

干热河谷豆科树种结瘤调查及其影响因子

曾小红^{1,2}, 伍建榕¹, 马焕成^{1*}

(1. 西南林学院, 西南地区生物多样性保育国家林业局重点实验室, 云南 昆明 650224;

2. 中国热带农业科学院 科技信息研究所, 海南 儋州 571737)

摘要:在金沙江干热河谷地带野外调查了 15 种豆科树种及其结瘤状况, 并对其生长地的土壤进行了相关的分析。结果发现: 各豆科树种不仅在不同地段其结瘤状况不同, 即使是生长在同一地段的植物, 其根瘤在数量、形状、大小、颜色等方面都有各自的特点。其中有 9 种豆科树种有结瘤, 且结瘤量不高且无效、呈空壳状的根瘤占多数。将根瘤进行分离、纯化, 经回接鉴定得到 18 个根瘤菌菌株的纯培养。对于干热河谷的 15 份豆科树种生长地的土壤样品分析表明: 在结瘤的豆科树种中, 其土壤的酸碱度多呈中性, 为壤土, 土壤的有机质含量较高, 而水解性氮(0.123 2~0.311 6 mg/kg)、速效磷(0.002 7~0.122 2 mg/kg)、速效钾(2.427 5~0.140 8 mg/kg)的含量有明显的不同。研究认为在干热河谷的特殊生态条件下, 豆科树种的结瘤固氮受到温度、土壤因子、生态环境等多因子的综合影响。

关键词:金沙江; 干热河谷; 豆科树种; 根瘤; 土壤

中图分类号: S718.81

文献标识码: A

文章编号: 1001-7461(2008)01-0028-06

Nodulation Status of Legume Trees in the Dry-hot Valley and the Infection Factors

ZENG Xiao-hong^{1,2}, WU Jian-rong¹, MA Huan-cheng^{1*}

(1. Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China, State Forestry Administration, Southwest

Forestry College, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Institute of Scientific and Technical Information,

CATAS, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: Legume species and their nodulations in the wild in dry-hot valley were surveyed, soils physical-chemical characters were analyzed. 15 species of Legumes trees were examined of nodulation in the dry-hot valley. Among them, each leguminous root nodule showed its own nature in different places, even in the same place; the root nodule exhibited its own characteristics, such as quantity, shape, size and color. There were 9 Legume plants with nodules. But the nodulation-rate was low and a high proportion of these root nodules were non-infected and shrunken. 18 strains of root nodule bacteria from the trees were isolated through the isolation, purification and identification. 15 soils were analyzed from the dry-hot valley. The experiment showed that the nodulation legume trees grew in the loam soil with neutral pH and had significant higher content of soil organic matter, and had clearly differences in N(0.123 2~0.311 6 mg·kg⁻¹), P(0.002 7~0.122 2 mg·kg⁻¹), and K(2.427 5~0.140 8 mg·kg⁻¹). So, in the dry-hot valley, all kinds of special environment conditions infected the nodulation of the legumes trees, such as temperature, ecology condition, soil, soil organic matter, and the content of available N, P, and K.

Key words: Jinshajiang river; dry-hot valley; Legume; root nodule; soil

豆科树种具有较高的经济价值和生态价值, 对不良环境抗逆性强, 在改良土壤、提高土壤肥力、保持水土和改善生态环境方面有重要的促进作用, 而

这些作用都跟豆科植物与根瘤菌共生结瘤固氮的特性密切相关^[1]。我国豆科树种超过 760 种^[2], 固氮的豆科树种和根瘤菌资源十分丰富^[3], 但并不是所有

收稿日期: 2007-03-20 修回日期: 2007-11-11

基金项目: 云南省自然科学基金(2003C0051M), 云南省重点学科建设项目-森林培育学, 云南省省院省校合作项目-森林培育学。

作者简介: 曾小红(1979-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态学方面的研究。

* 通讯作者: 马焕成(1962-), 男, 湖南武冈人, 教授, 博士生导师, 主要从事困难地段的生态恢复与生物质能源林培育。

的豆科树种都能结瘤固氮^[2,4]。

金沙江干热河谷区由于受地理位置、山川走向及气候上的焚风效应与山谷风的局部环流作用等多种自然因素的综合影响,形成了特殊的干热气候,其高温少雨、空气干燥,早期长等特点严重影响了干热河谷地区植被的生长^[5]。调查金沙江河谷区豆科树种及其结瘤规律,为造林时考虑选用固氮的豆科树种以及人工接种根瘤菌,为该地区的植被恢复、生态改善提供一定的理论基础。

1 材料和方法

1.1 豆科树种结瘤调查

本次调查主要集中在金沙江河谷的典型地段攀枝花、元谋及元江等地,野外调查自然生长和人工林的各豆科树种的结瘤情况,分别在 2004 年的 3 月、5 月及 2005 年的 3 月进行。野外观察根瘤的数量、大小、形状及颜色,并采集生长有根瘤处的土壤带回实验室进行相关的理化分析。采集到的根瘤装入存有变色硅胶的试管中干燥保存,带回室内分离。

1.2 根瘤菌的分离^[3]

新鲜根瘤或干燥根瘤(清水中浸泡数小时待吸涨)洗净,先在 70%酒精中处理 30 s,0.1%升汞表面灭菌 3~5 min,无菌水清洗 4~5 次,压碎根瘤,沾取根瘤汁液在加有刚果红的 YEM 琼脂平板培养基表面划线,于 28℃ 下恒温培养,待出现典型的根瘤菌菌落后再进行 1~2 次稀释纯化,选取典型的根瘤菌单菌落移植到 YEM 琼脂斜面,待充分生长后用冰箱保存。

1.3 根瘤菌的回接和交叉接种试验^[3]

将收集到的豆科树种的种子培养成无菌苗。再将各分离得到的各菌株接种到原树种或同属、同亚科树种,采用半封闭滤纸试管培养,每个菌株重复 3 次,观察接瘤情况。

1.4 土壤的理化分析

本次共进行了 15 个土壤样品的理化分析,主要进行以下几个方面的分析:土壤吸湿水含量的测定:烘箱法;土壤质地的测定;比重计速测法、土壤 pH 值的测定、土壤有机质的测定、及土壤水解性氮、速效钾、速效磷的测定。具体的测定方法参照《土壤理化分析》^[6]。

表 1 干热河谷部分豆科树种结瘤情况
Table 1 The nodulation data of some Leguminous trees in dry-hot valley

亚科属	树种名称	根瘤编号	结瘤情况					采集点	菌株号
			数量	形状	大小/mm	颜色	着生点		
金合欢属 <i>Acacia</i>	台湾相思 <i>A. confusa</i>	YJ3-4	+++	珊瑚椭圆	—	红褐色	侧根	元江	YJ3-4
		PZ5-1	+++	多面体 珊瑚椭圆	1.0~3.9	淡黄色 浅褐色	侧根	攀枝花 (青松山)	PZ5-1
		PZ5-6	++	珊瑚椭圆	1.7~3.1	淡黄色 黄红色	侧根	攀枝花 (公园)	PZ5-6
		PZ6-11	+	珊瑚椭圆	2.0~2.3	淡黄色	侧根	攀枝花 (凉风坳)	PZ6-11
	金合欢 <i>A. farnesiana</i>	YJ3-9	无	—	—	—	—	元江	—
		YM5-8	无	—	—	—	—	元谋 (热经所)	—
	银荆 <i>A. dealbata</i>	KM5-3	+++	椭圆珊瑚	—	淡黄色	侧根	昆明 (林校)	KM5-3
	黑荆树 <i>A. mearnsii</i>	KM5-1	++	椭圆珊瑚	—	淡黄色	侧根	昆明 (金殿)	KM5-1
	银合欢属 <i>Leucaena</i>	YJ5-6	死瘤	—	—	—	侧根	元江	—
		YM5-3	+	椭圆	1.2~1.9	浅褐色	侧根	元谋 (热经所)	YM5-3
		PZ5-3	++	圆形椭圆	1.0~2.1	淡黄色	侧根	攀枝花 (青松山)	PZ5-3

续表 1

亚科属	树种名称	根瘤编号	结瘤情况					采集点	菌株号
			数量	形状	大小/mm	颜色	着生点		
		YM8-12	+	椭圆	1.2~1.4	淡黄色	侧根	元谋 (热经所)	YM8-12
		YM8-17	+	椭圆	1.2~1.4	淡黄色	侧根	元谋 (老城)	YM8-17
合欢属 <i>Albizzia</i>	山合欢 <i>A. kalkora</i>	YM5-5	无	—	—	—	—	元谋 (热经所)	—
	光叶合欢 <i>A. lucidior</i>	YJ3-5	几乎无	—	—	—	—	元江	—
凤凰木属 <i>Delonix</i>	凤凰木 <i>D. regia</i>	YM5-7	无	—	—	—	—	元谋	—
酸豆属 <i>Tamarindus</i>	酸角 <i>T. indica</i>	YM5-1	无	—	—	—	—	元谋 (热经所)	—
蝶形花亚科 黄檀属 <i>Dalbergia</i>	印度黄檀 <i>D. sissoo</i>	YJ3-2	少且 多空瘤	—	—	—	侧根	元江	—
	南岭黄檀 <i>D. balansae</i>	YJ3-7	空瘤	—	—	—	侧根	元江	—
	钝叶黄檀 <i>D. obtusifolia</i>	PZ5-7	++	圆形	1.6—2.1	淡黄色	侧根	攀枝花 (公园)	PZ5-7
木豆属 <i>Cajanus</i>	木豆 <i>C. cajan</i>	YM5-2	有但	—	—	—	侧根	元谋 (热经所)	—
		YJ3-3	多空瘤 空瘤	—	—	—	侧根	元江	—
		PZ6-10	+	分叉状	—	—	侧根	攀枝花 (凉风坳)	PZ6-10
		YM8-15	空瘤	—	—	—	侧根	元谋 (热经所)	—
千斤拔属 <i>Flemingia</i>	大叶千斤拔 <i>F. macrophylla</i>	YJ3-8	无	—	—	—	—	元江	—
灰毛豆属 <i>Tephrosia</i>	白灰毛豆 <i>T. candida</i>	YM5-6	+++	椭圆珊瑚	1.0~2.0	淡黄色	侧根 主根	元谋 (热经所)	YM5-6
		PZ5-4	+++	椭圆珊瑚	1.0~2.2	淡黄色	侧根 主根	攀枝花 (青松山)	PZ5-4
		YM8-14	+++	椭圆 珊瑚	1.8~2.9	淡黄色	侧根 主根	元谋 (热经所)	YM8-14
		YM8-13	+++	椭圆 珊瑚	1.7~3.0	淡黄色	侧根 主根	元谋 (热经所)	YM8-13
大翼豆属 <i>Macroptilium</i>	大翼豆 <i>M. lathyroides</i>	PZ5-13	+	椭圆	0.9~1.3	淡黄色	侧根	攀枝花 (青松山)	PZ5-13
刺槐属 <i>Robinia</i>	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	KM5-2	++	椭圆 珊瑚	—	淡黄色	侧根	昆明 (林校)	KM5-2
苏木亚科 羊蹄甲属 <i>Bauhinia</i>	红花羊蹄甲 <i>B. blakeana</i>	PZ5-9	无	—	—	—	—	攀枝花 (公园)	—

注：+，示株平均根瘤数 1~5 个；++，示株平均根瘤数 5~10 个；+++，示株平均根瘤数多于 10 个。

表 2 干热河谷地区部分根瘤采集地及土壤的理化性状

Table 2 The spots of collection nodulation and these soil physics and chemistry nature in hot-dry valley								
根瘤编号	采集点	采集点的土壤状况						
		pH 值	质地	土壤吸湿水含量/%	有机质含量/%	水解性氮含量/(mg·kg ⁻¹)	速效磷含量/(mg·kg ⁻¹)	速效钾含量/(mg·kg ⁻¹)
PZ5—1	攀枝花青松山	6.57 中性	砂壤土	1.525	1.178	0.211 5	0.104 7	0.316 5
PZ5—6	攀枝花公园	6.58 中性	轻壤土	4.835	0.674	0.203 7	0.071 0	0.851 1
PZ6—11	攀枝花凉风坳	7.07 中性	轻壤土	1.770	0.125	0.174 1	0.002 7	0.140 8
PZ5—3	攀枝花青松山	7.07 中性	轻壤土	2.735	2.384	0.151 8	0.030 2	0.214 1
YM8—12	元谋热经所	7.23 中性	轻黏土	2.585	0.962	0.211 3	0.108 6	1.570 9
YM8—17	元谋老城	8.42 碱性	轻壤土	5.030	0.789	0.094 0	0.022 6	1.232 0
PZ5—7	攀枝花公园	5.95 酸性	轻黏土	4.960	0.726	0.204 1	0.058 9	0.976 6
PZ6—10	攀枝花凉风坳	7.41 中性	轻壤土	3.090	2.519	0.380 1	0.011 7	2.427 5
YM8—15	元谋热经所	6.14 酸性	重壤土	2.085	0.561	0.141 5	0.122 2	1.231 3
PZ5—4	攀枝花青松山	7.18 中性	中壤土	4.895	2.074	0.316 6	0.011 1	0.377 4
YM8—14	元谋热经所	6.62 中性	轻壤土	1.450	0.925	0.123 2	0.032 2	1.113 5
PZ5—13	攀枝花青松山	6.67 中性	砂壤土	1.525	1.178	0.211 5	0.104 5	0.316 5
PZ5—9	攀枝花公园	5.95 酸性	轻黏土	4.960	0.726	0.204 1	0.058 9	0.976 6

2 结果与分析

2.1 根瘤菌的分离及交叉接种

经观察,分离得到的菌落均为无色或呈乳白色,表面光滑,具有光泽;在培养的早期不吸收刚果红,培养后期则吸收微量的刚果红,为典型的根瘤菌菌株;经革兰氏染色镜检,菌呈革兰氏阴性反应,细胞杆状,两端钝原,或分叉状,为典型的类菌体形态。

经进一步的回接及交叉接种试验证实,所分离的根瘤菌菌株,除了钝叶黄檀没有回接外,其他的菌株都在原寄主植物或同属、同亚科的树种上产生了根瘤,证明所获得的菌株为根瘤菌的纯培养菌株。

2.2 土壤理化性质

2.2.1 土壤质地 土壤质地是土壤中各种颗粒反映出来的特性。在不同的土壤中,土著根瘤菌的侵染性和数量都是不同的^[7,8],在其中接种的根瘤菌其存活和竞争能力也不同^[9],这影响到其与豆科植物的共生结瘤和固氮的性能^[10]。

从表 2 中土壤质地情况看,干热河谷地区的土壤中,根瘤编号为 PZ5—13、PZ5—1 的采集地土壤万方数据

是砂壤土;YM8—12、PZ5—7、PZ5—9 为轻黏土;YM8—15 为重壤土;PZ5—4 为中壤土;其余的均为轻壤土(PZ5—6、PZ6—11、PZ5—3、YM8—17、PZ6—10、YM8—14)。以此可以得出,本次测试的土壤多为壤土,黏土为少。质地为壤土的土壤中豆科树种更易于结瘤,壤土的特性可能促进了根瘤菌对豆科植物根毛的浸染。

2.2.2 土壤 pH 值 测定结果表明,在测试的土壤中有 1 个为碱性土,pH 值大于 8.0(YM8—17);3 个为酸性土,pH6.5 ~ 5.9(PZ5—7、YM8—15、PZ5—9);9 个为中性土,pH 在 6.5 ~ 7.5 之间(PZ5—1、PZ5—6、PZ6—11、PZ5—13、YM8—12、PZ6—10、PZ5—4、YM8—14、PZ5—13)。生长银合欢的两个碱性土虽已结瘤,但根瘤既小又少,且大部分为无效根瘤。在中性土壤中生长的木豆、山毛豆、台湾相思、钝叶黄檀等结瘤较多。这说明根瘤菌和其他细菌一样,最适宜在中性环境中生长繁殖,过酸过碱对根瘤菌的生长和结瘤均有明显的抑制作用。

2.2.3 土壤有机质 一般来说,土壤有机质含量的多少是土壤肥力高低的一个重要指标^[11]。干热河谷

区的土壤保水保肥能力相对较差,降水难于下渗而土壤水分易于蒸发。从土壤有机质的测试结果可看出,在干热河谷区土壤有机质含量普遍偏低。有机质含量大于 1% 的只有 5 个土样(PZ5-1、PZ5-3、PZ6-10、PZ5-4、PZ5-13),其中 4 个是攀枝花青松山的土样,山上种植了大片的银合欢、山毛豆及台湾相思,并且基本上已成林(7~8 a 生)。在实地调查中发现该地的豆科树种大多结瘤,且其表层土有了一定的改善。在此可看出,有机质含量较高的土壤中,豆科植物更易结瘤。

2.2.4 土壤水解性氮 土壤水解性氮含量测定结果表明,在干热河谷地区的土壤中,除了在元谋老城一处生长银合欢树种(根瘤 YM8-17)的氮含量仅有 0.094 0 mg/kg 外,其它采集点的氮含量在 0.123 2~0.311 6 mg/kg 之间,差值为 0.188 4 mg/kg,土壤含氮量不高。

2.2.5 土壤速效磷 豆科植物和根瘤菌都需要较高的磷素营养,土壤中有效磷含量高,对根瘤菌在豆科植物根际的存活、繁殖、入侵、结瘤以及根瘤菌的固氮活性都有促进作用。植物结瘤和保持固氮酶活性比正常生长需要更大的磷^[12,13],且磷可以刺激根瘤菌的繁殖^[14]。从实验结果看,干热河谷地区土壤中速效磷的含量普遍偏低,在含磷量较高的 3 个土样(根瘤编号和磷含量分别为:YM8-15 含量为 0.122 2 mg/kg、YM8-12 含量为 0.108 6 mg/kg、PZ5-1 含量为 0.104 7 mg/kg)中分别是生长木豆、银合欢和台湾相思的土样,经实地调查,这 3 种树种都结瘤较多,根瘤较大,植株生长较好。

2.2.6 土壤速效钾 从测定的结果可看出,在干热河谷地区速效钾的含量差别较大,含量高的可达到 2.427 5 mg/kg,是元谋热经所的一处生长有木豆的土壤;而含量低的则只有 0.140 8 mg/kg,为攀枝花凉风坳的一处生长有台湾相思树种的土壤。

2.3 豆科树种结瘤

本试验在干热河谷的 3 个典型地段共调查了 15 种豆科树种的结瘤情况,各豆科木本植物除在不同地段其结瘤状况不同外,在同一地段其根瘤在数量、形状、大小、颜色等各方面均有各自的特点(表 1)。

调查发现,台湾相思、圣诞树、黑荆树、银合欢、钝叶黄檀、木豆、白灰毛豆、大翼豆、刺槐,等 9 种豆科树种有结瘤,除了白灰毛豆、台湾相思所接根瘤较多外,其他的树种接瘤量均较少,且无效、呈空壳状的根瘤占多数。还发现在结瘤的树种中,木豆、南岭

黄檀、印度黄檀及大叶千斤拔的根部有虫害出现过的痕迹,这可能是造成其结瘤率低且无效根瘤多的原因之一。此外,植物的不同生理发育阶段,对根瘤的颜色、形状及瘤的有效性也有一定的影响。如台湾相思,2 年生的台湾相思其根瘤多饱满,呈红褐色,瘤的一端分叉,大的呈珊瑚状;而在 8 a 生的台湾相思林中,根瘤多为椭圆状,大的呈分叉的珊瑚状,其颜色一般为浅黄色、浅褐色,且多有空壳的根瘤。

土壤测试结果表明在结瘤的豆科树种中,其土壤多呈中性,为壤土,且土壤 N、P、K 含量不高。土壤的这些特性是干热河谷地区高温干旱造成的。这也是在干热河谷地区豆科树种结瘤率不高且有效性低的因素之一。

在不结瘤的树种中发现金合欢、山合欢曾报道是有根瘤的^[2],而此次的调查并没有采集到根瘤,笔者认为这可能和当时调查的时间有关。这两种树种都是在干热河谷地区的干旱季节 3~5 月在野外进行观察的,天气持续高温无雨,这可能影响了树种的结瘤。

3 结论讨论

干旱、高温或高寒都是豆科植物结瘤固氮的限制因素,一般认为土壤温度低于 7℃ 或高于 30℃ 时,根瘤菌就不能浸染豆科植物,不易形成有效根瘤^[15],而豆科植物最适宜结瘤固氮的温度为 20~22℃^[16]。干热河谷地区气温的绝对高值在 40℃ 以上,地面的绝对最高温度达 78.7℃,而气温的绝对最低值均在 0℃ 以下,有的达 -6.2℃ (东川、宾川),地面绝对低温亦在 0℃ 以下,不少地区低至 -6.9℃ (攀枝花)^[17]。这种巨大的高、低温不仅使植物受到伤害,还严重的影响了豆科植株的结瘤固氮。温度的高低对共生体系的发育和功能都会产生影响,过低的温度导致豆科植物不结瘤、固氮能力下降和生物量减少^[18];过高的温度则会使根瘤很快退化,导致固氮期缩短^[16]。笔者认为高、低温度的巨大差异可能是干热河谷地区豆科植物结瘤固氮的一个限制因素。

土壤缺水,既影响了植物根毛的生长,减少了根瘤菌的浸染机会,同时根瘤菌在干燥的土壤中生长也受到限制,不易与豆科植物共生结瘤^[19]。土壤干旱也使根瘤的数量及重量显著的下降^[20]。金沙江干热河谷地区有半年的干旱时间,其蒸发量远大于降雨量,使得土壤严重缺水。低的土壤含水量影响了植株的结瘤及其固氮性能。

干热河谷地区生长的豆科植物常年处于高温干旱、土壤瘠薄、水土流失严重等复杂的生态环境条件下^[17],土壤及环境中的多重因素影响了豆科植株的结瘤固氮。调查此条件下木本豆科植株的结瘤状况,为进一步检验分离出的根瘤菌是否具有在高温干旱等逆境条件中生存的能力提供间接的证据。豆科植物—根瘤菌的共生固氮体系是在长久的协同进化中共生的。高温干旱引起根瘤的脱落干瘪,在植物生长的初期发生这种状况,若能及时解除该种环境胁迫,就可能重新生长再形成新的根瘤。这或许是干旱地区豆科树种具有较强的抗旱性的表现之一。

在比较耐旱的豆科树种中采集根瘤,其根瘤菌是否也具有耐高温干旱的能力,这有待于进一步的高温干旱实验加以证实。刁治民从青海高寒地区的豆科植物根瘤中分离得到的根瘤菌,就有不少具有较强的耐干旱、耐盐碱、耐低温的抗逆性能力且固氮能力也较高的根瘤菌菌株^[19]。这为在干热河谷高温干旱地区采集的根瘤中,筛选出具有耐干旱高温的根瘤菌菌株奠定了一定的试验依据,对于在干热河谷地区植树造林也具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 韩素芬. 我国豆科树种结瘤情况的补充资料[J]. 南京林业大学学报, 1995, 19(4): 89-91.
- [2] 韩素芬, 周湘泉. 我国豆科树种结瘤情况[J]. 南京林业大学学报, 1990, 14(3): 84-90.
- [3] 韩素芬. 固氮豆科树种和豆科树种根瘤菌资源的研究[J]. 林业科学, 1996, 32(5): 434-440.
- [4] 周湘泉, 韩素芬. 豆科树种根瘤菌共生体系的研究 I: 结瘤观察、分离、回接和交叉接种[J]. 南京林学院学报, 1984(2): 32-41.
- [5] 张道光, 陈纪卫. 我国西南干旱河谷区农业气象资源的分类与合理利用[J]. 自然资源, 1989(3): 1-6.
- [6] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [7] Dogbew, Feningio, Dansoska. Nodulation of Legumes in inland valley soils of Ghana [J]. Symbiosis Rehovot, 2000, 28(1): 77-92.
- [8] 黄怀琼, 曾玉霞, 龙碧华, 等. 四川紫色土壤中土著大豆根瘤菌的资源分布[J]. 西南农业学报, 2000, 13(3): 39-44.
- [9] Markovaa. Survival and competitive ability of *Rhizobium leguminosarum* biovar *viciae* in two soils [J]. Pochvo Agrok Ekol, 2002, 37(13): 46-47.
- [10] 慈恩, 高明. 环境因子对豆科共生固氮影响的研究进展[J]. 西北植物学报, 2005, 25(6): 1269-274.
- [11] 西南农学院. 土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1980.
- [12] 李晓林, 曹一平. VA 菌根菌丝—土壤界面(菌丝际)养分分布模拟方法研究[J]. 北京农业大学学报, 1992, 18(1): 59-63.
- [13] 李晓林, 曹一平. 菌根和非菌根三叶草根际土壤磷钾养分变化[J]. 土壤通报, 1992, 23(4): 180-182.
- [14] 何庆元, 胡艳, 王永雄. 生态环境对根瘤菌竞争结瘤影响的研究进展[J]. 大豆科学, 2004, 23(1): 66-70.
- [15] 尤崇杓. 生物固氮[M]. 北京: 科学出版社, 1987, 163-184.
- [16] 马焕成. 干热河谷造林新技术[M]. 中国博士丛书, 昆明: 云南科技出版社, 2000.
- [17] 马玉珍, 史清亮, 庞金梅, 等. 接种根瘤菌与加施化合态氮肥对花生增产效果的研究[J]. 土壤肥料, 1990(3): 128-131.
- [18] Anitaa, Veenaj, Nainawateehs. Effect of low temperature and rhizospheric application of naringenin on pea-Rhizobium legume inosa rum biovar *viciae* symbiosis[J]. J PlantBiochem Biotechn, 1998, 7(1): 35-38.
- [19] 刁治民. 青海豆科植物根瘤菌的初步研究[J]. 青海科技, 1995, 3(4): 1-5.
- [20] 窦新田. 生物固氮[M]. 北京: 农业出版社, 1989.