植物营养与肥料学报 2012,18(2):374 -381
Plant Nutrition and Fertilizer Science

喀斯特峰丛洼地次生林土壤有机碳的剖面分布特征

何 宁[1,2], 宋同清[1,2], 彭晚霞[1,2], 曾馥平[1,2], 王克林[1,2*],
杜 虎[1,2], 鹿士杨[1,2], 卢凌霄[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,广西环江 547100)

摘要: 采用样方法研究了喀斯特峰丛洼地八角枫(*Alangium chinensis*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、黄荆(*Vitex negundo*) 3 种典型次生林群落土壤有机碳(SOC)含量、密度的剖面分布特征。结果表明:土壤有机碳含量与土壤根系生物量呈极显著正相关;不同次生林群落 0—60 cm 土壤有机碳平均含量和密度不同,依次为黄荆 > 八角枫 > 盐肤木,盐肤木的碳含量显著低于黄荆和八角枫群落,碳密度显著低于黄荆;3 种次生林群落土壤碳含量和密度都与土壤深度有较好的线性关系,随土壤深度的增加而降低,20—60 cm 各层次的差异不显著,但均显著低于 0—10 cm 土层;不同次生林群落土壤各层次碳含量和密度均表现为黄荆 > 八角枫 > 盐肤木,其中盐肤木群落 10—40 cm 3 个层次的碳含量及 20—30 cm 的碳密度显著低于另外 2 个群落。由此可见,喀斯特峰丛洼地退化生态系统合理的植被恢复方式是促进该区域生态重建和碳贮存的关键。

关键词: 土壤有机碳;剖面分布;次生林;喀斯特峰丛洼地
中图分类号: S718.57+6;S153.6+2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008 -505X(2012)02 -0374 -08

Profile distribution characteristics of soil organic carbon in secondary forests in depressions between Karst hills

HE Ning[1,2], SONG Tong-qing[1,2], PENG Wan-xia[1,2], ZENG Fu-ping[1,2], WANG Ke-lin[1,2*],
DU Hu[1,2], LU Shi-yang[1,2], LU Ling-xiao[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 for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China*)

Abstract: The profile distribution characteristics of soil organic carbon (SOC) content and density in three secondary forests communities (*Alangium chinensis*, *Rhus chinensis* and *Vitex negund*) in depressions between Karst hills in southwest China were investigated. The results show that there are significant correlations ($P < 0.01$) between soil organic carbon contents and root contents in the three communities. The average soil organic carbon contents and densities are different in the layers from 0 -10 cm to 50 -60 cm of the three communities, and both of them are in the order of *Vitex negundo* > *Alangium chinensis* > *Rhus chinensis*. Soil organic carbon contents and densities in the three forest types are decreased with the increase of soil depth, and there is a good liner relationship between them. The maxima of soil organic carbon and density are likely in 0 -10 cm soil surface layer. The significant or highly significant differences are found in both soil organic carbon contents and densities between 0 -10 cm soil

收稿日期: 2011 -07 -19　　**接受日期:** 2011 -12 -22
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(XDA05050205,XDA05070404);国家科技支撑计划(2010BAE00739);国家自然科学基金项目(31070425,31000224,30970508,U1033004)资助。
作者简介: 何宁(1986—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事生态恢复与重建研究。E-mail: hening2010@163.com.
*通讯作者 Tel: 0731 -84615201,E-mail: kelin@isa.ac.cn

layer and other layers in the same forest community, while no significant differences are found among other layers. Soil organic carbon contents and densities are in the order of *Vitex negundo* > *Alangium chinensis* > *Rhus chinensis* communities in the same soil layers of different forest communities. The soil organic contents of 10 -40 cm soil layers and soil organic carbon densities of 20 -30 cm soil layers of *Rhus chinensis* community are significantly lower than those of the other two communities. Therefore, reasonable vegetation restoration plays a key role in improving regional ecological reconstruction and carbon storage in degraded ecosystems in depressions between Karst hills in southwest China.

Key words: soil organic carbon; profile distribution; secondary forest; depression between Karst hills

全球气候变化问题对人类的影响越来越显著。由于人类活动,全球碳循环发生了显著改变,以 CO_2 为主的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[1]。森林生态系统作为陆地生物圈的主要碳库,在陆地生态系统碳循环中起着重要的作用。森林土壤碳库占全球土壤碳库的 43%[2],如果将森林土壤生态系统中根系的碳储量计算在内,森林土壤有机碳库储量将占全球土壤碳库的 50% 左右,其碳储量的变化是导致大气碳库和全球气候变化的主要因素[3],因而森林土壤有机碳储量及空间分布成为碳循环研究的热点[4-6]。

近年来,不少学者对土壤碳储量进行了大量的研究,方精云等[7]、王绍强等[6,8]、刘国华等[9]、王效科等[10]对我国森林碳储量分别进行了估算,但由于土壤空间变异性较大,采样点密度相对不足,缺乏连续、可靠、完整、统一的土壤剖面数据资料,估算结果差别很大,存在着明显的不确定性[11]。喀斯特生态系统是地球表层生态系统中的重要组成部分[12],碳酸盐岩在全球分布面积广泛,由于 CO_2 - H_2O - $CaCO_3$ 系统活跃的生物过程和化学过程,在全球碳循环中发挥着重要的作用。喀斯特峰丛洼地位于我国西南喀斯特南部斜坡地带,岩石裸露率高,地形复杂,土壤破碎化严重,石砾含量较高,独特的地质背景、土壤性质、小生境气候、人为干扰及植被类型、覆盖率等因素导致不同植被群落土壤有机碳差异很大[13]。本研究选择喀斯特峰丛洼地八角枫(*Alangium chinensis*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、黄荆(*Vitex negundo*)3 种典型次生林群落为研究对象,分析了不同植被类型土壤有机碳含量、碳密度的差异及其垂直分布特征与变化规律,以期为喀斯特地区森林土壤碳储量估算提供依据,为实施促进该区域碳汇功能提升的植被恢复方式与生态重建技术提供参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,地理位置为东经 108°18′56.9″～108°19′58.4″,北纬 24° 43′58.9″～24°44′48.8″,面积 146.1 hm^2,为典型的喀斯特峰丛洼地景观,属于亚热带季风气候区,多年平均气温 19.9℃,7 月平均气温 27.9℃,1 月平均气温 10.1℃,极端温度分别为 38.7℃ 和 -5.2℃,年平均≥10℃ 积温为 6300 ℃,无霜期 329 d。多年平均降水量 1389.1 mm,4 ～8 月为雨季,降水量占全年的 73.7%,9 月至次年 3 月为旱季。年平均日照 1451.1 h,平均太阳总辐射量 413.8 KJ/cm^2,其中有效辐射量为 211.9 KJ/cm^2。研究区地势起伏较大,四周高,中间低,海拔高度为 272.0 ～647.2 m,最大相对高差 375.2 m,土壤主要为深色或棕色石灰土,地形破碎,基岩裸露,洼地基岩裸露面积占 15%,土壤厚度 20 ～160 cm,坡地基岩裸露面积≥30%,土层较薄,一般为 10 ～50 cm。研究区在 1984 年之前曾遭到砍伐、樵采、垦殖、放牧、火烧等大面积破坏,此后一直撂荒至现在,经长期自然恢复,形成不同的草丛、草灌丛及各种次生林群落。草丛、草灌丛以金樱子(*Ros laevigata*)、白茅(*Imperata cylindrical*)、蔓生莠竹(*Microstegium vagans*)、鬼针草(*Bidens parviflora*)、蕨菜(*Pteridium aquilinum*)等为主要的建群种或共建种。次生林面积约 6.8 hm^2,主要以八角枫、盐肤木和黄荆 3 个群落类型为主、零星分布有圆叶乌桕(*Sapium rotundifolium*)、华南皂荚(*Gleditsia fera*)、小构树(*Broussonetia kazinok*)、红背山麻杆(*Alchornea trewioides.*)、竹叶花椒(*Zanthoxylum armatum*)、灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)等其他次生林群落。由于干扰强度大,退化严重,它们中的大部分均为阳性先锋物种[14]。本文选择岩性、海拔、地形、植被盖度等条件均相似的 3 种典型次生林群落为研究对象,基本情况见表 1。

表1 3种典型次生林群落基本情况

Table 1 Details of the three typical secondary forest communities

群落类型 Forest type	坡度 Slope(°)	坡向 Aspect	坡位 Slope position	海拔(m) Elevation	植被盖度(%) Vegetation coverage	土壤类型 Soil type
八角枫 *Alangium chinensis*	5	W	坡脚 Slope foot	303	100	棕色石灰土 Brown limestone
盐肤木 *Rhus chinensi*	5	S	坡脚 Slope foot	298	95	棕色石灰土 Brown limestone
黄荆 *Vitex negundo*	5	S	坡脚 Slope foot	299	95	棕色石灰土 Brown limestone

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置调查与取样分析 2010年8月至9月,基于全面踏查,在林分特征、立地条件一致且连片的八角枫(*Alangium chinensis*, 文中以BJF表示, 1.6 hm^2),盐肤木(*Rhus chinensi* ,以YFM表示,1.4 hm^2),黄荆(*Vitex negundo* ,以HJ表示,1.1 hm^2)3个群落内,参照《IPCC优良做法指南》对系统随机抽样的建议,各设置3个20 m × 20 m标准样地,样地间隔25 m,各样地面积分别占群落面积的7.5%、8.5%和10.1%。首先将样地划分为16个5 m × 5 m的小样方,各获得25个网格点,用土钻测定每个网点的土壤厚度。在每个标准样地中根据土壤平均厚度挖取一个典型土壤剖面分层取样,由于土层较薄,每10 cm土层取三个环刀用于测定土壤容重,同时取500 g土样。在每个标准样地的4角和中间分0—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—60 cm六层分层用土钻取样,5个点同层次的土样组成一个混合样。由此共获取剖面样品38个,混合样54个。土样置于阴凉处自然风干后,用四分法取土样过0.15 mm筛,编号后供分析测定用。去除环刀内土样的植物根系和石砾,在105 ℃烘干24 h后,称重并计算土壤容重。采用孔径1 mm的筛子滤去可见植物根系,用清水洗净、烘干(70 ℃)至恒重,称重得根系生物量。土壤有机碳测定采用重铬酸钾—外加热法[15]。

1.2.2 土壤容重推算 喀斯特峰丛洼地森林土壤土层浅薄、石砾含量和岩石较多,导致一些剖面深层的土壤容重无法测定。有研究表明,土壤容重、土层、土壤有机质含量间存在相关关系[16-17]。根据3个群落9个土壤剖面的数据建立的土壤有机碳含量和土壤容重关系散点图,发现二者存在良好的直线关系($P<0.05$)(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。

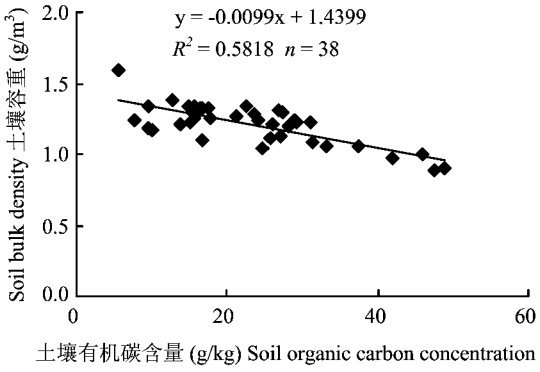

图1 喀斯特峰丛洼地次生林土壤有机碳含量与容重的关系

Fig. 1 Relationship between soil organic carbon concentration and soil bulk density in secondary forests of depressions between Karst hills

1.2.3 有机碳密度的计算 土壤有机碳密度是指单位面积一定深度土层中的土壤有机碳(SOC)贮量,一般用 t/hm^2 或 kg/m^2 表示。由于它以土体体积为基础作计算,排除了面积和土壤深度的影响,因此土壤碳密度已成为评价和衡量土壤中有机碳储量的一个极其重要的指标[18]。某一土层i的有机碳密度(SOC_i, kg/m^2)的计算公式为:

$$SOC_i = C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i)/100 \quad (1)$$

式中:C_i 为土壤有机碳含量(g/kg);D_i 为容重(g/m^3);E_i 为土层厚度(cm);G_i 为直径大于2 mm的石砾所占的体积百分比(%)。

如果某一土壤剖面由k层组成,那么该剖面的有机碳密度(SOC_t, kg/m^2)为:

$$SOC_t = \sum_{i}^{k} C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i)/100 \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 土壤根系生物量的垂直分布特征

由图 2 可以看出,土壤根系生物量主要分布在 20 cm 以上土层,随土层深度增加出现下降趋势。八角枫群落 0—10 cm 与 10—20 cm 土层的根系生物量有显著差异($P<0.05$),与其他土层的差异极显著($P<0.01$);盐肤木群落与黄荆群落 0—10 cm 和 10—20 cm 土层与其他土层之间均呈显著或极显著差异。3 种次生林群落中根系生物量和有机碳含量呈极显著或者显著正相关($P<0.01$),相关系数在 0.563 ~ 0.810 之间(表 2)。土壤有机碳来源于植物、动物、微生物残体和根系分泌物等多个方面,因此不能单纯用根系生物量作为判断土壤有机碳含量高低的标准。

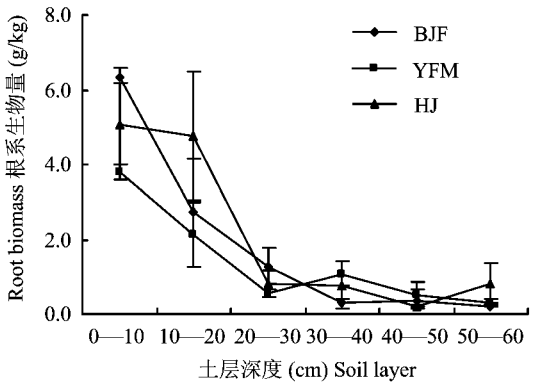

图 2　不同林分土壤各层根系生物量垂直分布

Fig. 2　The vertical distributions of the root biomass in three secondary forests

[注(Note):BJF—八角枫群落 *Alangium chinensis*;YFM—盐肤木群落 *Rhus chinensi*;HJ—黄荆群落 *Vitex negundo*]

2.2 土壤有机碳含量垂直分布特征

3 种次生林群落 0—60 cm 土壤平均有机碳含量介于 16.86 ±2.70 ~ 24.94 ±2.98 g/kg 之间,依次为黄荆(24.94 ±2.98 g/kg) > 八角枫(24.72 ±3.40 g/kg) > 盐肤木(16.86 ±2.70 g/kg),黄荆和八角枫的差异不显著,但均显著高于盐肤木;不同次生林群落土壤各层有机碳含量介于 13.07 ±3.33 ~ 40.65 ±5.48 g/kg 之间,其中最大值是最小值的 3.11 倍,最大值均出现在 0—10 cm 土层,最小值则分布在 40—60 cm 土层。各群落表层土壤有机碳含量极显著高于其他土层,随着土层深度的增加,土壤有机碳含量均呈下降趋势,其降低程度与土壤深度有较好的线性关系(表 3),10—60 cm 土层土壤有机碳含量变化平缓,无显著差异(图 3)。八角枫、盐肤木、黄荆 10—20 cm 土层的碳含量分别为 0—10 cm 土层的 64.85%、54.38%、63.27%;20—30 cm 分别为 0—10 cm 土层的 57.42%、48.68%、59.32%,30—60 cm 分别为 0—10 cm 土层的 47.55%、44.26%、52.66%;不同次生林群落同一土层土壤碳含量差异明显,均为黄荆 > 八角枫 > 盐肤木,仅盐肤木 10—40 cm 3 个土层的碳含量显著低于黄荆和八角枫,其他层次的差异不显著。

表 2　各群落根系生物量与土壤有机碳含量的相关分析

Table 2　Relationships between root biomass and soil organic carbon content

项目 Item	八角枫 BJF	盐肤木 YFM	黄荆 HJ
相关系数 Person correlation	0.787**	0.810**	0.563*
显著性检验 Significance test	0	0	0.015

注(Note):BJF—*Alangium chinensis*;YFM—*Rhus chinensi*;HJ—*Vitex negundo*. * 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著 Represent significant correlations at the 0.05 and 0.01 levels, respectively

表 3　土壤碳与土壤深度的关系

Table 3　Relationships between SOC content and soil depth, and between SOC density and soil depth

群落类型 Forest type	土壤碳含量(g/kg) SOC content	R^2	土壤碳密度(kg/m²) SOC density	R^2
八角枫 *Alangium chinensis*	Y = −0.382X + 28.101	0.501**	Y = −0.024X + 3.495	0.391**
盐肤木 *Rhus chinensi*	Y = −0.273X + 26.421	0.543**	Y = −0.028X + 3.080	0.548**
黄荆 *Vitex negundo*	Y = −0.449X + 40.877	0.599**	Y = −0.035X + 3.949	0.692**

注(Note):SOC—Soil organic carbon. ** 显著性检验水平 0.01 Correlation is significant at the 0.01 level.

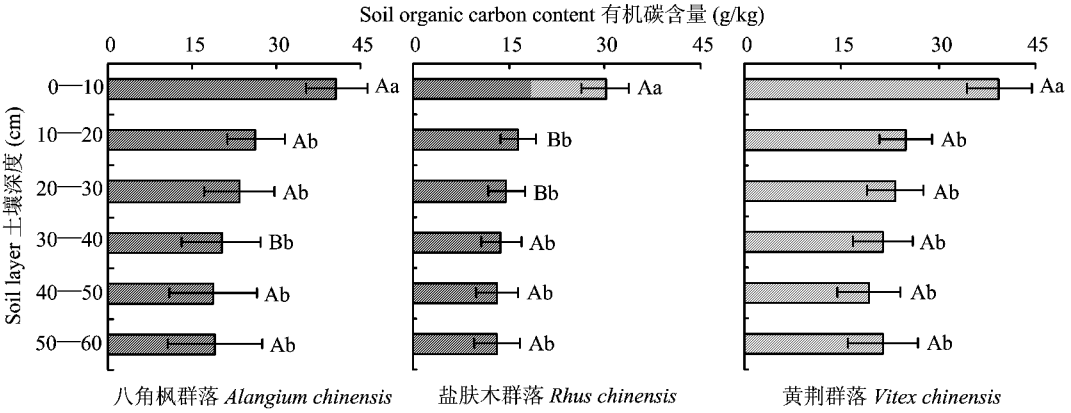

图3 不同林分土壤各层有机碳含量垂直分布

Fig. 3 The vertical distribution of soil organic carbon contents in different forest types

[注(Note):不同大、小写字母分别表示不同植被类型同一土层和同一植被类型不同土层间在 $P<0.05$ 水平下差异显著 Different capital and small letters mean significant difference at $P<0.05$ of the same soil layers in different forest types and the different soil layers in same forest types, respectively.]

2.3 土壤有机碳密度垂直分布特征

就整个土层而言,3 种次生林群落的有机碳密度为黄荆群落(16.94 kg/m^2)>八角枫群落(15.94 kg/m^2)>盐肤木群落(12.59 kg/m^2),黄荆与盐肤木的差异显著;不同群落类型土壤各层有机碳密度变化趋势与土壤有机碳含量一致,都随土层深度的增加而降低,同样存在着较好的线性关系(图4,表3);表层土的碳密度与其他土层差异显著,其他各层之间无显著差异。八角枫、盐肤木、黄荆 0—10 cm 土层的土壤碳密度分别占整个土层的 23.28%、23.31%、27.18%,10—40 cm 土层的占整个土层的 14.16%~16.99%,40—60 cm 的占整个土层的 13.50%~14.67%;不同群落同一土层的碳密度不同,均为黄荆>八角枫>盐肤木,其中盐肤木 10—20 cm 土层显著低于黄荆,20—30 cm 显著低于黄荆和八角枫,其他各层差异不显著;同一群落不同土层、同一土层不同群落间的土壤碳密度的变异程度不同,最高达 55.68%,最低为 2.60%。

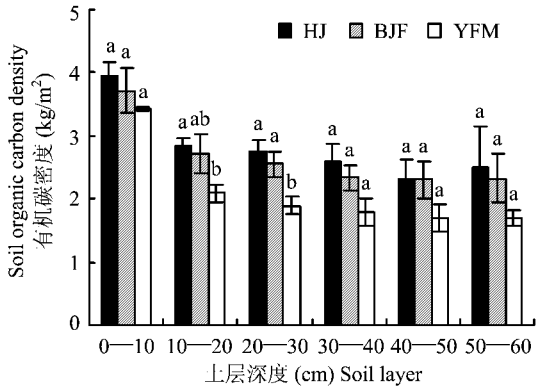

图4 不同林分类型土壤各层的有机碳密度

Fig. 4 The vertical distribution of soil organic carbon densities in different forest types

[注(Note):BJF—八角枫群落 *Alangium chinensis*;YFM—盐肤木群落 *Rhus chinensi*;HJ—黄荆群落 *Vitex negundo*. 图中每 10 cm 土层不同字母表示林分类型间土壤有机碳密度差异显著($P<0.05$) Different letters are significantly different at $P<0.05$ among different forest types.]

3 讨论

3.1 土壤有机碳与土壤根系生物量的关系

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[19]。因此,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,从而决定着土壤有机碳的垂直分布[20-22]。在西南喀斯特地区,自然生态系统由于其特殊的水文地质结构,植被经常处于临时性干旱状态,受到水分和土壤养分的双重胁迫[23]。立地生境的严酷、土层浅薄、水分胁迫等条件,使得喀斯特森林有较高的根系生物量。随着西南喀斯特地区生态治理工程的实施,喀斯特地区植被恢复呈正向演替,群落的水平结构和垂直层次区域复杂,土壤根系生物量逐步累积[23],土壤微生物生物量碳及微生物熵明显上升[24]。若森林砍伐后转变成农田和草地,地上部生物量明显降低,而土壤碳储量的变化则比较复杂。森林砍伐后,由于凋落物输入减少,有机质分解速度提高,土壤有机质含量

快速下降[25];在农田和草地初期,表层土壤碳含量存在减少的相似变化趋势,而 8 年后,草地表层的土壤碳含量恢复到转变前森林土壤碳含量水平[26]。本研究中喀斯特峰丛洼地次生林 3 个群落根系在土壤中的分布与土壤有机碳含量的分布有着相同或相近的变化趋势,土壤根系生物量与土壤有机碳含量呈极显著正相关关系,说明根系的分布及根系分泌物对于土壤有机碳的积累和碳汇的增加具有极其重要的作用。但这一结果是否适用于西南喀斯特地区其他区域和群落,有待进一步研究。

3.2　喀斯特峰丛洼地次生林群落土壤有机碳含量

土壤有机碳含量主要取决于植被每年的归还量和分解速率,而植被类型、气候特点以及土壤性质的差异均会影响土层内有机碳含量的大小及分布。而且,由于土壤有机碳处于不断分解与形成的动态过程,因此测得的土壤有机碳含量是生态系统在特定条件下的动态平衡值[27]。本研究中喀斯特峰丛洼地次生林 3 个群落土壤有机碳含量随土层加深均呈下降趋势,且降低程度与土壤深度有较好的线性关系,与鼎湖山自然保护区 4 种次生植被类型(马尾松针叶林、针阔混交林、次生季风常绿阔叶林和常绿灌丛)的土壤有机碳贮量及其分配研究的结果一致[16]。土壤有机碳以表层土壤储碳比重最大,碳储量贡献大。这说明一方面残枝落叶分解后输入土壤的有机碳都聚集在土壤表层,土壤有机碳的表聚性较明显;另一方面由于林下灌草根系主要分布在 20 cm 以上土层,根系生物量对于土壤有机碳含量有一定影响。而 30 cm 以下土层,各林分土壤有机碳含量差异变小,这可能是由于土壤成土母质大致相同,根系生物量下降,土壤有机碳流失等原因造成的,植被类型的差异对其影响不大。

不同植被条件下,由于受土壤微生物、凋落物分解转化程度、根系分布以及人为活动的影响,土壤有机碳含量存在差异,杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统凋落物的质量高(高的 C/N、木质素/N)时,土壤微生物活性相对较低,通过土壤呼吸释放到大气的 CO_2 较少,土壤矿化作用较弱,土壤有机碳累积明显[28];相反,如果凋落物质量低,微生物活性相对较高,土壤矿化作用较强,通过土壤呼吸释放到大气中的 CO_2 量较大,土壤有机碳的累积速率较慢。不同群落类型的树种组成不同,引起凋落物的种类、产量和质量也不同,从而对森林土壤有机碳积累和碳汇产生不同的影响。喀斯特峰丛洼地 3 种次生林群落下土壤有机碳含量的变化趋势为黄荆 > 八角枫 > 盐肤木。

3.3　喀斯特峰丛洼地次生林群落土壤有机碳密度

我国森林土壤有机碳密度分布受凋落物输入量影响,而且受低温和凋落物质量(高的 C/N、木质素/N)的限制,凋落物分解缓慢,土壤生态系统中积累的有机碳较高[29]。不同群落中植物根系分布、凋落物以及人工扰动土壤的方式不同,导致土壤容重不同,有机碳含量不同,有机碳密度也不同[21]。本研究中 3 个群落土壤有机碳密度的变异系数随深度增加而增大,与方云霆等人的研究结论相同[16]。喀斯特峰丛洼地不同次生林群落土壤有机碳密度都随土层深度的增加而降低,以表层土有机碳密度最大。这是因为植物的根系主要集中分布在土壤表层,而枯落物和腐殖质层对土壤有机碳积累的影响也会随着土壤深度的增加而降低。不同群落的土壤有机碳含量和有机碳密度在 10—30 cm 土层存在显著差异,植被类型是土壤有机碳垂直分布的主要影响因子。喀斯特地区地形复杂,土壤破碎化严重,石砾含量较高,土壤稳定性差,生态环境脆弱,植被覆盖率和人为活动直接影响着土壤有机碳的空间分布。因此,适宜的树种及其搭配比例,造林模式和森林生态系统管理,对于维持和增加该地区土壤碳汇有着重要的意义。

参 考 文 献:

[1] 丁仲礼, 傅伯杰, 韩兴国, 等. 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[J]. 中国科学院院刊, 2009, 24(1): 8-17.
Ding Z L, Fu B J, Han X G *et al*. Brief introduction to a cluster of projects of "Research in key issues of international negotiation with regard to coping with climate change" by CAS[J]. Bull. Chin. Acad. Sci., 2009, 24(1): 8-17.

[2] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones[J]. Nature, 1982, 298(8): 156-159.

[3] Watson R T, Noble I R, Bolin B *et al*. Land-use, land-use change, and forestry: a special report of the IPCC [R]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2000. 189-217.

[4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.

[5] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.
Pan G X, Zhou P, Li L Q *et al*. Core issues and research progresses of soil science of C sequestration[J]. Acta Pedol. Sin., 2007, 44(2): 327-337.

[6] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研

究，1999，18(4)：349-356.
Wang S Q, Zhou C H. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China[J]. Geog. Res., 1999, 18(4): 350-356.

[7] 方精云，刘国华，徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库[A]. 王庚辰，温玉璞. 温室气体浓度和排放监测及相关过程[C]. 北京：中国环境科学出版社，1996. 109-128.
Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China [A]. Wang G C, Wen Y P. Monitoring and relevant process of greenhouse gas concentration and emission [C]. Beijing: China Environment Sciences Publishing House, 1996. 109-128.

[8] 王绍强，周成虎，罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨[J]. 地理科学进展，1999，18(3)：238-244.
Wang S Q, Zhou C H, Luo C W. Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China[J]. Prog. Geog., 1999, 18(3): 238-244.

[9] 刘国华，傅伯杰，方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报，2000，20(5)：733-739.
Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forest and its contribution to global carbon balance[J]. Acta Ecol. Sin., 2000, 20(5): 733-739.

[10] 王效科，冯宗炜，欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究[J]. 应用生态学报，2001，12(1)：13-16.
Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystem in China[J]. Chin. Appl. Ecol., 2001, 12(1): 13-16.

[11] 王绍强，周成虎，李克让，等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报，2000，55(5)：533-544.
Wang S Q, Zhou C H, Li K R *et al*. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China[J]. Acta. Geog. Sin., 2000, 55(5): 533-544.

[12] 曹建华，袁道先，章程，等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境，2004，32(1)：1-8.
Cao J H, Yuan D X, Zhang C *et al*. Karst ecosystem constrained by geological conditions in southwest China[J]. Earth Environ., 2004, 32(1): 1-8.

[13] 吴海勇，曾馥平，宋同清，等. 喀斯特峰丛洼地土壤有机碳和氮素空间变异特征[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(5)：1029-1036.
Wu H Y, Zeng F P, Song T Q *et al*. Spatial variations of soil organic carbon and nitrogen in peak-cluster depression areas of Karst Region[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2009, 15(5): 1029-1036.

[14] 宋同清，彭晚霞，曾馥平，等. 桂西北喀斯特人为干扰区植被的演替规律与更新策略[J]. 山地学报，2008，26 (5)：597-604.
Song T Q, Peng W X, Zeng F P *et al*. Vegetation succession rule and regeneration strategies in disturbed Karst area, Northwest Guangxi[J]. J. Mount. Sci., 2008, 26(5): 597-604.

[15] 史瑞和，秦怀英，安战士，等. 土壤农化分析(第二版)[M]. 北京：农业出版社，1988. 33-36.
Shi R H, Qin H Y, An Z S *et al*. Soil agrochemical analysis (2nd ed.)[M]. Beijing: Agriculture Publishing House, 1988. 33-36.

[16] 方运霆，莫江明，Sandra B，等. 鼎湖山自然保护区土壤有机碳贮量和分配特征[J]. 生态学报，2004，24(1)：135-142.
Fang Y T, Mo J M, Sandra B *et al*. Storage and distribution of soil organic carbon in Dinghushan biosphere reserve[J]. Acta Ecol. Sin., 2004, 24(1): 135-142.

[17] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. Eur. J. Soil Sci., 1996, 47: 151-163.

[18] 杨金艳，王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. 生态学报，2005，25(11)：2875-2882.
Yang J Y, Wang C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China[J]. Acta Ecol. Sin., 2005, 25(11): 2875-2882.

[19] 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[J]. 地球科学进展，2005，20(1)：99-105.
Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. Adv. Earth Sci., 2005, 20(1): 99-105.

[20] 刘兴良，马钦彦，杨冬生，等. 川西山地主要人工林种群根系生物量与生产力[J]. 生态学报，2006，26(2)：542-551.
Liu X L, Ma Q Y, Yang D S *et al*. Studies on root biomass and productivity in dominant plantation populations in the mountainous land in western Sichuan[J]. Acta Ecol. Sin., 2006, 26(2): 542-551.

[21] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecol. Appl., 2002, 10(2): 423-436.

[22] 常宗强，冯起，司建华，等. 祁连山不同植被类型土壤碳贮量和碳通量[J]. 生态学杂志，2008，27(5)：681-688.
Chang Z Q, Feng Q, Si J H *et al*. Soil carbon storage and CO_2 flux under different vegetation types in Qilian Mountains[J]. Chin. J. Ecol., 2008, 27(5): 681-688.

[23] 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]. J. Plant Ecol., 2010, 34(5): 611-618.

[24] 魏媛，张金池，俞元春，等. 贵州高原退化喀斯特森林恢复过程中土壤微生物生物量碳、微生物熵的变化[J]. 农业现代化研究，2009，20(4)：487-490.
Wei Y, Zhang J C, Yu Y C *et al*. Changes of soil microbial biomass C and qSMBC during degraded karst forest restoration in Guizhou Plateau[J]. Reas. Agric. Modern, 2009, 20(4): 487-490.

[25] 杨景成，韩兴国，黄建辉，等. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响[J]. 应用生态学报，2003，14(8)：1385-1390.
Yang J C, Han X G, Huang J H *et al*. Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem[J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2003, 14(8): 1385-1390.

[26] Moraes J L, Cerri C C, Melillo J M *et al*. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon Basin[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1995, 59(1): 244-247.

[27] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 等. 贡嘎南山—拉轨岗日山南坡高寒草原生态系统表层土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 346-350.
Wang J H, Ouyang H, Wang Z H *et al*. Influential factors and distribution characteristics of topsoil organic carbon of alpine grassland ecosystem in the south slope of Gongga south Mountain2Lhaoi kangri mountain[J]. Chin. J. Soil Sci., 2010, 41(2): 346-350.

[28] 黄宇, 冯宗炜, 汪思龙, 等. 杉木、火力楠纯林及其混交林生态系统 C、N 贮量[J]. 生态学报, 2005, 25(12): 3146-3154.
Huang Y, Feng Z W, Wang S L *et al*. C and N stocks under three plantation forest ecosystems of Chinese-fir, Michelia-macclurei and their mixture[J]. Acta Ecol. Sin., 2005, 25(12): 3146-3154.

[29] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(1): 72-80.
Li K R, Wang S Q, Cao M K. Carbon storage of vegetation and soil in China[J]. Sci. China(Ser. D), 2003, 33(1): 72-80.