

文章编号: 1008 - 2786 - (2016) 6 - 707 - 09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000177

# 西双版纳不同复合农林模式橡胶林碳储量及固碳潜力

莫慧珠<sup>1,2</sup>, 沙丽清<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南昆明 650223;

2. 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049)

**摘 要:** 以新垦植橡胶林、成熟橡胶林、高海拔橡胶林为研究对象, 对其进行人为固碳增汇管理, 比较三种复合农林模式橡胶林与同条件下橡胶纯林的植被碳储量及其未来固碳潜力, 并分析三种复合农林橡胶林土壤碳储量。植被生物量碳储量通过各类增汇植物的生物量回归模型、热带树种生物量通用模型、异速生长模型进行拟合预测; 土壤碳储量通过土壤剖面分层采样(0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm, 20 ~ 30 cm, 30 ~ 50 cm, 50 ~ 100 cm) 进行估算。研究显示: 1. 复合农林橡胶林现存生物量碳储量为 1.19 ~ 52.89 t/hm<sup>2</sup>, 10 a 后固碳潜力为 1.28 ~ 106.08 t/hm<sup>2</sup>, 20 a 后固碳潜力为 2.23 ~ 233.89 t/hm<sup>2</sup>; 2. 林下添加增汇植物后土壤碳储量显著高于橡胶林, 新垦植模式中, 橡胶 + 大叶千斤拔土壤碳储量比橡胶林增加 54.95 t/hm<sup>2</sup>; 成熟橡胶林模式中, 橡胶 + 大叶千斤拔土壤碳储量比橡胶林增加 35.58 t/hm<sup>2</sup>, 橡胶 + 可可土壤碳储量比橡胶林增加 4.33 t/hm<sup>2</sup>。结果表明: 构建复合农林橡胶林可总体提高橡胶林植被碳储量及固碳潜力, 提高土壤碳储量, 但增汇植物种类、种植密度、生长速度不同, 固碳潜力大小不一。

**关键词:** 橡胶林; 复合农林; 碳储量; 固碳潜力; 西双版纳

中图分类号: Q948

文献标志码: A

已有研究显示<sup>[1-3]</sup>, 农林复合系统无论在经济效益、社会效益、还是生态效益上, 都是有益的综合土地利用方式。而自《京都议定书》明确肯定复合农林系统在减少温室气体排放策略中的重要性后, 其固碳能力更是受到广泛关注<sup>[4]</sup>。复合农林系统因其具有从林分、土壤中直接固定碳的能力, 且林分、林下作物、土壤之间复杂的相互作用, 对碳的储存具有巨大潜力<sup>[5]</sup>。Nair<sup>[6]</sup>的预测结果表明, 布局合理的农林系统, 在未来 50 年内, 可从大气中吸收 1.1 ~ 2.2 Pg C。因此, 研究农林复合系统的固碳潜力及其影响因素对深入理解陆地生态系统的碳循环过程和缓解气候变化具有重要的意义<sup>[7-8]</sup>。

尽管复合农林系统碳储量及固碳潜力已有相当多研究<sup>[9]</sup>, 但关于热带橡胶林复合农林系统碳储量及固碳潜力的研究尚少。橡胶树(*Hevea brasiliensis*) 为大戟科植物, 原产于南美洲亚马逊河流域热带雨林中, 喜高温、高湿环境, 因其乳胶的经济价值引起人类重视, 故于低纬度地区大面积扩种。橡胶林也是云南西双版纳地区最主要的人工林, 且以纯林为主。橡胶种植区域性强, 据云南省《橡胶树栽培技术规程》西双版纳橡胶种植的海拔上限为 950 m。西双版纳橡胶纯林大规模种植, 不仅取代了原本低海拔地区热带雨林、季雨林植被, 甚至已扩展到海拔较高的山地。橡胶纯林大规模种植存在诸多问题:

收稿日期(Received date): 2016 - 03 - 11; 修回日期(Accepted): 2016 - 04 - 01。

基金项目(Foundation item): 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070304); 中国科学院“一三五”专项——突破三(XTBG-T03); 国家自然科学基金重大项目(31290221); 中国科学院科技服务网络计划(STS计划)项目(KFJ-EW-ST-084); 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833501) [“Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences (XDA05070304); CAS 135 Program (XTBG-T03); Key program of NSF (31290221); Science and Technology Service Network Initiative of Chinese Academy of Sciences (No. KFJ-EW-ST-084) and Development Program in Basic Science of China (2010CB833501)]

作者简介(Biography): 莫慧珠(1989-), 女, 广西贺州人, 硕士研究生, 主要从事橡胶林复合农林的研究 [Mo Huizhu (1989-), female, born in Hezhou of Guangxi Province, M. Sc. candidate, mainly study agroforestry ecosystem of rubber plantation] E-mail: mhzjiayu@163.com

\* 通信作者(Corresponding author): 沙丽清, 男, 研究员 [Sha Liqing, male, professor] E-mail: shalq@xtbg.ac.cn

新垦植/更新橡胶林经过 7~9 a 的生长才能产胶,期间胶农经济收入难以得到保障;高海拔的山地由于温度较低,橡胶树生长缓慢甚至停止生长,不仅影响产胶量,还易引发水土流失、土壤质量下降等生态问题;传统种植的成熟橡胶林结构简单,株行距宽,空地杂草的生长夺取橡胶树养分、水分,易造成土壤养分和阳光的浪费<sup>[10]</sup>。

本研究针对西双版纳橡胶纯林存在的问题,于新垦植橡胶林、高海拔橡胶林、成熟橡胶林间种植适宜的植物,构建复合农林橡胶林系统,旨在增加人工橡胶林的植被与土壤碳储量,提高固碳能力。通过拟合橡胶树与林下增汇植物个体生物量生长模型,着重探讨复合农林橡胶林在无成片砍伐、死亡条件下的现有植被碳储量,预测未来 10 a、20 a 后的碳储量及固碳潜力,并估算土壤现存碳储量。由于因土地利用方式变化导致的土壤碳储量变化非常缓慢,且不同学者对土壤固碳潜力理解不一,导致土壤未来固碳潜力的评估预测困难重重<sup>[11-13]</sup>,故不在本文研究范围之内。研究结果将为本地区橡胶林固碳增汇技术试验示范提供理论依据,为促进当地经济与环境健康可持续发展和减缓全球变化提供可行方法。

## 1 研究区域概况

研究区域位于云南省西双版纳傣族自治州(21°08'N~22°36'N,99°56'E~101°50'E),地处大陆东南亚热带北缘,属于北热带季风气候,面积约 1.915 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。全年干湿分明,有雨季(5—10 月)和干季(11 月至翌年 4 月)之分,其中干季又可分为雾凉季(11 月至翌年 2 月)和干热季(3—4 月)<sup>[14]</sup>。年平均降雨量为 1557mm,干季降水和雨季降水分别占全年降水量的 17% 和 83%,全年平均气温为 21.4°C,最热的 5 月均温为 25.3°C,最冷的 1 月均温为 15.6°C。西双版纳森林植被可分为热带雨林、热带季节性湿润林、热带季雨林和热带山地常绿阔叶林四个主要的植被类型<sup>[15]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设置

根据西双版纳地区橡胶林不同海拔、树龄、种植规格、立地条件,建立 3 种橡胶林复合农林模式(表

1):未产生经济收益的新垦植橡胶林中,适当降低橡胶种植密度,添加珍稀树种及木材树种,并在台地间种植大叶千斤拔(*Flemingia macrophylla*)、咖啡(*Coffea arabica*)、可可(*Theobroma cacao*)等收益周期快的经济作物为增汇植物;生长缓慢的高海拔橡胶林中,在林下及林间空地添加种植适宜该环境下生长的格木(*Erythrophleum fordii*)、铁力木(*Mesua ferrea*)、望天树(*Parashorea chinensis*)、羯布罗香(*Dipterocarpus turbinatus*)、长叶竹柏(*Podocarpus fleuryi*)作为增汇植物;在林间空隙大的成熟橡胶林下间种具有一定耐阴性的可可、大叶千斤拔作物作为增汇植物,均统一于 2012 年春种植。

### 2.2 植被生物量、碳储量、固碳潜力的估算

#### 2.2.1 植被生物量、碳储量的估算

植被生物量采用生物量模型法估算。于 2015 年 3 月底测定橡胶林及林下增汇植物胸径(*D*)、地径(*BD*)、树高(*H*)等生长量指标,每个树种 15 个样本重复,并参考中国科学院西双版纳热带植物园内种植的不同树龄的成树的历史观测生长量数据,包括各个树种的胸径、树高,依据已有的生物量模型<sup>[16-24]</sup>估算各类树种的不同树龄阶段的植被生物量。林下增汇植物多为热带珍稀树种,部分树种尚未建立生物量模型,采用热带树种通用生物量模型<sup>[25]</sup>进行估算。

对估算出来的橡胶树和各类增汇植物的植被生物量与树龄进行曲线回归拟合,求出橡胶树及各增汇植物个体生物量与树龄的回归关系。利用拟合所得的回归方程预测未来 10 a、20 a 后的各增汇植物的生物量。其中,产胶期橡胶树生物量的计算还包括橡胶树的年产胶量。地上部分生物量与碳储量的换算,采用目前国际上通用的转换系数 0.5<sup>[26]</sup>。

#### 2.2.2 植被固碳潜力的估算

各个复合农林模式中,以橡胶纯林碳储量为参照系,橡胶纯林碳储量与添加树种的碳储量之和视为潜在固碳水平,固碳潜力理解为在橡胶纯林经过复合农林管理而增加的碳储量,即增汇树种的碳储量,具体计算公式为<sup>[27]</sup>

$$PICS_{\text{固碳潜力}} = CSC_{\text{复合农林模式碳储量}} - CSC_{\text{橡胶纯林碳储量}}$$

### 2.3 土壤碳储量计算

选择具有代表性的复合农林橡胶林模式,于 2015 年 3 月底进行土壤剖面分层采样,每个试验处理随机取 3 个土壤剖面重复。共计 18 个土壤剖面。采样深度分别是 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、

表1 不同橡胶林样地基本信息

Tab. 1 Basic information of different type of rubber plantation plots

复合模式	样地名	经纬度	海拔/m	面积/hm <sup>2</sup>	植胶时间	植胶密度	林下物种及种植密度
新垦植橡 胶林模式	版纳植物园	21°53'N	560	6.67	2012年	450株/hm <sup>2</sup>	增汇树种: 望天树、柚木( <i>Tectona grandis</i> )、海船( <i>Oroxylum indicum</i> )、坡垒( <i>Hopea hainanensis</i> )、波罗蜜( <i>Artocarpus heterophyllus</i> )、蛋黄果( <i>Lucuma nervosa</i> )——105株/hm <sup>2</sup>
	推广示范区	101°16'E					经济作物: 大叶千斤拔——9990株/hm <sup>2</sup> 可可——660株/hm <sup>2</sup> 咖啡——3990株/hm <sup>2</sup>
高海拔橡 胶林模式	普文林场	22°25'N 101°06'E	950	6.67	2004年	495株/hm <sup>2</sup>	增汇树种: 羯布罗香、望天树、长叶竹柏、格木、铁力木——250株/hm <sup>2</sup>
成熟橡胶 林模式	田野公司 橡胶基地	21°50'N 101°15'E	837	13.34	2002年	495株/hm <sup>2</sup>	经济作物: 大叶千斤拔——9990株/hm <sup>2</sup> 可可——660株/hm <sup>2</sup>

30~50 cm、50~100 cm。自下而上取样,每层3个100 cm<sup>3</sup>的环刀重复,另取500 g土样袋装密封,所有土样带回实验室。将环刀内土壤放入烘箱,在105±2℃下烘干24 h,在干燥器中冷却后称量,并计算土壤容重。袋装土样取回室内,置于干净白纸上,拣出杂物,风干研磨,过100目筛。西双版纳酸性土壤中土壤有机碳(SOC)占土壤全碳(TC)绝大部分,故土壤含碳量可直接采用碳-氮分析仪(vario MAX CN)测定,该方法较重铬酸钾氧化法操作简单,干扰因素少,且在高温下溶液中的有机碳能够彻底分解,因此测量结果准确<sup>[28]</sup>。土壤有机碳储量计算公式为<sup>[29]</sup>

$$SOC = \sum_{i=1}^5 (C_i \times d_i \times D_i)$$

式中 SOC 为土壤有机碳储量,单位为 t/hm<sup>2</sup>;  $d_i$  为土壤容重,单位为 t/m<sup>3</sup>;  $C_i$  为土壤含碳量,是一个百分比;  $D_i$  为土层厚度,单位为 m。

### 3 结果与分析

#### 3.1 植物个体生物量与树龄的关系

橡胶及增汇植物个体生物量与树龄关系的拟合结果见表2。14个树种中有13个树种  $R^2 > 0.8$ , 10个树种  $R^2 > 0.9$  表明 Logistic 曲线较好地拟合了增汇植物个体生物量与树龄之间的关系。少部分增汇植物指数模型拟合效果优于 Logistic 模型,可能是因为目前已有的生长量数据仅是整个生长周期的部分数据,缺乏增汇植物生长周期后期的数据。

#### 3.2 植被碳储量及固碳潜力

##### 3.2.1 新垦植橡胶林模式植被碳储量及固碳潜力

植物的生长和生命周期是决定橡胶林生态系统碳储量及固碳潜力的主要因素。物种不同,生长速率不同。生长较快的植物比其他植物在建植初期具有更高的固碳潜力,但慢速生长的物种能在长时间尺度上积累更多的碳。经济作物如咖啡、大叶千斤拔生长快,生物量累积速率高,林下树种如热带珍稀树种望天树、柚木、海船、坡垒以及果树波罗蜜、蛋黄果为慢速生长物种,且间种密度低于经济作物密度,故间种大叶千斤拔后现存碳储量(39.34±5.43 t/hm<sup>2</sup>)与间种可可后现存碳储量(9.41±0.83 t/hm<sup>2</sup>)显著高于间种各类增汇树种,但慢速生长的柚木、海船、望天树等热带树种未来碳储量及固碳潜力更高。10 a后,橡胶+柚木植被碳储量最高(46.06 t/hm<sup>2</sup>),与同时期橡胶纯林相比,固碳潜力为11.98 t/hm<sup>2</sup>,在西双版纳主要森林植被碳储量范围(8.60~70.90 t/hm<sup>2</sup>)之内<sup>[31]</sup>。20 a后,橡胶+可可植被碳储量最高(138.66 t/hm<sup>2</sup>),与同时期橡胶纯林相比,固碳潜力为62.68 t/hm<sup>2</sup>,高于西双版纳主要森林植被平均碳储量(51.13 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[32]</sup>,在热带森林植被平均碳储量(60~250 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[33]</sup>范围之内。

大叶千斤拔每年年底刈割枝叶还田,种植3~5 a收获根部,故更新周期为3~5 a。橡胶幼龄期林分郁闭度小,光热条件良好,大叶千斤拔生长最快。橡胶幼林发展为成熟胶林后,大叶千斤拔在荫蔽条件下生长缓慢,生物量碳储量累积慢。成熟橡胶林下大叶千斤拔生长慢,其植被碳储量数据引用王秀华<sup>[34]</sup>在成熟胶林下对大叶千斤拔的研究结果。

##### 3.2.2 高海拔恢复模式植被碳储量及固碳潜力

高海拔橡胶林添加增汇植物后现存碳储量差异

不显著(见表4),主要因为增汇植物为林龄2年的幼树,生物量碳储量小。添加种植增汇树种后,碳储量高于橡胶纯林,碳储量随时间的增加而增加。橡胶+格木现存植被碳储量及未来碳储量、固碳潜力高于其余增汇树种。10 a后植被碳储量(146.89 t/hm<sup>2</sup>)高于西双版纳主要森林植被平均碳储量(51.13 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[32]</sup>; 20 a后植被碳储量(293.33 t/

hm<sup>2</sup>)高于西双版纳热带季节雨林碳储量(174.02 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[35]</sup>,在热带森林植被平均碳储量(60~250 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[33]</sup>范围之内。

### 3.2.3 成熟橡胶林模式植被碳储量及固碳潜力

由表5知,成熟橡胶林模式植被碳储量及固碳潜力随时间增加而增加。10 a后,橡胶+可可植被碳储量(92.16 t/hm<sup>2</sup>)及固碳潜力(10.87 t/hm<sup>2</sup>)高于

表2 不同树种生长曲线拟合

Tab.2 Growth curves of different tree species

树种	生长曲线方程	方程类型	适用树龄/a	P	R <sup>2</sup>
橡胶	$W = 1076.06 / (1 + e^{-(x-29.62)/9.74})$	Logistic 模型	2~50	<0.0001	0.94
橡胶 <sup>1</sup>	$W = 139.76 / (1 + 17.83e^{-0.14x})$	Logistic 模型	2~26	/	0.96
波罗蜜	$W = 82.37 / (1 + e^{-(x-16.84)/6.35})$	Logistic 模型	2~35	<0.0001	0.97
海船	$W = 489.08 / (1 + e^{-(x-15.07)/1.35})$	Logistic 模型	2~22	<0.0001	0.98
坡垒	$W = 547.77 / (1 + e^{-(x-28.71)/7.69})$	Logistic 模型	2~25	<0.0001	0.76
可可	$W = 244.36 / (1 + e^{-(x-19.00)/2.40})$	Logistic 模型	2~23	<0.0001	0.98
铁力木	$W = 1487.64 / (1 + e^{-(x-46.89)/10.32})$	Logistic 模型	2~45	<0.0001	0.92
长叶竹柏	$W = 460.60 / (1 + e^{-(x-14.19)/2.21})$	Logistic 模型	2~25	<0.0001	0.98
褐布罗香	$W = 689.18 / (1 + e^{-(x-18.02)/7.25})$	Logistic 模型	2~30	<0.0001	0.81
格木	$W = e^{8.48 - 20.87/x}$	指数模型	2~35	<0.0001	0.94
咖啡	$W = e^{1.82 - 1.86/x}$	指数模型	2~15	0.026	0.89
蛋黄果	$W = e^{0.10 + 0.19x}$	指数模型	2~25	<0.0001	0.87
望天树	$W = e^{1.21 + 0.17x}$	指数模型	2~32	<0.0001	0.98
柚木 <sup>2</sup>	$W = 5.543x - 20.24^3$	line 模型	2~25	/	0.80

注:1 高海拔橡胶生长曲线引用宋清海<sup>[30]</sup>的研究结果

2 柚木生长曲线模型参考Jain<sup>[18]</sup>等的研究

3 W表示个体生物量,x表示树龄

表3 新垦植模式橡胶林植被碳储量及固碳潜力

Tab.3 Carbon stock and carbon sequestration potential of young rubber plantation

树种	现存量/(t/hm <sup>2</sup> )	10 a后/(t/hm <sup>2</sup> )		20 a后/(t/hm <sup>2</sup> )	
	碳储量	碳储量	固碳潜力	碳储量	固碳潜力
橡胶	1.18 ± 0.36 c	34.08	/	75.98	/
橡胶+柚木	2.57 ± 0.79 c	46.06	11.98	105.24	29.26
橡胶+海船	1.19 ± 0.36 c	36.48	2.4	101.51	25.53
橡胶+坡垒	1.21 ± 0.37 c	37.02	2.94	84.46	8.48
橡胶+望天树	1.80 ± 0.78 c	35.36	1.28	82.63	6.65
橡胶+波罗蜜	1.95 ± 0.61 c	35.46	1.38	78.98	3.00
橡胶+蛋黄果	1.24 ± 0.43 c	34.69	1.61	79.65	3.67
橡胶+可可	1.29 ± 0.42 c	38.22	4.14	138.66	62.68
橡胶+咖啡	9.41 ± 0.83 b	44.63	10.55	87.3	11.32
橡胶+大叶千斤拔	39.34 ± 5.43 a	36.31	2.23	78.21	2.23

注:差异显著水平为0.05。

橡胶 + 大叶千斤拔植被碳储量(83.52 t/hm<sup>2</sup>) 及固碳潜力(2.23 t/hm<sup>2</sup>) ,高于西双版纳主要森林植被平均碳储量(51.13 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[32]</sup>; 20 a 后 橡胶 + 可可植被碳储量(208.50 t/hm<sup>2</sup>) 高于西双版纳热带季节雨林碳储量(174.02 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[35]</sup> ,在热带森林植被平均碳储量(60 ~ 250 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[33]</sup> 范围之内。

成熟模式中的橡胶 + 大叶千斤拔现存碳储量(51.29 ± 10.18 t/hm<sup>2</sup>) 略高于新垦植模式橡胶 + 大叶千斤拔(39.34 ± 5.43 t/hm<sup>2</sup>)。虽成熟橡胶林生物量碳储量远高于新垦植橡胶林 ,但成熟胶林内的大叶千斤拔生长缓慢 ,而新垦植橡胶林郁闭度低 ,大叶千斤拔生长迅速。预测未来 10 a、20 a 后大叶千斤拔的碳储量时 ,参考王秀华<sup>[34]</sup> 的研究结果。

3.2.4 不同复合农林模式橡胶林固碳潜力范围

新垦植橡胶林模式、高海拔恢复模式和成熟橡胶林模式未来固碳潜力范围(见表 6) 差异巨大。复合农林橡胶林现存生物量碳储量为 1.19 ~ 52.89 t/hm<sup>2</sup> ,10 a 后固碳潜力为 1.28 ~ 106.08 t/hm<sup>2</sup> ,20 年后固碳潜力为 2.23 ~ 233.89 t/hm<sup>2</sup>。世界一些主要复合系统内植被的固碳速率(0.59 ~ 11.08 t/hm<sup>2</sup> · a) 差异也很大<sup>[36]</sup> ,这主要是因为农林复合系统的植

被碳固存潜力不但受气候因子的影响 ,也受农林复合系统自身特性(物种组成、生长速度、所处发育阶段、林木密度和林龄) 的影响。

3.3 土壤碳储量

三种复合农林橡胶林中 ,由于林下增汇植物种类多 ,种植时间短(定植 2 a) ,尤其高海拔橡胶林内间种的增汇植物皆为木本植物 ,短期内对土壤分异的影响不明显 ,故仅估算部分具有典型代表性增汇植物林下的土壤碳储量。研究结果见表 7。

不同林龄及海拔橡胶林土壤碳储量范围为 31.96 ~ 149.02 t/hm<sup>2</sup>。除高海拔橡胶林 ,其余橡胶林碳储量均高于海南省西部不同林龄橡胶林土壤碳储量(61.33 ~ 74.27 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[38]</sup> ,但低于庞家平<sup>[39]</sup> 在西双版纳本地区研究的不同龄林土壤碳储量(129.17 ~ 251.65 t/hm<sup>2</sup>)。不同地区不同林龄橡胶林土壤碳储量差异显著原因有二:一是林龄差异 ,幼龄较低 ,成熟胶林较高。幼龄期凋落物量少于成熟胶林 ,土壤碳含量及碳储量随之降低。二是空间异质性 ,土壤碳储量不仅受凋落物量影响 ,还受水分、温度、植被及土壤理化性质等各种复杂因素影响<sup>[40,41]</sup>。

表 4 高海拔模式橡胶林碳储量和固碳潜力

Tab.4 Carbon stock and carbon sequestration potential of rubber plantation in high altitude area

树种	现存量/(t/hm <sup>2</sup> )	10 a 后/(t/hm <sup>2</sup> )		20 a 后/(t/hm <sup>2</sup> )	
	碳储量	碳储量	固碳潜力	碳储量	固碳潜力
橡胶	23.64 ± 2.50 a	40.81	/		59.44
橡胶 + 铁力木	23.71 ± 2.50 a	46.93	6.12	74.74	15.3
橡胶 + 长叶竹柏	23.69 ± 2.50 a	56.4	15.59	115.38	55.94
橡胶 + 格木	23.79 ± 2.51 a	146.89	106.08	293.33	233.89
橡胶 + 望天树 + 铁力木 + 长叶竹柏	23.71 ± 2.50 a	49.03	8.22	98.92	39.48
橡胶 + 望天树 + 格木 + 长叶竹柏	23.73 ± 2.51 a	84.24	43.43	171.49	112.05
橡胶 + 羯布罗香 + 铁力木 + 长叶竹柏	23.72 ± 2.50 a	56.71	15.90	101.21	41.77
橡胶 + 羯布罗香 + 格木 + 长叶竹柏	23.75 ± 2.50 a	86.71	45.90	187.03	127.48

注: 差异显著水平为 0.05。

表 5 成熟模式橡胶林碳储量及固碳潜力

Tab.5 Carbon stock and carbon sequestration potential of mature rubber plantation

树种	现存量/(t/hm <sup>2</sup> )	10 a 后/(t/hm <sup>2</sup> )		20 a 后/(t/hm <sup>2</sup> )	
	碳储量	碳储量	固碳潜力	碳储量	固碳潜力
橡胶	51.18 ± 10.16 a	81.29	/	146.59	/
橡胶 + 可可	52.89 ± 10.47 a	92.16	10.87	208.50	61.91
橡胶 + 大叶千斤拔	51.29 ± 10.18 a	83.52	2.23	148.82	2.23

注: 差异显著水平为 0.05。

表 6 不同模式橡胶林碳储量及固碳潜力范围

Tab. 6 Range of carbon stock and carbon sequestration potential in different rubber plantations

复合农林模式	现存量/(t/hm <sup>2</sup> )	10 a 后/(t/hm <sup>2</sup> )		20 a 后/(t/hm <sup>2</sup> )	
	碳储量	碳储量	固碳潜力	碳储量	固碳潜力
新垦植胶林模式	1.19 ~ 39.34	34.69 ~ 46.06	1.28 ~ 11.98	78.21 ~ 138.66	2.23 ~ 62.68
高海拔恢复模式	23.69 ~ 23.79	46.93 ~ 146.89	6.12 ~ 106.08	74.74 ~ 293.33	15.30 ~ 233.89
成熟橡胶林模式	51.29 ~ 52.89	83.52 ~ 92.16	2.23 ~ 10.87	148.82 ~ 208.50	2.23 ~ 61.91

表 7 三种复合农林模式土壤有机碳储量比较

Tab. 7 Comparison of soil organic carbon storage in different rubber plantations

(t/hm<sup>2</sup>)

复合农林模式	处理	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 50 cm	50 ~ 100 cm	0 ~ 100 cm 总和
高海拔恢复模式	橡胶	4.01 ± 0.44C	3.87 ± 0.93C	3.33 ± 0.30B	6.64 ± 1.62C	14.11 ± 3.10C	31.97 ± 6.22C
新垦植模式	橡胶	15.73 ± 1.15Bb	13.66 ± 1.94Bb	15.63 ± 4.96Aa	19.77 ± 2.90Bb	34.99 ± 2.40Bb	99.78 ± 9.30Bb
	橡胶 + 大叶千斤拔	23.48 ± 2.65a	18.20 ± 7.28a	20.72 ± 3.53a	33.47 ± 2.90a	58.85 ± 13.56a	154.73 ± 15.22a
	橡胶	27.22 ± 0.95Aa	20.57 ± 2.16Ab	16.50 ± 1.88Ab	31.20 ± 8.36Ab	53.53 ± 1.57Ab	149.02 ± 11.50Ab
成熟胶林模式	橡胶 + 大叶千斤拔	26.96 ± 0.61a	26.03 ± 1.07a	24.69 ± 3.26a	38.37 ± 7.96a	68.55 ± 3.86a	184.60 ± 13.29a
	橡胶 + 可可	24.82 ± 1.16b	19.68 ± 3.66b	18.34 ± 4.46ab	32.72 ± 9.84ab	57.79 ± 2.50a	153.35 ± 14.11b

注: 差异显著水平为 0.05, 其中大写字母表示不同龄林橡胶纯林之间差异; 小写字母表示同一复合农林模式下不同处理林之间差异。

不同复合农林模式橡胶林的土壤碳储量均不同程度高于橡胶纯林。农林复合系统中树木和非树木成分输入的生物量质量、土壤质地、土壤结构等都会影响农林复合系统的土壤固碳能力<sup>[42]</sup>。新垦植模式橡胶林中, 橡胶 + 大叶千斤拔的土壤碳储量(154.73 ± 15.22 t/hm<sup>2</sup>) 显著高于纯橡胶土壤碳储量(99.78 ± 9.30 t/hm<sup>2</sup>), 增加了 54.95 t/hm<sup>2</sup>; 成熟橡胶林的橡胶 + 大叶千斤拔土壤碳储量(184.60 ± 13.29) 显著高于橡胶 + 可可(153.35 ± 14.11 t/hm<sup>2</sup>) 与纯橡胶(149.02 ± 11.50 t/hm<sup>2</sup>), 分别增加了 35.58 t/hm<sup>2</sup> 和 4.33 t/hm<sup>2</sup>。研究表明, 添加间种大叶千斤拔构建复合农林橡胶林, 有利于提高土壤碳储量。大叶千斤拔作为耐荫性经济作物和绿肥植物, 适应性强, 萌发力强, 生长快, 每年年底割刈枝叶还田, 短期内有机碳输入量增加, 土壤组成、结构、质地发生改变, 有效降低土壤容重, 增加土壤碳储量。可的地上生物量及凋落物量远小于大叶千斤拔, 因此林下间种可可后, 对土壤碳储量影响并不显著。

## 4 结论

西双版纳地区的橡胶纯林经过复合农林经营管理, 形成胶林复合生态系统, 具有更大的碳储量和碳贮存潜力。从植被碳储量考虑, 新垦植模式中, 橡胶

+ 大叶千斤拔现存生物量碳储量最高, 未来 10 a 后橡胶 + 柚木最高, 20 a 后橡胶 + 可可最高; 高海拔模式橡胶 + 格木的生物量碳储量及固碳潜力最高; 成熟胶林模式橡胶 + 可可生物量碳储量及固碳潜力最高。故新垦植橡胶林适宜选择大叶千斤拔、可可、柚木作为增汇植物; 高海拔模式最适宜的增汇植物为格木; 成熟橡胶林最适宜的增汇植物为可可。从土壤碳储量考虑, 新垦植模式橡胶 + 大叶千斤拔土壤碳储量比橡胶林高 54.95 t/hm<sup>2</sup>, 是橡胶林的 1.55 倍; 成熟模式橡胶 + 大叶千斤拔比橡胶高 35.58 t/hm<sup>2</sup>, 是橡胶林的 1.24 倍。大叶千斤拔对橡胶林生态系统碳储量的贡献在植被碳储量与土壤碳储量方面都很显著, 但可可及其余增汇树种皆为种植 2 年的幼树, 林下土壤没有足够的凋落物覆盖, 与大叶千斤拔相比缺乏土壤碳源, 且土壤有机碳含量积累是一个漫长的过程, 故短期内对土壤碳储量的影响不显著。

本研究通过生物量模型预测不同复合农林模式橡胶林植被碳储量, 存在一定的误差, 其实际变化还需进一步观测与研究。但从目前研究的结果来看, 至少有一点需要引起人们的关注: 无论植被碳储量发生怎样的变化, 对复合农林模式的选择, 需要考虑树种的固碳特性和科学的树种搭配。本研究另一缺陷是对增汇植物土壤碳储量的方面尚不全面, 且未

考虑增汇植物的经济效益,今后可深入研究其余增汇植物对土壤碳储量的影响,并兼顾生态、社会、经济效益,合理进行橡胶林复合农林经营管理,为减缓气候变化贡献力量,为环境友好橡胶林建设提供理论基础。

### 致谢

感谢中国科学院西双版纳热带植物园园林园艺部提供增汇植物生长量数据,植物园经济推广站、普文林场提供增汇植物幼树生长量数据,植物园中心实验室测定土壤含碳量。

### 参考文献(References)

- [1] 唐强,何秀斌,鲍玉海,等. 三峡库区柑橘园生态复合经营模式[J]. 中国水土保持,2010,10: 10 - 12 [Tang Qiang, He Xiubin, Bao Yuhai, et al. Ecological management models of citrus orchard in Three Gorges Reservoir Area [J]. Soil and Water Conservation in China, 2010, 10: 10 - 12]
- [2] 余晓章. 农林复合模式研究与进展 [J]. 四川林勘设计, 2003, 34(3): 9 - 10 [Yu Xiaole. Research prospects about agro-forestry composite model [J]. Sichuan Forestry Exploration and Design, 2003, 34(3): 9 - 10]
- [3] Zhang J H, Su Z A, Liu G C. Effects of terracing and agroforestry on soil and water loss in hilly areas of the Sichuan Basin, China [J]. Journal of Mountain Science, 2008, 5(3): 241 - 248
- [4] Takimoto A, Nair P R, Nair V D. Carbon stock and sequestration potential of traditional and improved agroforestry systems in the West African Sahel [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 125(1): 159 - 166
- [5] Nair P R. Directions in tropical agroforestry research: past, present, and future [J]. Agroforestry Systems, 1998, 38: 223 - 245
- [6] Nair P R, Nair V D. Carbon storage in North American agroforestry systems [J]. The potential of US forest soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect, 2003: 333 - 346
- [7] Udawatta R P, Jose S. Agroforestry strategies to sequester carbon in temperate North America [J]. Agroforestry Systems, 2012, 86(2): 225 - 242
- [8] Thangata P, Hildebrand P. Carbon stock and sequestration potential of agroforestry systems in smallholder agroecosystems of sub-Saharan Africa: Mechanisms for 'reducing emissions from deforestation and forest degradation' (REDD+) [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 158: 172 - 183
- [9] 平晓燕,王铁梅,卢欣石. 农林复合系统固碳潜力研究进展 [J]. 植物生态学报, 2013, 37(1): 80 - 92 [Ping Xiaoyan, Wang Tiemei, Lu Xinshi. Review of advances in carbon sequestration potential of agroforestry [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(1): 80 - 92]
- [10] 张佳琦,薛达元. 西双版纳橡胶林种植的生态环境影响研究 [J]. 中国人口. 资源与环境, 2013, 23(11): 304 - 307 [Zhang Jiaqi, Xue Dayuan. The impacts of rubber plantation on the Eco-environment in Xishuangbanna of Yunnan province [J]. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(11): 304 - 307]
- [11] Richter D D, Markewitz D, Trumbore S E, et al. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest [J]. Nature, 1999, 400(6739): 56 - 58
- [12] 孙文娟,黄耀,张稳等. 农田土壤固碳潜力研究的关键科学问题 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 996 - 1004 [Sun Wenjuan, Huang Rao, Zhang Wen, et al. Key issues on soil carbon sequestration potential in agricultural soil [J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(9): 996 - 1004]
- [13] Smith P. Land use change and soil organic carbon dynamics [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 81(2): 169 - 178
- [14] 张克映. 滇南气候的特征及其形成因子的初步分析 [J]. 气象学报, 1966, 33(2): 210 - 230 [Zhang Keying. Preliminary analysis of the characteristics and formation factors of the climate in southern Yunnan [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1966, 33(2): 210 - 230]
- [15] 朱华. 论滇南西双版纳的森林植被分类 [J]. 云南植物研究, 2007, 29(4): 377 - 387 [Zhu Hua. On the Classification of Forest Vegetation in Xishuangbanna, Southern Yunnan [J]. Acta Botanica Yunnanica, 2007, 29(4): 377 - 387]
- [16] 唐建维,庞家平,陈明勇,等. 西双版纳橡胶林的生物量及其模型 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(10): 1942 - 1948 [Tang Jianwei, Pang Jiaping, Chen Mingyong, et al. Biomass and its estimation model of rubber plantations in Xishuangbanna, southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(10): 1942 - 1948]
- [17] 明安刚,贾宏炎,田祖为,等. 不同林龄格木人工林碳储量及其分配特征 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 940 - 946 [Ming An'gang, Jia Hongyan, Tian Zuwei, et al. Characteristics of carbon storage and its allocation Erythrophleum fordii plantations with different ages [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 940 - 946]
- [18] Jain A, Ansari S. Quantification by allometric equations of carbon sequestered by Tectona grandis in different agroforestry systems [J]. Journal of Forestry Research, 2013, 24(4): 699 - 702
- [19] Brown, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer [M]. Rome: FAO Forestry Papers, 1997: 55, 134. [http://www.fao.org/icalog/search/dett.asp?aries\\_id=7736](http://www.fao.org/icalog/search/dett.asp?aries_id=7736)
- [20] 萧自位,王秀华,郑丽. 等. 西双版纳不同胶林复合生态系统的生物量及其分配特征 [J]. 中南林业大学学报, 2014, 34(2): 108 - 116 [Xiao Ziwei, Wang Xiuhua, Zheng Li, et al. Biomass and its allocation pattern of monoculture and mixed rubber-tree plantations in Xishuangbanna [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(2): 108 - 116]
- [21] 周庆,杨沅志,陈北光. 营养条件对印度紫檀幼苗生物量结构的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2006, 27(4): 69 - 72 [Zhou Qing, Yang Yuanzhi, Chen Beiguang. Effects of the different fertilization on the biomass pattern of pterocarpus indicus seedlings [J]. Journal of South China Agricultural University, 2006, 27

- (4): 69–72]
- [22] 郑路,蔡道雄,卢立华. 等. 南亚热带不同树种人工林生态系统碳库特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(12): 110–116 [Zheng Lu, Cai Daoxiong, Lu Lihua. et al. Carbon pool of different species plantation ecosystems in lower subtropical area of China [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2014, 34(12): 110–116]
- [23] Smiley G, Kroschel J. Temporal change in carbon stocks of cocoa-gliciridia agroforests in Central Sulawesi, Indonesia [J]. Agroforestry Systems, 2008, 73(3): 219–231
- [24] 唐建维,施济普,张光明. 等. 西双版纳不同斑块望天树种群的密度,结构和生物量 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 40–54 [Tang Jianwei, Shi Jipu, Zhang Guangming. et al. Density, structure and biomass of parashorea chinensis populations in different patches in Xishuangbanna, SW China [J]. Journal of Plant Ecology. 2008, 32(1): 40–54]
- [25] 孙鸿烈,邓晓保,唐建维. 等. 中国生态系统定位观测与研究数据集. 森林生态系统卷. 云南西双版纳站: 1998~2006 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 133–134 [Sun Honglie, Deng Xiaobao, Tang Jianwei. et al. Ecosystem observation and research dataset of China. Forest ecosystems, Xishuangbanna of Yunnan 1998~2006 [M]. Beijing: China agriculture press, 2010: 133–134]
- [26] 朱宏光,蓝嘉川,刘虹. 等. 广西马山岩溶次生林群落生物量和碳储量 [J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2616–2621 [Zhu Hongguang, Lan Jiachuan, Liu Hong. et al. Biomass and carbon storage of communities in secondary karst forests in Mashan county, Guangxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2616–2621]
- [27] 于贵瑞,王秋凤,刘迎春. 等. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础 [J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 771–787 [Yu Guirui, Wang Qiufeng, Liu Yingchun. et al. Conceptual framework of carbon sequestration rate and potential increment of carbon sink of regional terrestrial ecosystem and scientific basis for quantitative carbon authentication [J]. Progress in Geography, 2011, 30(7): 771–787]
- [28] 窦森,周桂玉,邵晨. 等. 土壤提取液中有机碳量测定方法的比较 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(2): 99–101 [Dou Sen, Zhou Guiyu, Shao Chen. et al. Comparison on Determination Methods of Organic Carbon Content in Soil Extracts [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(2): 99–101]
- [29] 尉海东,马祥庆. 中亚热带不同发育阶段杉木人工林生态系统碳储量研究 [J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(2): 239–243 [Wei Haidong, Ma Xiangqing. A study on the carbon storage and distribution in Chinese fir plantation ecosystem of different growing stages in mid-subtropical zone [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis. 2006, 28(2): 239–243]
- [30] 宋清海,张一平. 西双版纳地区人工橡胶林生物量,固碳现状及潜力 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(10): 1887–1891 [Song Qinghai, Zhang Yiping. Biomass carbon sequestration and its potential of rubber plantations in Xishuangbanna, Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(10): 1887–1891]
- [31] 张修玉,许振成,王俊能. 等. 西双版纳森林植被碳储量动态与增汇潜力研究 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(3): 397–402 [Zhang Xiuyu, Xu Zhencheng, Wang Junneng. et al. Research on forest vegetation carbon stock dynamics and capacity of raising carbon sink in Xishuangbanna [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(3): p. 397–402]
- [32] 李红梅,马友鑫,郭宗峰. 等. 西双版纳森林植被的碳贮量及影响因素分析 [J]. 福建林学院学报, 2006, 25(4): 368–372 [Li Hongmei, Ma Youxin, Guo Zongfeng. et al. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with affecting factors in Xishuangbanna [J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2006, 25(4): 368–372]
- [33] Houghton R. Temporal patterns of land-use change and carbon storage in China and tropical Asia [J]. Science in China Series C Life Science – English Edition, 2002, 45(SUPP): 10–17
- [34] 王秀华,谢志英,赵永祥. 等. 西双版纳不同年龄橡胶林下大叶千斤拔的生物量动态及其模型 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(19): 30–35 [Wang Xiuhua, Xie Zhiying, Zhao Yongxiang. et al. Biomass and its estimation model of Flamingia macrophylla intercropped with rubber plantations with different ages in Xishuangbanna [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(19): 30–35]
- [35] 吕晓涛,唐建维,何有才. 等. 西双版纳热带季节雨林的生物量及其分配特征 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 11–22 [Lv Xiaotao, Tang Jianwei, He Youcai. et al. Biomass and its allocation in tropical seasonalrain forest in Xishuangbanna Southwest, China [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 11–22]
- [36] 解婷婷,苏培玺,周紫鹃. 等. 气候变化背景下农林复合系统碳汇功能研究进展 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 3039–3046 [Xie Tingting, Su Peixi, Zhou Zijuan. et al. Research progress on carbon sink function of agroforestry system under climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10): 3039–3046]
- [37] Schoeneberger M M. Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands [J]. Agroforestry Systems, 2009, 75(1): 27–37
- [38] 吴志祥,谢贵水,陶忠良. 等. 海南儋州不同林龄橡胶林土壤碳和全氮特征 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1484–1491 [Wu Zhixiang, Xie Guishui, Tao Zhongliang. et al. Characteristics of soil carbon and total nitrogen contents of rubber plantations at different age stages in Danzhou, Hainan island [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4): 1484–1491]
- [39] 庞家平,西双版纳橡胶林的碳储量及其分配格局 [D]. 西双版纳: 中国科学院西双版纳热带植物园, 2009: 39–43 [Pang Jiaping. Carbon storage and its allocation of rubber plantation in Xishuangbanna, southwest China [D]. Xishuangbanna: Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Science, 2009: 39–43]
- [40] Nair P R, Kumar B M, Nair V D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration [J]. J Plant Nutr Soil Sci, 2009, 172(1): 10–23
- [41] Tilman D, Lehman C L, Thomson K T. Plant diversity and ecosystem productivity: theoretical considerations [J]. Proceedings of

the national academy of sciences, 1997, 94(5): 1857-1861  
[42] García-Oliva F, Masera O R. Assessment and measurement issues related to soil carbon sequestration in land-use, land-use

change, and forestry (LULUCF) projects under the Kyoto protocol [J]. Climatic Change, 2004, 65(3): 347-364

## The Carbon Stock and Carbon Sequestration Potential of Rubber Plantations under Different Agro-forestry Systems in Xishuangbanna, SW China

MO Huizhu<sup>1,2</sup>, SHA Liqing<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Yunnan Kunming 650223, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Carbon sequestration management was operated in newly-planted rubber plantations, mature rubber plantations and high-altitude rubber plantations. We compared vegetation carbon storage, carbon sequestration potential, and soil carbon storage in different agro-forestry systems and pure rubber plantations. The vegetation carbon storage was estimated by tree biomass regression model, tropical trees biomass universal model, and allometric model. Soil carbon storage was estimated by soil profile stratified sampling (0~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, 30~50 cm, 50~100 cm). The results showed: 1. The existing biomass carbon storage was 1.19~52.89 t/hm<sup>2</sup>, and the carbon sequestration potential was 1.28~106.08 t/hm<sup>2</sup> in 10 years later and 2.23~233.89 t/hm<sup>2</sup> in 20 years later. 2. After carbon sink plants were added in rubber plantations, soil carbon storage was significantly higher than that of pure rubber plantations. For newly-cultivated rubber plantations, soil carbon storage of rubber with *flemingia macrophylla* increased 54.95 t/hm<sup>2</sup> than that of pure rubber plantations; for mature rubber plantations, rubber with *flemingia macrophylla* increased 35.58 t/hm<sup>2</sup>, and rubber with cocoa increased 4.33 t/hm<sup>2</sup>. The carbon sequestration management can improve the overall vegetation carbon storage and carbon sequestration potential, meanwhile increase soil carbon storage. However, carbon sequestration potential varies due to different plant species, planting density, and growth rates.

**Key words:** rubber plantation; agro-forestry; carbon storage; carbon sequestration potential; Xishuangbanna