

# 土层厚度对刺槐旱季水分状况和生长的影响

王 林 冯锦霞 万贤崇\*

中国林业科学研究院新技术研究所, 北京 100091

**摘 要** 该研究测定了旱季和雨季刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林不同土层厚度的土壤含水量, 刺槐的树高、胸径、小枝凌晨水势、叶片碳稳定同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )、叶面积、比叶重和气体交换指标; 分析了刺槐旱季和雨季的水分状况和土层厚度之间的关系; 通过刺槐对季节性干旱胁迫的反应, 估计华北石质山区不同土层厚度土壤水分对刺槐的承载能力; 并求证近年来该地区刺槐衰败和水分因素的关系。结果显示: 随着土层厚度减小, 旱季土壤含水量下降、凌晨小枝水势降低; 气孔导度和最大光合速率都减小, 而瞬时水分利用效率增加, 雨季上述指标无显著性差异, 旱季土壤含水量只有雨季的60%左右。随着土层变薄, 刺槐叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 增高, 叶面积减小, 比叶重增加; 刺槐树高和胸径减小。以上结果表明: 刺槐在不同季节下的水分状况综合反映土壤的供水能力, 土层浅薄导致土壤水分承载力不足, 致使刺槐在旱季受到较严重的水分胁迫, 这可能是刺槐出现衰败的重要原因。

**关键词** 气体交换, 叶片形态, 凌晨水势, 刺槐, 土层厚度, 碳稳定同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )

## Effects of soil thickness on dry-season water relations and growth in *Robinia pseudoacacia*

WANG Lin, FENG Jin-Xia, and WAN Xian-Chong\*

Chinese Academy of Forestry, Institute of New Forestry Technology, Beijing 100091, China

### Abstract

**Aims** Our main purposes were to explore effects of soil thickness on the soil water carrying capacity of black locust (*Robinia pseudoacacia*) forests and to investigate the role of soil moisture in causing decline of black locust forests in regions of northern China in recent years.

**Methods** We measured soil moisture, pre-dawn twig water potential and gas exchange of black locust in the dry season and wet season. We also measured stable carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of leaf, leaf morphology and growth of black locust. Combined with the differential response in the dry season and wet season, we analyzed the relationship between water status of black locust and the soil thickness.

**Important findings** In the dry season, the twig pre-dawn water potential and soil moisture significantly declined with decreased soil thickness, and the net photosynthetic rate and stomatal conductance of black locust also decreased. But there were no significant differences in these indexes in the wet season. Average soil moisture in the dry season was only 60% that in the wet season. With decrease in soil thickness,  $\delta^{13}\text{C}$  increased, area of leaf decreased and leaf mass per area increased. As a result, tree height and diameter at breast height significantly decreased with decrease in soil thickness. Results revealed that the water status of black locust in the different seasons strongly reflected water supply capacity of the soil, and that thin soil thickness was the main cause for the decline of black locust forests due to low carrying capacity of vegetation caused by inadequate water storage in the dry season.

**Key words** gas exchange, leaf morphogenesis, predawn water potential, *Robinia pseudoacacia*, soil thickness, stable carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ )

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)生长速度快、对环境适应性强、具有固氮能力, 是生态恢复的先锋树种, 也是我国北方广泛应用的造林树种(于占辉等, 2009; 李军等, 2010)。长期以来, 刺槐被广泛认为是

抗旱树种(王均明等, 1999; 杨建伟等, 2004)。但近年研究发现, 在干旱地区大量刺槐出现生长减慢、枝梢干枯、甚至整株死亡的衰败现象(单长卷等, 2004; 李军等, 2010)。由此看来, 刺槐还不能简单地

定义为抗旱树种,它衰败的原因需要进一步的研究。我们先前的研究发现刺槐对水分需求量大、对干旱胁迫反应敏感(靳欣等, 2011)。也有学者称刺槐为耗水性耐旱树种(杨建伟等, 2004)。研究西北黄土高原地区的刺槐发现,刺槐具有发达的根系,可深达地下数米(胡小宁等, 2010),可以提取、利用深层土壤的水分。一方面,刺槐耗水量大,它的深根提水被认为可能是造成一些地区深层土壤干化的主要原因(王力等, 2001)。另一方面,在已出现干化的土壤上,刺槐呈现出明显的衰退(单长卷等, 2004)。本研究组调查华北石质山区的刺槐林发现,20年及以上的刺槐出现衰败现象、生长状况较差,这可能与该地区普遍土层浅薄有关。土层厚度影响土壤的储水能力和土壤水分植被承载能力(Poff, 1996; Buttle *et al.*, 2004),进一步影响到生物量、植被盖度以及植被生长状况(Schenk, 2008; 聂云鹏等, 2011)。特别是在土层浅薄的山地丘陵区,土层厚度成为影响植被类型和植被生长状况的主要限制因子(Querejeta *et al.*, 2007)。

土壤含水量和植物的凌晨水势直接反映土壤和植物的水分状况(Breshears *et al.*, 2008; Levanič *et al.*, 2011),气体交换指标和植物叶片形态学特征是植物应对环境条件变化适应性的重要表现,与植物的水分状况有直接关系(Carter & White, 2009; Zhang *et al.*, 2012)。植物叶片碳稳定同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )值,可以反映一定时间尺度内气孔导度和叶片内外 $\text{CO}_2$ 浓度的状况,也可以作为植物水分利用效率(water use efficiency, WUE)的指标(Farquhar *et al.*, 1989; Galle *et al.*, 2010),还可以反映植物受干旱胁迫的程度。结合上述指标是研究树木水分利用状况及树木生长受水分因素影响的有效手段。

本研究的假说是:刺槐根系发达,在土壤水分允许的情况下,可以开发深层水分,避免干旱胁迫;而在土壤水分限制下,刺槐不能保持水分平衡,表现出受胁迫的症状。本研究通过测定不同时间尺度上土层厚度对刺槐的影响,验证以上假说:(1)通过测定旱季和雨季的土壤含水量、植物凌晨水势以及气体交换指标,调查土壤的供水情况和刺槐对干旱胁迫的即时响应;(2)通过测定叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和叶片形态学指标,研究土壤水分状况差别对刺槐影响的积累效应;(3)通过测定树高和胸径,比较长期土层厚度差异下刺槐在生长上的差别表现。通过以上研究,

比较刺槐水分状况和生长的关系,验证土层厚度对刺槐的限制作用。主要目的是探索华北石质山区立地条件对刺槐水分状况和生长的影响,并求证在该地区刺槐衰败与土壤水分因素的关系。华北石质山区土壤贫瘠,刺槐是该地区主要的造林树种之一,对该地区生态恢复起到过重要的作用,研究其土层厚度与刺槐水分状况、生长之间的关系,对该地区刺槐人工林抚育具有指导意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于河南省济源市境内的黄河小浪底森林生态系统定位研究站(35°01' N, 112°28' E),地处黄河中游,紧连太行山,属暖温带大陆性季风气候。属低山丘陵区,试验地中心区域海拔为410 m左右,主要植被类型有阔叶林、针叶林、灌丛和草丛。主要土壤种类为棕壤和石灰岩风化母质淋溶性褐土。年平均气温12.4–14.3 °C,全年日照时数为2 367.7 h,年日照率为54%,历年平均年降水量641.7 mm。由于受季风气候的影响,降水季节性分布不均匀,6–9月多年平均降水量为438.0 mm,占全年降水的68.3%,每年的春夏之交是典型的旱季(王林等, 2013)。

### 1.2 试验材料

本研究以我国华北石质山区的主要造林树种刺槐为研究对象。选取3种类型的刺槐纯林,土层厚度分别为70 cm (R70)、40 cm (R40)和25 cm (R25),每种类型设置3个20 m × 20 m的样地,各类型刺槐年龄在27–33年,林下有少量灌木及杂草,灌木主要为扁担木(*Grewia biloba* var. *parviflora*)和黄荆(*Vitex negundo*)。具体土层厚度及植株密度状况见表1。

### 1.3 试验方法

于2011年5月底(旱季)和8月初(雨季)各测定一次土壤含水量、凌晨水势、气体交换指标:土壤含水量用TRME-T3 TDR便携式土壤水分测定仪(IMKO, Ettlingen, Germany)测定,由于浅薄土层样地的土层厚度为25 cm左右,为了使不同土层厚度的土壤含水量更具可比性,我们统一测定土壤含水量深度为20 cm,每个样地随机测定6个重复。小枝凌晨水势用SAPSII 3115便携式植物水势压力室(SEC, Santa Barbara, USA)测定,测定时间为5:30–

表1 样地土层厚度和林分密度(平均值±标准偏差)  
Table 1 Soil thickness and plant density of plots (mean ± SD)

样地 Plot	土层厚度 Soil thickness (cm)	植株密度 Plant density (No.·hm <sup>-2</sup> )
R70	70 ± 10	2 250 ± 265
R40	38 ± 3	1 800 ± 200
R25	25 ± 6	2 130 ± 305

6:00, 采集树冠中上部向阳面当年生小枝进行水势测定, 枝条高度在8 m左右, 6个重复。气体交换指标(包括光合作用、蒸腾作用和气孔导度)晴天9:00–11:00进行测定, 采用LI-6400光合测定系统红蓝光源叶室(LI-COR, Lincoln, USA)进行叶片瞬时光合速率测定。测量时, 使用大气CO<sub>2</sub>浓度(380 μmol·mol<sup>-1</sup>), 光合有效辐射强度设定为1 500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 所测光合为最大光合速率(徐洁, 2010)。我们采用离体方法测定, 将树冠中上部向阳面的枝条剪下后立即进行气体交换指标测定, 我们的预实验表明离体后马上进行测定对检测指标没有影响。水分利用效率的公式计算为: 水分利用效率(WUE)=最大光合速率/蒸腾速率。

用于δ<sup>13</sup>C值检测的叶片采样时间为2011年5月底, 采集树冠中上部向阳面的叶片, 每种类型刺槐6个重复, 带回实验室后洗净、烘干后用粉碎机粉碎, 过80目筛。在中国林业科学院稳定同位素实验室进行碳稳定同位素测定, 所用仪器为Flash EA1112元素分析仪和DELTA V同位素质谱仪(Thermo Fisher Scientific, Pittsburgh, USA), 分析精度为±0.1‰。碳稳定同位素组成采用以下公式计算 δ<sup>13</sup>C = ((<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C<sub>sample</sub>)/(<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C<sub>standard</sub>)-1) × 1000。其中<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C<sub>standard</sub>是国际标准物(Pee Dee Belnite或PDB)(Farquhar *et al.*, 1989)。

叶片形态指标的测定时间为2011年5月底, 采样部位同叶片δ<sup>13</sup>C测定, 用叶面积仪测定叶面积, 烘干后测定叶片干重, 6个重复, 比叶重的计算公式为: 比叶重=叶片干重/叶面积。

每种类型刺槐林在样地中随机选取15–20个单株进行树高和胸径测定。

#### 1.4 统计分析

用Excel软件进行方差分析。以 $p < 0.05$ 作为显著性的标准。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同土层厚度的土壤含水量

在旱季3个土层厚度土壤含水量为: R70 > R40 > R25, 3个土层厚度土壤含水量均有显著性差异( $p < 0.05$ )。在雨季, 土壤含水量随土层厚度的降低略有下降的趋势, R70和R25之间存在显著性差异( $p < 0.05$ )。旱季平均土壤含水量只相当于雨季的60%(图1)。

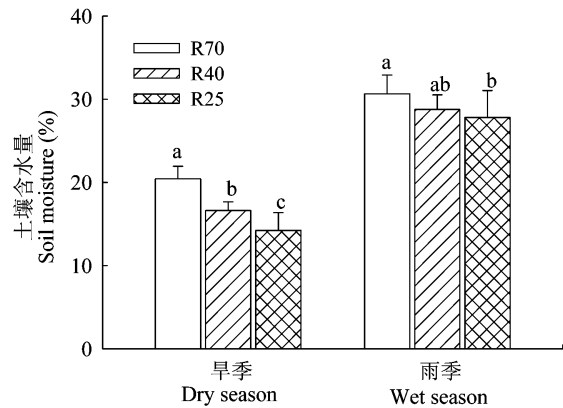


图1 不同土层厚度(R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm)下刺槐林旱季和雨季的土壤含水量(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示差异显著( $p = 0.05$ )。

Fig. 1 Soil moisture of *Robinia pseudoacacia* forests in different soil thickness (R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm) in dry season and wet season (mean ± SD). Different small letters indicate significant difference ( $p = 0.05$ ).

### 2.2 不同土层厚度下刺槐的凌晨水势

在旱季, 刺槐小枝凌晨水势为R70 > R40 > R25, 3个土层厚度之间凌晨水势均有显著差异( $p < 0.05$ ), 在雨季3个土层厚度下刺槐的小枝凌晨水势无显著差异。旱季凌晨水势约为雨季的2倍(图2)。

### 2.3 不同土层厚度下刺槐的气体交换

在旱季, 刺槐的最大光合速率、气孔导度率均为R70 > R40 > R25, 瞬时水分利用效率为R25 > R40 > R70。在雨季, 3个土层厚度下刺槐的气体交换指标均无显著差异。比较旱季和雨季的气体交换指标, 旱季刺槐的平均最大光合速率仅为雨季的50%左右, 气孔导度仅相当于雨季的23%, 瞬时水分利用效率显著高于雨季( $p < 0.05$ )(图3)。

### 2.4 不同土层厚度下刺槐的叶片δ<sup>13</sup>C

刺槐叶片δ<sup>13</sup>C值随着土层厚度的降低而增高。3个土层厚度的δ<sup>13</sup>C值均存在显著性差异( $p < 0.05$ ,

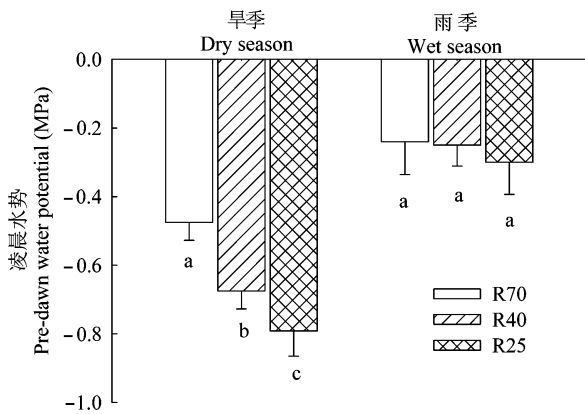


图2 不同土层厚度(R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm)下刺槐旱季和雨季的小枝凌晨水势(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示差异显著( $p = 0.05$ )。

Fig. 2 Predawn twig water potential of *Robinia pseudoacacia* in different soil thickness (R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm) in dry season and wet season (mean ± SD). Different small letters indicate significant difference ( $p = 0.05$ ).

图4), R40的叶片 $\delta^{13}C$ 值比R70高1.19, R25的叶片 $\delta^{13}C$ 值比R70高1.91。

### 2.5 不同土层厚度下刺槐的叶片形态

随着土层厚度的降低, 刺槐叶面积减小, 比叶重增加。R70的叶面积最大( $8.43 \text{ cm}^2$ ), 比叶重最小( $49.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), R25的叶面积最小( $4.49 \text{ cm}^2$ ), 比叶重最大( $82.3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), 3个土层厚度的叶面积和比叶重之间均有显著性差异( $p < 0.05$ , 图5)。

### 2.6 不同土层厚度下刺槐的树木大小

不同土层厚度之间刺槐的树高和胸径均存在显著差异( $p < 0.05$ ),  $R70 > R40 > R25$ 。R25的树高是R70的56%, 胸径为R70的77%。R40的树高是R70的68%, 胸径为R70的88% (图6)。

## 3 讨论

华北地区属于季节性干旱地区, 雨量不均会对植物造成严重危害(Villalba *et al.*, 1998), 每年的春夏之交是该地区典型的旱季(Sun *et al.*, 2011), 而4-6月, 是刺槐整个生长季中生长最快、干物质积累最集中的时间(杨建伟等, 2004)。在本研究中, 旱季的土壤含水量仅为雨季土壤含水量的60%; 在旱季, 土壤含水量减小, 随着土层厚度的降低, 刺槐受到的水分胁迫程度加重; 而在雨季, 由于降水充沛, 虽然3个土层厚度林分土壤含水量也有差别, 但由于雨季土壤含水量较高, 土壤水分状况不是植物生

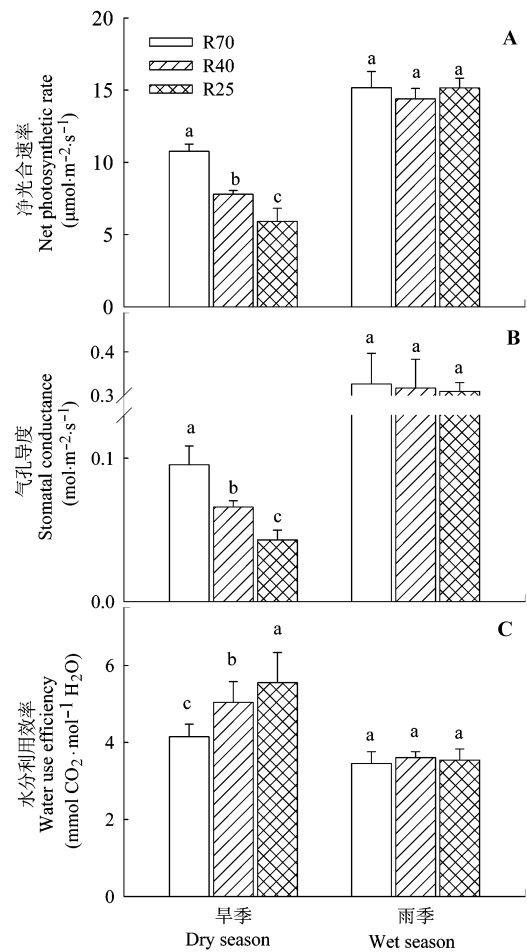


图3 不同土层厚度(R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm)下刺槐旱季和雨季的净光合速率(A)、气孔导度(B)、水分利用效率(C)(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示差异显著( $p = 0.05$ )。

Fig. 3 Net photosynthetic rate (A), stomatal conductance (B) and water use efficiency (C) of *Robinia pseudoacacia* in different soil thickness (R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm) in dry season and wet season (mean ± SD). Different small letters indicate significant difference ( $p = 0.05$ ).

长的限制因子, 雨季刺槐小枝凌晨水势和气体交换指标均没有显著差异, 但这些指标均显著高于旱季。水势和气体交换的结果也表明, 水分不足导致的气孔关闭是限制旱季光合的主要因素。所以, 旱季对刺槐生长的影响很突出, 旱季土壤水分状况是刺槐生长的主要限制因素。

植物水分供应主要取决于降水和土壤储水。试验地区为石质山区, 植物根系接触到地下水的可能性很小, 在旱季, 植物的水分状况很大程度上受到土壤储水能力的制约。该地区地下水位低, 土壤水分补给主要依赖降水, 在旱季缺少降水的情况下,

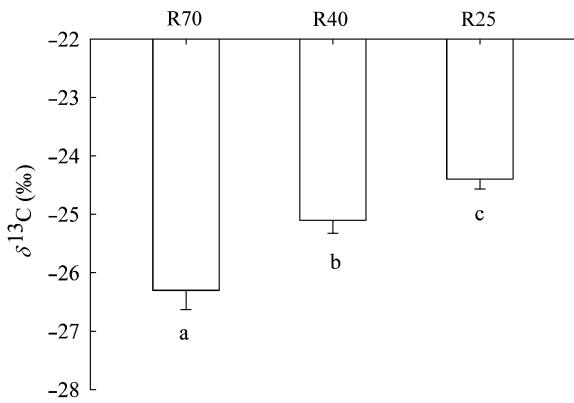


图4 不同土层厚度(R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm)下刺槐的叶片碳稳定同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ ) (平均值 $\pm$ 标准偏差)。不同小写字母表示差异显著( $p = 0.05$ )。

Fig. 4 Leaf stable carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of *Robinia pseudoacacia* in different soil thickness (R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm) (mean  $\pm$  SD). Different small letters indicate significant difference ( $p = 0.05$ ).

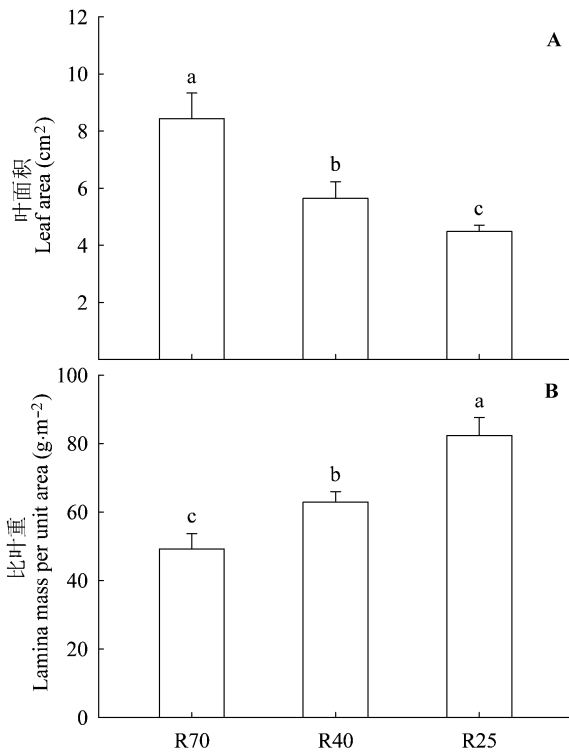


图5 不同土层厚度(R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm)下刺槐的叶面积(A)和比叶重(B) (平均值 $\pm$ 标准偏差)。不同小写字母表示差异显著( $p = 0.05$ )。

Fig. 5 Leaf area (A) and leaf mass per area (B) of *Robinia pseudoacacia* in different soil thickness (R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm) (mean  $\pm$  SD). Different small letters indicate significant difference ( $p = 0.05$ ).

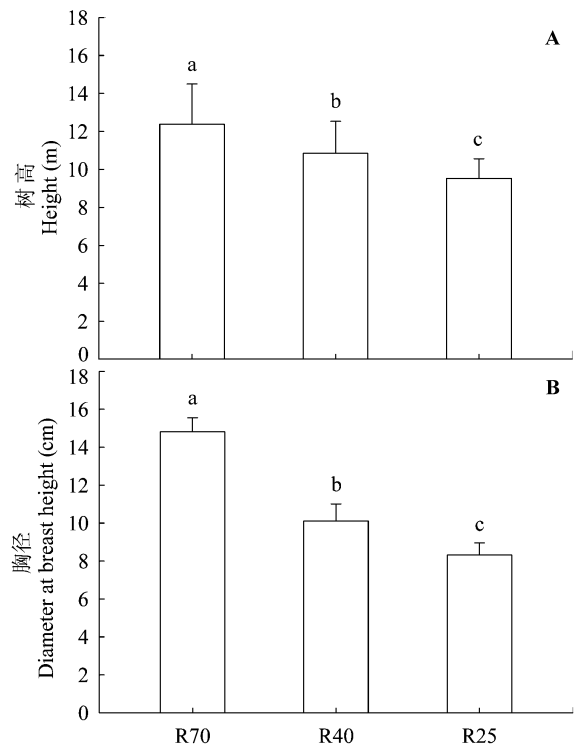


图6 不同土层厚度(R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm)条件下刺槐的树高(A)和胸径(B) (平均值 $\pm$ 标准偏差)。不同小写字母表示差异显著( $p = 0.05$ )。

Fig. 6 Height (A) and diameter at breast height (B) of *Robinia pseudoacacia* in different soil thickness (R70, 70 cm; R40, 40 cm; R25, 25 cm) (mean  $\pm$  SD). Different small letters indicate significant difference ( $p = 0.05$ ).

树木的需求来自于土壤和风化岩基层的储藏水分, 因此, 树木受到的干旱胁迫程度和土壤储水能力有很大的关系。土壤储水能力决定着植物受季节性干旱胁迫的程度。土层厚度是影响土壤储水能力的重要方面, 植物的生长状况在很大程度上取决于土层厚度(Buttle *et al.*, 2004)。然而, 该地区土层浅薄, 土壤的储水能力有限, 土壤储水能力成为植物生长和水分状况的主要限制因素。在本研究中, 旱季土壤水分含量随着土层厚度的降低而减小, 刺槐受到的水分胁迫程度加重, 这反映了在降水不足的情况下, 浅薄土层不能提供足够的水分来维持刺槐的水分平衡, 即土壤水分对刺槐的承载力不足。

由于土壤水分含量的异质性, 以及取样的限制, 通常仅凭土壤含水量难以精确地判断土壤水分承载能力, 尤其是在土层瘠薄的石质地区, 难以得知是否有根系透过石头缝隙接触到地下水, 所以, 估计土壤水分植物承载能力需要基于植物对干旱

胁迫的反应,最常用的指标是植物叶片或小枝的凌晨水势(Améglío *et al.*, 1999),它可以综合反映土壤水分供应状况。刺槐小枝凌晨水势的测定结果,进一步证明旱季浅薄土层对植物的水分供应不足。另外,植物对干旱胁迫的一个普遍响应是叶片气孔关闭,光合作用下降,本试验中刺槐在干旱季节也表现出同样的反应,而且气孔导度和光合速率都随土壤厚度的减小而降低,也说明浅薄土层的土壤水分对刺槐的承载能力不足。

叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和叶片形态反映植物受环境胁迫的累积响应。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值反映植物受到干旱胁迫的程度(Anyia *et al.*, 2007; Cui *et al.*, 2009)。 $\delta^{13}\text{C}$ 值和植物的水分利用效率成正比(Farquhar *et al.*, 1989)。当外界 $\text{CO}_2$ 浓度和叶温没有显著差异时, $\delta^{13}\text{C}$ 值主要取决于胞间 $\text{CO}_2$ 浓度,也就是取决于气孔导度和叶肉导度,以及羧化酶对 $^{12}\text{C}$ 的选择性(Farquhar *et al.*, 1989; Monclus *et al.*, 2006)。刺槐叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随着土层厚度的变化,表明随着土层厚度减小,刺槐受到水分胁迫的程度增大。叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值和叶片厚度成正比,且两者都受环境湿度的调节(Lamont *et al.*, 2002)。叶片厚度(本研究以比叶重为指标)增加、植物细胞增长速度下降以及叶片密度增大,导致蒸腾面积减少、水分散失阻力增加,这些都是植物对干旱的一种适应(Guerfel *et al.*, 2009; Poorter *et al.*, 2009)。

另外,本研究结果显示,R70的林分密度最大(表1),它的胸径仍然最大,说明随着土壤变薄,树木受水分胁迫程度加重,高生长和加粗生长也受到抑制。通过本研究可知,在该地区的气候条件下,70 cm的土层厚度可以较好地缓冲季节性干旱对刺槐生长的影响。而在浅薄的(25 cm)土壤,刺槐的轮植期最好不超过25年。

#### 4 结论

本研究基于土壤水分含量和小枝凌晨水势,了解土壤的供水情况;通过测定叶片的气体交换,调查刺槐对干旱胁迫的即时响应;测定叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值、叶面积和比叶重,研究干旱对刺槐的累积影响;比较各土层厚度刺槐的生长情况,综合估计华北石质山区不同土层厚度土壤水分对刺槐的承载能力。华北石质山区,旱季降水偏少,刺槐在旱季受到一定程度的干旱胁迫;另外,该地区土层浅薄,土壤储

水能力弱,土壤水分对刺槐的承载力不足,影响到刺槐的水分状况和生长,这可能是该地区刺槐出现衰败的重要原因。

**基金项目** “十二五”农村领域国家科技计划(2011BAD38B0604)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFINT2011C11)。

**致谢** 感谢谢军同学在野外工作中给予的协助。

#### 参考文献

- Améglío T, Archer P, Cohen M, Valancogne C, Daudet FA, Dayau S, Cruiziat P (1999). Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil*, 207, 155–167.
- Anyia AO, Slaski JJ, Nyachiro JM, Archambault DJ, Juskiw P (2009). Relationship of carbon isotope discrimination to water use efficiency and productivity of barley under field and greenhouse conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 193, 313–323.
- Breshears DD, Myers OB, Meyer CW, Barnes FJ, Zou CB, Allen CD, McDowell NG, Pockman WR (2008). Tree die-off in response to global change-type drought: mortality insights from a decade of plant water potential measurements. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 7, 185–189.
- Buttle JM, Dillon PJ, Eerkes GR (2004). Hydrologic coupling of slopes, riparian zones and streams: an example from the Canadian Shield. *Journal of Hydrology*, 287, 161–177.
- Carter JL, White DA (2009). Plasticity in the Huber value contributes to homeostasis in leaf water relations of a mallee eucalypt with variation to groundwater depth. *Tree Physiology*, 29, 1407–1418.
- Cui NB, Du TS, Kang SZ, Li FH, Hu XT, Wang MX, Li ZJ (2009). Relationship between stable carbon isotope discrimination and water use efficiency under regulated deficit irrigation of pear-jujube tree. *Agricultural Water Management*, 96, 1615–1622.
- Farquhar GD, Ehleringer JR, Hubick KT (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 40, 503–537.
- Galle A, Esper J, Feller U, Ribas-Carbo M, Fonti P (2010). Responses of wood anatomy and carbon isotope composition of *Quercus pubescens* saplings subjected to two consecutive years of summer drought. *Annals of Forest Science*, 67, 809–825.
- Guerfel M, Baccouri O, Boujnah D, Chaïbi W, Zarrouk M

- (2009). Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, 119, 257–263.
- Hu XN, Zhao Z, Yuan ZF, Wang DH, Guo MC, Li J (2010). Relationship between fine root growth of *Robinia pseudoacacia* plantation and the soil moisture in the loess plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 46, 30–35. (in Chinese with English abstract) [胡小宁, 赵忠, 袁志发, 王迪海, 郭满才, 李剑 (2010). 黄土高原刺槐林细根生长与土壤水分的耦合关系. *林业科学*, 46, 30–35.]
- Jin X, Xu J, Bai KD, Feng JX, Zhang JS, Wan XC (2011). Comparison of drought strategies of three co-existing woody plants by their hydraulic structures. *Journal of Beijing Forestry University*, 33, 135–141. (in Chinese with English abstract) [靳欣, 徐洁, 白坤栋, 冯锦霞, 张劲松, 万贤崇 (2011). 从水力结构比较3种共存木本植物的抗旱策略. *北京林业大学学报*, 33, 135–141.]
- Lamont BB, Groom PK, Cowling RM (2002). High leaf mass per area of related species assemblages may reflect low rainfall and carbon isotope discrimination rather than low phosphorus and nitrogen concentrations. *Functional Ecology*, 16, 403–412.
- Levanič T, Čater M, McDowell NG, Abrams M (2011). Associations between growth, wood anatomy, carbon isotope discrimination and mortality in a *Quercus robur* forest. *Tree Physiology*, 31, 298–308.
- Li J, Wang XC, Shao MA, Zhao YJ, Li XF (2010). Simulation of biomass and soil desiccation of *Robinia pseudoacacia* forestlands on semi-arid and semi-humid regions of China's Loess Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 330–339. (in Chinese with English abstract) [李军, 王学春, 邵明安, 赵玉娟, 李小芳 (2010). 黄土高原半干旱和半湿润地区刺槐林地生物量与土壤干燥化效应的模拟. *植物生态学报*, 34, 330–339.]
- Monclus R, Dreyer E, Villar M, Delmotte FM, Delay D, Petit J M, Barbaroux C, Le Thiec D, Brechet C, Brignolas F (2006). Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides* × *Populus nigra*. *New Phytologist*, 169, 765–777.
- Nie YP, Chen HS, Wang KL (2011). Methods for determining plant water source in thin soil region: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 2427–2433. (in Chinese with English abstract) [聂云鹏, 陈洪松, 王克林 (2011). 石灰岩地区连片出露石丛生境植物水分来源的季节性差异. *应用生态学报*, 21, 2427–2433.]
- Poff RJ (1996). Effects of silvicultural practices and wildfire on productivity of forest soils. [http://pubs.usgs.gov/dds/dds-43/VOL\\_II/VII\\_C16.PDF](http://pubs.usgs.gov/dds/dds-43/VOL_II/VII_C16.PDF). Cited: 10 Dec. 2012.
- Poorter H, Niinemets Ü, Poorter L, Wright IJ, Villar R (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New Phytologist*, 182, 565–588.
- Querejeta JI, Estrada-Medina H, Allen MF, Jiménez-Osornio JJ (2007). Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate. *Oecologia*, 152, 26–36.
- Schenk HJ (2008). Soil depth, plant rooting strategies and species' niches. *New Phytologist*, 178, 223–225.
- Shan CJ, Liang ZS, Hao WF, Liu SM (2004). Relationship between growth of locust and soil water in the different habitats on the Loess Plateau. *Journal of Northwest Forestry University*, 19(2), 9–14. (in Chinese with English abstract) [单长卷, 梁宗锁, 郝文芳, 刘淑明 (2004). 黄土高原不同立地条件下刺槐生长与水分关系研究. *西北林学院学报*, 19(2), 9–14.]
- Sun SJ, Meng P, Zhang JS, Wan XC (2011). Variation in soil water uptake and its effect on plant water status in *Juglans regia* L. during dry and wet seasons. *Tree Physiology*, 31, 1378–1389.
- Villalba R, Grau HR, Boninsegna JA, Jacoby GC, Ripalta A (1998). Tree-ring evidence for long-term precipitation changes in subtropical South America. *International Journal of Climatology*, 18, 1463–1478.
- Wang JM, Meng L, Sun JH, Guo XY (1999). Study of the relation between antidrought capability of trees and their secondary root structure. *Soil and Water Conservation in China*, (6), 20–22. (in Chinese with English abstract) [王均明, 孟丽, 孙金花, 郭向阳 (1999). 林木抗旱性与其根次生构造关系的研究. *中国水土保持*, (6), 20–22.]
- Wang L, Feng JX, Wang SX, Jia CR, Wan XC (2013). The interaction of drought and slope aspect on growth of *Quercus variabilis* and *Platycladus orientalis*. *Acta Ecologica Sinica*, doi: 10.5846/stxb201209051255. (in Chinese with English abstract) [王林, 冯锦霞, 王双霞, 贾长荣, 万贤崇 (2013). 干旱和坡向的互作对栓皮栎和侧柏生长的影响. *生态学报*, doi: 10.5846/stxb201209051255.]

- Wang L, Shao MA, Hou QC, Yang GM (2001). The analysis to dried soil layer of artificial *Robinia pseudoscacia* forestry land in the Yan'an experimental area. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 21, 101–106. (in Chinese with English abstract) [王力, 邵明安, 侯庆春, 杨岗民 (2001). 延安试区人工刺槐林地的土壤干层分析. 西北植物学报, 21, 101–106.]
- Xu J (2010). *Hydraulic Architecture and Photosynthetic Characteristics of Three Main Afforestation Species in Responses to Water Dynamics*. Master degree dissertation, Chinese Academy of Forestry, Beijing. 21–22. (in Chinese with English abstract) [徐洁 (2010). 三个主要造林树种水力结构和光合特性对水分消长的响应. 硕士学位论文, 中国林业科学研究院, 北京. 21–22.]
- Yang JY, Liang ZS, Han RL (2004). Characteristics of growth and water use of *Robinia pseudoacacia* under different soil water conditions. *Scientia Silvae Sinicae*, 40(5), 93–98. (in Chinese with English abstract) [杨建伟, 梁宗锁, 韩蕊莲 (2004). 不同土壤水分状况对刺槐的生长及水分利用特征的影响. 林业科学, 40(5), 93–98.]
- Yu ZH, Chen YM, Du S (2009). Sap flow dynamics in the leaf-flushing period of a *Robinia pseudoacacia* plantation in semi-arid region of loess plateau. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(4), 53–59. (in Chinese with English abstract) [于占辉, 陈云明, 杜盛 (2009). 黄土高原半干旱区人工林刺槐展叶期树干液流动态分析. 林业科学, 45(4), 53–59.]
- Zhang YX, Equiza MA, Zheng QS, Tyree MT (2012). Factors controlling plasticity of leaf morphology in *Robinia pseudoacacia* L. II: the impact of water stress on leaf morphology of seedlings grown in a controlled environment chamber. *Annals of Forest Science*, 69, 39–47.

责任编辑: 孙建新 责任编辑: 李 敏