

## 豆科植物对石漠化土地生物碳固持能力的影响\*

# Restoring Ecosystem Carbon Sequestration Through Legume Species Afforestation: A Case Study for Karst Desertification Restoration

温远光<sup>1\*\*</sup>, 张健<sup>1</sup>, 严理<sup>1</sup>, 朱宏光<sup>1</sup>, 周晓果<sup>1</sup>, 尤业明<sup>1</sup>, 陆志成<sup>2</sup>

WEN Yuan-guang<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>, YAN Li<sup>1</sup>, ZHU Hong-guang<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-guo<sup>1</sup>, YOU Ye-ming<sup>1</sup>, LU Zhi-cheng<sup>2</sup>

(1. 广西大学林学院, 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广西南宁 530004; 2. 北京林业大学林学院, 北京 100083)

(1. State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources, Forestry College of Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Forestry College of Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China)

**摘要:**【目的】评估豆科植物功能群在恢复石漠化土地生态功能(如碳固持)中的速率及效果。【方法】以豆科植物顶果木 *Acrocarpus fraxinifolius*、降香黄檀 *Dalbergia odorifera* 为驱动种实施再造林, 对顶果木纯林、降香黄檀纯林、顶果木×降香黄檀混交林和对照(自然恢复的灌丛)进行系列取样调查, 研究不同恢复类型群落的生物量、碳储量和碳固持速率。【结果】顶果木纯林、降香黄檀纯林和顶果木×降香黄檀混交林群落的生物量、碳储量和碳固持速率均显著高于对照, 高出灌丛 8 倍以上; 在 3 种恢复模式中, 以顶果木纯林的生物量、碳储量和碳固持速率最高, 降香黄檀纯林最低, 顶果木×降香黄檀混交林居二者之间; 方差分析结果表明, 3 种恢复模式的生物量、碳储量和碳固持速率与对照存在显著差异, 但 3 种恢复类型间差异不显著。【结论】应用豆科植物功能群恢复石漠化土地的生物碳固持能力可以取得快速、高效和显著的效果, 建议推广应用。

**关键词:** 豆科植物 功能群 恢复 石漠化 生物量碳

中图分类号: Q143 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2015)06-0573-05

**Abstract:**【Objective】Through afforestation of legume species, the effects of restoration on ecological functions were evaluated in order to provide guidance for future restoration projects on karst desertification lands.【Methods】Three restoration forests (*Acrocarpus fraxinifolius*, *Dalbergia odorifera* pures, and the mixture of *A. fraxinifolius* and *D. odorifera*) and one experimental control (natural recovery) were estimated. Their differences in biomass, carbon stocks and carbon sequestration rate were evaluated, including above-ground and below-ground carbon pools, forest floor litter, and woody and herbaceous species.【Results】The biomass, carbon stocks, and carbon sequestration rate in the three restoration types were significantly higher than that in the control sites (more than over 8 times), but there were no significant differences in biomass, carbon stocks, and carbon sequestration rate between the restoration types. Among the three restoring models, the biomass, carbon stocks, and carbon sequestration rate were highest in *A. fraxinifolius* pure forest, followed by

收稿日期: 2015-10-26

作者简介: 温远光(1957—), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事森林生态和森林培育研究。

\* 国家自然科学基金项目(31460121), 国家科技支撑计划项目(2011BAC09B02, 2012BAD22B01)和广西重大专项计划项目(1222005)资助。

\*\* 通讯作者: E-mail: wenyg@263.net.

the mixture of *A. fraxinifolius* and *D. odorifera*, and lowest in *D. odorifera* pure forest. **【Conclusion】**This study clearly demonstrated that active restoration can enhance ecosystem carbon sequestration in the area of karst desertification.

**Key words:** legume, functional group, restoration, karst desertification, biomass carbon stock

## 0 引言

**【研究意义】**陆地生态系统碳循环、碳固持潜力、碳源汇格局及其驱动机制是当前国际气候变化科学界广泛关注的前沿科学问题<sup>[1]</sup>。历史上我国西南岩溶地区森林植被繁茂,由于长期的人为干扰和破坏,这些区域出现了大面积的岩溶退化生态系统和石漠化景观,导致岩溶生态系统功能(碳固持能力和碳固持潜力等)急剧退化<sup>[2~4]</sup>,严重影响区域经济、社会及环境的可持续发展,石漠化的综合治理已成为国家战略目标<sup>[4]</sup>。因此,迫切需要深入开展石漠化生态系统植被恢复,特别是碳固持能力、碳循环机制及其驱动力机制的研究,藉以增强对石漠化治理对岩溶生态系统固碳潜力及其不确定性的科学认识。**【前人研究进展】**我国退化生态系统恢复实践始于20世纪60年代,20世纪80年代以来出版了大量的研究论著<sup>[5~12]</sup>。恢复的策略主要是封山育林、以先锋种造林驱动生态系统恢复<sup>[5]</sup>。最近,魏晓华等<sup>[13]</sup>提出以顶极种驱动红壤区退化生态系统的恢复并取得显著成效。但应用豆科植物功能群作为驱动种恢复石漠化生态系统功能(如碳固持)的研究尚未见报道。**【本研究切入点】**在全球气候变化和石漠化的双重胁迫下,岩溶生态系统缺土缺水少肥的问题越加突出,应用自肥功能强、水分利用高效的豆科植物功能群驱动石漠化生态系统的恢复将获得更为快速、高效的恢复效果。**【拟解决的关键问题】**探讨应用豆科植物功能群恢复石漠化生态系统功能(碳固持能力)的可能性及效果。

## 1 材料与方 法

### 1.1 环境概况

研究地点位于广西壮族自治区中部的马山县(107°41'~108°29'E, 23°24'~24°2'N),县域东西长约80 km,南北宽约50 km,总面积2364 km<sup>2</sup>,属亚热带季风型气候。年均气温21.3℃,最高温度38.9℃,最低温度-0.7℃;年均降雨量1667.1 mm,雨量充沛,但分布不均,夏季多暴雨,易发生洪涝,春秋两季雨水少,易造成干旱;相对湿度76%;平均无霜期343 d。马山县的土壤主要以碳酸盐岩发育的石

灰土为主,石粒含量高,质地粘重,土层浅薄,岩基裸露度大,土壤pH值呈弱碱性;土山区土壤为赤红壤,土层较深厚,土壤pH值呈弱酸性,肥力中等偏下。在广西森林分区中,马山县属于南亚热带季雨林化常绿阔叶林地带、桂中石山青冈仪花青檀林区<sup>[14]</sup>。土山区地带性植被为以大叶栎(*Castanopsis fissa*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)、纳稿润楠(*Machilus nakao*)等为优势种的季雨林化常绿阔叶林(在《中国植被》中称为季风常绿阔叶林);在岩溶石山区隐域性植被为以青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、青檀(*Pteroceltis tatarinowii*)、小化香(*Platycarya glandulosa*)、仪花(*Lysidice rhodostegia*)等为优势种的石灰岩常绿落叶阔叶混交林<sup>[14]</sup>。由于长期人为干扰或破坏,这些森林早已荡然无存,退化为各种次生植被或各种人工植被。境内岩溶地貌发育,生态环境脆弱,是广西石漠化最严重的地区之一。石漠化面积占总面积的54.8%,其中重度石漠化面积达82.1%、中度为15.7%、轻度为2.3%<sup>[15-16]</sup>。石漠化已成为该县生态环境的突出问题,严重制约其经济、社会的可持续发展。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验林的建立

2010年8月,在对马山县石漠化区域进行全面踏查的基础上,选定马山县白山镇民族村约50 hm<sup>2</sup>石漠化土地作为试验地。2011年2月,选择顶果木(*Acrocarpus fraxinifolius*)、降香黄檀(*Dalbergia odorifera*)2种豆科植物进行造林,分别建立顶果木纯林、降香黄檀纯林和顶果木×降香黄檀混交林各15 hm<sup>2</sup>,剩余的5 hm<sup>2</sup>为石漠化保留地(对照)。样地概况见表1。

#### 1.2.2 群落调查与生物量测定

2015年7月,选择代表性地段,分别在不同林分类型设立20 m×20 m样地,每个类型3次重复。将每个400 m<sup>2</sup>样地进一步细分为4个10 m×10 m中样方、16个5 m×5 m和16个1 m×1 m的小样方,以中样方为单位,记录每个乔木个体的种名、胸径、树高以及林冠郁闭度;以小样方为单位分别调查灌木层(5 m×5 m)和草本层(1 m×1 m)的物种种名、个体数、高度和盖度。

表 1 调查样地的海拔及林分概况

Table 1 Stand factors and altitude in plots

类型 Types	树种 Species	样地号 Plot	海拔 Altitude(m)	密度 Density (n/hm <sup>2</sup> )	平均胸径 Average diameter at breast height(cm)	平均树高 Average height(m)
纯林 Pure plantation	降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	1	285	1550	4.8	5.6
		2	275	1525	5.7	5.6
		3	295	1750	4.3	4.7
		平均 Mean	285	1608	4.9	5.3
纯林 Pure plantation	顶果木 <i>A. fraxinifolius</i>	1	308	1300	7.1	7.1
		2	300	1600	6.5	6.9
		3	292	1350	7.3	8.6
		平均 Mean	300	1417	7.0	7.5
混交林 Mixed plantation	顶果木×降香黄檀 <i>A. fraxinifolius</i> × <i>D. odorifera</i>	1	295	1225	6.2	6.6
		2	290	1475	5.5	6.7
		3	280	1875	6.1	7.3
		平均 Mean	288	1525	5.9	6.9
灌丛 Shrub		1	285			
		2	257			
		3	257			
		平均 Mean	266			

在群落调查的基础上,每种树种选取 5~7 株样木,伐倒后按 2 m 区分段测定树干、树枝和树叶的生物量;根系按全挖法,分根莖、粗根、细根和吸收根测定生物量。对每个组分生物量取样 500 g,带回室内,以 85℃ 烘干至恒重,以测定干物质重。

采用收获法测定林下植被和枯落物的生物量。其中,灌木层的收获样方面积为 2 m×2 m,草本层和枯落物为 1 m×1 m。将样方内所有植物、枯落物收获,按地上、地下部分分别称重,取部分样品(约 500 g),带回实验室测定含水率。

### 1.2.3 生物量的计算

在样木生物量测定的基础上,按照相对生长模型(回归方程为  $W = a(D^2 H)^b$ )对生物量测定样木实验数据进行拟合,建立降香黄檀、顶果木器官生物量估

表 2 不同树种的器官生物量估算模型

Table 2 Allometric equations of the organs in different trees

树种 Species	组份 Component	回归方程 Allometric equations	R <sup>2</sup>
降香黄檀 <i>D. odorifera</i>	树干 Stem	$W_S = 0.0275 \times (D^2 H)^{1.0082}$	0.9831
	树枝 Branches	$W_{BR} = 0.0020 \times (D^2 H)^{1.3205}$	0.9396
	树叶 Leaves	$W_L = 0.0232 \times (D^2 H)^{0.8149}$	0.8057
	树根 Roots	$W_R = 0.0062 \times (D^2 H)^{1.1112}$	0.9880
顶果木 <i>A. fraxinifolius</i>	树干 Stem	$W_S = 0.0638 \times (D^2 H)^{0.8225}$	0.9912
	树枝 Branches	$W_{BR} = 0.0012 \times (D^2 H)^{0.9756}$	0.9101
	树叶 Leaves	$W_L = 0.0120 \times (D^2 H)^{0.6649}$	0.8638
	树根 Roots	$W_R = 0.0185 \times (D^2 H)^{0.8125}$	0.9511

算模型(表 2),根据表 2 的生物量估算模型计算不同林分乔木层的生物量。

林下和灌草丛植被层和枯枝落叶层生物量采用公式<sup>[17]</sup>:  $W = \sum W_i / an \times 10000$  计算求得每公顷生物量(式中:  $W_i$  为各样方测得的生物量,  $a$  为样方面积,  $n$  为样方数)。

### 1.2.4 生物碳储量的估算

在森林生态系统碳贮量的研究中,国际上常用 0.45 与 0.50<sup>[18]</sup> 作为植被和凋落物平均含碳率的转换系数。鉴于岩溶区植物碳含量较高<sup>[19]</sup>,本研究的植物碳储量选择 0.50 的指标计算。生物碳固持速率:  $NPP = BC/a$ , 式中  $NPP$  为生物碳固持速率,  $BC$  为生物量碳,  $a$  为群落(林分)年龄。

### 1.2.5 数据的统计分析

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)分别比较4种恢复类型群落生物量、碳储量和碳固持速率的差异程度,数据分析在SPSS18.0软件下完成,采用LSD程序分析比较不同类型各均值的差异性,显著性水平设为 $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 群落生物量

研究表明,应用豆科植物功能群恢复石漠化土地,造林4年后,群落的总生物量的大小顺序为顶果木纯林( $20.52 \text{ t/hm}^2$ ) $>$ 顶果木 $\times$ 降香黄檀混交林( $18.44 \text{ t/hm}^2$ ) $>$ 降香黄檀纯林( $15.82 \text{ t/hm}^2$ ) $>$ 灌丛( $2.95 \text{ t/hm}^2$ )。方差分析表明,用豆科植物功能群恢复的群落生物量显著高于灌丛(对照)( $P < 0.01$ ),而3种恢复类型间差异不显著( $P > 0.05$ )(图1a)。

### 2.2 群落碳储量

由图1b可以看出,应用豆科植物功能群恢复石漠化植被,4年后其生物碳储量显著高于灌丛(对照, $P < 0.05$ ),而两种豆科植物纯林、纯林与混交林之间差异都不显著( $P > 0.05$ ),比较不同层次的碳储量发现,灌丛虽经历8~10年的恢复,其仍然缺乏乔木层的碳固持能力。3种恢复类型乔木层碳储量无显著差异。群落灌木层的碳储量,以灌丛类型最高,显

著高于3种人工恢复类型,降香黄檀群落的灌木层碳储量显著高于顶果木 $\times$ 降香黄檀混交林,降香黄檀纯林与顶果木纯林间差异不显著。总体上,豆科植物恢复类型群落的草本层、枯落物层碳储量高于灌丛,但差异不显著(图1b)。

### 2.3 群落碳固持速率

从图2可以看出,不同恢复类型群落的碳固持速率,以顶果木纯林为最高,平均为 $2.65 \text{ t} \cdot \text{C}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ,其次为顶果木 $\times$ 降香黄檀混交林( $2.27 \text{ t} \cdot \text{C}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ )和降香黄檀纯林( $2.01 \text{ t} \cdot \text{C}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ),灌丛最小,只有 $0.13 \text{ t} \cdot \text{C}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 。方差分析表明,3种恢复类型群落的碳固持速率均显著高于灌丛( $P < 0.05$ )。

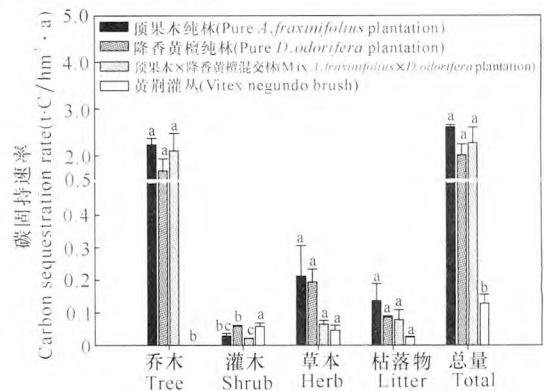


图2 不同恢复类型群落的碳固持速率

Fig. 2 Carbon sequestration rate in different restoration types

## 3 讨论

早期研究表明,在极度退化的生态系统中只有先锋种(如马尾松 *Pinus massoniana*)才能启动退化生态系统的恢复<sup>[5]</sup>。最近的研究表明,一些顶极种(如荷木 *Schima superba*、枫香 *Liquidambar formosana*)用于红壤区退化生态系统恢复同样可以提高生态系统的碳固持<sup>[13]</sup>。在石漠化地区,通常以封山育林方式恢复植被和生态系统功能<sup>[1]</sup>,但此种自然恢复过程需要数十年甚至上百年的时间<sup>[3]</sup>。本研究发现,应用降香黄檀等豆科植物功能群恢复石漠化土地的生物碳固持能力是可行的,它不仅能够快速地恢复森林景观,增强退化生态系统的服务功能,还具有很高的经济价值。

本研究还发现,豆科植物功能群显著提高石漠化土地的生物碳固持速率。无论是纯林还是混交林,其生物碳固持速率均比对照(灌丛)高15倍。因此,建议在广西南部、西部和中部石漠化地区大力发展顶果木和降香黄檀。从林分结构上看,以混交林模式的恢复效果更好。

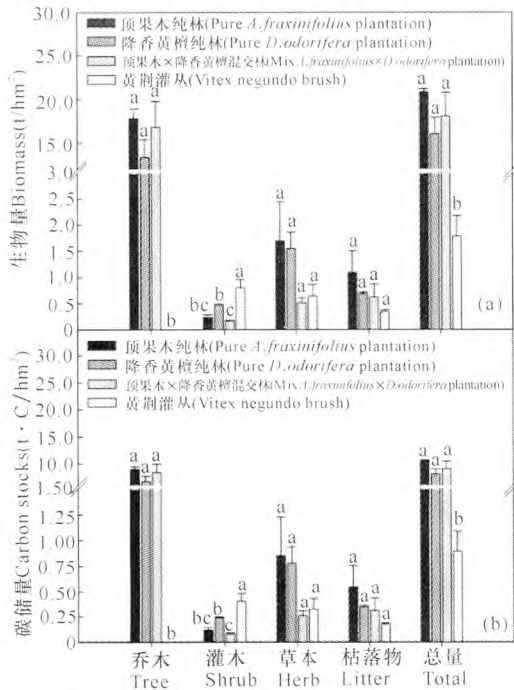


图1 不同恢复类型群落的生物量和碳储量

Fig. 1 Biomass and carbon stocks in different restoration types

参考文献:

- [1] 刘世荣,温远光,蔡道雄,等.气候变化对森林的影响与多尺度适应性管理研究进展[J].广西科学,2014,21(5):419-435.  
Liu S R, Wen Y G, Cai D X, et al. Impacts of climate change on forests and adaptive multi-scales management: A review[J]. Guangxi Sciences, 2014, 21(5): 419-434.
- [2] Qi X K, Wang K L, Zhang C H. Effectiveness of ecological restoration projects in a karst region of southwest China assessed using vegetation succession mapping[J]. Ecological Engineering, 2013, 54: 245-253.
- [3] Wen Y G, Sun D J, Zhu H G, et al. Changes in above-ground biomass and diversity between different stages of secondary succession of a karst vegetation in Guangxi, China[M]//Hu J (ed.). Advances in Biomedical Engineering. Information Engineering Research Institute. Newark, USA: IERI, 2011: 420-423.
- [4] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [5] 彭少麟. 热带亚热带恢复生态学研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Peng S L. Study and Application of Restoration Ecology in Tropical and Subtropical China[M]. Beijing: Science Publishing House, 2003.
- [6] 蒋忠诚, 李先琨, 胡宝清. 广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
Jiang Z C, Li X K, Hu B Q. Rocky Desertification in Karst Mountainous Areas in Guangxi and Its Comprehensive Treatment [M]. Beijing: Science Publishing House, 2011.
- [7] 杨汉奎, 程仕泽. 贵州茂兰喀斯特森林群落生物量研究[J]. 生态学报, 1991, 11(4): 307-312.  
Yang H K, Cheng S Z. Study on biomass of the karst forest community in Maolan, Guizhou province[J]. Acta Ecologica Sinica, 1991, 11(4): 307-312.
- [8] 朱守谦, 魏鲁明, 陈正仁, 等. 茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究[J]. 植物生态学报, 1995, 19(4): 358-367.  
Zhu S Q, Wei L M, Chen Z R, et al. A preliminary study on biomass components of karst forest in Maolan of Guizhou province, China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1995, 19(4): 358-367.
- [9] 刘长成, 魏雅芬, 刘玉国, 等. 贵州普定喀斯特次生林乔灌层地上生物量[J]. 植物生态学报, 2009, 33(4): 698-705.  
Liu C C, Wei Y F, Liu Y G, et al. Biomass of canopy and shrub layers of karst forests in Puding, Guizhou, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(4): 698-705.
- [10] 屠玉麟, 杨军. 贵州中部喀斯特灌丛群落生物量研究[J]. 中国岩溶, 1995, 14(3): 199-208.  
Tu Y L, Yang J. Study on biomass of the karst shrub community in central region of Guizhou province[J]. Carsologica Sinica, 1995, 14(3): 199-208.
- [11] 罗东辉. 贵州茂兰喀斯特植被不同演替阶段的生物量和净初级生产力[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.  
Luo D H. Biomass and Net Primary Productivity in Different Successional Stages of Karst Vegetation in Maolan, Guizhou Province, S W China [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [12] 罗东辉, 夏婧, 袁婧薇, 等. 我国西南山地喀斯特植被的根系生物量初探[J]. 植物生态学报, 2010, 34(5): 611-618.  
Luo D H, Xia J, Yuan J W, et al. Root biomass of karst vegetation in a mountainous area of southwestern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(5): 611-618.
- [13] Wei X H, Li Q L, Liu Y Q, et al. Restoring ecosystem carbon sequestration through afforestation: A sub-tropic restoration case study[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 60-67.
- [14] 李治基. 广西森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.  
Li Z J. Guangxi Forests[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001.
- [15] 罗贵荣, 梁小平, 李兆林. 岩溶石山地区石漠化的危害与治理对策初探——广西马山岩溶地下河流为例[J]. 现代农业科学, 2008, 15(11): 97-98.  
Luo G R, Liang X P, Li Z L. Preliminary study on story desertification calamity and its harnessing countermeasure in karst rock area of Guangxi[J]. Modern Agricultural Sciences, 2008, 15(11): 97-98.
- [16] 邓必玉, 马一琳, 许仕道, 等. 广西马山县岩溶土地石漠化动态变化情况及变化原因分析[J]. 广西林业科学, 2012, 41(4): 365-369.  
Deng B Y, Ma Y L, Xu S D, et al. Dynamic changes and cause analysis of rocky desertification in karst areas of Mashan county in Guangxi[J]. Guangxi Forestry Sciences, 2012, 41(4): 365-369.
- [17] 温远光. 桉树生态、社会问题与科学发展[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.  
Wen Y G. *Eucalyptus* Ecological, Social Issues and Scientific Development[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2008.
- [18] Fang J Y, Chen A P, Peng C H. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [19] 曹娟. 喀斯特贵阳市 4 种森林生物量和碳储量研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.  
Cao J. The Research about Biomass and Carbon Storage of 4 Kinds of Urban Forest in Guiyang in Krast Area [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2012.

(责任编辑:尹 闯)