

DOI: 10.5846/stxb201306081429

朱宏光, 蓝嘉川, 刘虹, 温远光, 王克林, 马祖陆, 陆晓明, 雷丽群, 覃林, 庄嘉, 邓艳, 李婉舒, 左花, 熊江波. 广西马山岩溶次生林群落生物量和碳储量. 生态学报, 2015, 35(8): 2616-2621.

Zhu H G, Lan J C, Liu H, Wen Y G, Wang K L, Ma Z L, Lu X M, Lei L Q, Qin L, Zhuan J, Den Y, Li W S, Zuo H, Xiong J B. Biomass and carbon storage of communities in secondary karst forests in Mashan county, Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2616-2621.

## 广西马山岩溶次生林群落生物量和碳储量

朱宏光<sup>1</sup>, 蓝嘉川<sup>1</sup>, 刘虹<sup>1,5</sup>, 温远光<sup>1,2,\*</sup>, 王克林<sup>3</sup>, 马祖陆<sup>4</sup>, 陆晓明<sup>1</sup>, 雷丽群<sup>1</sup>, 覃林<sup>1,2</sup>, 庄嘉<sup>1</sup>, 邓艳<sup>3</sup>, 李婉舒<sup>1</sup>, 左花<sup>1</sup>, 熊江波<sup>1</sup>

1 广西大学林学院, 南宁 530004

2 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 南宁 530004

3 中国科学院亚热带农业生态所, 长沙 410125

4 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林 541004

5 Department of Earth and Environment, Florida International University, Miami, Florida 33199 USA

**摘要:** 岩溶植被在岩溶生态系统碳循环和全球碳平衡中具有重要的作用。通过对马山县岩溶次生林年龄序列(幼龄林、中龄林和老龄林)3个演替阶段9个样地(20 m×50 m)的系统取样调查,研究了停止人为干扰后岩溶次生林生物量和碳储量的变化。结果表明:沿幼林、中林和老林群落的顺向演替发展,群落生物量显著增加( $P < 0.05$ ),从幼林群落的 48.17 t/hm<sup>2</sup>、到中林群落 113.47 t/hm<sup>2</sup>,再到老林群落 242.59 t/hm<sup>2</sup>。老林生态系统的碳储量较高,平均为 236.69 t/hm<sup>2</sup>,中林和幼林较低且非常相近,分别为 225.17 t/hm<sup>2</sup>和 224.76 t/hm<sup>2</sup>,各次生林生态系统的碳储量差异不显著( $P > 0.05$ )。土壤碳储量的大小顺序为幼林(198.44 t/hm<sup>2</sup>)>中林(167.39 t/hm<sup>2</sup>)>老林(113.43 t/hm<sup>2</sup>)。沿群落正向演替,各次生林生态系统中植物碳储量和土壤碳储量的比例发生明显的变化。幼林的土壤碳储量占生态系统碳储量的 88.29%,植物碳储量只占 11.71%;中林相应为 74.34%和 25.66%;而老林为 47.92%和 52.08%。可见,随着岩溶植被的正向演替,土壤碳转变为植物碳的趋势十分明显,这是岩溶森林不同于酸性土森林的一个显著特征。

**关键词:** 岩溶区域; 次生林; 群落; 生物量; 碳储量; 广西

## Biomass and carbon storage of communities in secondary karst forests in Mashan county, Guangxi

ZHU Hongguang<sup>1</sup>, LAN Jiachuan<sup>1</sup>, LIU Hong<sup>1,5</sup>, WEN Yuanguang<sup>1,2,\*</sup>, WANG Kelin<sup>3</sup>, MA Zulu<sup>4</sup>, LU Xiaoming<sup>1</sup>, LEI Liqun<sup>1</sup>, QIN Lin<sup>1,2</sup>, ZHUANG Jia<sup>1</sup>, DENG Yan<sup>3</sup>, LI Wanshu<sup>1</sup>, ZUO Hua<sup>1</sup>, XIONG Jiangbo<sup>1</sup>

1 Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004, China

2 State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources, Nanning 530004, China

3 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

4 Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China

5 Department of Earth and Environment, Florida International University, Miami, Florida 33199 USA

**Abstract:** Karst vegetation plays an important role in the karst ecosystem carbon cycle and the global carbon balance. However, most of the estimations on biomass and carbon sequestration patterns for many karst forest vegetation ecosystems were questionable. The lack of accurate characterization of carbon storage in tree, understory, forest floor and organic soil

基金项目: 国家科技支撑项目(2011BAC09B02); 中国地质科学院岩溶地质研究所和国家林业局重点资助项目(2010TK45)

收稿日期: 2013-06-08; 网络出版日期: 2014-05-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenyg@263.net

layers in karst forest vegetation ecosystems has hindered the effort to estimate their contribution to the global carbon stocks. In this study, we investigated changes in biomass and carbon storage of karst vegetation along successional stages of a chronosequence following human disturbance in Mashan county, southwest China. We sampled nine plots, each of 20 m×50 m, three of which represented successional stages of young, mid-mature and old forest, respectively. We found that community biomass increased significantly along the successional stages, from 48.17 t/hm<sup>2</sup> in young forest to 113.47 t/hm<sup>2</sup> in mid-mature forest to 242.59 t/hm<sup>2</sup> in old forest ( $P < 0.05$ ). The biomass of the understory vegetation in different successional stages is very low, accounting for 4.32%, 1.47% and 0.47% of the total biomass in communities of young, mid-mature, and old forests, respectively. The mean biomass carbon storage in old forests (123.26 t/hm<sup>2</sup>) was significantly higher than that in young forest (26.32 t/hm<sup>2</sup>) and than that in mid-mature forest (57.78 t/hm<sup>2</sup>) ( $P < 0.05$ ), and it was significantly higher in mid-mature forests than that in young forests ( $P < 0.05$ ). Carbon storages in tree and herb layers were significantly different among the three forest types ( $P < 0.05$ ). The differences in carbon storage in shrub layer, however, was not significantly different among the three forest types ( $P > 0.05$ ). Carbon storage in forest floor litter in mid-mature forest (0.20 t/hm<sup>2</sup>) was significantly lower than that in young forest (1.19 t/hm<sup>2</sup>) and in old forest (1.40 t/hm<sup>2</sup>). Soil carbon storage was significantly different between old forest (113.43 t/hm<sup>2</sup>) and young forest (198.44 t/hm<sup>2</sup>), but the difference in soil carbon was not significant between old forests and mid-mature forests (167.39 t/hm<sup>2</sup>). In all three forest types, carbon storage in soil decreased as depth increased. Overall, carbon storage in old forest ecosystems (236.69 t/hm<sup>2</sup>) was only slightly higher than that in young forest (224.76 t/hm<sup>2</sup>) and mid-mature forest (225.17 t/hm<sup>2</sup>), but these differences were not statistically significant ( $P > 0.05$ ). In contrast, soil carbon storage was highest in the young forest (198.44 t/hm<sup>2</sup>), followed by mid-mature forest (167.39 t/hm<sup>2</sup>) and old forest (113.43 t/hm<sup>2</sup>). The ratios of plant vs. soil carbon storage in various secondary forest ecosystems increased significantly along the successional stages. The percentages of plant and soil carbon storage were 11.71% and 88.29%, respectively, in young forest ecosystems, 25.66% and 74.34% in mid-mature forest, and 47.92% and 52.08% in old forest. It appeared that soil carbon was converted to plant carbon as forest moving forward along the successional chronosequence in the karst region. Our results suggested that the carbon storage capacity of the karst forest ecosystems decreased due to the high bare rock cover, limited soil cover, shallow soil layer, and low biomass. Our results also indicated that the carbon sequestration and carbon allocation in the karst ecosystems were influenced strongly by karst forest vegetation succession. More long-term monitoring and research are needed to further evaluate biomass and carbon accumulation of the karst forest vegetation succession.

**Key Words:** Karst region; secondary forest; community; biomass; carbon storage; Guangxi

森林生物量和土壤是巨大的碳储库<sup>[1-2]</sup>,增加森林面积是应对全球气候变化的有效措施<sup>[1-5]</sup>。我国岩溶面积广布,占国土面积的 1/3<sup>[6]</sup>,广西岩溶面积 9.87 万 km<sup>2</sup>,占广西总面积的 41.57%,是世界上最典型、最重要的岩溶区之一<sup>[7]</sup>。岩溶植被及其土壤是岩溶生态系统中碳蓄积的重要来源,在调节全球碳平衡、减缓气候变化等方面具有重要的作用<sup>[8-10]</sup>。因此,充分了解岩溶植被恢复过程中群落生物量的动态变化,对于深入理解和认识岩溶植被生态系统的碳输入及整个生态系统的碳循环具有重要的意义<sup>[11-12]</sup>。

由于森林类型的多样性、结构的复杂性和森林干扰响应的时空异质性,至今对森林及其土壤碳储量和变率的科学估算的认识还十分有限<sup>[12]</sup>。岩溶森林生态系统生物量和碳储量数据的获取难度很大,相关研究资料更加匮乏。目前仅有的研究是少数学者对岩溶森林植被地上生物量<sup>[13-17]</sup>、灌丛群落地上与地下生物量<sup>[18]</sup>,以及不同演替阶段群落生物量和生产力的估算<sup>[19]</sup>。最近,罗东辉等对我国西南岩溶区不同演替阶段植被的根系生物量进行了研究<sup>[20]</sup>,为准确估算岩溶植被的地下生物量提供了支持。异速生长理论认为,在植物个体水平上,地上生物量的增长与地下生物量的增长成一定的比例,且不随植物种类(裸子植物和被子植物)和环境的变化而变化<sup>[21]</sup>。同样,在群落水平上,通过异速生长理论预测的地上与地下生物量之间的等速生长关系

也得到证实<sup>[21-26]</sup>。本研究以马山县岩溶植被年龄序列的 3 个次生林(幼龄林、中龄林、老龄林)为对象,研究岩溶次生林自然恢复过程中群落的生物量和碳储量及其变化规律,可为应对气候变化、保护和恢复岩溶植被生态系统服务功能以及科学评估岩溶次生林的碳储存能力提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区及样地概况

研究区位于广西中部的马山县(107°41'—108°29'E, 23°24'—24°2'N),境内岩溶广布,出露地表的碳酸盐岩面积占全县土地总面积的 60%。属南亚热带季风型气候,年均气温 21.3 °C,极端最高温度 38.9 °C,最低温度 -0.7 °C,年均降雨量 1667.1 mm。土壤主要以碳酸盐岩发育的石灰土为主,土层浅薄,一般只有 20—40 cm,土质粘重,坡度大,通常在 30°以上,水土流失严重,岩石裸露度高,森林植被一旦被破坏,发生石漠化的风险极高。原生森林已荡然无存,但同一年龄序列的次生林分布较普遍。经全面踏查,这些岩溶次生林主要是以青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)、海红豆(*Adenanthera pavonina*)、光叶海桐(*Pittosporum glabratum*)、铁榄(*Sinosideroxylum pedunculatum*)、小化香树(*Platycarya glandulos*)、乌材(*Diospyros eriantha*)、虎皮楠(*Daphniphyllum oldhamii*)为优势的群落类型。选择了同一年龄序列 3 个不同演替阶段的群落,即 10—15a(幼龄林)、20—30a(中龄林)和 50—70a(老龄林)开展研究。这些群落类型直线距离相差不到 10 km,立地间变异小,具有相似的气候、海拔、母岩和地形,平均海拔 237—263 m,坡度 24—42°,土层厚度约 40 cm。各样地概况见表 1、表 2。

表 1 不同次生林调查样地的环境因子

Table 1 The environmental factors of sample plots in different secondary forests

类型 Types	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope aspect	岩石裸露度/% Bare rock cover rate	土层厚度/cm Horizon thickness	土壤容重/(g/cm <sup>3</sup> ) Soil bulk density	有机质/(g/kg) Organic matter
幼龄林 Young forest (YF)	237	42	45.4	0—40	0.712	155.9
中龄林 Mid-mature forest (MF)	263	39	28.1	0—40	0.870	96.9
老龄林 Old forest (OF)	261	24	41.0	0—40	0.935	82.8

表 2 不同次生林调查样地的林分因子

Table 2 The stand factors of sample plots in different secondary forests

类型 Types	年龄 Age/ a	平均胸径 Average DBH/ cm	平均树高 Average height/ m	最大胸径 Maximum DBH/cm	最大树高 Maximum height/m	林分密度 Density/ (株/hm <sup>2</sup> )	林冠盖度 Canopy cover/ %
幼龄林 YF	10—15	5.3	4.9	20.7	9.5	3397	64
中龄林 MF	20—30	7.4	8.9	23.5	20.5	2640	83
老龄林 OF	50—70	11.3	12.5	45.7	26.0	1540	79

### 1.2 群落及生物量调查

在每种次生林中设 3 个面积为 20 m×50 m 的样方,共 9 个样方。将每个样方细分成 10 个 10 m×10 m 的小型样方,调查每个胸径≥2 cm 的个体,记录树种名称、胸径、树高、盖度等;在每个小型样方左上角设置 1 个 2 m×2 m 的微型样方,调查灌木、草本的种类、数量、高度、盖度,之后,分别将第 1、5 和 7 号微型样方内的草本植物和木本(DBH<2 cm)植物收获,按地上和地下部分称鲜重,取样,带回实验室,以 85 °C 烘干至恒重,计算含水率及干重;同时,收集微型样方内的林地枯落物,取样,测定含水率和干重。

岩溶植被乔木层生物量的测定相当困难,当地也不准采伐。因此,本研究利用朱守谦早期建立的岩溶森林地上生物量方程估算乔木层的地上生物量<sup>[14]</sup>,罗东辉等研究获得的岩溶顶极和次顶极森林群落水平的根茎比为 0.4066—0.6889 之间<sup>[20]</sup>,本文采用群落平均根茎比来量化群落的根系生物量<sup>[20]</sup>。

$$W_{ACB} = 0.0755 (D^2 H)^{0.8941}, (n=30, r=0.9872, 3 \text{ cm} \geq DBH \leq 28.6 \text{ cm})$$

式中,  $W_{AGB}$  为乔木层地上部分生物量(kg),  $D$  为林木胸径(cm),  $H$  为树高(m)。

### 1.3 群落碳储量的估算

在群落及生物量调查的同时,在每个样地的第 1、5 和 7 号微型样方挖土壤剖面,分 0—20 cm 和 20—40 cm 取样,土壤容重采用环刀法测定,土壤有机碳采用外加热重铬酸钾-浓硫酸氧化-容量法《LY/T1237—1999》测定。按下式计算土壤的有机碳储量:

$$SOC = C_k D_k E_k (1 - G_k) / 10$$

式中, SOC 是第  $k$  层土壤有机碳储量( $t/hm^2$ ),  $k$  代表土壤层次,  $C_k$  是第  $k$  层土壤有机碳含量( $g/kg$ ),  $D_k$  是第  $k$  层土壤密度( $g/cm^3$ ),  $E_k$  是第  $k$  层土层厚度(cm),  $G_k$  为林地的岩石裸露率(%)。

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>[11]</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>[27]</sup>,本研究的植物碳储量选择 0.5 的指标计算。

### 1.4 数据的统计分析

数据分析在 SPSS16.0 软件下完成,并使用 one-way ANOVA 进行单因素方差分析与多重比较。

## 2 结果

### 2.1 群落生物量

#### 2.1.1 乔木层生物量

不同次生林乔木层生物量存在极显著差异,老林林分乔木层生物量、地上生物量和地下生物量均明显高于幼林和中林,而中林显著高于幼林( $P < 0.05$ ) (图 1)。

#### 2.1.2 林下植被和枯落物生物量

各次生林林下灌木层的生物量差异不显著,草本层生物量差异显著( $P < 0.05$ )。不论是灌木层还是草本层,地下生物量平均值均小于地上生物量。幼林和老林林地枯落物生物量差异不显著,与中林存在显著差异( $P < 0.05$ ) (表 3)。

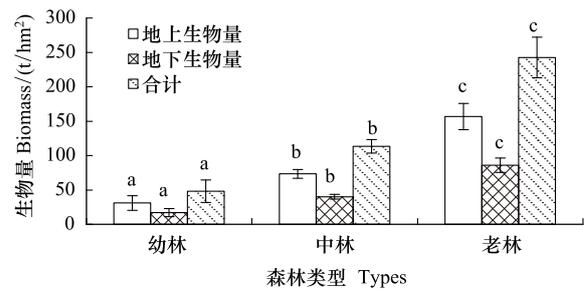


图 1 不同次生林乔木层生物量比较

Fig. 1 Comparison of biomass of tree layer in different secondary forests

表 3 各次生林林下植被生物量的比较

Table 3 Comparison of biomass in understory and forest floor litter in different secondary forests

类型 Types	灌木层生物量 Shrub layer/( $t/hm^2$ )			草本层生物量 Herb layer/( $t/hm^2$ )			枯落物 Litter/( $t/hm^2$ )
	地上 AGB	地下 BGB	小计 Total	地上 AGB	地下 BGB	小计 Total	
幼林 YF	0.58±0.64A	0.15±0.13A	0.73±0.76A	0.89±0.51A	0.46±0.39A	1.35±0.13A	2.38±1.03A
中林 MF	1.09±0.92A	0.58±0.54A	1.66±1.46A	0.01±0.00B	0.01±0.00A	0.01±0.01B	0.40±0.02B
老林 OF	0.96±0.32A	0.16±0.10A	1.13±0.41A	0.00±0.00C	0.00±0.00B	0.00±0.00C	2.80±0.62A

\* 同一列字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ ); AGB: Aboveground biomass; BGB: Belowground biomass

### 2.2 群落生物量碳储量

对马山县岩溶次生林生物量碳储量进行分析,结果表明,老林群落的生物量碳显著高于幼林和中林( $P < 0.05$ ),中林的生物量碳显著高于幼林( $P < 0.05$ );不同次生林之间乔木层和草本层的生物量碳存在显著差异( $P < 0.05$ ),灌木层的差异不显著( $P > 0.05$ ),中林枯落物层的生物量碳显著低于幼林和老林( $P < 0.05$ ) (表 4)。

### 2.3 群落土壤的碳储量

各次生林土壤碳储量,以老林最低(平均为  $113.43 t/hm^2$ ),中林次之( $167.39 t/hm^2$ ),幼林最高( $198.44 t/hm^2$ )。老林土壤碳储量显著低于幼林( $P < 0.05$ ),与中林差异不显著( $P > 0.05$ ),幼林与中林的差异也不显著

表 4 各次生林生物量碳的比较

Table 4 Comparison of biomass carbon in different secondary forests

类型 Type	乔木层 Tree layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	枯落物层 Forest floor litter	合计 Total
幼林 YF	24.09±8.24A	0.37±0.38A	0.68±0.06A	1.19±0.51A	26.32±9.20A
中林 MF	56.74±4.87B	0.83±0.73A	0.01±0.00B	0.20±0.01B	57.78±5.62B
老林 OF	121.29±14.81C	0.56±0.20A	0.00±0.00C	1.40±0.31A	123.26±15.33C

\* 同一列字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

( $P > 0.05$ ) (图 2)。土壤碳储量随着土层加深而减少, 0—20 cm 和 20—40 cm 土层平均土壤碳储量的大小顺序分别为中林 ( $114.33 \text{ t/hm}^2$ ) > 幼林 ( $105.45 \text{ t/hm}^2$ ) > 老林 ( $74.98 \text{ t/hm}^2$ ) 和幼林 ( $92.99 \text{ t/hm}^2$ ) > 中林 ( $53.06 \text{ t/hm}^2$ ) > 老林 ( $38.45 \text{ t/hm}^2$ ) (图 2)。各次生林中, 只有幼林与老林 20—40 cm 土层的碳储量存在显著差异, 其余林分及土层的差异均不显著 ( $P > 0.05$ ) (图 2)。

#### 2.4 生态系统碳储量及其分配

研究表明, 马山岩溶区老林生态系统的碳储量较高, 平均为  $236.69 \text{ t/hm}^2$ , 中林和幼林的较低且非常相近, 分别为  $225.17 \text{ t/hm}^2$  和  $224.76 \text{ t/hm}^2$ , 各次生林生态系统的碳储量差异不显著 ( $P > 0.05$ )。但是, 各次生林生态系统中植物碳储量和土壤碳储量的比例差异明显 ( $P < 0.05$ )。幼林中, 土壤碳储量占生态系统碳储量的 88.29%, 植物碳储量只占 11.71%; 中林相应为 74.34% 和 25.66%; 老林为 47.92% 和 52.08%。

### 3 讨论

前人对贵州茂兰亚热带岩溶植被顶极群落生物量的研究发现, 圆果化香 (*Platycarya longipes*)、青冈栎顶极群落的生物量为  $257.89 \text{ t/hm}^2$ <sup>[14]</sup> (此数值是作者将该群落的乔木地上生物量 ( $164.07 \text{ t/hm}^2$ )、地下生物量 ( $89.87 \text{ t/hm}^2$ )、灌木层生物量 ( $3.53 \text{ t/hm}^2$ ) 和草本层生物量 ( $0.42 \text{ t/hm}^2$ ) 相加所得), 青冈栎、硬叶樟 (*Cinnamomum calcareum*) 群落为  $146.32$ — $190.92 \text{ t/hm}^2$ <sup>[13]</sup>, 齿叶黄皮 (*Clausena dunniana*)、圆果化香为  $143.70 \text{ t/hm}^2$ <sup>[19]</sup>。本文利用朱守谦建立的生物量方程<sup>[14]</sup>和罗东辉提出的岩溶植被根茎比<sup>[20]</sup>较好的估算了广西马山亚热带岩溶次生林群落的生物量, 结果显示, 老林群落的生物量 ( $242.59 \text{ t/hm}^2$ ) 介于岩溶顶极群落的生物量范围之内, 而中林和幼林群落的生物量均明显低于岩溶顶极群落的生物量<sup>[13-14]</sup>。表明用朱守谦建立的生物量方程<sup>[14]</sup>和罗东辉提出的根茎比<sup>[20]</sup>能较好的估算亚热带区域岩溶森林乔木地上和地下生物量。在岩溶次生林的年龄序列中, 随着群落的正向演替, 群落不同层次的生物量表现出不同的变化规律。乔木层的生物量随着年龄的增加而增加, 灌木层为先增后减并维持次高水平, 草本层生物量显著下降。此结论与罗东辉的研究结论一致<sup>[19]</sup>。

岩溶生态系统的碳储量随着植被的正向演替而增加<sup>[19]</sup>。本研究中, 岩溶次生幼林、中林和老林生态系统的碳储量分别是  $224.76$ 、 $225.17 \text{ t/hm}^2$  和  $236.69 \text{ t/hm}^2$ , 低于我国森林生态系统平均碳储量  $258.82 \text{ t/hm}^2$ <sup>[27]</sup>。原因可能是, 岩溶山地基岩裸露大、土壤覆盖少、土层浅薄, 属于低生物量森林, 影响了岩溶森林生态系统的碳储存能力。

国内外研究表明, 土壤亚系统在调节森林生态系统碳循环和减缓全球气候变化中发挥着重要作用<sup>[12]</sup>。在我国, 不同森林类型的土壤碳储量的变化范围在  $44$ — $264 \text{ t/hm}^2$  之间, 平均为  $107.8 \text{ t/hm}^2$ , 其中, 天然林平均土壤碳储量  $109.1 \text{ t/hm}^2$ , 人工林相应为  $107.1 \text{ t/hm}^2$ <sup>[12]</sup>。本研究中, 土壤碳储量的大小顺序为幼林 ( $198.44$

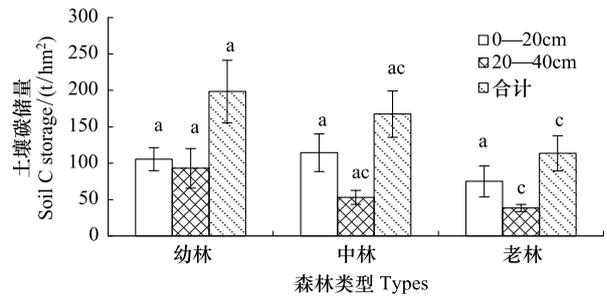


图 2 各次生林土壤碳储量的比较

Fig. 2 Comparison of soil carbon storage in different secondary forests

$t/hm^2$ )>中林(167.39  $t/hm^2$ )>老林(113.43  $t/hm^2$ ),表明随着群落的正向演替,土壤碳储量下降。地下碳储量下降,主要原因是随着正向演替,更多的碳被转移到植物体中<sup>[19]</sup>。本研究发现,随着植被的正向演替,各次生林生态系统中植物碳储量和土壤碳储量的比例也在发生明显的变化。幼林的土壤碳储量比例很高,占生态系统碳储量的88.29%,植物碳储量很低,只占11.71%;老林则不同,植物碳储量(52.08%)高于土壤碳储量(47.92%);中林居两者之间,但与幼林相似,以土壤碳储量为主(74.34%),植物碳储量为辅(25.66%)。可见,随着岩溶植被的正向演替,土壤碳转变为植物碳的现象十分明显,到老林阶段甚至出现生物量碳大于土壤碳的现象。这是岩溶森林不同于酸性土森林的一个显著特征。因此,确保岩溶植被的正向演替对保持岩溶地区的碳稳定和提高碳储存能力具有重要作用。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Watson R T, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N H, Verardo D J, Dokken D J. (Eds.). Land use, land-use change, and forestry. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [ 2 ] 徐小锋,田汉勤,万师强.气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响.植物生态学报,2007,31(2):175-188.
- [ 3 ] Hunter I. Above ground biomass and nutrient uptake of three tree species (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia sissoo*) as affected by irrigation and fertiliser, at 3 years of age, in southern India. Forest Ecology and Management, 2001,144:198-200.
- [ 4 ] Janzen H H. Carbon cycling in earth systems: a soil science perspective. Agriculture Ecosystems Environment, 2004,104,399-417.
- [ 5 ] FAO. Global forest resource assessment 2005. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 2006.
- [ 6 ] 袁道先.新形势下我国岩溶研究面临的机遇和挑战.中国岩溶,2009,28(4):329-331.
- [ 7 ] 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.北京:科学出版社,2011.
- [ 8 ] Zeng F P, Peng W X, Song T Q, Wang K L, Wu H Y, Song X J, Zeng Z X. Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the karst disturbed area in northwestern Guangxi, China. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(12):5110-5119.
- [ 9 ] Ferlan M, Alberti G, Eler K, Batič F, Peressotti A, Miglietta F, Zaldei A, Simončič P, Vodnik D. Comparing carbon fluxes between different stages of secondary succession of a karst grassland. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011,140(1/2):199-207.
- [ 10 ] 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. Ecological Engineering, 2013,54:245-253.
- [ 11 ] Fang J Y, Chen A P, Peng C H. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 2001,292(5525):2320-2322.
- [ 12 ] 刘世荣,王晖,栾军伟.中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展.生态学报,2011,31(19):5437-5448.
- [ 13 ] 杨汉奎,程仕泽.贵州茂兰喀斯特森林群落生物量研究.生态学报,1991,11(4):307-312.
- [ 14 ] 朱守谦,魏鲁明,陈正仁,张从贵.茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究.植物生态学报,1995,19(4):358-367.
- [ 15 ] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,魏鲁明,陈正仁.退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究.林业科学,2002,38(1):1-7.
- [ 16 ] Wen Y G, Sun D J, Zhu H G, Liu J T, Liu S R, Shi Z M. Changes in aboveground biomass and diversity between different stages of secondary succession of a karst vegetation in Guangxi, China. In Hu J. (ed.). Advances in Biomedical Engineering, Information Engineering Research Institute, Newark, USA; IERI, 2011:420-423.
- [ 17 ] 刘长成,魏雅芬,刘玉国,郭柯.贵州普定喀斯特次生林乔灌层地上生物量.植物生态学报,2009,33(4):698-705.
- [ 18 ] 屠玉麟,杨军.贵州中部喀斯特灌丛群落生物量研究.中国岩溶,1995,14(3):199-208.
- [ 19 ] 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,硕士学位论文,2009.
- [ 20 ] 罗东辉,夏婧,袁婧薇,张忠华,祝介东,倪健.我国西南山地喀斯特植被的根系生物量初探.植物生态学报,2010,34(5):611-618.
- [ 21 ] Enquist B J, Niklas K J. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants. Science, 2002,295(5559):1517-1520.
- [ 22 ] Cheng D L, Niklas K J. Above- and below-ground biomass relationships across 1534 forested communities. Annals of Botany, 2007,99(1):95-102.
- [ 23 ] 马文红,方精云.内蒙古温带草原的根冠比及其影响因素.北京大学学报,自然科学版,2006,42(6):774-778.
- [ 24 ] 杨元合.青藏高原高寒草地生态系统碳氮储量[D].北京:北京大学,2008.
- [ 25 ] 王敏,苏永中,杨荣,杨晓.黑河中游荒漠草地上和地下生物量的分配格局.植物生态学报,2013,37(3):209-219.
- [ 26 ] 刘世荣,温远光.杉木生产力生态学.北京:气象出版社,2005.
- [ 27 ] 周玉荣,于振良,赵士洞.我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡.植物生态学报,2000,24(5):518-522.