

DOI: 10.5846/stxb201311192768

杜虎, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 彭晚霞, 付威波, 李莎莎. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型碳格局变化及影响因子. 生态学报, 2015, 35(14): 4658-4667.

Du H, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Peng W X, Fu W B, Li S S. Carbon storage and its controlling factors under different vegetation types in depressions between karst hills, southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4658-4667.

喀斯特峰丛洼地不同植被类型碳格局变化及影响因子

杜 虎^{1,2}, 宋同清^{1,2,*}, 曾馥平^{1,2}, 王克林^{1,2}, 彭晚霞^{1,2}, 付威波^{1,2,3}, 李莎莎^{1,2}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125

2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100

3 广西大学林学院, 南宁 530004

摘要: 采用样方法研究了西南喀斯特峰丛洼地草地、灌丛、次生林、原生林 4 种植被类型碳格局及其土壤碳的影响因子。结果表明: 草地、灌丛、次生林、原生林 4 类生态系统总碳储量分别为 133.84、160.79、179.08 和 261.24 Mg C/hm², 其中植被碳储量为 5.02、6.59、20.87 和 60.20 Mg C/hm², 占总碳储量的 3.75%—23.04%, 随植被正向发展而增加; 地被物碳储量为 1.76、0.95、2.60 和 0.82 Mg C/hm², 仅占总碳储量的 0.32%—1.45%; 土壤层碳储量为 127.06、153.25、151.61 和 200.21 Mg C/hm², 占 76.64%—94.93%, 随植被正向发展呈增加趋势, 但对整个生态系统碳储量贡献率减少; 由草地向原生林发展过程中, 地下部分碳储量均大于地上部分碳储量, 地上部分所占比例逐渐提高, 地下部分所占比例逐渐减少; 相关分析表明, 土壤有机碳含量、储量与土壤容重、土壤深度存在良好的线性关系, 喀斯特峰丛洼地石灰土土壤有机碳含量与水稳性团聚的分布关系密切, 土壤氮素是影响有机碳含量的主要因素, <2 mm 细根和土壤微生物对石灰土土壤有机碳的积累具有重要的作用。

关键词: 碳储量; 影响因子; 植被类型; 喀斯特峰丛洼地

Carbon storage and its controlling factors under different vegetation types in depressions between karst hills, southwest China

DU Hu^{1,2}, SONG Tongqing^{1,2,*}, ZENG Fuping^{1,2}, WANG Kelin^{1,2}, PENG Wanxia^{1,2}, FU Weibo^{1,2,3}, LI Shasha^{1,2}

1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China

3 Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004, China

Abstract: The karst region in southwest China is the world's largest geology-controlled eco-environment. This area's basic characteristics include: the shortage of soil resources; low vegetation cover and highly diverse microhabitats. The historical influence of human direct/indirect disturbances has negatively affected the karst forest causing different degrees of degradation. This has resulted in the forest forming coexisting communities at different stages or forms reflecting different successional stages. Therefore, vegetation restoration/reconstruction and the comprehensive control of karst rock desertification has rapidly developed in this region of southwest China. However, the role of karst ecosystems in the global carbon-cycle under different vegetation types remains unclear. The quantification of karst areas for carbon storage and distribution is important in studies on karst carbon cycling. To quantify carbon storage in karst areas we used plot inventory,

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB3-10); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05070404, XDA05050205); 国家科技支撑计划 (2011BAC09B02); 国家自然科学基金项目 (31370485, 31370623); 广西特聘专家项目

收稿日期: 2013-11-19; **网络出版日期:** 2014-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songtongq@163.com

harvest methods and an allometric approach to measure carbon density and allocation at four different vegetation types including grasslands, shrublands, secondary and primary (climax community) forests located in depressions between karst hills. In addition, we investigated the effect of different parameters such as soil physicochemical properties and biological characteristics on soil carbon. The results showed that the total carbon storage in grasslands, shrublands, secondary and primary forest were 133.84, 160.79, 179.08 and 261.24 Mg C/hm², respectively, with the vegetation developing into a higher stage. The storage of carbon in vegetation was 5.02, 6.59, 20.87 and 60.20 Mg C/hm² (grasslands, shrublands, secondary and primary forests, respectively) accounting for 3.75, 4.10, 13.89 and 23.04% of the total carbon storage in grassland, shrublands, secondary and primary forest, respectively. The carbon storage in the litter for grasslands, shrublands, secondary and primary forests was 1.76, 0.95, 2.60 and 0.82 Mg C/hm², respectively, contributing 0.32—1.45% to the total carbon density. The soil organic carbon content decreased with increasing soil depth at different stages of vegetation restoration, with the carbon storage of mineral soils at 127.06, 153.25, 151.61 and 200.21 Mg C/hm², (grassland, shrub, secondary and primary forest respectively) This accounted for 94.93% (grassland) 95.31% (shrubs), 84.66% (secondary forest) and 76.64% (primary forest) of the total carbon storage. The soil carbon pool increased with vegetation development into a higher stage, but showed a proportional decrease with restoration. The underground carbon content was higher compared with that above-ground, while the proportion of carbon storage above-ground gradually increased. However, the underground carbon content decreased from grasslands to primary forest. Correlation analysis showed a significant positive or negative linear association between soil carbon content, carbon storage, soil bulk density and soil depth. In the depressions between the karst hills, the calcareous soil organic carbon content showed a significant association with water-stable aggregation (< 0.25, 0.25—0.5, 0.5—1, 1—2, 2—5, 5—8, > 8 mm). Soil nitrogen was the main factor affecting soil organic carbon content. Fine roots (< 2 mm) and soil microorganism showed a significant role in organic carbon accumulation in calcareous soil. In the karst region of southwestern China, the carbon sequestration potential is significant under the conditions of reduced human disturbance and reasonable management strategies promoting rapid vegetation recovery, ecological reconstruction and increased carbon storage.

Key Words: carbon storage; controlling factor; vegetation types; depressions between karst hills

受人类活动的影响,全球碳循环发生了显著改变,大气 CO₂ 等温室气体浓度持续大幅度的增加导致温室效应增强、全球气候变暖、大气环流发生变化、区域性气候变化加剧等一系列的生态环境问题,全球气候变化及其对全球生态系统和人类环境的影响既是举世瞩目的科学问题、经济贸易和环境问题,也是一个具有浓烈政治色彩的全球问题,受到国际社会的普遍关注,全球减排 CO₂ 的呼声日益高涨,但在此背景下举行的哥本哈根、德班全球性气候会谈并没有达成实质性协议,且今后很长一段时期内不可能实现零排放,大气 CO₂ 浓度增高不可能逆转^[1]。为此人类正在努力寻找各种能够减缓 CO₂ 浓度升高的技术措施,其中增加农田、草地、森林 3 类主要陆地生态系统中的碳库储量被认为是一种非常有效的 CO₂ 减排措施,得到了《京都议定书》的承认^[2-5]。

植物群落是指在特定空间和时间范围内,具有一定的植物种类组成和一定的外貌及结构与环境形成一定相互关系并具有特定功能的植物集合体。西南喀斯特属亚热带季风气候区,雨热资源丰富但分布不均,岩石裸露率高,土层浅薄且不连续,二元结构明显,湿润气候条件下的特殊岩溶干旱严重。岩溶植物具有石生性、旱生性、喜钙性和耐瘠性特点,由此形成的植被属隐喻植被,其顶级群落为非地带性的常绿落叶阔叶混交林,且目前在人为强烈干扰的破坏下,除自然保护区和悬崖陡壁还存在着部分原始植被外,绝大部分均产生了不同程度的退化,形成了草丛、灌丛、次生林和原生林群落不同植被类型共存现象,碳汇功能丧失严重^[6]。

碳酸盐岩在全球分布面积为 2.2×10^7 km², 总含碳量为 10^{14} t, 占全球总碳量的 99.55%, 是全球最大的碳库^[7], 由于 CO₂-H₂O-CaCO₃ 系统活跃的生物过程和化学过程,石灰土理论上更有利于 CO₂ 固定^[8], 既可是碳汇

(碳酸盐溶蚀作用),又可是碳源(碳酸盐沉积中的 CO_2 脱气作用)^[9],总的趋势是汇大于源。目前有关方面的研究主要侧重于地质方面,生物特别是植物碳储量和碳汇功能研究基本上按同类地区红黄壤方法类推,忽略了该区域的景观高度异质性和特殊性。本文以喀斯特峰丛洼地 4 类不同植物群落为研究对象,基于样方设置与调查,揭示了不同植被类型生态系统碳格局变化,初步分析了其形成原因,为制定该区域的植被恢复、生态重建和固碳措施提供了科学参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究区位于广西环江毛南族自治县(107°51′—108°43′ E, 24°44′—25°33′ N), 最高海拔为 1 028.0 m, 属亚热带季风气候区。根据广西环江县气象局 1986—2005 年 20 年的气象观测数据, 研究区年平均气温为 15.7 °C, 1 月平均气温为 10.1 °C, 7 月平均气温为 28 °C, 历年最低气温为 -5.2 °C, 无霜期为 290 d, 年平均日照时数为 1 451 h, 年降水量为 1 389.1 mm, 4—9 月降水量占全年降水量的 70%, 平均蒸发量为 1 571.1 mm, 平均相对湿度为 70%。喀斯特峰丛洼地集中分布在环江县的西南部, 土壤以碳酸盐岩发育的深色或棕色石灰土为主, 土层浅薄, 坡度大, 水土流失严重, 岩石裸露情况严重, 石漠化趋势严峻。研究区主要有草丛、灌丛、次生林和原生林(顶级群落) 4 种植被类型。草丛主要有以斑茅(*Saccharum arundinaceum*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、蔓生莠竹(*Microstegium fasciculatum*)、纤毛鸭嘴草(*Ischaemum ciliare*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)和鬼针草(*Bidens pilosa*)为主要建群种的群落类型; 灌丛主要有以长序苎麻(*Boehmeria dolichostachya*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides*)、毛桐(*Mallotus barbatus*)和火棘(*Pyracantha fortuneana*)为主要建群种的群落类型; 次生林主要有以八角枫(*Alangium chinense*)、黄荆(*Vitex negundo*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)和刀果鞍叶羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa*)为主要建群种的群落类型; 原生林主要有以伊桐(*Itoa orientalis*)、掌叶木(*Handeliidendron bodinieri*)、菜豆树(*Radermachera sinica*)、灰岩棒柄花(*Cleidion bracteosum*)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、南酸枣(*Choerospondias axillaris*)、刨花润楠(*Machilus pauhoi*)、伞花木(*Eurycorymbus cavaleriei*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、化香树(*Platycarya strobilacea*)、光叶槭(*Acer laevigatum*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、乌冈栎(*Quercus phillyraeoides*)、铁榄(*Sinosideroxylon pedunculatum*)、翠柏(*Calocedrus macrolepis*)和罗城鹅耳枥(*Carpinus luochengensis*)为主要建群种的群落类型。

1.2 样方设置与调查

基于全面踏查, 根据代表性和典型性原则, 从 4 个植被类型主要群落类型中各选择 3 个代表性群落类型, 草丛(Ⅰ): 纤毛鸭嘴草、白茅、荩草; 灌丛(Ⅱ): 红背山麻杆、毛桐、长序苎麻; 次生林(Ⅲ): 八角枫、盐肤木、黄荆; 原生林(Ⅳ): 侧柏、菜豆树、伊桐。在坡向、坡度、海拔等基本相同或相似的坡中下位分别建立 3 个 20 m × 20 m 的样方, 共计 36 个样方。乔木调查主要包括种名、胸径、树高、冠幅和存活状态, 并进行每木检尺, 起测胸径为 1 cm; 灌木层按“品”字型选择 3 个 2 m × 2 m 的样框, 调查种名、株丛数、平均高度、平均基径和盖度; 草本层在灌木层样框内各选择 1 个 1 m × 1 m 的样框, 调查其种名、株丛数、平均高度, 并记录覆盖度, 同时用 GPS 定位。

表 1 不同类型植物群落特征

Table 1 The characteristics of different plant communities

类型 Types	高度 Height/m	密度 Density/(株/m ²)	盖度 Coverage/%
I	0.56	89.00	86.33
II	1.90	6.00	81.67
III	3.71	0.15	80.55
IV	7.78	0.17	82.50

1.3 生物量获取

1.3.1 乔木层

在每木调查的基础上,以 2 cm 为径阶,根据中央径阶多、两端逐次少的原则,在次生林和原生林内各选择建群种 15 株,测定其基径、胸径、树高和冠幅并按 2 m 区分段锯断称量,在树干基部、胸径、中部及顶端分别锯取一个圆盘测定含水量;并分别称取枝条、叶片和花果的鲜质量;根的生物量采用全挖法;然后对各部分器官分别取样 500 g 带回实验室,将样品在 105 ℃ 烘箱内杀青 2 h,调至 75 ℃ 下烘干至恒重,求出各器官干鲜质量之比,由此换算出样本各器官的干质量及总干质量。利用样本各器官(干、枝、叶、根)的干重和总干重建立如表 2 所示的各器官及总生物量与样本胸径(D)、树高(H)的幂回归方程。除八角枫树根拟合模型的相关系数为 0.804 外,其余各群落树种整株树和各器官拟合模型的相关系数均达到了 0.900 以上。根据样地每木调查的结果及相应的回归方程计算乔木层各个体的生物量,并由此获得乔木层的总生物量。

1.3.2 灌木层、草本层和地上凋落物

在灌木层样框内按全收获法收获样框内所有灌木的枝、叶、花果、根,测定各器官生物量,并以 3 个样框的平均值来推算样地中灌木层的总生物量。按同样方法在 1 m×1 m 草本小样框内获取草本层地上与地下、凋落物生物量及总生物量。

1.4 土样采集

首先将每个样地划分为 16 个 5 m×5 m 的小样方,各获得 25 个网点,用土钻测定每个网格点的土壤厚度可知所有样地各网点的土层厚度均<60 cm。因此在每个标准样地中挖取一个深度为 60cm 的典型剖面,用环刀分 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm、40—50 cm、50—60 cm 6 层测容重,同时用硬质保鲜盒采集各层 10 cm 厚原状土样。在样地的 4 个角和中间按土壤机械分层分 6 层取样,5 个点同层次的土样组成一个混合样。样品取完后置于阴凉处自然风干,用四分法取土样过筛,供分析测定用,同时测定石砾含量。

表 2 乔木层生物量拟合方程

Table 2 Fitted equation for tree layer biomass

树种 Species	器官 Organs	拟合方程 Fitted equation	相关系数 Correlation coefficient	树种 Species	器官 Organs	拟合方程 Fitted equation	相关系数 Correlation coefficient
盐肤	叶	$W_L = 71.639(D^2 H)^{0.301}$	0.995	伊桐	叶	$W_L = 26.503(D^2 H)^{0.627}$	0.909
<i>Rhus chinensis</i>	枝	$W_S = 17.358(D^2 H)^{0.801}$	0.917	<i>Itoa orientalis</i>	枝	$W_S = 33.350(D^2 H)^{0.954}$	0.995
	干	$W_B = 48.551(D^2 H)^{0.762}$	0.973		干	$W_B = 3.585(D^2 H)^{1.124}$	0.942
	根	$W_R = 26.997(D^2 H)^{0.740}$	0.949		根	$W_R = 74.865(D^2 H)^{0.751}$	0.865
	总	$W_T = 132.920(D^2 H)^{0.718}$	0.985		总	$W_T = 100.955(D^2 H)^{0.902}$	0.986
八角枫	叶	$W_L = 31.037(D^2 H)^{0.718}$	0.976	菜豆树	叶	$W_L = 47.829(D^2 H)^{0.476}$	0.970
<i>Alangium chinense</i>	枝	$W_S = 8.134(D^2 H)^{1.061}$	0.957	<i>Radermachera sinica</i>	枝	$W_S = 36.975(D^2 H)^{0.888}$	0.993
	干	$W_B = 33.781(D^2 H)^{0.878}$	0.932		干	$W_B = 11.714(D^2 H)^{0.861}$	0.984
	根	$W_R = 45.388(D^2 H)^{0.666}$	0.804		根	$W_R = 61.965(D^2 H)^{0.711}$	0.978
	总	$W_T = 121.600(D^2 H)^{0.803}$	0.950		总	$W_T = 130.676(D^2 H)^{0.799}$	0.991
黄荆	叶	$W_L = 23.319(D^2 H)^{0.501}$	0.894	侧柏	叶	$W_L = 8.601(D^2 H)^{0.924}$	0.939
<i>Vitex negundo</i>	枝	$W_S = 4.9186(D^2 H)^{1.110}$	0.942	<i>Platycladus orientalis</i>	枝	$W_S = 43.327(D^2 H)^{0.906}$	0.995
	干	$W_B = 34.292(D^2 H)^{0.71}$	0.967		干	$W_B = 5.228(D^2 H)^{0.989}$	0.953
	根	$W_R = 40.821(D^2 H)^{0.718}$	0.973		根	$W_R = 20.170(D^2 H)^{0.882}$	0.994
	总	$W_T = 100.600(D^2 H)^{0.752}$	0.970		总	$W_T = 84.766(D^2 H)^{0.889}$	0.991

1.5 样品分析

植物碳和土壤碳均采用重铬酸钾-浓硫酸氧化外加热法测定全碳含量,同时测定土壤 pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾^[10],并用湿筛法分离出<0.25 mm、0.5—0.25 mm、1—0.5 mm、2—1 mm、>2 mm 水

稳性团聚体^[11]。

1.6 碳储量计算

乔木层、林下植被(灌木层、草本层)和凋落物层的碳储量以其生物量现存量乘以相应的碳含量求得。土壤层碳储量的计算采用以下公式: $SOC_n = \sum_{i=1}^n (1-G_i) \times D_i \times C_i \times T_i / 10$, 式中 SOC_n 为分 n 层调查的土壤单位面积碳储量($Mg\ C/hm^2$), G_i 为第 i 层直径 $\geq 2\ mm$ 的石砾含量(%), D_i 为第 i 层土壤容重(g/cm^3), C_i 为第 i 层土壤有机碳含量(g/kg), T_i 为第 i 土层的厚度(cm)。

1.7 数据处理

所有数据采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件进行分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 植物碳储量

由表 3 知,不同类型植被总碳储量为原生林($60.20\ Mg\ C/hm^2$)>次生林($20.87\ Mg\ C/hm^2$)>灌丛($6.59\ Mg\ C/hm^2$)>草丛($5.02\ Mg\ C/hm^2$),原生林总碳储量显著高于次生林,次生林显著高于灌丛和草丛,灌丛、草丛差异不显著。除灌丛地上部分的碳储量($3.14\ Mg\ C/hm^2$)与根($3.45\ Mg\ C/hm^2$)相当外,其余 3 个植被类型均以地上部分为主,草丛、次生林、原生林地上部分分别是根系的 4.52、3.36、3.75 倍,除草丛地上部分碳储量大于灌丛外,其他类型地上部分和根的碳储量与总碳储量一致。同一类型不同层次的碳储量对植被总碳储量的贡献不同,草丛阶段只有草本层,碳储量为 $5.02\ Mg\ C/hm^2$;灌丛没有乔木层,灌木层碳储量的贡献率达 67.52%,是草本层的 2.08 倍;次生林乔木层、灌木层、草本的贡献率分别为 52.55%、41.01%、6.43%;原生林乔木层碳储量占绝对优势,贡献率高达 94.04%,其他各层所占比例很小,灌木层>草本层。同一层次不同类型的碳储量不同,乔木层原生林显著高于次生林;灌木层为次生林>灌丛>原生林,次生林显著大于灌丛和原生林,灌丛、原生林差异不显著;草本层为草丛>灌丛>次生林>原生林,草丛显著高于其他 3 种植被类型,灌丛和次生林差异不显著,但均显著高于原生林。

2.2 地被物层碳储量

喀斯特峰丛洼地不同植被类型地被物的碳储量较小,对整个生态系统碳储量贡献不大,仅在 0.32%—1.45%,其中次生林和草丛地被物碳储量为 $2.60\ Mg\ C/hm^2$ 和 $1.76\ Mg\ C/hm^2$,差异不显著,但显著高于灌丛($0.95\ Mg\ C/hm^2$)和原生林($0.82\ Mg\ C/hm^2$),灌丛和原生林差异不显著。

表 3 不同层次的植物碳储量/($Mg\ C/hm^2$)

Table 3 Carbon Storage of vegetation in different layers

类型 Types	乔木层 Tree layer			灌木层 Shrub layer			草本层 Herb layer			合计 Total		
	地上部 Aboveground	根 Root	小计 Total	地上部 Aboveground	根 Root	小计 Total	地上部 Aboveground	根 Root	小计 Total	地上部 Aboveground	根 Root	小计 Total
I							4.11a	0.91a	5.02a	4.11c	0.91d	5.02c
II				1.54b	2.91a	4.45b	1.6b	0.54b	2.14b	3.14c	3.45c	6.59c
III	10.79b	2.28b	13.07b	7.10a	3.10a	10.20a	1.28b	0.32b	1.60b	19.17b	5.7b	24.87b
IV	44.66a	11.95a	56.61a	2.57b	0.61b	3.18b	0.31c	0.10c	0.41c	47.54a	12.66a	60.2a

同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)

2.3 土壤碳储量

喀斯特峰丛洼地不同植被类型、不同土壤深度土壤碳含量不同,随土壤深度的增加总体上呈下降趋势(表 4),草丛、灌丛、次生林和原生林 10—20 cm 土层的碳含量依次为 0—10 cm 的 60.40%、70.17%、61.42%和 76.01%,20—30 cm 为 0—10 cm 的 48.07%、62.30%、55.71%、61.69%,最后一层为 0—10 cm 的 40.73%、49.80%、48.86%、30.31%。不同植被类同一层次的土壤碳含量也存在差异,0—10 cm、40—50 cm、50—60 cm

的土壤碳含量均为原生林>次生林>灌丛>草丛,差异不显著,10—20 cm、20—30 cm 的变化趋势相同,其中原生林显著高于草丛,其他类型差异不显著,30—40 cm 的大小顺序为原生林>次生林>草丛>灌丛,其中原生林显著高于草丛和灌丛,其他类型差异不显著。各层次土壤的碳的平均碳含量为原生林>次生林>灌丛>草丛,其中原生林显著高于草丛,其他各类型差异不显著。不同植被类型不同层次土壤碳储量的变化趋势总体上与碳含量一致(表 5)。

2.4 不同植被恢复阶段碳储量及其分布格局

喀斯特峰丛洼地 4 种植被类型总碳储量大小顺序为原生林(261.24 Mg C/hm²)>次生林(179.08 Mg C/hm²)>灌丛(160.79 Mg C/hm²)>草丛(133.84 Mg C/hm²),原生林显著高于次生林、灌丛,次生林、灌丛差异不显著,但显著高于草丛。4 种植被类型的碳储量分布格局均表现为土壤>植物>地被物、地下部分>地上部分,其中地被物占的比例相当小,随着植被由草丛向顶级群落的正向发展,土壤和地下部分所占的比例逐渐减小,植物和地上部分逐步提高(表 6)。

表 4 土壤有机碳含量/(g/kg)

Table 4 The content of soil organic carbon

类型 Types	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	40—50 cm	50—60 cm	平均 Average
I	30.2a(a)	18.24b(b)	14.52b(bc)	16.33b(bc)	13.63a(bc)	12.3a(c)	17.54b
II	30.64a(a)	21.5ab(b)	19.09ab(bc)	15.68b(c)	14.79a(c)	15.26a(c)	19.49ab
III	36.69a(a)	22.54ab(b)	20.44ab(b)	18.46ab(b)	16.98a(b)	17.93a(b)	22.17ab
IV	51.01a(a)	38.78a(ab)	31.47a(ab)	27.77a(ab)	20.47a(ab)	15.47a(b)	30.83a

括号内字母表示不同层次间差异显著($P<0.05$)

表 5 土壤有机碳密度/(Mg C/hm²)

Table 5 The density of soil organic carbon

类型 Types	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	40—50 cm	50—60 cm	合计 Total
I	31.35b(a)	20.81b(bc)	18.88b(bc)	21.58b(b)	17.97b(bc)	16.47a(c)	127.06c
II	34.02b(a)	30.62ab(a)	26.70ab(b)	21.82b(c)	19.64b(c)	20.45a(c)	153.25b
III	36.95ab(a)	25.48b(b)	24.02ab(b)	22.35b(b)	21.07b(b)	21.75a(b)	151.61b
IV	46.79a(a)	40.90a(ab)	33.75a(ab)	31.91a(ab)	26.89a(ab)	19.99a(c)	200.21a

表 6 生态系统各层次碳分布/(Mg C/hm²)

Table 6 Carbon(C) allocation in different layers

类型 Types	植物 Plant		地被物层 Ground cover		土壤 Soil		地上部分 Aboveground		地下部分 Underground		合计 Total
	碳储量 C storage	比例/% Percentage	碳储量 C storage	比例/% Percentage	碳储量 C storage	比例/% Percentage	碳储量 C storage	比例/% Percentage	碳储量 C storage	比例/% Percentage	
I	5.02c	3.75	1.76a	1.32	127.06c	94.93	5.87c	4.39	127.97c	95.61	133.84c
II	6.59c	4.10	0.95b	0.59	153.25b	95.31	4.09c	2.54	156.70b	97.46	160.79b
III	24.87b	13.89	2.60a	1.45	151.61b	84.66	21.77b	12.16	157.31b	87.84	179.08b
IV	60.20a	23.04	0.82b	0.32	200.21a	76.64	48.36a	18.51	212.87a	81.49	261.24a

2.5 土壤碳的影响因素

2.5.1 土壤有机碳与土壤物理性状的关系

(1)土壤有机碳含量与容重 喀斯特峰丛洼地土壤土层浅薄,石砾含量和岩石很多,导致一些剖面深层土壤容重无法测定,根据 12 个群落 36 的土壤剖面数据建立的土壤有机碳含量和土壤容重关系散点图发现,二者存在良好直线关系($P<0.05$)(图 1),土壤有机碳含量随土壤容重的增加递减,从而依据测定的有机碳含量可以求得土壤容重。

(2)土壤碳含量、储量与深度 随着土层深度的增加,喀斯特峰丛洼地 4 种植被类型土壤有机碳密度和

土壤有机碳含量均呈下降趋势(表 7),其降低程度与土壤深度有较好的线性关系,达到极显著水平($P<0.01$),表明喀斯特峰丛洼地地区土壤有机碳有明显的表聚作用,表层土壤有机碳储量贡献大,这是因为喀斯特峰丛洼地表层土壤分布一些凋落物、细根明显多于下层,凋落物的增加、根系的垂直分布及其穿插作用直接影响到土壤剖面各层次的有机碳。

(3)土壤碳含量与水稳性团聚体 土壤有机碳含量与 >8 mm 团聚体含量呈极显著负相关($P<0.01$),与 2—5 mm 和 5—8 mm 含量呈极显著正相关,与 0.25—0.5、0.5—1 和 1—2 mm 团聚体含量呈显著正相关关系,但与 <0.25 mm 团聚体含量相关性不显著。团聚体粒径分布与土壤有机碳含量关系密切,特别是提高 2—5 mm 和 5—8 mm 团聚体含量将有利于土壤有机碳含量的升高(表 8)。

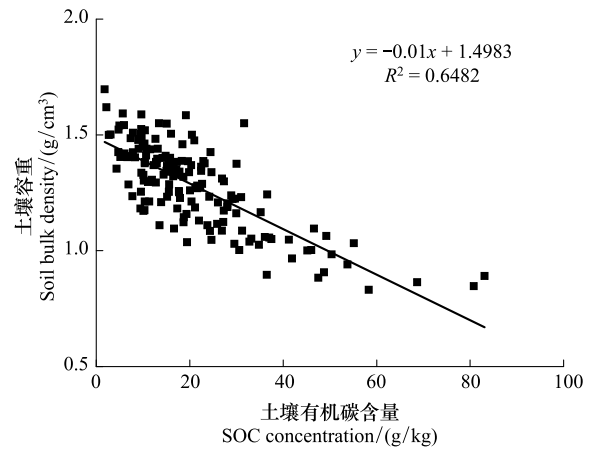


图 1 土壤容重与土壤有机碳相关关系

Fig.1 Correlation between soil bulk density and SOC

表 7 土壤有机碳与土壤深度的关系

Table 7 Relationships between soil organic carbon content, soil carbon storage and soil depth

群落类型 Forest type	土壤碳含量/(g/kg) Soil organic carbon (SOC) content	R^2	土壤碳密度/(kg/m ²) Soil organic carbon (SOC) density	R^2
草丛 Grassland	$Y = -0.269X + 27.196$	0.539 **	$Y = -0.203X + 28.582$	0.474 **
灌丛 Shrub	$Y = -0.287X + 29.537$	0.690 **	$Y = -0.302X + 36.107$	0.835 **
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	$Y = -0.273X + 26.421$	0.543 **	$Y = -0.280X + 30.803$	0.548 **
八角枫 <i>Alangium chinense</i>	$Y = -0.382X + 28.101$	0.501 **	$Y = -0.234X + 34.951$	0.391 **
黄荆 <i>Vitex negundo</i>	$Y = -0.449X + 40.877$	0.599 **	$Y = -0.256X + 37.328$	0.385 **
伊桐 <i>Itoa orientalis</i>	$Y = -1.078X + 79.329$	0.790 **	$Y = -0.776X + 68.323$	0.778 **
菜豆树 <i>Radermachera sinica</i>	$Y = -0.156X + 23.558$	0.516 **	$Y = -0.230X + 34.171$	0.386 **
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	$Y = -0.946X + 63.830$	0.539 **	$Y = -0.622X + 53.059$	0.283 **

表 8 各粒径团聚体含量与土壤有机碳含量的相关系数

Table 8 Relevant coefficients of soil aggregates with different sizes and soil organic carbon content

土壤团聚体粒径 Soil aggregate size/mm	<0.25	0.25—0.5	0.5—1	1—2	2—5	5—8	>8
相关系数 Correlation coefficient	0.009	0.484 *	0.570 *	0.580 *	0.661 **	0.662 **	-0.638 **

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

2.5.2 土壤有机碳与土壤化学性状的关系

喀斯特峰丛洼地土壤有机碳含量与全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、pH 之间均存在极显著的相关性($P<0.01$),其中与全氮和碱解氮的相关系数分别达到 0.86、0.90(表 9),土壤全氮主要来源于有机质,有机质的积累与分解直接影响着氮素在土壤中的贮存和转化,对土壤氮素含量起着主导作用^[12]。而碳氮元素是土壤中酶类和微生物合成的物质基础,影响着酶类和微生物合成的物质基础,影响着酶和微生物的活性,进而影响着土壤有效养分的含量。

2.5.3 土壤有机碳与生物性状的关系

(1) 土壤有机碳与根系生物量(0—2 mm)

根系在土壤中吸收水和矿物质,合成和储存有机物,根系微生物、根系残体以及根系死亡后的空穴对于转化土壤有机碳和无机氮起着重要的作用^[13],根系的垂直分布特征直接影响输入到土壤剖面各层次的有机碳

数量,决定着土壤有机碳的垂直分布^[14-16]。喀斯特峰丛洼地 12 种典型群落土壤有机碳含量与根系生物量关系显著,除黄荆为显著水平外,其他均达到极显著水平(表 10),说明根系的分布及根系分泌物对石灰土土壤有机碳的积累和碳汇的增加具有极其重要的作用。

表 9 土壤有机碳含量与其他土壤养分相关性
Table 9 Relationship between soil organic carbon content and soil nutrients

指标 Index	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	碱解氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	pH	有机碳 SOC
全氮 Total nitrogen	1							
全磷 Total phosphorus	0.57 *	1						
全钾 Total potassium	-0.42 **	0.41 **	1					
碱解氮 Available nitrogen	0.84 **	0.20 **	-0.28 **	1				
速效磷 Available phosphorus	0.37 **	0.13 *	-0.18 **	0.30 **	1			
速效钾 Available potassium	-0.05	0.28 **	0.58 **	0.14 *	-0.53 **	1		
pH	0.34 **	0.07	-0.29 **	0.28 **	0.21 **	-0.07	1	
有机碳 SOC	0.86 **	0.16 **	-0.42 **	0.90 **	0.47 **	0.44 **	0.36 **	1

表 10 群落根系生物量与土壤有机碳含量相关性
Table 10 Relationship between root biomass and soil organic carbon in different community

指标 Index	草丛 Grassland	灌丛 Shrub	盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	八角枫 <i>Alangium chinense</i>	黄荆 <i>Vitex negundo</i>	伊桐 <i>Itoa orientalis</i>	菜豆树 <i>Radermachera sinica</i>	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>
相关系数 Correlation coefficient	0.615 **	0.828 **	0.810 **	0.787 **	0.563 *	0.654 **	0.655 **	0.548 **
显著性检验 Significance test	0.011	0.000	0.000	0.000	0.015	0.003	0.008	0.046

(2)土壤有机碳与土壤微生物生物量碳

微生物生物量碳是土壤活性有机质中最活跃的部分,是土壤生态系统变化的预警及敏感指标,由图 2 可以看出,石灰土微生物生物量碳与有机碳呈显著的正相关($P<0.05$),可用作评价土壤质量变化的生物学指标^[17]。土壤微生物能促使根系周围的有机物形成腐殖酸,促进植物生长发育;植物、凋落物促进土壤有机质含量提高,为土壤微生物提供了良好的生存环境和物质来源,有利于微生物生长,反过来微生物又能促进土壤质量的提高,增加植物可吸收的养分。

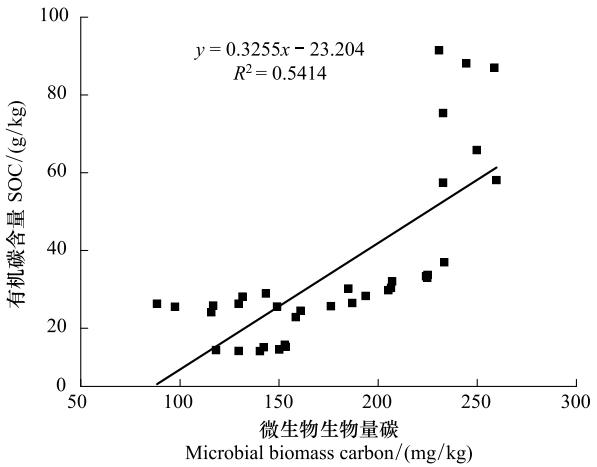


图 2 微生物生物量碳与土壤有机碳相关关系
Fig.2 Correlation between soil microbial biomass carbon and SOC

3 结论与讨论

3.1 喀斯特峰丛洼地不同植被类型的碳格局变化

碳酸盐岩是全球最大的碳库,但现在用于全球变化研究(如 IGBP)的碳循环模型中,将一切地质作用(含盐溶作用)都列为长时间尺度的循环,因此传统的观念认为,碳酸盐岩不积极参与全球碳循环。国际地质对比计划(IGCP)379 项“岩溶作用与碳循环”和其他研究的一系列监测、模拟试验研究资料证明^[7,18],碳酸盐岩既可是极为重要的碳汇,碳酸盐岩下垫面吸收的土壤 CO₂量远较砂岩下垫面所吸收的高,表层岩溶作用全球年回收 2.2 ×10⁸—6.08 ×10⁸ tC/a,按 6.08 ×10⁸ tC/a 计的话占当前碳循环模型中遗漏汇的 1/3,又可是极为重要的碳源,深部有大量的 CO₂释放特别是在板块构造

结合带,仅我国就有 28 条活动断裂带普遍有深部的 CO₂释放。Kerrick 曾估算导致新生代早期全球变暖的喜马拉雅深部的 CO₂释放量为 10¹⁸ mol/Ma,按杨立铮教授的数据换算单位,也可得 0.6 × 10¹⁶ mol/Ma,那么近 50 年来全球大气 CO₂浓度上升与我国西南深部 CO₂释放的关系的确是一个值得深入研究的问题^[9]。植物在溶蚀作用上的固碳能力和对深部 CO₂释放的抑制作用还需要进行深入的研究。本文初步研究了喀斯特峰丛洼地草丛、灌丛、次生林、原生林不同植被类型碳格局及其变化,结果发现,总碳储量为 133.84—261.24 Mg C/hm²,原生林>次生林>灌丛>草丛,土壤>植物>地被物,地下>地上,其中原生林的总碳储量高达 261.24 Mg C/hm²,与同一土壤深度、同区域红壤上白桦林接近^[19],远高于同区域红壤上的马尾松落叶阔叶混交林^[20];植物因受喀斯特环境的胁迫,生长缓慢,植被碳储量原生林时也仅为 60.20 Mg C/hm²,远低于同区域的上述两个典型森林群落;土壤因有机质含量高,同一深度的碳储量远高于上述两个群落(表 11)。

表 11 不同生态系统类型土壤、植被碳储量比较
Table 11 The comparison of carbon storage in soil and vegetation in different ecosystems

森林类型 Forest types	地点 Sites	土层厚度 Soil thickness/cm	土壤碳 Soil carbon		植被碳储量 Vegetation carbon storage/(Mg/hm ²)	总碳储量 Total carbon storage/(Mg/hm ²)	文献 References
			含量 Content/(g/kg)	储量 Storage/(Mg/hm ²)			
峰丛洼地原生林 Primary forest in Cluster-peak-depression Region	广西区环江县	60	30.83	200.21	60.20	261.24	本研究
白桦林 <i>Bemla platyphlla</i> plantation	四川省平武县	60	22.64	165.89	73.74	262.27	[19]
中亚热带常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forests in mid-subtropical	湖南省会同县	60	20.08	65.73	110.98	196.79	[20]

3.2 石灰土土壤有机碳积累的影响机制

土壤有机碳不仅为植被生长提供碳源、维持土壤良好的结构、不断调节土壤质量及功能,同时也以 CO₂等温室气体的形式向大气释放碳。由于土壤碳的库容巨大,其较小的变幅即能导致大气 CO₂浓度较大的波动,因而在全球碳循环过程中起着极其重要的作用。土壤有机碳具有高度异质、动态变化、影响因素复杂及依赖于时空尺度等特点,受生态系统类型、土壤类型、土层深度、土壤管理措施、土壤生物活性及群落组成等多因素的影响,其稳定性机制对于估计有机碳的固定潜力、制定相宜的土壤管理措施以提高有机碳固定、充分发挥土壤有机碳的生态功能均非常重要,国内外学者围绕有机碳稳定性的土壤有机碳难降解性、土壤物理、土壤化学、土壤生物保护 4 种机制进行了广泛的研究,但仍没能达成统一认识^[21-24]。我国西南喀斯特地区主要由白云岩和石灰岩发育的钙质土壤,从理论上认为有利于 CO₂的固定,但缺乏石灰土有机碳积累机制的具体研究。本文初步研究发现,石灰土土壤碳含量随土壤容重、土壤深度的增加而递减,与 2—5 mm 和 5—8 mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关;与土壤养分和 pH 值之间均存在着显著的相关性,其中与氮素的相关性更密切;与根系生物量和微生物生物量碳呈显著正相关。石灰土与其他类型土壤一样,存在着土壤有机碳难降解性、土壤物理、土壤化学、土壤生物保护 4 种机制,但他们之间的相互作用关系及石灰土土壤有机碳积累的稳定性主导机制还有待于深入研究。

致谢:样地调查得到了广西壮族自治区木论国家级自然保护区和环江毛南族自治县林业局的大力支持,还得到了课题组殷庆仓、鹿士杨、何宁、卢凌霄、徐云蕾等成员的帮助,特此致谢。

参考文献 (References):

[1] 丁仲礼,傅伯杰,韩兴国,葛全胜,郭正堂,王毅,樊杰,黄耀,于贵瑞,蔡祖聪,史学正,顾行发. 中国科学院“应对气候变化国际谈判

- 的关键科学问题”项目群简介. 中国科学院院刊, 2009, 24(1): 8-17.
- [2] 李长生, 肖向明, Froking S, Moore III B, Salas W, 邱建军, 张宇, 庄亚辉, 王效科, 戴昭华, 刘纪远, 秦小光, 廖柏寒, Sass R. 中国农田的温室气体排放. 第四纪研究, 2003, 23(5): 493-503.
- [3] Metz B, Davidson O, Swart R, Pan J H. Climate Change 2001, Mitigation 2001: Migration: Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [4] Woodwell G M, Whittaker R H, Reiners W A, Likens G E, Delwiche C C, Botkin D B. The biota and the world carbon budget. Science, 1978, 199(4325): 141-146.
- [5] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.
- [6] 彭晚霞, 王克林, 宋同清, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. 生态学报, 2008, 28(2): 811-820.
- [7] 袁道先. 现代岩溶学和全球变化研究. 地学前缘, 1997, 4(1-2): 17-25.
- [8] 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 朴何春, 涂成龙, 刘涛泽, 张伟, 朱书法. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究: 重要性、现状与趋势. 地学前缘, 2009, 16(6): 1-12.
- [9] 袁道先. “岩溶作用与碳循环”研究进展. 地球科学进展, 1999, 14(5): 425-432.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [12] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 陈利顶, 余莉. 黄土高原小流域土壤养分的空间分布格局—Kriging 插值分析. 地理研究, 2003, 22(3): 373-379.
- [13] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [14] 刘兴良, 马钦彦, 杨冬生, 史作民, 宿以明, 周世强, 刘世荣, 杨玉坡. 川西山地主要人工林种群根系生物量与生产力. 生态学报, 2006, 26(2): 542-551.
- [15] 常宗强, 冯起, 司建华, 李建林, 苏永红. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量. 生态学杂志, 2008, 27(5): 681-688.
- [16] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [17] 俞慎, 李勇, 王俊华, 车玉萍, 潘映华, 李振高. 土壤微生物生物量作为红壤质量生物指标的探讨. 土壤学报, 1999, 36(3): 413-422.
- [18] Yuan D X. The carbon cycle in karst. Zeitschrift Fur Geomorphologie Supplementband, 1997, 91-102.
- [19] 鲜骏仁, 张远彬, 王开运, 胡庭兴, 杨华. 川西亚高山 5 种森林生态系统的碳格局. 植物生态学报, 2009, 33(2): 283-290.
- [20] 宫超, 汪思龙, 曾掌权, 邓仕坚, 陈建平, 龙康寿. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1935-1941.
- [21] Six J, Conant R T, Paul E A, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil, 2002, 241: 155-176.
- [22] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.
- [23] Luetzow M V, Kogel-Knabner I, Ekschmitt K, Matzner E, Guggenberger G, Marschner B, Flessaf H. Stabilization of organic matter in temperate soils mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4): 426-445.
- [24] 刘满强, 胡 锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展. 生态学报, 2007, 27(6): 2642-2650.