成年侧柏和刺槐对春季干旱的适应策略

王 凯* 赵成姣 邓 杰 张 莹 高 爽
(辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘 要 本研究以成年侧柏和刺槐为对象,分析春季干旱胁迫对叶片、根系形态和生理特性的影响,比较2树种在干旱胁迫下的适应策略。结果表明:春季干旱胁迫下,侧柏叶片脯氨酸和可溶性蛋白含量及SOD和POD活性显著低于刺槐叶片($P<0.05$),可溶性糖含量和CAT活性显著高于刺槐叶片($P<0.05$),两树种叶片丙二醛含量无显著差异($P>0.05$);侧柏根系脯氨酸和可溶性蛋白含量及POD和CAT活性显著低于刺槐根系($P<0.05$),可溶性糖和丙二醛含量显著高于刺槐根系($P<0.05$)。侧柏比叶重和根系活力显著高于刺槐($P<0.05$),刺槐根长密度和根面积指数显著高于侧柏($P<0.05$)。这说明春季干旱胁迫下成年侧柏和刺槐的渗透调节物质含量及抗氧化酶活性不同,春季干旱对两树种叶片伤害程度相似,而对侧柏根系伤害更大;成年侧柏主要采取耐旱策略,刺槐主要采用避旱策略。

关键词 春季干旱; 适应策略; 大树; 耐旱; 避旱

Adaptive strategies of adult *Platycladus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* to spring drought. WANG Kai*, ZHAO Cheng-jiao, DENG Jie, ZHANG Ying, GAO Shuang (*College of Environmental Sciences and Engineering*, *Liaoning Technical University*, *Fuxin* 123000, *Liaoning*, *China*).

Abstract: In the present study, the effects of spring drought stress on morphology and physiological characteristics of leaves and roots of mature *Platycladus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* were analyzed and the adaptive strategies of the two tree species under drought stress were compared. The results showed that the proline and soluble protein contents, and SOD and POD activities in leaves of *P. orientalis* were significantly lower than those in leaves of *R. pseudoacacia* ($P<0.05$), but the soluble sugar content and CAT activity in leaves of *P. orientalis* were significantly higher than those in leaves of *R. pseudoacacia* under spring drought stress ($P<0.05$). Meanwhile, the difference in malondialdehyde content in leaves was not significant between *P. orientalis* and *R. pseudoacacia* ($P>0.05$). The proline and soluble protein contents, and POD and CAT activities in roots of *P. orientalis* were significantly lower than those in roots of *R. pseudoacacia* ($P<0.05$). However, the soluble sugar and malondialdehyde contents in roots of *P. orientalis* were significantly higher than those in roots of *R. pseudoacacia* ($P<0.05$). The specific leaf weight and root activity of *P. orientalis* were significantly higher than those of *R. pseudoacacia* ($P<0.05$). The root length density and root area index of *R. pseudoacacia* were significantly greater than those of *P. orientalis* ($P<0.05$). These results indicated that there were differences in permeating substance contents and antioxidative enzyme activities between *P. orientalis* and *R. pseudoacacia* under spring drought stress. The damages of spring drought to leaves were similar between *P. orientalis* and *R. pseudoacacia*, but the damages were more severe to the roots of *P. orientalis*. Adult *P. orientalis* mainly adopted drought-tolerance strategies, while mature *R. Pseudoacacia* mainly adopted drought-avoidance strategies under spring drought.

Key words: spring drought; adaptive strategy; mature tree; drought tolerance; drought avoidance.

国家自然科学基金项目(31400613)资助。
收稿日期: 2017-03-15 接受日期: 2017-07-08
*通讯作者 E-mail: wangkai_2005@hotmail.com

全球干旱半干旱区约占陆地总面积的35%,遍及60多个国家和地区,干旱已成为长期存在的世界性难题。我国降雨在时间和空间上分配不均匀,春季干旱是我国北方地区常见的气候现象,植物每年都要经历这种环境胁迫的考验,导致粮食产量下降、林木生长衰退、植株死亡等一系列生态环境问题发生(张国盛,2000;焦树仁,2001)。植物对干旱胁迫响应规律和适应性一直是研究热点(Seki *et al.*,2007)。植物一般通过避旱和耐旱两种策略来适应干旱(刘长成等,2011)。避旱策略指植物通过增加根系生物量投入以吸收更多水分,关闭气孔以降低水分散失,停止生长或落叶来减少蒸发面积和对光能的吸收(Chaves *et al.*,2003)。耐旱策略指植物通过积累渗透调节物质以降低渗透势(Patakas *et al.*,2002),增加比叶重(Maroco *et al.*,2000),提高水分利用效率(Medrano *et al.*,2009),在水势很低条件下仍保持着较高的气孔导度和光合作用;同时提高抗氧化酶活性,降低膜脂质过氧化水平,保证细胞正常的生理代谢(Reddy *et al.*,2004)。

侧柏(*Platycladus orientalis*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是我国北方地区常用造林绿化树种。侧柏属常绿乔木,具有耐干旱、寿命长的特点;刺槐属落叶乔木,具有抗旱、速生、改良土壤的优点,二者常作为常绿和落叶混交树种(薛鸥等,2016)。不同树种在旱生生态系统中能够共存,往往采用不同的适应策略(刘金玉等,2012),关于侧柏和刺槐抗旱性研究报道多集中于模拟干旱环境下幼苗地上部分的响应和适应规律(刘淑明等,2003;周席华等,2005;陈丽华等,2008),而对于现实干旱环境下成年树木叶片和根系2方面适应策略研究较少。2013年辽宁省西北部发生了较为严重的春季干旱,影响了树木的存活与生长,而成年侧柏和刺槐作为当地主要绿化树种,能较好地适应环境。本研究以成年侧柏和刺槐为对象,分析春季干旱胁迫下2树种叶片和根系的形态与生理特征,比较常绿和落叶树木在干旱环境下的适应策略,为了解成年树木抗旱机理和科学地筛选绿化树种提供建议。

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

辽宁省阜新市(121°1′ E—122°56′ E,41°41′ N—42°56′ N),属半干旱大陆性季风气候。年均降水量539 mm,主要集中于7、8月,春季(4、5月)降雨较少。年均气温6.5~7.5 ℃,极端最低气温-28.4 ℃,极端最高气温40.6 ℃,平均相对湿度50%~60%。植被类型以华北和长白植物区系为主;土壤为褐土。本试验在辽宁工程技术大学(阜新校区)校园内进行,该区土壤容重1.47 g·cm^{-3},pH值7.28,有机质34.4 mg·g^{-1},全氮1.2 mg·g^{-1},速效氮13.0 mg·kg^{-1},全磷0.48 mg·g^{-1},速效磷8.3 mg·kg^{-1}(王凯等,2015)。

1.2　试验材料

试验开始于2013年5月15日,之前未发生春季降雨,也未进行人工灌溉,土壤含水量为8.00%±0.29%,属严重干旱(潘德成等,2013;王丽娜,2014)。侧柏和刺槐作为行道树,单株成行种植于人行道两侧,株距为4 m,年龄为35~40 a。侧柏株高(10.37±0.72) m,胸径(19.95±0.65) cm;刺槐株高(16.77±1.13) m,胸径(42.44±0.70) cm。各树种处于自然光照水平,分别选择具有代表性的3株,在每株树木不同方位的中上部位随机采摘健康完整叶片,保存于冰盒中。同时在每棵树下按照1/4样圆法采集根样(王凯等,2015),用土钻(Φ=7 cm)在0~20 cm土层(根系主要分布区域)中取样,连土带根装入塑封袋,编号后带回实验室。

1.3　试验方法

侧柏和刺槐各随机选取10个叶片,经数码相机照相后,将图像导入电脑中,用Photoshop 7.0软件处理后,计算出叶片面积。然后在80 ℃烘干至恒重,用电子天平称干重,计算比叶重(比叶重=叶干重/叶面积,g·m^{-2})。根据各树种根系外形、颜色、弹性等区别死根和活根,将活根用清水冲洗干净后晾干,用游标卡尺(精度为0.02 mm)挑选出直径小于2 mm的细根,测量直径(D)和长度(L),根面积=$\pi\times D\times L$,计算出根长密度(即单位土壤体积的根长)和根面积指数(根面积/地表面积),之后放入80 ℃烘箱中烘干至恒重测定生物量。分别测定混合后的新鲜叶片、根系各项生理指标,脯氨酸含量采用茚三酮显色法,可溶性糖含量采用硫酸蒽酮比色法,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法,超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光还原法,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚显色法,过氧化氢酶(CAT)活性采用高锰酸钾滴定法,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸比色法,根系活力采用氯化三苯基四氮唑法测定(李合生,2000)。每个指标5次重复。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 软件处理数据并绘制图表,用 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析,对侧柏和刺槐抗旱性状间差异采用 T 检验方法进行显著性分析($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 春季干旱对侧柏和刺槐渗透调节物质含量的影响

干旱胁迫可诱导树木体内合成并积累某些溶质,如可溶性糖、脯氨酸等。由表 1 可知,春季干旱胁迫下,侧柏叶片和根系脯氨酸含量显著低于刺槐($P<0.05$),可溶性糖含量显著高于刺槐($P<0.05$);脯氨酸和可溶性糖含量在 2 树种中表现出此消彼长的趋势,脯氨酸和可溶性糖之间具有相互补偿机制,可溶性糖积累可能是脯氨酸下降的补偿策略。干旱环境会诱导树木体内某一类特定蛋白质合成,由表 1 可知,侧柏叶片可溶性蛋白含量显著高于刺槐叶片($P<0.05$),根系可溶性蛋白含量显著低于刺槐根系($P<0.05$)。

2.2 春季干旱对侧柏和刺槐抗氧化酶活性的影响

干旱胁迫下树木体内积累活性氧,植株本身对活性氧的伤害有精细而复杂的防御体系。SOD 作为抵御活性氧伤害的“第一道防线”,能歧化 O_2^- 催化成 H_2O_2 和 O_2。由表 2 可知,春季干旱胁迫下,侧柏叶片 SOD 活性显著低于刺槐($P<0.05$),而侧柏和刺槐根系 SOD 活性没有显著差异($P>0.05$)。植株首先启动 SOD,导致 H_2O_2 含量增多,而此时清除 H_2O_2 的酶 POD 和 CAT 也相应升高,将 H_2O_2 分解成 H_2O。春季干旱胁迫下,侧柏叶片 POD 活性显著低于刺槐叶片($P<0.05$),CAT 活性显著高于刺槐($P<0.05$);而侧柏根系 POD 和 CAT 活性均显著低于刺槐根系($P<0.05$)。

表 1 春季侧柏和刺槐根叶渗透调节物质含量

Table 1 Osmotic substance contents in leaves and roots of *Platycladus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* in spring

部位		脯氨酸 (μg·g^{-1})	可溶性糖 (mg·g^{-1})	可溶性蛋白 (mg·g^{-1})
叶片	侧柏	15.79±0.51 b	29.77±0.54 a	2.40±0.21 a
	刺槐	41.63±3.71 a	12.60±1.00 b	0.61±0.04 b
根系	侧柏	19.54±0.57 b	3.77±0.23 a	0.96±0.08 b
	刺槐	41.87±2.84 a	1.71±0.30 b	2.08±0.05 a

数据为平均值±标准误;同列不同字母代表 2 树种差异显著($P<0.05$)。下同。

表 2 春季侧柏和刺槐根叶抗氧化酶活性

Table 2 Antioxidative enzyme activities in leaves and roots of *Platycladus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* in spring

部位		SOD (U·g^{-1})	POD(U·g^{-1}·min^{-1})	CAT(mg·g^{-1}·min^{-1})
抗氧化酶	侧柏	14.34±2.44 b	0.98±0.05 b	1.53±0.10 a
	刺槐	43.57±3.55 a	1.63±0.05 a	0.68±0.06 b
根系	侧柏	35.70±9.88 a	2.95±0.03 b	0.45±0.07 b
	刺槐	40.90±10.05 a	3.45±0.12 a	3.12±0.11 a

2.3 春季干旱对侧柏和刺槐丙二醛含量的影响

干旱胁迫会导致树木在叶绿体、线粒体、细胞质及质膜上产生超量活性氧,破坏生物膜的结构与功能。丙二醛是有细胞毒性的物质,其含量高低是反映脂质过氧化作用强弱的重要指标,丙二醛积累越多,表明对组织的伤害越重。由图 1 可知,春季干旱胁迫下,侧柏和刺槐叶片丙二醛含量无显著差异($P>0.05$),侧柏根系丙二醛含量显著高于刺槐根系($P<0.05$),说明春季干旱环境对侧柏和刺槐叶片膜质过氧化伤害程度相同,而对侧柏根系细胞膜伤害较大。

2.4 春季干旱对侧柏和刺槐根系活力的影响

根系活力能表征根系新陈代谢活动的强弱,是反映根系吸水能力的一项综合指标。由图 2 可知,侧柏根系活力显著高于刺槐($P<0.05$),说明春季干旱胁迫下侧柏根系生理代谢活动较活跃,对水分和养分的吸收能力更强,是耐旱性的表现。

2.5 春季干旱对侧柏和刺槐比叶重的影响

比叶重指单位面积的叶片质量,能反映树木获取资源能力,与植株生长存活策略紧密相关。由图 3 可知,春季干旱胁迫下侧柏比叶重显著高于刺槐($P<0.05$),说明侧柏单位面积的叶片质量更大,叶

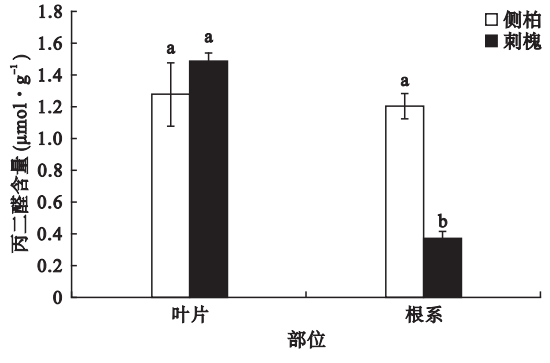


图 1 春季侧柏和刺槐根叶丙二醛含量

Fig. 1 Malondialdehyde content in leaves and roots of *Platycladus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* in spring

不同字母代表不同树种差异显著($P<0.05$)。下同。

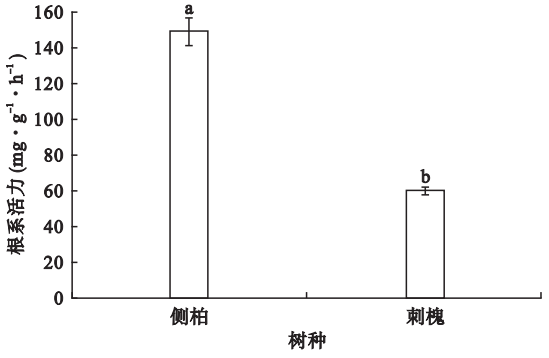


图 2　春季侧柏和刺槐根系活力

Fig.2　Root activity of *Platycladus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* in spring

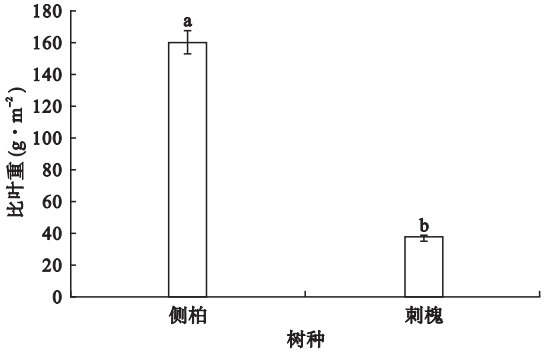


图 3　春季侧柏和刺槐比叶重

Fig.3　Specific leaf weight of *Platycladus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* in spring

片更厚,有利于减少蒸腾作用导致的水分散失,能更好地适应干旱环境。

2.6　春季干旱对侧柏和刺槐根系形态的影响

根系生物量是评价根系吸收水分和养分能力的常用指标,根长密度指单位土壤体积的根系长度,根面积指数指单位土壤面积的根系面积。由表 3 可知,侧柏和刺槐根系生物量差异不显著($P>0.05$),而刺槐根长密度和根面积指数均显著高于侧柏($P<0.05$),说明刺槐单位质量的根系更长,面积更大,分布范围更广,有利于其获取更多土壤水分。

表 3　春季侧柏和刺槐根系形态特征

Table 3　Root morphology of *Platycladus orientalis* and *Robinia pseudoacacia* in spring

根系形态指标	侧柏	刺槐
生物量(g·cm^{-3})	300.16±52.56 a	298.27±36.53 a
根长密度(cm·cm^{-3})	0.17±0.03 b	0.27±0.03 a
根面积指数	0.32±0.06 b	0.50±0.06 a

3　讨　论

侧柏和刺槐是我国北方地区常用绿化树种,二者经常作为常绿与落叶的混交树种,探讨 2 树种在干旱环境的抗旱机理,了解常绿与落叶植物在干旱胁迫下的适应策略,对科学地筛选抗旱树种具有重要意义。抗旱性分析是一个复杂问题,由于观测指标、立地、植株年龄(幼苗、幼树和成年树)和器官(叶片和根系)等差异,可能会得到不同结论(王凯等,2016)。关于侧柏和刺槐抗旱性比较已有研究报道,但研究方法、手段和结果略有不同,刘琪璟(1989)通过观测幼树叶片显微结构和根系分布特征,刘淑明等(2003)比较幼苗叶片光合和蒸腾速率,周席华等(2005)通过观测幼苗叶片形态和生理代谢特征,徐彩霞等(2009)通过研究幼苗根系渗透调节物质累积能力,余新晓等(2013)通过观测叶片 $\delta^{13}C$ 含量,均发现侧柏抗旱性强于刺槐;而王丁等(2011)应用多维空间坐标综合评定法对 2 树种苗木的水势、水力结构、保水力和耗水量等抗旱指标进行综合评价,发现刺槐抗旱性强于侧柏。以往研究多集中于幼苗或幼树,而树木在不同生长发育阶段对干旱的适应策略和抗旱性强弱表现存在差异(王凯等,2016)。本研究以成年树木为对象,从叶片和根系 2 方面进行比较发现,春季干旱胁迫下,侧柏叶片脯氨酸和可溶性蛋白含量显著低于刺槐($P<0.05$),可溶性糖含量显著高于刺槐($P<0.05$);侧柏叶片 SOD 和 POD 活性显著低于刺槐($P<0.05$),CAT 活性显著高于刺槐($P<0.05$);侧柏和刺槐叶片丙二醛含量无显著差异($P>0.05$)。这说明成年侧柏和刺槐在春季干旱环境下叶片渗透调节物质及抗氧化酶作用不同,侧柏叶片渗透调节物质中可溶性糖在调节细胞渗透势中起着主导作用,刺槐主要依靠脯氨酸和可溶性蛋白共同调节细胞渗透势;侧柏叶片主要通过 CAT 清除活性氧自由基避免伤害,刺槐主要利用 SOD 和 POD 同时清除。然而,侧柏和刺槐叶片膜质过氧化程度相同,春季干旱对 2 树种叶片伤害程度没有差异。

研究还发现,侧柏根系脯氨酸和可溶性蛋白含量显著低于刺槐($P<0.05$),可溶性糖含量显著高于刺槐($P<0.05$);说明成年侧柏和刺槐根系在春季干旱环境下的渗透调节物质不同,侧柏根系主要依靠可溶性糖调节细胞渗透势,刺槐根系主要依靠脯氨酸和可溶性蛋白共同调节。侧柏与刺槐根系 SOD 活性没有显著差异($P>0.05$),POD 和 CAT 活性在侧柏根系中显著低于刺槐($P<0.05$);说明刺槐清除活性氧自由基能力强于侧柏,导致侧柏根系丙二醛

含量显著高于刺槐($P<0.05$)(图 1),春季干旱对成年侧柏根系膜质过氧化伤害更大。而侧柏根系活力显著高于刺槐($P<0.05$)(图 2),说明侧柏根系生理代谢活动更活跃。这可能由于植物抗逆性防御体系是一个高度耗能的系统,需要投入大量的理化成分,付出较大的成本(Ito *et al.*,2009),导致用于吸收和运输的成分较少。刺槐可能将更多的理化成分用于抗旱性防御系统,而侧柏可能更注重于维持根系的吸收能力;导致侧柏根系生理代谢活跃,膜质过氧化伤害程度更大。

常绿和落叶植物由于叶片形态结构、寿命、功能等方面的差异,在干旱环境下存在着不同生存策略(Antúnez *et al.*,2001)。刘长成等(2011)发现,常绿乔木猴樟(*Cinnamomum bodinieri*)幼苗主要采用耐旱策略,落叶乔木圆果化香树(*Platycarya longipes*)主要采用避旱策略。刘金玉等(2012)发现,常绿植物直脉榕(*Ficus orthoneura*)表现为耐旱策略,落叶植物豆果榕(*Ficus pisocarpa*)采取避旱策略。本研究发现,侧柏比叶重和根系活力均显著高于刺槐($P<0.05$)(图 3)。这表明侧柏通过提高比叶重,增加叶片厚度或叶肉细胞密度,降低叶片蒸腾作用的水分散失;同时提高根系生理代谢活动以维持正常水分吸收,表现为耐旱特征。本研究还发现,侧柏和刺槐根系虽然生物量差异不显著($P>0.05$),但刺槐根长密度和根面积指数均显著高于侧柏($P<0.05$)(表 3);说明侧柏和刺槐根系质量相同,但刺槐通过增加单位质量根系的长度和面积,扩大根系吸收的范围,以寻找更多水源,表现为避旱特征。这与刘长成等(2011)和刘金玉等(2012)发现常绿植物采用耐旱策略,落叶植物采取避旱策略的研究结果相似,然而这一规律是否适用于其他常绿和落叶植物还有待于进一步证实。本研究是成年侧柏和刺槐在春季干旱环境下的适应结果,反映了 2 树种在春季的生存状态,而对于其抗旱性状在不同干旱胁迫程度下变化的比较将做进一步研究。

参考文献

陈丽华, 鲁绍伟, 张学培, 等. 2008. 晋西黄土区主要造林树种林地土壤水分生态条件分析. 水土保持研究, **15**(1): 79-82, 86.

焦树仁. 2001. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施. 林业科学, **37**(2): 131-138.

李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.

刘金玉, 付培立, 王玉杰, 等. 2012. 热带喀斯特森林常绿和落叶榕树的水力特征和水分关系与抗旱策略. 植物科学学报, **30**(5): 484-493.

刘琪璟. 1989. 辽西阜新地区主要树种抗旱性的研究. 东北林业大学学报, **17**(1): 93-99.

刘淑明, 陈海滨, 孙长忠, 等. 2003. 黄土高原主要造林树种的抗旱性研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **31**(4): 149-153.

刘长成, 刘玉国, 郭 柯. 2011. 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性. 植物生态学报, **35**(10): 1070-1082.

潘德成, 宋 冬, 孟宪华, 等. 2013. 近 50 年辽西北半干旱区降水变化与花生水分适宜性评价. 干旱地区农业研究, **31**(5): 9-13.

王 丁, 张丽琴, 薛建辉. 2011. 苗木抗旱性综合评价研究——以 6 种喀斯特造林树种苗木为例. 中国农学通报, **27**(25): 5-12.

王 凯, 郭晶晶, 王冬琦, 等. 2015. 樟子松和油松根叶对春季干旱胁迫的响应. 生态学杂志, **34**(11): 3132-3138.

王 凯, 雷 虹, 刘建华. 2016. 春季辽宁西北部主要绿化树种根叶抗旱生理性状评价. 应用生态学报, **27**(6): 1853-1860.

王丽娜. 2014. 降水与墒情关系及抗旱需水量评估技术研究. 测绘与空间地理信息, **37**(2): 159-161.

徐彩霞, 赵 忠, 陈明涛. 2009. 水分胁迫对 5 个树种苗木根系部分生理指标的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **37**(8): 109-114.

薛 鸥, 魏天兴, 朱金兆. 2016. 环境因子对北京低山区低效林林下植被物种组成和丰富度的影响. 生态学杂志, **35**(9): 2321-2328.

余新晓, 杨芝歌, 白艳婧, 等. 2013. 基于 $\delta^{13}C$ 值的北京山区典型树种水分利用效率研究. 应用基础与工程科学学报, **21**(4): 593-599.

张国盛. 2000. 干旱、半干旱地区乔灌木树种耐旱性及林地水分动态研究进展. 中国沙漠, **20**(4): 363-368.

周席华, 刘学全, 胡兴宜, 等. 2005. 鄂西北主要造林树种耐旱生理特性分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, **29**(1): 67-70.

Antúnez I, Retamosa EC, Villar R. 2001. Relative growth rate in phylogenetically related deciduous and evergreen woody species. *Oecologia*, **128**: 172-180.

Chaves MM, Maroco JP, Pereira JS. 2003. Understanding plant responses to drought: From genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, **30**: 239-264.

Ito K, Sakai S. 2009. Optimal defense strategy against herbivory in plants: Conditions selecting for induced defense, constitutive defense, and no-defense. *Journal of Theoretical Biology*, **260**: 453-459.

Maroco JP, Pereira JS, Chaves MM. 2000. Growth, photosynthesis and water-use efficiency of two C_4 Sahelian grasses subjected to water deficits. *Journal of Arid Environments*, **45**: 119-137.

Medrano H, Flexas J, Galmés J. 2009. Variability in water use efficiency at the leaf level among Mediterranean plants with different growth forms. *Plant and Soil*, **317**: 17-29.

Patakas A, Nikolaou N, Zioziou E, *et al*. 2002. The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought-stressed grapevines. *Plant Science*, **163**: 361-367.

Reddy AR, Chaitanya KV, Jutur PP, *et al*. 2004. Differential antioxidative responses to water stress among five mulberry (*Morus alba* L.) cultivars. *Environmental and Experimental Botany*, **52**: 33-42.

Seki M, Umezawa T, Urano K, *et al*. 2007. Regulatory metabolic networks in drought stress responses. *Current Opinion in Plant Biology*, **10**: 296-302.

作者简介　王　凯,男,1981 年生,博士,副教授,主要从事水土保持与荒漠化研究。E-mail: wangkai_2005@ hotmail.com

责任编辑　张　敏