.35	0.76
滇柏	生长初期	0.88	0.76	0.15	0.59
<i>Fokienia hodginsii</i>	生长旺期	0.96	0.82	0.32	0.7
(Dunn) Henry et Thomas	生长末期	1.03	0.88	0.38	0.76
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	生长初期	0.76	0.74	0.13	0.54
	生长旺期	1.03	0.98	0.19	0.71
	生长末期	1.16	1.00	0.22	0.79
构树	生长初期	0.79	0.71	0.12	0.54
<i>Broussonetia papyrifera</i>	生长旺期	0.81	0.76	0.17	0.58
	生长末期	0.98	0.83	0.19	0.67
香樟	生长初期	0.75	0.69	0.15	0.53
<i>Cinnamomum camphora</i>	生长旺期	0.96	0.85	0.2	0.67
(Linn.) Presl	生长末期	1.01	0.91	0.23	0.71
杜英	生长初期	0.75	0.61	0.08	0.48
<i>Elaeocarpus sylvestris</i>	生长旺期	0.86	0.72	0.11	0.56
(Lour.) Poir	生长末期	0.89	0.79	0.14	0.61

由表 3 可以看出,不同时期干旱处理后复水 24h,叶片水势恢复度存在差异,按生长时期排序为:生长末期>生长旺期>生长初期。以侧柏为例,从生长初期→生长旺期→生长末期,苗木叶片水势平均 24h 复水后,其恢复度分别为 0.61、0.68、0.76。这说明干旱胁迫解除以后,叶片水势的恢复能力与苗木的生长发育水平有关。另外,从表中也可以发现干旱胁迫解除后叶片水势的超补偿现象,即复水后恢复度大于 1 的现象。尤其在苗木生长末期轻度干旱胁迫条件下产生这种现象。说明随着苗木的生长以及各个器官发育成熟,根系的吸水能力增强,胁迫解除后的恢复能力也相应增强。

2.5 苗木吸水潜能综合评价

为综合评价 6 种苗木吸水潜能的大小,分别选取了 13 个能够根据数值的大小就能直接反映其吸水潜能的指标(表 4),这些指标主要包括 4 各方面:(1)正常水分条件下叶片水势变化趋势,包含年均水势、年最低水势、年最大水势差和月水势变化平均标准差,主要反映的是植物在正常水分条件下其对叶片水势的调节能力;(2)干旱胁迫指数,主要反映植物在干旱胁迫条件下其叶片水势的受胁迫情况;(3)叶片与土壤水势差,主要

反映植物在干旱胁迫条件下其对自身水势梯度的调节能力;(4)水势恢复度指数主要反映植物在胁迫解除后叶片水势的恢复能力;这 4 各方面即不同又相互联系,能够比较全面的反映植物的吸水潜能。这些指标绝对值越大(胁迫指数为越小),说明其吸水潜能越高,或随着外界环境变化,调节体内水势,增加吸水的能力越大。

表 4 6 种苗木吸水潜能评价指标实测值

Table 4 The measured water potential value of water absorption of six tree species seedlings

		树种 Tree species					
		侧柏 <i>Platycladus orientalis</i> (Linn.) Franco	滇柏 <i>Fokienia hodginsii</i> (Dunn) Henry et Thomas	杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> (Lour.)Poir	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i> (Linn.)Presl	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>
年均水势 Annual average of water potential		0.978	1.014	0.466	0.713	0.938	0.684
年最低水势 Annual minimum of water potential		1.559	1.424	0.913	1.646	1.507	0.92
年最大水势差 Annual maximum of water potential difference		1.134	0.81	0.778	1.249	0.918	0.582
月水势变化平均标准差 Standard deviation average of water potential monthly change		0.237	0.221	0.116	0.219	0.279	0.226
叶片土壤水势差	生长初期	0.568	0.846	0.219	0.850	1.261	0.524
Difference between soil and leaf water potential	生长旺期	2.028	2.008	1.824	2.994	2.68	1.543
	生长末期	0.354	0.653	0.262	0.338	0.692	0.687
胁迫指数	生长初期	0.475	0.465	0.683	0.697	0.626	0.531
Drought stress index	生长旺期	0.355	0.411	0.571	0.539	0.536	0.471
	生长末期	0.344	0.368	0.508	0.477	0.488	0.394
恢复度	生长初期	0.617	0.597	0.48	0.53	0.543	0.54
Recovery index	生长旺期	0.687	0.7	0.563	0.67	0.71	0.58
	生长末期	0.767	0.763	0.607	0.717	0.793	0.667

对选取的 13 个指标分别计算各指标的隶属函数值(表 5),然后分树种累加各指标隶属函数值,得出每个树种累加隶属函数值。

从表 5 可知,侧柏的隶属函数值最大为 9.9262,杜英最小为 0.5471。各个树种苗木的吸水潜能由大到小排序为:侧柏>滇柏>刺槐>香樟>构树>杜英。必须指出的是,用隶属函数法评价苗木吸水潜能的大小,并不代表某种苗木吸水潜能的绝对值大小,而是一个相对大小的概念。反映不同树种苗木吸水潜能大小的顺序,可以作为划分不同树种苗木吸水潜能等级的依据。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1)6 个树种苗木在不同生长期随着干旱胁迫强度的增强,其叶片水势均表现出下降趋势,下降程度因树种、胁迫强度和不同生长期而异,且不同胁迫强度之间存在显著差异($P<0.002$)。在不同干旱胁迫强度下,所有树种苗木叶片水势均以生长旺期降幅最大,生长末期次之,生长初期最小。在生长旺期,6 个树种,叶片水势最低值分别为:侧柏-3.77MPa、滇柏-3.78 MPa、刺槐-5.08 MPa、构树-3.81 MPa、香樟-5.67 MPa、杜英-3.98 MPa;分别比对照下降了 2.21 MPa、2.14 MPa、3.57 MPa、2.89MPa、4.02MPa 和 3.07MPa。

(2)6 个树种苗木不同生长期随着干旱胁迫强度的增加,其叶片水势的胁迫指数均不同程度的增大,但不同树种胁迫指数增长方式不同。干旱胁迫对苗木叶片水势的影响均表现出从生长初期→生长旺期→生长末

期逐渐减小的趋势。6 个树种苗木其叶片水势平均胁迫指数按大小排序为:杜英>香樟>刺槐>构树>滇柏>侧柏。

表 5 6 种苗木吸水潜能评价指标隶属函数值

Table 5 Subordinate functional value of water absorption assessment index in 6 tree species seedlings

指标 Index	树种 Tree species					
	侧柏 <i>Platycladus Orientalis</i> (Linn.) Franco	滇柏 <i>Fokienia hodginsii</i> (Dunn) Henry et Thomas	杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i> (Lour.) Poir	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i> (Linn.) Presl	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i> L.	构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>
年均水势 Annual average of water potential	0.9343	1	0	0.4507	0.8613	0.3978
年最低水势 Annual minimum of water potential	0.8813	0.6971	0	1	0.8103	0.0095
年最大水势差 Annual maximum of water potential difference	0.8275	0.3418	0.2938	1	0.5037	0
月水势变化平均标准差 Standard deviation average of water potential monthly change	0.7423	0.6441	0	0.6319	1	0.6748
叶片土壤水势差 Difference between soil and leaf water potential						
生长初期	0.3351	0.6023	0	0.6056	1	0.2928
生长旺期	0.3341	0.3206	0.1938	1	0.7835	0
生长末期	0.2137	0.9094	0	0.1759	1	0.9866
胁迫指数 Drought stress index						
生长初期	0.9596	1	0.0594	0	0.3060	0.7201
生长旺期	1	0.7456	0	0.1489	0.1662	0.4676
生长末期	1	0.8503	0	0.1913	0.1231	0.6934
恢复度 Recovery index						
生长初期	1	0.8536	0	0.3658	0.4634	0.4390
生长旺期	0.8409	0.9318	0	0.7273	1	0.1136
生长末期	0.8571	0.8392	0	0.5893	1	0.3214
累加值 Accumulated value	9.9262	9.7363	0.5471	6.8869	9.0178	5.1169

(3)在不同干旱胁迫强度下,6 个树种苗木叶片与土壤水势差值变化规律为:在生长初期和生长末期,中度干旱胁迫条件下,叶片和土壤水势差值最大,而生长旺期重度干旱胁迫条件下,叶片与土壤水势差值最大。这反映了在不同生长时期不同苗木对干旱胁迫的适应存在差异。6 种苗木在不同生长时期不同干旱胁迫强度下,其平均叶片与土壤水势差值按大小排序为:生长初期:刺槐(1.261 MPa)>香樟(0.850 MPa)>滇柏(0.846 MPa)>侧柏(0.568 MPa)>构树(0.524 MPa)>杜英(0.219 MPa);生长旺期:香樟(2.994 MPa)>刺槐(2.68 MPa)>侧柏(2.028 MPa)>滇柏(2.008 MPa)>杜英(1.824 MPa)>构树(1.543 MPa);生长末期:刺槐(0.692 MPa)>构树(0.687 MPa)>滇柏(0.653 MPa)>侧柏(0.354 MPa)>香樟(0.338 MPa)>杜英(0.262 MPa)。

(4)干旱胁迫复水 24h 后,不同生长阶段苗木叶片水势均有不同程度的恢复。总的趋势是随着胁迫强度的增加,其恢复指数逐渐减小。6 个树种苗木不同生长时期,其叶片水势恢复指数按大小排序为:生长末期>生长旺期>生长初期。在苗木的生长末期的轻度干旱胁迫复水 24h 后,出现叶片水势恢复超补偿现象。

(5)利用隶属函数累加法对 6 个树种苗木的吸水潜能进行综合评价,结果排序为:侧柏>滇柏>刺槐>香樟>构树>杜英。

3.2 讨论

对于植物而言,要保持其活跃的生长状态,必须具有一个连续的“液相”,这个“液相”从土壤经过植物维管系统到达叶肉细胞,最后“液相”水变成“气相”水,然后扩散到大气中。这个系统被称为土壤-植物-大气连

续体 (SPAC)^[13]。在 SPAC 系统中,植物能够根据外界条件对植物施加的压力而做出反应^[14]。而植物水势的增高或者降低,则是植物的重要反应之一。从本次研究结果来看,随着干旱胁迫强度的增强,不同生长时期苗木叶片水势均表现出下降趋势,这与大多数学者的研究基本一致^[15-18]。在干旱胁迫条件下植物能够通过降低其叶片水势来调节其体内的水势梯度从而增加其吸水能力^[19]。这一点也可从在不同干旱胁迫强度下,6 个树种苗木叶片与土壤水势差值变化规律中得到验证。

本研究发现干旱胁迫解除后叶片水势的超补偿现象,庞云龙^[20],李继文^[15]等学者通过对刺槐、元宝枫等苗木在水分胁迫及复水后的生理特性的研究也发现同样的超补偿现象。如果植物某一器官受环境的影响而减弱或丧失其功能,则生物体内部具有恢复该器官功能的能力。这种补偿机制是生物保存自身的一种重要机能^[21]。关于补偿效应的研究目前大都是在农作物上研究较多,林业上尚未见有公开的文章发表。而且以生理指标变化规律居多,机理研究较少,而且由于作物品种、土壤处理和胁迫强度差异较大,有些结论间尚有矛盾之处。因此有必要加强这方面的研究,对节水农林业的发展,保护生态环境,实现可持续发展都具有十分重要的意义。

另外,本次研究由于实验设备所限制,并没有涉及苗木的茎部和根部的水势变化。若能同时研究苗木的各个部位在干旱胁迫条件下的水势梯度变化,就能更全面的评价苗木的吸水能力和调节体内水分平衡能力。另外,单一的植物水势值不能全面反映植物的水分状况以及抗旱特性。因此,一方面应继续探索和完善植物水势的基础理论研究,另一方面应该从土壤-植物-大气连续系统 (SPAC) 入手,分析各个组分水势的变化及其相关性以及水分在植物体内的传输过程及其调控机理。

References:

- [1] Li J Y. A study on drought resistance of typical afforest tree in region of Taihang (I) (VI). Journal of Beijing Forestry University, 1991, (Supplement): 1-24, 230-238.
- [2] Ji K S, Sun Z Y, Fang Y. Research advance on the drought resistant in forest. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2006, 30 (6): 123-128.
- [3] Wang M Z. Study on seasonal drought in Southern China. Rural Eco-Environment, 1997, 13(2): 6-10.
- [4] Shan C J, Liang Z Z. Study on water physiological characteristics of black locust seedling under soil drought condition. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2006, 37(4): 598-602.
- [5] Morte A, Lovisolo C, Schubert A. Effect of drought stress on growth and water relations of the mycorrhizal association *Helianthemum almeriense*-*Terfezia clavari*. Mycorrhiza, 2000, 10(3): 115-119.
- [6] Donovan L A, Grisé D J, West J B, Pappert R A, Alder N N, Richards J H. Predawn disequilibrium between plant and soil water potentials in two cold-desert Shrubs. Oecologia, 1999, 120(2): 209-217.
- [7] Tardieu F, Davies W J. Stomatal response to abscisic acid is a function of current plant water status. Plant Physiology, 1992, 98(2): 540-545.
- [8] Atkinson C J, Policarpo M, Webster A D, Kingswell G. Drought tolerance of clonal *Malus* determined from measurements of stomatal conductance and leaf water potential. Tree Physiology, 2000, 20(8): 557-563.
- [9] Zhu L H, van de Peppel A, Li X Y, Welander M. Changes of leaf water potential and endogenous cytokinins in young apple trees treated with or without paclobutrazol under drought conditions. Scientia Horticulturae, 2004, 99 (2): 133-141.
- [10] Fu A H, Chen Y N, Li W H, Zhang H F. Research advances on plant water potential under drought and salt stress. Journal of Desert Research, 2005, 25 (5): 744-749.
- [11] Guo L S, Tian Y L. Transpiration rate of coniferous and broadleaf young trees as a function of water potential of their leaves and of environmental factors. Acta Ecologica Sinica, 1992, 12 (1): 47-52.
- [12] Li J Y, Zhang J G. Studies on classification models and mechanisms of drought tolerance of chief afforestation species in the northern part of China (I)——the classification of relationships between seedling leaf water potential and soil water content. Journal of Beijing Forestry University, 1993, 15(3): 1-9.
- [13] Liao G Y. SPAC — a system of thermodynamics about water potential. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 1991, 12 (1): 47-52.
- [14] Li B. Symposium on Modern Ecology. Beijing: Science Press, 1995: 10-23.

- [15] Li J W, Wang J X, Zhang M L, Ji Z B, Xue S. Effect of drought and rewater on leaf water potential of *Robinia pseudoacacia*. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3): 33-36.
- [16] Zhao Y, Li J Y, Liu H Y, Huang K K, Li J. Effect of different water supply on water potential and transpiring water-consumption of five *salix psammophila* provenances. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(5): 19-25.
- [17] Wang H Z, Han L, Li Z J, Peng J, Ma C H. The photosynthetic and water physiological characteristics of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa* in the upper reaches of Tarim River. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(11): 5843-5850.
- [18] Zhao L J, Li J Y, Yu J F, Bertin S. Daily variation in transpiring water-consumption rates of seedlings in different drought stress. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(3): 42-47.
- [19] Si J H, Feng Q, Zhang X Y. Leaf water potential of *populus euphratica* and influencing factors in extreme arid region. Journal of Desert Research, 2005, 25(4): 505-510.
- [20] Pang Y L, Wang J X, Tian L. Effect of water stress and rewatering on the physiological characteristics of *Acer truncatum* seedlings. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2008, 36(6): 92-96.
- [21] Yuan B Z, Wang J, Zhao S L, Sun J. An approach to the mechanism of plant compensation. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17(5): 45-49.

参考文献:

- [1] 李吉跃. 太行山区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): 1-24, 230-280.
- [2] 季孔庶, 孙志勇, 方彦. 林木抗旱性研究进展. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2006, 30(6): 123-128.
- [3] 王明珠. 我国南方季节性干旱研究. 农村生态环境, 1997, 13(2): 6-10.
- [4] 单长卷, 梁宗锁. 土壤干旱对刺槐幼苗水分生理特征的影响. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2006, 37(4): 598-602.
- [10] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红, 张宏锋. 干旱、盐胁迫下的植物水势研究与进展. 中国沙漠, 2005, 25(5): 744-749.
- [11] 郭连生, 田有亮. 9 种针阔叶幼树的蒸腾速率、叶水势与环境因子关系的研究. 生态学报, 1992, 12(1): 47-52.
- [12] 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(I)——苗木叶水势与土壤含水量的关系及分类. 北京林业大学学报, 1993, 15(3): 1-9.
- [13] 廖光瑶. SPAC 的水势热力学系统. 四川林业科技, 1991, 12(1): 47-52.
- [14] 李博. 现代生态学讲座. 北京: 科学出版社, 1995: 10-23.
- [15] 李继文, 王进鑫, 张慕黎, 吉曾宝, 薛设. 干旱及复水对刺槐叶水势的影响. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 33-36.
- [16] 赵燕, 李吉跃, 刘海燕, 黄看看, 李佳. 水分胁迫对 5 个沙柳种源苗木水势和蒸腾耗水的影响. 北京林业大学学报, 2008, 30(5): 19-25.
- [17] 王海珍, 韩路, 李志军, 彭杰, 马春晖. 塔里木河上游胡杨与灰杨光合水分生理特性. 生态学报, 2009, 29(11): 5843-5850.
- [18] 招礼军, 李吉跃, 于界芬, Bertin S. 干旱胁迫对苗木蒸腾耗水日变化的影响. 北京林业大学学报, 2003, 25(3): 42-47.
- [19] 司建华, 冯起, 张小由. 极端干旱区胡杨水势及影响因子研究. 中国沙漠, 2005, 25(4): 505-510.
- [20] 庞云龙, 王进鑫, 田丽. 水分胁迫及复水对元宝枫幼树生理特性的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 92-96.
- [21] 原保忠, 王静, 赵松岭, 孙颖. 植物补偿作用机制探讨. 生态学杂志, 1998, 17(5): 45-49.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 8 April, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

The relationship between <i>Populus euphratica</i> 's radial increment and groundwater level at the lower reach of Tarim River	AN Hongyan, XU Hailiang, YE Mao, et al (2053)
Influence of elevation factor on soil profile texture configuration: a case study of the alluvial plain of Fengqiu County	TAN Manzhi, MI Shuxiao, LI Kaili, et al (2060)
Effects of ozone on AsA-GSH cycle in soybean leaves	WANG Junli, WANG Yan, ZHAO Tianhong, et al (2068)
The effects of physical and chemical factors on the growth and lipid production of <i>Chlorella</i>	ZHANG Guiyan, WEN Xiaobin, LIANG Fang, et al (2076)
Response of net productivity of masson pine plantation to climate change in North Subtropical Region	CHENG Ruimei, FENG Xiaohui, XIAO Wenfa, et al (2086)
Soil respiration of <i>Zoysia matrella</i> turfgrass in subtropics	LI Xibo, YANG Yusheng, ZENG Hongda, et al (2096)
Effect of UV-B radiation on the leaf litter decomposition and nutrient release of <i>Pinus massoniana</i>	SONG Xinzhang, ZHANG Huiling, JIANG Hong, et al (2106)
Physiological ecological effect of endophyte infection on <i>Achnatherum sibiricum</i> under drought stress	HAN Rong, LI Xia, REN Anzhi, et al (2115)
Zinc Tolerance and Accumulation Characteristics of <i>Armillaria mellea</i>	ZHU Lin, CHENG Xianhao, LI Weihuan, et al (2124)
Expansion strategies of <i>Caragana stenophylla</i> in the arid desert region	ZHANG Jianhua, MA Chengcang, LIU Zhihong, et al (2132)
Effects of mixed plant residues from the Loess Plateau on microbial biomass carbon and nitrogen in soil	WANG Chunyang, ZHOU Jianbin, XIA Zhimin, et al (2139)
Survival strategy of <i>Stipa krylovii</i> and <i>Agropyron cristatum</i> in typical steppe of Inner Mongolia	SUN Jian, LIU Miao, LI Shenggong, et al (2148)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in <i>Salix psammophila</i> root-zone soil in Inner Mongolia desert	HE Xueli, YANG Jing, ZHAO Lili (2159)
An experimental study on the the effects of different diurnal warming regimes on single cropping rice with Free Air Temperature Increased (FATI) facility	DONG Wenjun, DENG Aixin, ZHANG Bin, et al (2169)
Endophytic bacterial diversity in <i>Achnatherum inebrians</i> by culture-independent approach	ZHANG Xuebing, SHI Yingwu, ZENG Jun, et al (2178)
Hierarchical Partial Least Squares (Hi_PLS) model analysis of the driving factors of Henan's Ecological Footprint (EF) and its development strategy	JIA Junsong (2188)
Evaluation on spatial distribution of soil salinity and soil organic matter by indicator Kriging in Yucheng City	YANG Qiyong, YANG Jinsong, YU Shipeng (2196)
The toxicity of lupeol of <i>Inula britannica</i> on <i>Tetranychus cinnabarinus</i> and its effects on mite enzyme activity	DUAN Dandan, WANG Younian, CHENG Jun, et al (2203)
Abundance and biodiversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in littoral wetland of Baiyangdian Lake, North China	YE Lei, ZHU Guibing, WANG Yu, et al (2209)
Changes of leaf water potential and water absorption potential capacities of six kinds of seedlings in Karst mount area under different drought stress intensities: Taking six forestation seedlings in karst Mountainous region for example	WANG Ding, YAO Jian, YANG Xue, et al (2216)
Comparison of structure and species diversity of <i>Eucalyptus</i> community	LIU Ping, QIN Jing, LIU Jianchang, et al (2227)
Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands	JIANG Bo, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong, et al (2236)
Effects of <i>Phragmites australis</i> on methane emission from a brackish estuarine wetland	MA Anna, LU Jianjian (2245)
Genetic differentiation and the characteristics of uptake and accumulation of lead among <i>Camellia sinensis</i> populations under different background lead concentrations of soils in Yunnan, China	LIU Shengchuan, DUAN Changqun, LI Zhenhua, et al (2253)
Comparison of zooplankton lists between <i>Coilia mystus</i> food contents and collections from the Yangtze River Estuary & Hangzhou Bay	LIU Shouhai, XU Zhaoli (2263)
Reconstruction and analysis of July-September precipitation in Mt. Dagangshan, China	QIAO Lei, WANG Bing, GUO Hao, et al (2272)
Analysis on economic and ecological benefits of no-tillage management of <i>Carya cathayensis</i>	WANG Zhengjia, HUANG Xingzhao, TANG Xiaohua, et al (2281)
GIS-based analysis of the accessibility of urban forests in the central city of Guangzhou, China	ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (2290)
Review and Monograph	
Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration	YANG Qingpeng, XU Ming, LIU Hongsheng, et al (2301)
The advance of allometric studies on plant metabolic rates and biomass	CHENG Dongliang, ZHONG Quanlin, LIN Maozi, et al (2312)
Practice and the research progress on eco-compensation for cultivated land	MA Aihui, CAI Yinying, ZHANG Anlu (2321)
Discussion	
Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou	LIU Jie, LI Xianwei, JI Zhonghua, et al (2331)
Scientific Note	
Effects of secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake	HU Kun, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (2341)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任:孔红梅

执行编辑:刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 8 期 (2011 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 8 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元