

# 丛枝菌根真菌对刺槐热值、碳和灰分含量的影响

朱晓琴<sup>1</sup> 王春燕<sup>2</sup> 盛敏<sup>2</sup> 陈辉<sup>2</sup> 唐明<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>西北农林科技大学生命科学学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100

**摘要** 该试验以根内球囊霉(*Glomus intraradices*)和地表球囊霉(*G. versiforme*)为接种剂, 研究了丛枝菌根真菌对刺槐(*Robinia pseudoacacia*)生物量、热值、含碳量、灰分、能量积累和碳素积累的影响。结果表明, 接种根内球囊霉和地表球囊霉对提高刺槐生物量、热值、能量积累和碳素积累都起到了重要作用。接种根内球囊霉和地表球囊霉后刺槐的总生物量比对照分别增加了89.61%和91.34%, 能量积累分别比对照增加102.20%和94.19%, 碳素积累分别比对照增加93.30%和77.21%; 同时发现刺槐的能量和碳主要分布在根系和叶, 而茎中能量和碳所占的比例较小。接种根内球囊霉提高了刺槐的干重热值, 其根、茎、叶的干重热值分别比对照增加7.72%、8.94%和8.41%; 接种地表球囊霉也显著( $p < 0.05$ )提高了刺槐的干重热值, 但其效果低于根内球囊霉。接种根内球囊霉显著( $p < 0.05$ )提高了刺槐根的含碳量, 对茎和叶的含碳量影响不明显。接种根内球囊霉和地表球囊霉都显著( $p < 0.05$ )提高了刺槐茎和叶的去灰分热值。

**关键词** 丛枝菌根真菌, 灰分含量, 刺槐, 热值, 含碳量

## Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on calorific value and contents of carbon and ash in *Robinia pseudoacacia*

ZHU Xiao-Qin<sup>1</sup>, WANG Chun-Yan<sup>2</sup>, SHENG Min<sup>2</sup>, CHEN Hui<sup>2</sup>, and TANG Ming<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; and <sup>2</sup>College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

### Abstract

**Aims** It is still unknown whether arbuscular mycorrhizal (AM) fungi could increase calorific value and carbon content in plants. Our objectives in this study were to (1) determine the effects of two AM fungi, *Glomus intraradices* and *G. versiforme*, on biomass, calorific value, carbon content, and ash content in black locust (*Robinia pseudoacacia*) seedlings; and (2) assess the effectiveness of *G. intraradices* and *G. versiforme* in affecting biomass and energy accumulation in black locust.

**Methods** Three treatments were performed: black locust seedlings, including inoculations of seedlings with *G. intraradices*, *G. versiforme*, respectively, and no inoculum as control. Seedlings were grown in a greenhouse for 14 months following treatments, and then their biomass, gross calorific value, carbon content, and ash content of the roots, stems, and leaves were measured. Ash-free calorific value, energy accumulation, and carbon accumulation were calculated.

**Important findings** We found that inoculations with the two AM fungi increased the biomass, calorific value, and carbon content in black locust seedlings. The accumulations of biomass, energy, and carbon were 89.61%, 102.20%, and 93.30% greater in black locust seedlings inoculated with *G. intraradices*, and 91.34%, 94.19% and 77.21% greater in those inoculated with *G. versiforme*, respectively, than the controls. Both calorific value and carbon content were the highest in seedlings inoculated with *G. intraradices*; and the gross calorific value of roots, stems and leaves were 7.72%, 8.94%, 8.41% higher, respectively, in seedlings inoculated with *G. intraradices* than the controls. *Glomus intraradices* was found to be more effective than *G. versiforme* in enhancing calorific value and accumulation of energy and carbon.

**Key words** arbuscular mycorrhizal fungi, ash content, black locust, calorific value, carbon content

随着化石燃料的日渐枯竭和空气CO<sub>2</sub>浓度的逐渐升高, 生物质能源的研究和生产成为人们关注的

热点。木质能源植物一般生长迅速, 抗逆性强, 易于管理, 多种植于荒山及废弃矿区等农作物不易生

长的地方,既能产生大量的生物量,又有利于荒地的开垦利用和环境修复。因而,木质能源植物被广泛认为是化石燃料的理想替代品。

能源植物的生物量是生物能的直接来源,其热值是单位质量的生物量所提供能量的有效指标(任海等,1999)。为了增加生物质能,首先要解决如何提高能源植物的生物量及热值等关键问题(Luo & Polle, 2009; 高凯等,2012)。生物量和热值受多种因素(包括微生物、生长季节、树龄等)的影响(官丽莉等,2005; Ghimire *et al.*, 2009)。丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AM真菌)是土壤微生物的重要组成部分,能够增强宿主植物的营养与水分吸收,促进植物生长,提高宿主生物量的积累(刘润进和陈应龙,2007)。但AM真菌能否提高能源植物的热值和含碳量,最终对能源植物能量积累和碳素积累(即生物量中蕴藏的总能量和总碳量)有怎样的影响,这些问题都亟待研究。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是重要的能源林树种之一,它分布广泛、耐贫瘠,且生长迅速、抗逆性强(Grünwald *et al.*, 2009),既可以作为纤维燃料或木材,也可以用于热解产生生物石油、生物乙醇、生物碳等(Balat, 2010; González-García *et al.*, 2011, 2012),有着重要的经济价值。很多试验证明,AM真菌能与刺槐形成良好的共生关系,促进刺槐的营养吸收和生长(Olesniewicz & Thomas, 1999; Tian *et al.*, 2003; 付淑清等,2011)。但这些研究主要集中在2-6个月的幼苗期,却很少关注AM真菌与宿主植物共生较长时间的效果,所以本试验在刺槐幼苗与AM真菌共生14个月后,研究了AM真菌对刺槐幼苗的生物量、热值、含碳量、灰分含量、能量和碳素积累与分配的影响,以揭示AM真菌与植物共生较长时间后AM真菌对植物生长是否仍然有促进作用,并比较分别接种两种AM真菌对刺槐生长的不同影响效果,以期为AM真菌在能源林种植中的应用提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试植物为刺槐实生苗。刺槐种子采集于西北农林科技大学北校区的成熟刺槐。选取大小一致的饱满种子用1% KMnO<sub>4</sub>溶液消毒10 min,用无菌水冲洗后,放于潮湿的滤纸上,在25 °C培养箱中催

芽,每天早晚用无菌水冲洗一次,直至发芽。

AM真菌菌剂由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供,分别是根内球囊霉(*Glomus intraradices*)和地表球囊霉(*G. versiforme*),含孢子(50个·g<sup>-1</sup>)、菌丝、侵染的根段和扩繁基质。

供试生长基质为土和沙的混合物。土壤采自西北农林科技大学南校区绿化园表层土(0-20 cm),pH 7.5 (土:水=1:2 (W:V)),养分含量为:有机质17.56 g·kg<sup>-1</sup>、有效氮55 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷19 mg·kg<sup>-1</sup>和速效钾232 mg·kg<sup>-1</sup>。河沙与土均过2 mm筛,河沙洗净后,与土按1:1 (V:V)的比例混合均匀,121 °C灭菌2 h后备用。

### 1.2 试验设计

2011年4月下旬在西北农林科技大学采用盆栽试验。每个花盆中(上直径16 cm,高度17 cm)装入1.5 kg生长基质,并播种发芽一致的3粒种子,幼苗出土10天后,每盆定苗1株。播种时,在刺槐种子下面5 cm处接种20 g AM真菌菌剂,共设接种*G. intraradices*、接种*G. versiforme*和不接种(对照)3个处理,每个处理40盆,随机摆放。于温室下,自然光照,温度12-35 °C,湿度40%-85%,每天定时补充自来水100 mL,每周浇一次Hoagland营养液,每盆100 mL。Hoagland营养液(刘润进和陈应龙,2007)成分如下:KNO<sub>3</sub> 5 mmol·L<sup>-1</sup>,KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1 mmol·L<sup>-1</sup>,MgSO<sub>4</sub> 2 mmol·L<sup>-1</sup>,Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 5 mmol·L<sup>-1</sup>,H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 40 μmol·L<sup>-1</sup>,MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 10 μmol·L<sup>-1</sup>,ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 1 μmol·L<sup>-1</sup>,CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 0.5 μmol·L<sup>-1</sup>,H<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O 0.1 μmol·L<sup>-1</sup>,C<sub>10</sub>H<sub>12</sub>O<sub>8</sub>N<sub>2</sub>NaFe 20 μmol·L<sup>-1</sup>,营养液pH为6.0。生长14个月后,每个处理随机选取3盆测定苗高、地茎、菌根侵染率、生物量、热值、含碳量和灰分。

### 1.3 测定方法

#### 1.3.1 菌根侵染率

刺槐根部用流水轻轻冲洗干净,从主根周围剪下约1 g细根,采用Trypan blue方法(Phillips & Hayman, 1970),将根段透明、染色,然后压片,用交叉划线法统计出菌根侵染率(弓明钦等,1997)。

#### 1.3.2 生物量

收获前先测量苗高、地茎,然后分别按顺序收获叶、茎、根(流水冲洗干净),并放入80 °C烘箱中烘干48 h,取出放入干燥器中,冷却平衡后,称量各部分干重。并根据根与地上部分的干重比值,计

算根冠比。

### 1.3.3 热值与灰分

采用OR2010快速自动氧弹量热仪(OR2010, 上海欧锐仪器设备有限公司)测定热值, 每次测定前, 用苯甲酸(热值 $(26\,470 \pm 20)\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ )对仪器进行标定。刺槐根、茎、叶烘干称重后, 分别研磨并过100目筛, 准确称量样品1.000 0 g, 每个样品重复3次。样品灰分测定采取直接灰化法, 即称取样品1.000 0 g, 在马弗炉550 °C灰化5 h后称重, 并计算其灰分含量(鲍士旦, 2000)。

去灰分热值 $(\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}) = \text{干重热值}(\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}) / (1 - \text{灰分含量})$

能量积累 = 根生物量 × 根干重热值 + 茎生物量 × 茎干重热值 + 叶生物量 × 叶干重热值

### 1.3.4 含碳量

采用德国liqui TOCII (Elementar, Hanau, Germany)分析仪测定含碳量, 烘干后的刺槐根、茎、叶研磨并过200目筛, 称取5 mg样品, 每个样品重复3次。

碳素积累 = 根生物量 × 根含碳量 + 茎生物量 × 茎含碳量 + 叶生物量 × 叶含碳量

## 1.4 相关计算与数据处理

采用SPSS 16.0软件对试验数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 均值进行Duncan检验, 以 $p < 0.05$ 为显著差异。

## 2 结果和分析

### 2.1 AM真菌对刺槐生长的影响

不接种真菌的刺槐苗根部没有观察到AM真菌

侵染情况, 而接种AM真菌的刺槐苗根部均形成了菌根, 接种根内球囊霉和地表球囊霉的苗木菌根侵染率分别是78%和61%。

接种AM真菌的刺槐与不接种的对照相比, 其苗高、地茎和生物量都显著提高( $p < 0.05$ ) (表1), 说明AM真菌促进了刺槐的生长。接种根内球囊霉和地表球囊霉的刺槐苗高比对照增加88.46%和112.08%, 地茎比对照增加21.81%和32.72%, 总生物量比对照增加了89.61%和91.34%, 根干重分别比对照提高了127.77%和142.23%, 茎干重提高了137.64%和121.91%, 叶干重提高了45.05%和42.82%。两种AM真菌对刺槐根冠比的影响不显著( $p < 0.05$ )。另外, 在对刺槐苗总生物量及根、茎、叶干重的促生作用方面, 两种AM真菌之间无显著差异( $p > 0.05$ )。尽管接种2种AM真菌都增加了刺槐苗高, 但根内球囊霉的促进作用明显低于地表球囊霉。

### 2.2 AM真菌对刺槐干重热值和去灰分热值的影响

两种AM真菌均显著提高了刺槐茎和叶的干重热值和去灰分热值( $p < 0.05$ )。接种根内球囊霉与地表球囊霉的刺槐茎干重热值分别比对照高出8.94%和5.83%, 叶的干重热值高出8.41%和6.69%。两种AM真菌使茎的去灰分热值提高8.39%和5.98%, 使叶的去灰分热值提高8.11%和5.76%。根内球囊霉显著提高了根的干重热值和去灰分热值( $p < 0.05$ ), 根的干重热值比对照提高7.72%, 去灰分热值提高8.12%。然而, 地表球囊霉对根的干重热值和去灰分热值没有明显作用( $p > 0.05$ ) (表2)。

### 2.3 AM真菌对刺槐碳和灰分含量的影响

接种根内球囊霉明显提高了刺槐根的含碳量

表1 刺槐幼苗丛枝菌根(AM)真菌侵染率、苗高、地茎、根冠比和根、茎、叶干重(平均值±标准偏差)

Table 1 Rate of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi colonization, seedling height, basal diameter, root/shoot ratio, and dry weight of root, stem, and leaf in *Robinia pseudoacacia* seedlings (mean ± SD)

植物器官 Plant organ	根内球囊霉 <i>Glomus intraradices</i>	地表球囊霉 <i>Glomus versiforme</i>	对照 Control	
菌根侵染率 Rate of AM colonization (%)	78 ± 3 <sup>a</sup>	61 ± 4 <sup>b</sup>	0 <sup>c</sup>	
苗高 Seedling height (cm)	34.3 ± 3.2 <sup>b</sup>	38.6 ± 3.7 <sup>a</sup>	18.2 ± 1.2 <sup>c</sup>	
地茎 Basal diameter (mm)	6.7 ± 0.3 <sup>a</sup>	7.3 ± 0.4 <sup>a</sup>	5.5 ± 0.8 <sup>b</sup>	
根冠比 Root/shoot ratio	0.73 ± 0.19 <sup>a</sup>	0.81 ± 0.12 <sup>a</sup>	0.58 ± 0.25 <sup>a</sup>	
干重 Dry weight (g·plant <sup>-1</sup> )	根 Root	8.30 ± 1.42 <sup>a</sup>	8.87 ± 0.86 <sup>a</sup>	3.66 ± 0.94 <sup>b</sup>
	茎 Stem	4.23 ± 0.49 <sup>a</sup>	3.95 ± 0.35 <sup>a</sup>	1.78 ± 0.64 <sup>b</sup>
	叶 Leaf	7.18 ± 0.57 <sup>a</sup>	7.07 ± 0.47 <sup>a</sup>	4.95 ± 1.03 <sup>b</sup>
	整株 Whole plant	19.72 ± 0.50 <sup>a</sup>	19.90 ± 0.51 <sup>a</sup>	10.40 ± 0.76 <sup>b</sup>

每行中不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

Different letters within each line mean significant difference ( $p < 0.05$ ).

表2 丛枝菌根真菌对刺槐幼苗干重热值和去灰分热值的影响(平均值±标准偏差)

Table 2 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on gross calorific value and ash-free calorific value in *Robinia pseudoacacia* seedlings (mean ± SD)

	植物器官 Plant organ	根内球囊霉 <i>Glomus intraradices</i>	地表球囊霉 <i>Glomus versiforme</i>	对照 Control
干重热值 Gross calorific value (kJ·g <sup>-1</sup> )	根 Root	14.50 ± 0.24 <sup>a</sup>	13.33 ± 0.29 <sup>b</sup>	13.46 ± 0.24 <sup>b</sup>
	茎 Stem	16.80 ± 0.13 <sup>a</sup>	16.32 ± 0.24 <sup>b</sup>	15.42 ± 0.12 <sup>c</sup>
	叶 Leaf	17.65 ± 0.16 <sup>a</sup>	17.37 ± 0.84 <sup>a</sup>	16.28 ± 0.76 <sup>b</sup>
去灰分热值 Ash-free calorific value (kJ·g <sup>-1</sup> )	根 Root	16.52 ± 0.40 <sup>a</sup>	15.33 ± 0.47 <sup>b</sup>	15.27 ± 0.51 <sup>b</sup>
	茎 Stem	18.46 ± 0.21 <sup>a</sup>	18.05 ± 0.29 <sup>a</sup>	17.03 ± 0.24 <sup>b</sup>
	叶 Leaf	20.26 ± 0.23 <sup>a</sup>	19.82 ± 0.07 <sup>a</sup>	18.74 ± 0.30 <sup>b</sup>

每行中不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

Different letters within each line mean significant difference ( $p < 0.05$ ).

表3 丛枝菌根真菌对刺槐幼苗碳和灰分含量的影响(平均值±标准偏差)

Table 3 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on carbon and ash contents in *Robinia pseudoacacia* seedlings (mean ± SD)

	植物器官 Plant organ	根内球囊霉 <i>Glomus intraradices</i>	地表球囊霉 <i>Glomus versiforme</i>	对照 Control
含碳量 Carbon content (%)	根 Root	29.63 ± 1.34 <sup>a</sup>	23.45 ± 1.62 <sup>c</sup>	26.04 ± 0.23 <sup>b</sup>
	茎 Stem	42.09 ± 1.86 <sup>a</sup>	39.16 ± 0.64 <sup>a</sup>	40.94 ± 1.59 <sup>a</sup>
	叶 Leaf	47.81 ± 1.51 <sup>a</sup>	44.62 ± 5.77 <sup>a</sup>	42.76 ± 3.98 <sup>a</sup>
灰分含量 Ash content (%)	根 Root	12.22 ± 0.74 <sup>a</sup>	13.06 ± 0.85 <sup>a</sup>	11.81 ± 1.38 <sup>a</sup>
	茎 Stem	8.96 ± 3.30 <sup>b</sup>	9.60 ± 0.56 <sup>a</sup>	9.47 ± 0.66 <sup>a</sup>
	叶 Leaf	12.90 ± 0.31 <sup>a</sup>	12.36 ± 0.45 <sup>a</sup>	13.11 ± 0.87 <sup>a</sup>

每行中不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

Different letters within each line mean significant difference ( $p < 0.05$ ).

(表3), 而地表球囊霉降低了根的含碳量( $p < 0.05$ )。两种AM真菌对刺槐叶和茎的含碳量没有显著影响( $p > 0.05$ )。

两种AM真菌对刺槐根和叶的灰分含量没有显著影响( $p > 0.05$ ), 而根内球囊霉明显降低了刺槐茎的灰分含量( $p < 0.05$ )。

#### 2.4 AM真菌对刺槐能量积累和碳素积累及分配的影响

接种根内球囊霉和地表球囊霉显著提高了刺槐的能量积累和碳素积累(图1), 使刺槐能量积累分别比对照高出102.20%和94.19%, 碳素积累分别比对照高出93.30%和77.21%。从图1可以看出, 刺槐的能量和碳主要分布在根和叶, 茎中分布较少。接种根内球囊霉和地表球囊霉的刺槐根的能量分别占整株能量的37.83%和38.70%, 根中碳占整株刺槐碳素的33.08%和30.80%; 茎的能量占22.34%和21.10%, 茎中碳占24.02%和22.83%; 叶的能量占39.83%和40.20%, 叶中碳占42.90%和46.38%; 而对照根、茎、叶的能量占整株刺槐能量的31.32%、17.44%和51.22%, 碳占整株刺槐碳素的24.89%、

19.04%和56.07%。

### 3 讨论

菌根真菌能够促进植物的生长。本试验结果显示, 接种AM真菌的刺槐生物量几乎是不接种AM真菌刺槐生物量的2倍, 证明接种较长时间(14个月)后, AM真菌对刺槐生长仍然有明显的促进效果, 并且生物量的增加倍数比2-6个月的幼苗期还高(Tian *et al.*, 2003; 付淑清等, 2011)。AM真菌与刺槐共生, 显著提高了刺槐的生物量, 可能主要是因为AM真菌与刺槐共生形成菌丝网, 并且增加了刺槐根的面积, 不仅有利于矿质营养吸收, 而且AM真菌作为碳沉积进一步刺激刺槐地上部分加强光合作用(Kaschuk *et al.*, 2009), 因此能合成大量有机物质使生物量增多, 同时, AM真菌促进刺槐生长也表现在使植物具有较多的叶生物量和较大的叶面积, 本研究中接种AM真菌刺槐叶的生物量比对照多出40%以上, 因此能够固定更多的光能和CO<sub>2</sub>, 形成较多的有机物质, 使接菌的刺槐能量积累和碳素积累增多。另外, AM真菌能够促进刺槐光合产物(碳水化合物

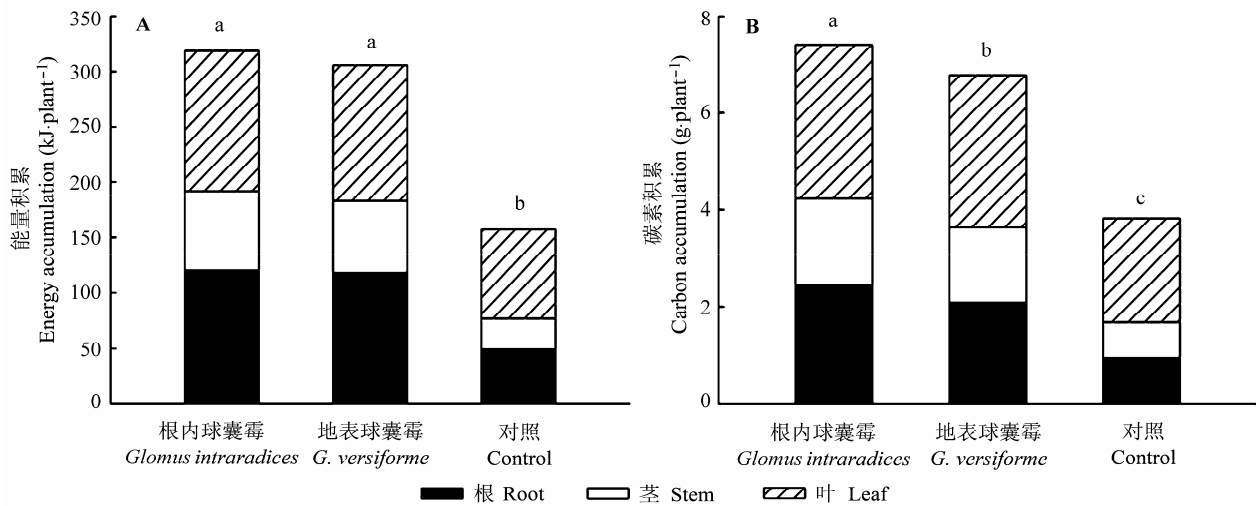


图1 丛枝菌根真菌对刺槐幼苗能量积累(A)和碳素积累(B)的影响。不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

Fig. 1 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on accumulation of energy (A) and carbon (B) in *Robinia pseudoacacia* seedlings. Different lower-case letters mean significant difference ( $p < 0.05$ ).

物, 主要是蔗糖)由叶部向根部的运输(Wu *et al.*, 2013), 因而改变了刺槐根、茎、叶生物量的分配和能量及碳素的分配。由于接菌刺槐的总生物量比对照高出很多, 所以其能量积累和碳素积累也表现出相似的变化趋势。

植物热值是植物的特性之一, 相对稳定, 但也受多种因素的影响, 影响因素主要包括植物光合能力、器官组成成分和生长环境等。AM真菌促进植物对N、P等矿质营养成分的吸收(Smith & Smith, 2011), 增强了植物对CO<sub>2</sub>和太阳辐射能的利用(Sheng *et al.*, 2008), 改变了植物组成成分含量, 例如高热值组分脂类或木质素含量增加(官丽莉等, 2005; Luo & Polle, 2009)等, 这或许是AM真菌提高刺槐热值的主要原因。AM真菌作为生物肥料(刘润进, 2001)也能提高植物的热值, 与其他肥料的功能相似, 如添加适量的N肥或P肥等, 就提高了植物的热值(陈慧娟等, 2009; 高凯等, 2012)。

碳是有机物的重要组成成分, 它与热值一样, 也受多种因素的影响, 例如幼龄树含碳量一般略低(Kumar *et al.*, 2011)。在本试验中接种AM真菌的刺槐叶的含碳量(44.62%–47.81%)与多数阔叶树叶的含碳量很接近(程堂仁等, 2008), 但茎的含碳量(39.16%–42.09%)却低于硬木茎含碳量的一般范围(46.2%–49.9%) (Lamlom & Savidge, 2003), 这主要是由于树龄、生长季节、生长环境及木材组成成分的不同造成的。刺槐根的含碳量(23.45%–29.63%)

明显低于成熟树木根的含碳量, 与草本植物根的含碳量(26.11%) (程堂仁等, 2008)接近。这可能是由于刺槐苗是盆栽苗, 而且仅生长14个月, 根部木质化程度很低, 与草本植物根的结构或组成成分相似, 而与成熟树木根的结构或组成成分相差很多造成的。本试验材料是温室盆栽刺槐苗, 与大田生长的树木光照和生长环境相差很大, 对刺槐各器官的组分和结构影响也较大。AM真菌对大田生境里的植物热值和含碳量的影响有待进一步的研究。

灰分是植物能用价值评价的重要参考指标(高凯等, 2012)。据文献报道, 灰分含量与热值呈负相关关系(官丽莉等, 2005)。AM真菌促进植物矿质元素吸收, 使植物矿质元素含量增加, 相应的灰分含量增加, 但本试验中接种AM真菌的刺槐灰分含量与不接种AM真菌的刺槐的灰分含量差别不显著, 而且根内球囊霉降低了刺槐茎的灰分含量, 这可能是由于与AM真菌共生的植物生长较快, 使有机质增加速度大于根系和菌丝吸收矿质营养的速度, 最终导致灰分含量相对降低。

本研究发现两种AM真菌都显著提高了刺槐的总生物量, 但根内球囊霉和地表球囊霉对刺槐的促生效果及对热值和含碳量的影响不同。根内球囊霉比地表球囊霉更能显著增加刺槐茎的生物量、根和茎的干重热值、含碳量及碳素积累。这可能与AM真菌和植物之间的相互识别、选择有关, 表明根内球囊霉更适合与刺槐共生, 促进刺槐的生长, 也证

明了在选择AM真菌接种植物时遵循“适树适菌”原则的必要性。

本试验结果显示, AM真菌与刺槐共生使刺槐总生物量、热值及能量积累和碳素积累都显著地高于不接种AM真菌的刺槐, 表明根内球囊霉和地表球囊霉在提高植物生长和能量方面都有着重要的应用潜力。本文研究了AM真菌对植物生长和热值的影响, 为将来AM真菌在能源植物种植中的应用提供理论参考。AM真菌与其他能源植物的共生情况及在大田生境中AM真菌的促生效果如何, 还有待进一步的研究, 希望在今后能源植物种植中能利用AM真菌提高生物质产量与热值。

**基金项目** 国家自然科学基金(31270639、31170607和1170567)、长江学者和大学创新团队(IRT1035)及国家教育部博士课题基金(20100204110033和20110204130001)。

## 参考文献

- Balat M (2010). Bio-oil production from pyrolysis of black locust (*Robinia pseudoacacia*) wood. *Energy, Exploration & Exploitation*, 28, 173–186.
- Bao SD (2000). *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. 3rd edn. China Agriculture Press, Beijing. 258–260. (in Chinese) [鲍士旦 (2000). 土壤农化分析. 第三版. 中国农业出版社, 北京. 258–260.]
- Chen HJ, Zhang ZW, Ning ZL, Yang H, Sun GP (2009). Effects of fertilization on the caloric value and morphological properties of *Miscanthus floridulus*. *Pratacultural Science*, 26, 63–67. (in Chinese with English abstract) [陈慧娟, 张卓文, 宁祖林, 扬鸿, 孙贵平 (2009). 施肥对五节芒热值和表型性状的影响. 草业科学, 26, 63–67.]
- Cheng TR, Feng J, Ma QY, Wang YT, Kang FF, Feng ZK, Zhang YL, Deng XR (2008). Carbon pool and allocation of forest vegetations in Xiaolong Mountains, Gansu Province. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 33–44. (in Chinese with English abstract) [程堂仁, 冯菁, 马钦彦, 王玉涛, 康峰峰, 冯仲科, 张彦林, 邓向瑞 (2008). 甘肃小陇山森林植被碳库及其分配特征. 生态学报, 28, 33–44.]
- Fu SQ, Qu QQ, Tang M, Yang Y, Li C (2011). Effects of nitrogen and AM fungi on the growth and nutrition metabolism of *Robinia pseudoacacia*. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(1), 95–100. (in Chinese with English abstract) [付淑清, 屈庆秋, 唐明, 杨艳, 李翠 (2011). 施氮和接种AM真菌对刺槐生长及营养代谢的影响. 林业科学, 47(1), 95–100.]
- Gao K, Zhu TX, Wang QB (2012). Effects of nitrogen fertilization on biomass, caloric value and ash content of *Helianthus tuberosus* L. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 18, 512–517. (in Chinese with English abstract) [高凯, 朱铁霞, 王其兵 (2012). 氮肥对菊芋生物量、热值和灰分含量的影响. 植物营养和肥料学报, 18, 512–517.]
- Ghimire SR, Charlton ND, Craven KD (2009). The mycorrhizal fungus, *Sebacina vermifera*, enhances seed germination and biomass production in switchgrass (*Panicum virgatum* L.). *Bioenergy Research*, 2, 51–58.
- Gong MQ, Chen YL, Zhong CL (1997). *Mycorrhizal Research and Application*. China Forestry Publishing House, Beijing. 137–141. [弓明钦, 陈应龙, 仲崇禄 (1997). 菌根研究及应用. 中国林业出版社, 北京. 137–141.]
- González-García S, Gasol CM, Moreira MT, Gabarrell X, Rieradevall J, Feijoo G (2011). Environmental assessment of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.)-based ethanol as potential transport fuel. *International Journal Life Cycle Assessment*, 16, 465–477.
- González-García S, Moreira MT, Feijoo G, Murphy RJ (2012). Comparative life cycle assessment of ethanol production from fast-growing wood crops (black locust, eucalyptus and poplar). *Biomass and Bioenergy*, 39, 378–388.
- Grünewald H, Böhm C, Quinkenstein A, Grundmann P, Eberts J, von Wühlisch G (2009). *Robinia pseudoacacia* L.: a lesser known tree species for biomass production. *Bioenergy Research*, 2, 123–133.
- Guan LL, Zhou XY, Luo Y (2005). A review on the study of plant caloric value in China. *Chinese Journal of Ecology*, 24, 452–457. [官丽莉, 周小勇, 罗艳 (2005). 我国植物热值研究综述. 生态学杂志, 24, 452–457.]
- Kaschuk G, Kuyper TW, Leffelaar PA, Hungria M, Giller KE (2009). Are the rates of photosynthesis stimulated by the carbon sink strength of rhizobial and arbuscular mycorrhizal symbioses? *Soil Biology & Biochemistry*, 41, 1233–1244.
- Kumar R, Pandey KK, Chandrashekar N, Mohan S (2011). Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus hybrid*, *Accacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. *Biomass and Bioenergy*, 35, 1339–1344.
- Lamlom SH, Savidge RA (2003). A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy*, 25, 381–388.
- Liu RJ (2001). Research and utilization of mycorrhizal fertilizer. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 17, 40–45. (in Chinese) [刘润进 (2001). 菌根真菌生物肥料研究开发前景. 中国农学通报, 17, 40–45.]
- Liu RJ, Chen YL (2007). *Mycorrhizology*. Science Press, Beijing. 152, 289–319. (in Chinese) [刘润进, 陈应龙 (2007). 菌根学. 科学出版社, 北京. 152, 289–319.]
- Luo ZB, Polle A (2009). Wood composition and energy content in a poplar short rotation plantation on fertilized

- agricultural land in a future CO<sub>2</sub> atmosphere. *Global Change Biology*, 15, 38–47.
- Olesniewicz KS, Thomas RB (1999). Effects of mycorrhizal colonization on biomass production and nitrogen fixation of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) seedlings grown under elevated atmospheric carbon dioxide. *New Phytologist*, 142, 133–140.
- Phillips JM, Hayman DS (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55, 158–161.
- Ren H, Peng SL, Liu HX, Cao HL, Huang ZL (1999). The caloric value of main plant species at Dinghushan, Guangdong, China. *Acta Phytoecologica Sinica*, 23, 148–154. (in Chinese with English abstract) [任海, 彭少麟, 刘鸿先, 曹洪麟, 黄忠良 (1999). 鼎湖山植物群落以及主要植物的热值研究. 植物生态学报, 23, 148–154.]
- Sheng M, Tang M, Chen H, Yang BW, Zhang FF, Huang YH (2008). Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. *Mycorrhiza*, 18, 287–296.
- Smith SE, Smith FA (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Annual Review of Plant Biology*, 62, 227–250.
- Tian CJ, He XY, Zhong Y, Chen JK (2003). Effect of inoculation with ecto- and arbuscular mycorrhizae and *Rhizobium* on the growth and nitrogen fixation by black locust, *Robinia pseudoacacia*. *New Forests*, 25, 125–131.
- Wu QS, Zou YN, Huang YM, Li Y, He XH (2013). Arbuscular mycorrhizal fungi induce sucrose cleavage for carbon supply of arbuscular mycorrhizas in citrus genotypes. *Scientia Horticulturae*, 160, 320–325.

特邀编委: 肖春旺 责任编辑: 王 葳