

# 干热河谷4种固氮植物根瘤固氮潜力及其影响因素

唐国勇<sup>1,2</sup>, 李 昆<sup>1,2\*</sup>, 孙永玉<sup>1,2</sup>, 张春华<sup>1,2</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 昆明 650224; 2. 国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位研究站, 昆明 650224)

**摘要:** 氮是除水分之外影响干热河谷生物活性的关键因子, 豆科植物生物固氮是该地区氮素的重要来源之一。采用乙炔还原法测定了干热河谷不同季节燥红土和变性土林地中大叶相思、新银合欢、木豆和山合欢根瘤固氮酶活性(NAs)。结果表明: 新银合欢( $16.25 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )和大叶相思( $15.85 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )根瘤 NAs 显著( $P < 0.001$ )高于山合欢( $9.60 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )和木豆( $9.42 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )。雨季根瘤 NAs 显著高于旱季, 约为旱季的2.3倍。燥红土样地上植物根瘤 NAs 是变性土样地的1.3~1.6倍。研究揭示: 除植被类型外, 干热河谷植物根瘤 NAs 主要受土壤类型、季节和土壤含水量的影响, 而受土壤温度的影响较小。

**关键词:** 固氮酶活性; 根瘤; 土壤类型; 季节动态; 干热河谷

中图分类号: S718.81

文献标识码: A

## Nitrogen-fixation Potential of Nodules in Four Types of Nitrogen-fixation Plants and Their Influencing Factors in Dry-hot Valley

TANG Guo-yong<sup>1,2</sup>, LI Kun<sup>1,2</sup>, SUN Yong-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Chun-hua<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute of Resource Insects, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Yuanmou Desertification Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** In addition to water, Nitrogen (N) is often the key limiting factor for biological activity in Dry-hot Valleys. Biological N-fixation by nitrogen-fixation plants is of important source of N for vegetations in those areas. The nitrogenase activities (NAs) of nodules in *Acacia auriliformis* A. Cunn, *Leucaena leucacephala* (Lam.) de Wit, *Cajanus cajan* (L). Millspangh and *Albiza kalkora* Prain plantations were determined at the Dry red soils and Vertisol spots at four different sampling times in a Dry-hot Valley with the acetylene reduction assay. The results showed that the NAs of nodules in *L. leucacephala* ( $16.25 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) and *A. auriliformis* ( $15.85 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) were significantly higher than those in *A. kalkora* ( $9.60 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) and *C. cajan* ( $9.42 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ). The NAs of nodules in rainy season were significantly higher than those in dry season, and approximated 2.3 times that in dry season. The NAs of nodules at the Dry red soils spots were 1.3–1.6 times higher than those at the Vertisol spots. The research revealed besides plant type, the NAs of nodules were primarily affected by soil type, season and soil water content, but less affected by soil temperature.

**Key words:** Nitrogenase activity; nodule; soil type; season pattern; Dry-hot Valley

收稿日期: 2012-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(31100462); 中国林业科学研究院资源昆虫研究所基本科研业务专项(riricaf201001M); 林业公益性行业专项(201104002-3-2)

作者简介: 唐国勇(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事西南造林困难区域土壤与环境生态研究. E-mail: tangguoyong1980@gmail.com

\* 通讯作者.

土壤中氮素植物有效性是除水分之外影响干旱区生态系统生物活性的关键因子<sup>[1-2]</sup>,生物可利用氮的输入量决定该类气候区生态系统的生产力<sup>[1,3]</sup>。干热河谷地区土壤氮素含量及其有效性普遍较低,被认为是该地区生态修复的主要障碍因子之一<sup>[4-5]</sup>。根瘤菌与豆科植物共生固氮是生态系统氮素重要来源之一,尤其是在大气氮沉降极少的干旱区<sup>[2,6]</sup>,但固氮酶活性和固氮能力因树种、采样季节、立地环境等差异较大<sup>[7-11]</sup>。以往对干热河谷地区豆科植物根系结瘤状况<sup>[11-12]</sup>、根瘤菌抗性<sup>[13]</sup>以及根瘤菌多样性与系统发育<sup>[14]</sup>进行了研究,但尚未有探究根瘤固氮潜力及其影响因素的研究。本研究通过调查不同季节和不同土壤环境下大叶相思、新银合欢、木豆和山合欢根系根瘤菌结瘤状况,采用乙炔还原法测定其根瘤固氮酶活性(NAs),旨在探究干热河谷根瘤固氮特征,为该地区造林树种配置提供依据和参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 样地设置与调查采样

研究区位于国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位观测站(101°52' E, 25°40' N),是干热河谷的典型代表。研究区立地条件相对一致,海拔约1 100~1 120 m,坡度约12~15°,以阳坡为主,土壤类型为燥红土和变性土,基本情况详见文献[15-16]。

于2011年4月选择观测站内大叶相思、新银合欢、木豆和山合欢人工林作为调查样地,在各样地上设置20 m×20 m的标准样方各8个,其中4个样方土壤类型为燥红土,另外4个为变性土,共32个样地。对标准样方内林木进行每木检尺,测定林木的胸径、树高、冠幅等(表1)。在干热河谷,大叶相思和新银合欢为乔木,木豆和山合欢为灌木,这4种树种是干热河谷较好的先锋固氮护坡树种,乔木和灌木可以与不同类型、不同生长特征的树种混栽<sup>[5,15]</sup>。

表1 样地基本情况

植被类型	土壤类型	林龄/a	胸径/cm	树高/m	冠幅/m	土壤密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	<0.002 mm黏粒含量/%	pH值	土壤有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )
大叶相思	燥红土	10	6.3	8.3	3.2×3.5	1.41	31.47	6.35	3.45	0.38
	变性土	10	5.4	4.7	2.5×2.6	1.55	55.88	7.79	3.01	0.28
新银合欢	燥红土	10	6.9	8.1	2.2×2.3	1.36	34.01	6.26	3.67	0.42
	变性土	10	5.2	5.8	2.0×2.0	1.47	54.74	7.74	3.41	0.32
木豆	燥红土	3	4.5	2.5	1.8×1.9	1.45	30.67	6.07	2.97	0.31
	变性土	3	3.0	1.8	1.6×1.7	1.58	60.79	7.99	2.64	0.23
山合欢	燥红土	10	3.8	3.4	2.0×2.0	1.42	31.95	6.48	3.37	0.35
	变性土	10	3.6	3.0	1.8×1.9	1.53	56.73	7.45	3.21	0.29

于2011年5月上旬(旱季末期)、7月上旬(雨季中期)和9月上旬(雨季末期)和12月上旬(旱季中期),在各标准样方内随机选取1株平均标准木作为样木,每株样木分层挖掘根系,现场调查根瘤的数量、大小、形状、颜色及着生点位置等参数特征(表2),选取含新鲜健康根瘤的根系,置于冰盒内带回实验室处理,每次分别采样32个混合样。同时取0~40 cm土层的土样进行土壤理化性质测定(表1)。采样前用TDR水分仪(Field Scout TDR 200 Probe, 美国)多点(3~5个)测定0~40 cm土层的土壤含水量,用土壤温度测定仪(TR-TZS-IW型,杭州)多点(3~5个)测定20 cm处土壤温度。考虑土壤含水量和土壤温度的日际变化,测定时间统一为采样当天早上8:00—9:00,且采样前至少1个星期无降雨。

### 1.2 固氮酶活性分析

固氮酶活性(NAs)用乙炔还原法测定<sup>[17]</sup>。采

回的根系用蒸馏水洗净,吸干水分,小心快速地摘取健康根瘤,称质量(鲜质量20 g左右),置于血清反应瓶,从血清瓶中抽取2 mL空气,注入2 mL高纯乙炔气体,于25 °C条件下恒温培养2 h,从血清反应瓶内抽出1 mL气体注入气相色谱仪(GC6820, Agilent Technologies, Palo Alto, 美国),测定乙烯生成量。NAs用乙烯生成速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )表示。

### 1.3 数据处理与分析

用单因素方差分析(one-way ANOVA, LSD法)检验不同植被类型、土壤类型和采样时间之间根瘤NAs的差异显著性;用广义线性模型(general linear models, GLM)模块中的Univariate分析植被类型、采样时间和不同土壤类型对根瘤NAs的交互影响,用线性回归分析土壤含水量和土壤温度与根瘤NAs的相关性。以上分析在SPSS 11.0软件上完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 干热河谷4种固氮树种结瘤调查及根瘤特征

调查发现,干热河谷大叶相思、新银合欢、木豆和山合欢的根瘤均呈圆形或椭圆形,绝大多数根瘤着生在侧根上,尤其是 $<1\text{ mm}$ 的侧根,而且根瘤形状和着生部位几乎不受采样时间和土壤类型的影响(数据未显示);但根瘤颜色、数量和大小因固氮树种而异,并且存在明显的季节性差异和土壤类型差异(表2)。与木豆和山合欢相

比,大叶相思和新银合欢的根瘤数量较多、体积较大,颜色偏红。通常颜色深表明根瘤血红蛋白含量相对较高,潜在固氮能力强<sup>[7-8]</sup>。就取样时间而言,雨季中期和雨季末期根瘤数量多、体积大,旱季中期根瘤数量和体积较小,而旱季末期根瘤数量最少、体积最小,甚至在旱季末期木豆和山合欢未检出有效根瘤(木豆燥红土样地除外)。燥红土样地上的4类固氮树种其根瘤数量约为变性土的1.3~2.3倍,体积约为变性土的2~4倍,根瘤颜色比变性土的稍深。

表2 干热河谷4种豆科植物结瘤及根瘤特征

植被类型	采样时间	土壤类型	样本数 /个	根瘤数量 /个	根瘤颜色	根瘤大小 /mm	固氮酶活性/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ )	土壤含水量/ %	土壤温度 /°C	
大叶相思	5月上旬	燥红土	4	9	淡黄色	0.5~1.0	$5.20 \pm 0.51$	6.84	15.70	
		变性土	4	4	淡黄色	0.3~1.0	$1.92 \pm 0.16$	5.42	15.75	
	7月上旬	燥红土	4	42	红褐色、浅黄色、棕红色	0.9~5.8	$27.14 \pm 1.31$	15.52	14.80	
		变性土	4	31	红褐色、浅黄色、棕红色	0.9~4.2	$18.58 \pm 0.83$	13.85	14.90	
	9月上旬	燥红土	4	41	红褐色、浅黄色、棕红色	0.8~5.0	$26.20 \pm 1.00$	15.25	15.30	
		变性土	4	30	红褐色、浅黄色、棕红色	0.7~4.1	$17.41 \pm 1.28$	13.75	15.33	
	12月上旬	燥红土	4	18	淡黄色、黄红色、浅褐色	0.7~2.2	$19.30 \pm 0.92$	10.54	15.28	
		变性土	4	8	淡黄色、黄红色	0.4~1.8	$11.05 \pm 0.86$	8.54	15.33	
	新银合欢	5月上旬	燥红土	4	12	淡黄色	0.6~2.1	$6.05 \pm 0.47$	6.97	15.83
			变性土	4	7	浅褐色	0.8~1.9	$3.82 \pm 0.19$	5.57	15.90
7月上旬		燥红土	4	45	粉红色、红色	1.1~7.8	$26.40 \pm 0.77$	15.60	14.78	
		变性土	4	34	粉红色、红色	1.0~6.5	$19.04 \pm 0.80$	13.90	14.88	
9月上旬		燥红土	4	42	红色、粉红色	1.2~5.4	$24.20 \pm 1.00$	15.42	15.33	
		变性土	4	31	红色、粉红色	1.0~4.5	$18.24 \pm 0.73$	13.79	15.33	
12月上旬		燥红土	4	22	粉红色、淡黄色	0.9~4.7	$19.52 \pm 0.60$	10.55	15.25	
		变性土	4	14	淡黄色、浅褐色	0.8~3.5	$12.70 \pm 0.78$	8.88	15.25	
木豆		5月上旬	燥红土	4	1	白色	0.1	—	5.56	16.00
			变性土	4	0	—	—	—	5.00	16.02
	7月上旬	燥红土	4	27	浅红色	0.8~4.0	$15.80 \pm 0.63$	14.98	15.63	
		变性土	4	17	浅红色	0.8~4.1	$10.30 \pm 0.61$	12.87	15.70	
	9月上旬	燥红土	4	26	浅红色	0.7~3.8	$15.00 \pm 0.65$	13.42	15.73	
		变性土	4	17	浅红色	0.6~3.5	$9.66 \pm 0.69$	12.71	15.88	
	12月上旬	燥红土	4	9	淡黄色	0.4~2.1	$3.95 \pm 0.49$	9.99	15.33	
		变性土	4	5	浅灰色	0.3~2.0	$1.78 \pm 0.36$	8.01	15.43	
	山合欢	5月上旬	燥红土	4	0	—	—	—	5.98	15.88
			变性土	4	0	—	—	—	5.89	15.87
7月上旬		燥红土	4	24	浅红色、淡黄色	0.8~3.7	$14.17 \pm 0.70$	14.97	15.55	
		变性土	4	15	浅红色、淡黄色	0.6~3.8	$12.25 \pm 0.59$	12.86	15.58	
9月上旬		燥红土	4	20	浅红色	0.8~3.0	$14.09 \pm 0.69$	13.34	15.70	
		变性土	4	14	浅红色	0.5~2.5	$11.06 \pm 0.59$	12.67	15.70	
12月上旬		燥红土	4	8	浅灰色	0.3~2.0	$3.98 \pm 0.47$	9.56	15.25	
		变性土	4	5	浅灰色、白色	0.2~1.0	$2.02 \pm 0.40$	8.21	15.35	

注:固氮酶活性用乙烯生成速率表示。

## 2.2 干热河谷4种固氮树种根瘤固氮活性特征

用乙炔还原法检测所采集根瘤样品的 NAs, 结果表明:参试根瘤绝大部分具有 NAs, 仅旱季末期在木豆燥红土样地中获取的根瘤因根瘤量不足(仅 2.3 g, 不满足检测要求)而未测出 NAs。检测结果显示:4 种固氮树种根瘤 NAs 为 1.78 ~ 27.14  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , 其中, 大叶相思、新银合欢、木豆和山合欢根瘤 NAs 变化区间分别为 1.92 ~ 27.14、3.82 ~ 26.40、1.78 ~ 15.80、2.02 ~ 14.17  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。总体上, 参试树种根瘤 NAs 表现为新银合欢(平均值为 16.25  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , 下同) > 大叶相思(15.85  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) > 山合欢(9.60  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) > 木豆(9.42  $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 其中, 新银合欢和大叶相思根瘤 NAs 无显著差异( $P = 0.826$ ), 山合欢与木豆也无显著差异( $P = 0.935$ ), 但新银合欢和大叶相思根瘤 NAs 显著( $P < 0.001$ )高于木豆和山合欢(图 1A)。

从 4 种植物根瘤 NAs 与土壤类型的关系来看, 燥红土样地上 4 种豆科植物根瘤 NAs 均高于变性土, 约为变性土的 1.3 ~ 1.6 倍(图 1B)。统计分析显示除山合欢外( $P = 0.264$ ), 燥红土样地上的其他 3 个树种的根瘤 NAs 均显著( $P < 0.05$ )高于变性土样地。

不同采样时间根瘤 NAs 差异明显, 各树种根瘤 NAs 均表现为雨季中期 > 雨季末期 > 旱季中期 > 旱季末期(图 1C)。雨季中期和雨季末期收集根瘤的 NAs 均无显著差异, 但均显著高于旱季中期和旱季末期, 而旱季中期根瘤 NAs 也显著高于旱季末期。雨季根瘤 NAs 约为旱季的 2.3 倍。旱季末期木豆和山合欢未检出有效根瘤(或极少量), 即该树种在旱季末期根瘤无固氮能力。

## 2.3 干热河谷4种固氮树种根瘤固氮活性的影响因素

为明确植被类型、土壤类型和采样时间对根瘤 NAs 的交互影响, 进行了主效应方差分析(表 3)。结果表明:不仅植被类型、土壤类型和采样时间对根

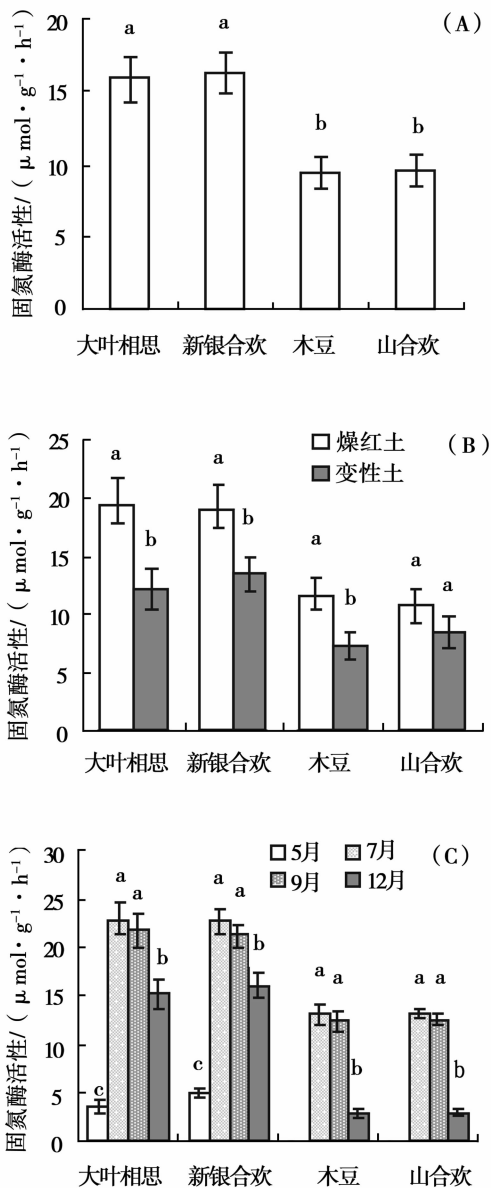


图1 不同植被类型(A)、土壤类型(B)和采样时间(C)固氮植物根瘤菌固氮活性

瘤 NAs 有显著( $P < 0.001$ )的影响, 三者的交互效应同样有显著影响( $P < 0.01$ )。

通过线性回归分析, 发现土壤含水量与 NAs 呈正线性相关, 而且不同土壤类型样地中土壤含水量与 NAs 均呈正线性相关; 但土壤温度与 NAs 相关性不明确(表 4)。

表3 主效应方差分析

变异来源	Ⅲ型平方和	自由度	均方	F	P
校正模型	6 566.51	27	243.20	453.93	0.000
截距	14 393.08	1	14 393.08	26 864.03	0.000
植被类型	2 637.28	3	879.09	1 640.79	0.000
土壤类型	546.34	1	546.34	1 019.71	0.000
采样时间	4 403.63	3	1 467.88	2 739.72	0.000
植被类型 × 土壤类型	134.41	3	44.80	83.62	0.000
植被类型 × 采样时间	83.28	7	11.90	22.21	0.000
土壤类型 × 采样时间	76.75	3	25.58	47.75	0.000
植被类型 × 土壤类型 × 采样时间	12.85	7	1.84	3.43	0.003
误差	45.00	84	0.54		
总和	26 257.82	112			
校正总和	6 611.51	111			

注:  $R^2 = 0.993$  ( $R^2_{\text{Adjusted}} = 0.991$ )。

表4 土壤含水量、土壤温度与根瘤菌固氮酶活性相关性

参数	土壤类型	回归方程	$R^2$	P
土壤含水量(W)、固氮酶活性(y)	燥红土	$y = 0.30W + 7.68$	0.617	0.001
	变性土	$y = 0.42W + 6.28$	0.700	0.000
	总体	$y = 0.34W + 7.11$	0.660	0.000
土壤温度(T)、固氮酶活性(y)	燥红土	$y = -0.41T + 21.96$	0.001	0.912
	变性土	$y = 0.61T + 1.46$	0.004	0.830
	总体	$y = -0.13T + 15.16$	0.000	0.957

### 3 结论与讨论

豆科植物结瘤固氮是一个复杂的生态学过程,受众多因素的影响,其中,植物本身的遗传背景是影响植物根系结瘤固氮的关键因素<sup>[7-11]</sup>。在采集时间和生境条件相近的情况下,不同豆科植物根瘤 NAs 或固氮量也存在明显差异<sup>[10-11, 18]</sup>。如周丽霞等<sup>[18]</sup>对广东省境内的豆科植物结瘤固氮资源进行了调查,发现在采集时间相近的情况下植物根瘤 NAs 差异明显,大多数根瘤 NAs 在  $1 \sim 10 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  之间。本研究于干热河谷调查的 4 类固氮树种在结瘤数量、大小和根瘤 NAs 等方面存在一定差异(表 2、图 1A),总体上,新银合欢和大叶相思结瘤固氮能力相当,木豆与山合欢较类似;但新银合欢和大叶相思根瘤数量和 NAs 均高于木豆和山合欢。曾小红等<sup>[11]</sup>于旱季末期在干热河谷 3 个典型地段调查了 18 种豆科树种结瘤情况,发现银合欢结瘤数量明显高于木豆,且木豆多空瘤,而山合欢未检出根瘤。广东境内大叶相思和新银合欢根瘤体积大于山合欢,但因为新银合欢和山合欢根瘤数量较少而未检出根瘤 NAs<sup>[18]</sup>。通过盆栽试验,刘国凡等<sup>[19]</sup>发现,尽管木豆根瘤 NAs 低于山合欢,但由于木豆结

瘤量大于山合欢,其固氮量反而高于山合欢,而野外调查却发现山合欢根瘤明显大于木豆。本研究中木豆结瘤数量和结瘤大小略高于山合欢,但二者 NAs 差异不显著。

土壤类型是影响植物生长及其相关土壤生态过程的重要因素。本研究中,在相同林龄和种植密度条件下,由于燥红土土壤肥力状况和土壤含水量明显优于变性土(表 1、2),林木生长状况也明显优于变性土(表 1),这可能是导致燥红土立地条件下 4 种固氮树种结瘤量和根瘤 NAs 均高于变性土的主要原因。刘国凡等<sup>[19]</sup>在四川米易县(干热河谷)野外调查发现,褐红土上木豆结瘤量、NAs 和固氮量分别是红壤的 2.0~2.7 倍、1.2~1.3 倍和 2.4~3.4 倍;而盆栽试验也证实了不同立地条件下固氮树种(木豆和山合欢)结瘤量、NAs 和固氮量差异显著。

研究表明,豆科植物结瘤量和根瘤 NAs 均呈现明显的季节性动态,如萌芽后(5 月中旬),欧洲杨梅(*Myrica gale* L.)根系根瘤菌固氮酶开始具有活性,6 月下旬到 8 月中旬达到峰值,而所有的叶凋落后(11 月下旬)固氮酶失活<sup>[7]</sup>。也有研究表明,干旱环境下,根瘤中豆血红蛋白含量并不一定下降,但根瘤干物质显著下降<sup>[20]</sup>。本研究中,4 种固氮树种根瘤

NAs 在雨季中期和雨季末期较高,在旱季较低,尤其是旱季末期,NAs 极低,甚至消失。本研究中除受植物生理节律的影响外,干热河谷根瘤菌 NAs 与土壤含水量的关系密切,在一定范围内其活性随土壤含水量的提高而增加,但与土壤温度的关系不密切(表4)。通常认为根瘤菌生物固氮的最适地表温度是  $20 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[9-10]</sup>,根际土壤温度为  $15 \sim 17.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[8]</sup>。本研究中土壤温度与 NAs 关系不密切,这可能是由于 20 cm 土壤层温度变化幅度较小( $14.78 \sim 16.02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ),其温度变化区间都在根瘤菌适宜生活的温度范围内。

基于以上结果及分析,干热河谷造林模式中可适当混植固氮能力较强的大叶相思和新银合欢。由于木豆为 3~5 年生灌木,也可在生态恢复中作为先锋树种考虑,但需要注意的是固氮植物与非固氮植物混植将减少结瘤量,并减低固氮量,但 NAs 并不一定下降<sup>[21]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] Wilfred M P, John P, Zinke P J, *et al.* Global patterns of soil nitrogen storage [J]. *Nature*, 1985, 317: 613-616
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304: 1623-1627
- [3] Steven G W. Repairing damaged wildlands: A process-orientated, landscape-scale approach [M]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. Fifth printing, 2005:1-23
- [4] 何毓蓉,黄成敏,杨忠,等. 云南省元谋干热河谷的土壤退化及旱地农业研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 3(1): 57-61
- [5] 赵琳,郎南军,郑科,等. 云南干热河谷退化生态系统植被恢复影响因子的特征分析[J]. *西部林业科学*, 2009, 38(3): 39-44
- [6] 张鹏,李新荣,贾荣亮,等. 沙坡头地区生物土壤结皮的固氮活性及其对水热因子的响应[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(9): 906-913
- [7] Schwintzer C R, Berry A M, Disney L D, *et al.* Seasonal patterns of root nodule growth, endophyte morphology, nitrogenase activity, and shoot development in *Myrica gale*[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1982, 60: 746-757
- [8] Zhang F, Dashti N, Hynes R K, *et al.* Plant growth promoting rhizobacteria and soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] nodulation and nitrogen fixation at suboptimal root zone temperatures [J]. *Annals of Botany*, 1996, 77(5): 453-459
- [9] 黄维南,黄志宏,林清洪,等. 气候因子对三种豆科树种固氮的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(5): 455-458
- [10] Lurline E M, Raymond B, Dyremple B M, *et al.* Temperature effects on *Bradyrhizobium* spp. growth and symbiotic effectiveness with pigeonpea and cowpea [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2006, 29(2): 331-346
- [11] 曾小红,伍建榕,马焕成. 干热河谷豆科树种结瘤调查及其影响因素[J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(1): 28-33
- [12] 贾风勤,杨比伦,腊萍. 云南景东县豆科固氮树种及根瘤菌资源调查[J]. *西南林学院学报*, 2009, 22(4): 13-18
- [13] 黄明勇,张小平,李登煜,等. 金沙江干热河谷区土著花生根瘤菌耐旱性初步研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2000, 6(3): 263-266
- [14] 黄昌学,张小平,彭贤超,等. 金沙江干热河谷区田菁根瘤菌多样性与系统发育[J]. *微生物学报*, 2008, 48(6): 725-732
- [15] 唐国勇,李昆,孙永玉,等. 干热河谷不同利用方式下土壤活性有机碳含量及其分配特征[J]. *环境科学*, 2010, 31(5): 1365-1371
- [16] 唐国勇,李昆,孙永玉,等. 干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性[J]. *环境科学*, 2012, 33(2): 551-557
- [17] Hardy R W F, Burns R C, Holsten R D. Applications of the acetylene-ethylene assay for measurement of nitrogen fixation [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1973, 5(1): 47-81
- [18] 周丽霞,蚁伟民,丁明懋,等. 广东省豆科植物结瘤固氮及根瘤菌资源的初步研究[J]. *生物多样性*, 2003, 11(4): 309-321
- [19] 刘国凡,邓廷秀. 几种豆科树木结瘤固氮的初步研究[J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1986, 10(3): 228-233
- [20] Antolin M C, Muro I, Sanchez-Diaz M. Application of sewage sludge improves growth, photosynthesis and antioxidant activities of nodulated alfalfa plants under drought conditions [J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2010, 68(1): 75-82
- [21] Bouillet J P, Laclau J P, Goncalves J L M, *et al.* Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil 2: Nitrogen accumulation in the stands and biological  $\text{N}_2$  fixation [J]. *Forest Ecology & Management*, 2008, 255(12): 3918-3930