

# 贵州普定喀斯特坡地土壤剖面有机碳及其同位素组成<sup>\*</sup>

田丽艳<sup>1,2</sup> 郎赞超<sup>1\*\*</sup> 刘丛强<sup>1</sup> 丁虎<sup>1</sup> 赵志琦<sup>1</sup> 刘涛泽<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 选取贵州省中西部普定县城周边具有不同岩性(碎屑岩和碳酸盐岩)的2个坡地的土壤剖面为研究对象,采集了不同坡地位置的砂岩黄壤剖面和黄色石灰土剖面,分析了土壤pH值、C/N值、土壤有机碳(SOC)含量以及有机碳同位素组成,探讨了黄壤与石灰土 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值组成差异和SOC含量沿剖面以及在不同坡地位置的分布特征。结果表明:砂岩黄壤和黄色石灰土的有机碳含量变化范围分别为3.1~79.7和8.2~73.3 g·kg<sup>-1</sup>;沿坡面顶端到底端2种土壤类型SOC含量均呈现出坡脚>坡顶>坡腰;除砂岩黄壤坡顶剖面的个别层位外,2类土壤剖面SOC含量均随剖面深度的增加而降低;砂岩黄壤和石灰土剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值的变化范围分别为-25.4‰~-20.7‰和-23.2‰~-18.8‰;除黄色石灰土坡腰剖面外,其余土壤剖面的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值均表现为随剖面表层至20~40 cm升高,然后随深度增加而降低,最后趋于稳定的特征;2类坡地土壤SOC含量以及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值的变化反映了不同类型植被残体的输入以及在土壤中的降解累积特征,有助于了解坡地堆积侵蚀以及成土过程对SOC循环的影响。

**关键词** 喀斯特地区; 黄壤; 石灰土; 土壤有机碳; 稳定碳同位素

中图分类号 X142 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2013)9-2362-06

**Distribution patterns of organic carbon and its isotope compositions in soil profiles on the slopes in Puding karst areas of Guizhou Province, Southwest China.** TIAN Li-yan<sup>1,2</sup>, LANG Yun-chao<sup>1\*\*</sup>, LIU Cong-qiang<sup>1</sup>, DING Hu<sup>1</sup>, ZHAO Zhi-qi<sup>1</sup>, LIU Tao-ze<sup>1</sup> (<sup>1</sup> State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; <sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(9): 2362–2367.

**Abstract:** Soil samples were collected from two types of slope soil profiles with different lithology (clastic rock and carbonate rock) around the Puding County of Guizhou Province, and their pH values, C/N ratios, organic carbon (SOC) contents, and SOC isotope compositions were analyzed, aimed to approach the distribution patterns of SOC and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$  in the two types of the soil profiles at different slope positions. The results showed that the SOC contents in the profiles of sandstone yellow soil and limestone yellow soil ranged from 3.1–79.7 g·kg<sup>-1</sup> and 8.2–73.3 g·kg<sup>-1</sup>, respectively. From the top to the bottom of the slopes, the SOC contents in the two soils showed the same distribution pattern, *i. e.*, slope bottom > slope top > slope waist. Across each soil profile, the SOC content decreased as a function of soil depth, except that of the sandstone yellow soil profile on the slope top. The  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$  values in the profiles of sandstone yellow soil and limestone yellow soil varied in the range of -25.4‰ to -20.7‰ and -23.2‰ to -18.8‰, respectively. Except for the limestone yellow soil profile on the slope waist, the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$  values in the other soil profiles increased firstly from the surface layer to the 20–40 cm depth, then decreased as a function of soil depth, and finally kept stable at the base of the soil profiles. The variations of the SOC

\* 国家自然科学基金项目(41073099和41203090)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-EW-402和KZCX2-YW-437)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: langyc822@163.com

收稿日期: 2013-03-13 接受日期: 2013-06-09

contents and the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$  values as a function of soil depth could be due to the input of plant residue and its degradation and accumulation in soil. This study provided insights to the slope soil erosion and the effects of pedogenic process on the SOC circulation of slope soils.

**Key words:** karst area; yellow soil; limestone soil; soil organic carbon; stable carbon isotope.

土壤有机碳库是陆地生态系统最大的碳库,其变化受到气候、成土过程、时间、母质、植被、地形等诸多因素影响,同时也与土壤类型、植被覆盖以及土地利用方式等有着密切关系(Wang *et al.*, 2003; Jarecki *et al.*, 2005; 王发刚等, 2008)。土壤有机碳(SOC)的微小变化可能导致全球碳收支以及气候系统的稳定性发生改变(Smith *et al.*, 2008)。并且, SOC是控制土壤肥力和农业生产的关键因素, SOC的流失可以导致土壤肥力和土壤质量下降, 影响陆地生态系统的稳定性(Zhong & Zhao, 2001)。喀斯特地质与生态系统是地球表层系统中的重要组成部分, 其变化将对其他地区以及整个地球系统的物质循环等方面产生影响(刘丛强等, 2009a)。

贵州处于东亚岩溶区域中心, 是中国碳酸盐岩出露面积最大、岩溶最为发育的省区, 同时也是中国土壤侵蚀严重和生态环境脆弱的地区(白占国和万国江, 1998), 面临着经济和生态环境的双重压力(王世杰, 2002; 黄秋昊等, 2007)。黄壤和石灰土是贵州省中部分布面积较大的2种典型的土壤类型, 石灰土是由碳酸盐岩发育而来, 成土时间较短; 而黄壤的成土母岩是砂岩, 成土时间较长。由于所在区域的地质地貌、气候、土壤内在性质和分布状况等具有独特性, SOC在不同土壤类型中含量分布以及在同一类型不同区域土壤间均表现出高度异质性, 给喀斯特地区土壤碳库的计算、区域土壤碳的生物地球化学循环等方面的研究带来了很大的困难(刘丛强等, 2009b)。此外, 一些学者通过对不同流域西南岩溶作用与碳循环研究, 发现外源水通过岩溶作用可加强岩溶碳汇效应, 岩溶土壤具有特殊的碳循环机制, 亟待开展此方面的研究(Liu *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2010; 杨慧等, 2012)。本研究主要选取位于贵州省中西部普定县城周边具有不同岩性(碎屑岩和碳酸盐岩)的坡地土壤剖面, 尤其是选取富含有机质的泥炭层在内的黄壤剖面作为研究对象, 明确喀斯特地区坡地土壤剖面不同层位的有机碳及其同位素组成的分布特征, 探讨喀斯特不同生态系统中土壤有机碳在周转过程中的变化规律, 为喀斯特生态系统退化及恢复的认识与管理提供科学基础数据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国西南的贵州省中部偏西的普定县境内(图1)。普定县处于乌江上游三岔河(属长江水系)与北盘江支流打帮河(属珠江水系)分水岭的北坡, 属北亚热带季风性湿润气候, 年均温度 $15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 年均降雨量 $1396.9\text{ mm}$ , 降雨季节多集中在5—9月(廖婧琳等, 2009; 高晟等, 2012)。普定县发育了典型的峰丛洼地的岩溶地貌, 自然地森林植被退化较严重, 植被多为稀疏灌丛和次生林。境内主要土壤类型有黄棕壤、黄壤、石灰土、紫色土、草甸土。研究区的坡地土壤是由母岩风化物发育而来的土壤, 以黄色石灰土和酸性黄壤为主, 土层厚度一般为 $15\sim 50\text{ cm}$ , 多为黏质, 土壤交换量和盐基饱和度均高, 土体与基岩面过渡清晰(谭巍等, 2010)。区内沙坝地坡地的土壤主要以砂岩黄壤为主, 上覆植被密集, 主要以灌木和草丛为主; 陈旗堡坡地上黄色石灰土发育, 植被覆盖较少, 仅有稀疏灌丛, 土壤分布多不连续。

### 1.2 样品采集

2012年4月分别于普定县的沙坝地和陈旗堡2个坡地的坡顶、坡腰和坡脚处采集土壤剖面, 共计6个(图1)。在剖面表层 $30\text{ cm}$ 内, 以 $5\text{ cm}$ 间隔进行采样,  $30\text{ cm}$ 以下按每 $10\text{ cm}$ 间隔采集。将采集到的土壤样品在实验室内去除动、植物残体, 自然风干

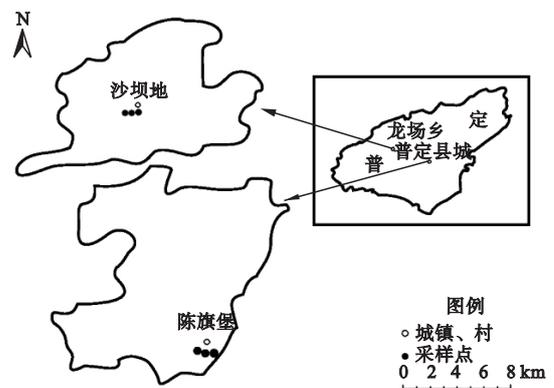


图1 采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling position

表1 采样点基本情况及理化参数

Table 1 Basic properties of the soils

采样点	土壤类型	采样位置	植被覆盖	剖面深度 (cm)	pH	SOC ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	C/N	$\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ (‰)
沙坝地	黄壤	坡顶	草丛	0~80	4.0~5.2	5.2~75.9	10.7~25.6	-25.4~-21.4
		坡腰	灌丛	0~130	4.2~5.9	3.3~76.4	1.6~22.9	-24.4~-22.0
		坡脚		0~110	4.2~5.0	3.1~79.7	5.5~22.7	-24.9~-20.7
陈旗堡	石灰土	坡顶	稀疏	0~60	7.5~8.0	11.3~72.6	10.0~16.7	-22.7~-20.0
		坡腰	灌丛	0~90	7.1~7.7	8.2~56.9	5.1~15.8	-23.2~-18.8
		坡脚		0~80	7.0~7.5	17.0~73.3	7.7~13.6	-22.3~-21.2

后按四分法取样, 研磨过筛(10、100、200目)后均匀混合, 封装备用。

### 1.3 室内分析

**1.3.1 土壤 pH 值测定** 称取过 10 目筛的土壤样品 10.0 g, 加入 25 mL 无  $\text{CO}_2$  去离子水作为浸提剂, 用酸度计测定 pH 值 3 次, 取其平均值作为样品 pH 值。

**1.3.2 土壤有机碳及 C/N** 称取过 100 目筛的土壤样品 1.00 g, 放入 50 mL 离心管中, 加入  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的盐酸溶液 20 mL 浸泡, 以去除土壤中碳酸盐。之后用去离子水离心洗涤至中性并于  $60^\circ\text{C}$  烘干研磨。用 PE2400 型元素分析仪测定土壤有机碳含量。

**1.3.3 有机碳同位素值** 采集的土壤样品在自然条件下风干并研磨过筛, 进行碳同位素值测试的具体预处理过程见文献(朱书法等 2005)。在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室的气体质谱仪(MAT-252)上进行碳同位素值测试。测定结果用千分单位(‰), 以  $\delta$  符号表示:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}) / R_{\text{标准}}] \times 1000$$

式中  $R_{\text{样品}}$  为待测样品同位素比值;  $R_{\text{标准}}$  为国际标准 PDB 同位素比值, 分析误差小于  $\pm 0.2\text{‰}$ 。有关采样点的描述及各项化学参数的测定结果见表 1。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 pH 值、C/N 剖面分布特征

2 种类型土壤的 pH 值存在很大差异(图 2) 砂岩黄壤 pH 值在 4.0~5.9, 石灰土剖面在 7.0~8.0(表 1) 前者明显低于后者。就沿土壤剖面深度增加的变化而言, 2 类土壤 pH 值均表现出增大的趋势。

黄色石灰土剖面 C/N 变化范围为 5.1~16.7, 而砂岩黄壤剖面 C/N 变化范围为 1.6~25.6(表 1), 黄色石灰土 C/N 变化幅度明显小于砂岩黄壤剖面(图 3) 尤其是从地表至 60 cm, 就整体趋势而言, 2 类土壤 C/N 都有随土壤深度的增加出现下降的趋势。

### 2.2 土壤有机碳含量以及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$ 值分布特征

所采集的黄色石灰土和砂岩黄壤的 SOC 含量范围分别为 8.2~73.3 和 3.1~79.7  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1) 砂岩黄壤的表层(0~15 cm) SOC 含量略高于黄色石灰土(图 4)。2 类土壤 SOC 含量沿剖面深度具有相似的变化特征, 均表现出下降的趋势。而黄壤在 25~40 cm 左右 SOC 含量表现出骤增的现象。沿坡面顶端到底端的方向, 黄壤和石灰土剖面的 SOC 含量总体都表现出坡脚 > 坡顶 > 坡腰的分布特征。

陈旗堡的石灰土剖面  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$  值的变化范围为  $-23.2\text{‰} \sim -18.8\text{‰}$ , 平均值为  $-21.2\text{‰}$ ; 沙坝地砂岩黄壤剖面  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$  值变化范围为  $-25.4\text{‰} \sim -20.7\text{‰}$ , 平均值为  $-23.3\text{‰}$ (表 1) 略低于石灰土剖面。除石灰土坡腰剖面外, 2 类型土壤的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$  值沿剖面深度的增加具有相似的变化趋势, 均表现出先增加后降低的变化特征, 在 0~20 cm 剖面深度内,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$  值表现为逐渐增加的趋势, 而 20~50 cm 左右  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$  值却表现出下降的趋势, 在 50 cm 以下逐渐趋于稳定。从坡顶到坡脚  $\delta^{13}\text{C}_{\text{SOC}}$  值未见明显规律性的变化特征。

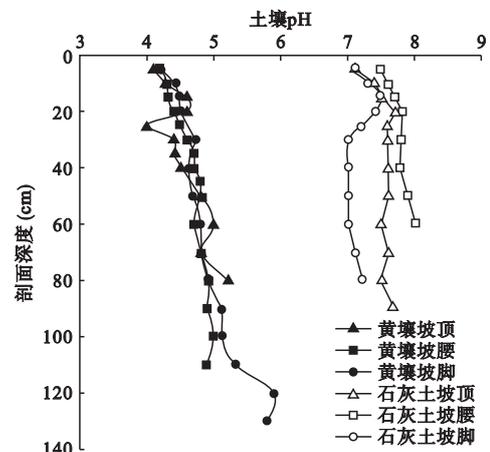


图2 土壤 pH 值随剖面变化特征

Fig. 2 Variations of pH through the soil profiles

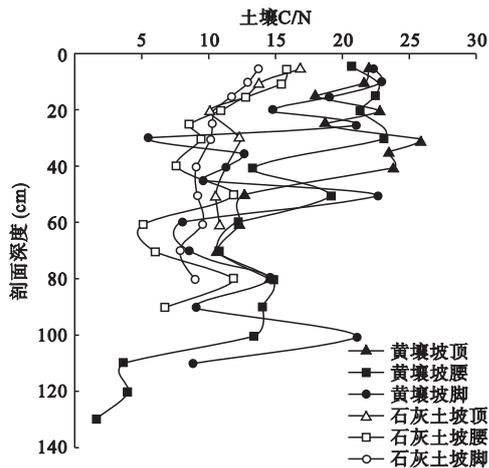


图3 土壤 C/N 随剖面深度变化特征  
Fig. 3 Variations of C/N through the soil profiles

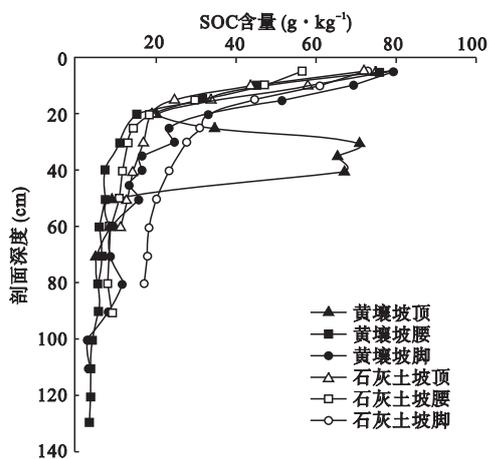


图4 土壤有机碳含量随剖面深度的变化  
Fig. 4 Variations of SOC through the soil profiles

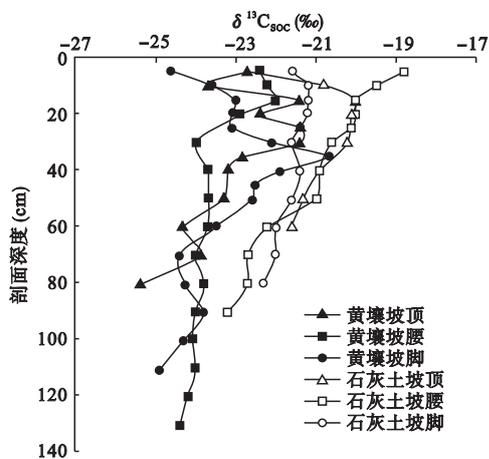


图5 土壤有机碳同位素组成随剖面深度的变化  
Fig. 5 Variations of carbon isotopic compositions of SOC through the soil profiles

### 3 讨论

黄壤的 pH 值要显著低于石灰土,与之前的研究结果类似(朱书法等,2007;李龙波等,2012),主要是由于黄壤属于地带性土壤,受淋滤作用比较强,钙、镁元素淋失较多,而石灰土是由碳酸盐岩发育而来,具中性至微碱性。

C/N 不仅可以指示土壤有机质的降解程度,同时也是影响土壤有机质降解的重要因素,进入土壤的植物残体 C/N 小于 25~30 时,微生物活动增强,易于有机质的降解,且随着土壤 C/N 的增加,土壤有机碳矿化速率持续增加(廖建雄和王根轩,2000;窦晶鑫等,2009)。一般而言,有机质氮含量低或 C/N 高,有机质降解缓慢,C/N 大于 25~30 时,则分解速率下降(廖建雄和王根轩,2000;陈怀满,2010)。黄色石灰土 C/N 变化幅度小于砂岩黄壤剖面表明砂岩黄壤中的营养物质相对黄色石灰土丰富,微生物活动相对较强,导致矿质氮相对较多地被微生物所利用。

喀斯特地区土壤有机碳含量与植被类型以及覆盖度有着显著关系(刘方等,2005;罗海波等,2009;廖洪凯和龙健,2009)。土壤表层的 SOC 主要来源于地表植物残体和凋落物的直接输入,植被覆盖情况直接影响土壤表层 SOC 的含量。研究表明,不同石漠化阶段和不同土壤层次间的 SOC 含量均存在较大差异,伴随着石漠化程度的加剧,SOC 含量显著下降(闫俊华等,2011)。本研究中,由于陈旗堡植被覆盖稀疏,具有轻度石漠化现象,地表的植物残体以及凋落物输入较少,表层石灰土中有机碳含量偏低。而距地表 15 cm 以下的土壤剖面,砂岩黄壤 SOC 含量低于黄色石灰土,与黄壤不同的是石灰土中含有大量的钙、镁离子,能与土壤有机质形成较稳定的腐殖质钙,进而具有较丰富的有机碳(刘丛强等,2009a)。

此外,SOC 的积累不仅取决于物质的输入,更与 SOC 的降解密切相关(Schlesinger & Andrews, 2000),其降解受到温度、降雨以及土壤类型等诸多因素影响,造林、施肥等人类活动也会影响土壤有机碳矿化(Kirschbaum, 1995; Groenendijk *et al.*, 2002)。2 类土壤有机碳含量均随剖面深度的增加而降低,这与已有的研究结果(朱书法等,2007;刘涛泽等,2008;李龙波等,2012)类似,但本研究中的砂岩黄壤表层的 SOC 含量略高于已有对不同喀斯

特地区黄壤的相应研究结果,更接近黄色石灰土的SOC含量。因为沙坝地的黄壤上覆植被除了灌木,还有大量的渐尖毛蕨等草本植物,土壤表层堆积有较厚的腐殖质层。随着剖面深度的增加,有机物质的来源和微生物数量不断减少,且表土层因沉积作用不断被埋藏,成土时间增加,因分解导致的有机质含量降低幅度增大,从而有机质含量不断减少(张月鲜等,2011)。沙坝地的坡顶所采集到的砂岩黄壤剖面在25~40 cm处SOC含量出现骤增现象,这是由于在该层位出现泥炭或煤系地层,其有机碳含量较高(李育枢和李天斌,2006)。除此之外,沿坡面顶端到底端的方向,砂岩黄壤和黄色石灰土SOC含量总体表现出坡脚>坡顶>坡腰的分布特征(图4),其变化与刘涛泽等(2008)在广西环江石灰土坡地的分布特征不同,这是因为本研究的2个坡面坡脚相对于坡腰平坦,植被覆盖较好,有利于有机质堆积。坡顶与坡腰相比,坡顶植被覆盖较好,来源于植物残体以及凋落物等直接输入较多,有利于SOC在坡顶的堆积,使得坡脚SOC含量相对较高。

土壤pH值、C/N、上覆植被类型以及人类活动等因素是影响土壤剖面不同深度 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值变化的重要因素,而成土环境可能是导致2种类型土壤有机碳剖面分布和稳定碳同位素组成差异的主要原因(李龙波等,2012)。土壤SOC含量和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值随深度的变化,反映了植物残体的输入及在土壤中分解累积的特征,这有助于了解坡地土壤的成土过程和受到的侵蚀程度(刘涛泽等,2008)。本研究中2种类型的土壤的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值与C3植物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 均值(-27‰)接近(Boutton,1991),说明其上覆植被类型主要为C3植物,C4植物分布相对较少。

由于表层土壤受到植物残体以及凋落物影响较大,而随着剖面深度的增加,在排水良好的表层土壤中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值通常有1‰~2‰的升幅(Wedin *et al.*,1995)。随着深度的继续增加,难降解的有机质(例如木质素等)含量增加并在土壤剖面底层积累,由此导致同位素值随之降低,最终趋于稳定(朱书法等,2007)。本研究中,砂岩黄壤不同坡地位置的土壤剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值均表现出上述的趋势。黄色石灰土坡顶、坡脚剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值随深度的变化与砂岩黄壤剖面的趋势相同,但坡腰剖面则出现随剖面深度逐渐降低并趋于稳定的趋势。究其原因,陈旗堡样区的坡腰位置不利于植物残体等新鲜有机质的堆积,且植被以火棘为主,凋落物的输入很少,土壤

$\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值不易受新鲜有机质输入的影响,多为以前的有机质长期堆积的结果,说明其成土时间较长。所研究的土壤剖面中,部分剖面在近20 cm深度出现碳同位素组成的负偏移现象。特别是砂岩黄壤中的坡脚的一个剖面,从40 cm深度向上和向下均出现了 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值的降低,这个现象说明有2种机制存在:一是因土地利用方式的转变导致覆盖植被类型变化;二是土壤堆积了较多从坡上侵蚀下来的土壤。

#### 4 结论

由于受上覆植被、坡度以及有机质降解等方面的影响,砂岩黄壤表层土壤(0~15 cm)SOC含量高于黄色石灰土表层土壤,而剖面中泥炭层的存在使该位置有机碳含量显著升高。除了砂岩黄壤坡顶剖面个别层位外,沿坡面顶端到底端的方向,砂岩黄壤和黄色石灰土SOC含量总体表现出坡脚>坡顶>坡腰的分布特征,坡脚位置均为较平坦的地形,更利于有机质的堆积。而坡腰位置由于坡度以及植被覆盖情况等的影响,不利于有机质的堆积,如果在坡腰上进行耕作,有机质易于流失,长期将使土壤的肥力受到较大影响。

土地利用方式的转变导致上覆植被类型的变化,以及植物残体输入并在土壤中的降解而累积过程是 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值沿剖面深度变化的主要因素,从坡上侵蚀下来的土壤在坡脚的堆积,也可能影响土壤剖面上碳同位素组成的分布。黄色石灰土坡腰位置 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值沿剖面深度变化特征受到成土过程的影响较为显著。除黄色石灰土坡腰的剖面外,2类土壤剖面的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值的总体变化趋势近似,表现为随着剖面深度的增加先升后降,最终趋于稳定。近地表主要受植物及凋落物输入的影响。表层40 cm以下直到近岩-土边界层处,难降解的有机质(例如木质素等)含量随之增加,并在土壤剖面底层逐渐累积,导致 $\delta^{13}\text{C}_{\text{soc}}$ 值相应降低。

#### 参考文献

- 白占国,万国江. 1998. 贵州碳酸盐岩区域的侵蚀速率及环境效应研究. 土壤侵蚀与水土保持学报,4(1): 1-7.
- 陈满怀. 2010. 环境土壤学. 北京: 科学出版社.
- 窦晶鑫,刘景双,王洋,等. 2009. 三江平原草甸湿地土壤有机碳矿化对C/N的响应. 地理科学,29(5): 773-778.
- 高晟,王磊,薛建辉,等. 2012. 贵州喀斯特地区草本植被盖度与土壤养分的相互关系. 南京林业大学学报(自然科学版),36(1): 79-83.

- 黄秋昊, 蔡运龙, 王秀春. 2007. 我国西南部喀斯特地区石漠化研究进展. *自然灾害学报*, **16**(2): 106 - 111.
- 李龙波, 刘涛泽, 李晓东, 等. 2012. 贵州喀斯特地区典型土壤有机碳垂直分布特征及其同位素组成. *生态学杂志*, **31**(2): 241 - 247.
- 李育枢, 李天斌. 2006. 煤系地层中炭质泥岩滑带土的初步研究. *岩土工程技术*, **20**(2): 88 - 93.
- 廖洪凯, 龙健. 2011. 喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化. *应用生态学报*, **22**(9): 2253 - 2258.
- 廖建雄, 王根轩. 2000. CO<sub>2</sub>和温度升高及干旱对小麦叶片化学成分的影响. *植物生态学报*, **24**(6): 744 - 747.
- 廖婧琳, 苏跃, 李航, 等. 2010. 喀斯特山区不同复种指数条件下的土壤质量变化——以普定县猫洞小流域为例. *中国岩溶*, **28**(3): 308 - 328.
- 刘方, 王世杰, 刘元生, 等. 2005. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价. *生态学报*, **25**(3): 639 - 644.
- 刘丛强, 郎赞超, 李思亮, 等. 2009a. 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. *地质学前沿*, **16**(6): 1 - 12.
- 刘丛强. 2009b. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要循环. 北京: 科学出版社.
- 刘涛泽, 刘丛强, 张伟, 等. 2008. 喀斯特地区坡地土壤有机碳的分布特征和 $\delta^{13}\text{C}$ 值组成差异. *水土保持学报*, **22**(5): 115 - 124.
- 罗海波, 刘方, 刘元生, 等. 2009. 喀斯特石漠化地区不同植被群落的土壤有机碳变化. *林业科学*, **45**(9): 24 - 28.
- 谭巍, 陈洪松, 王克林, 等. 2010. 桂西北喀斯特坡地不同演替阶段典型植物碳同位素组成差异. *中国生态农业学报*, **18**(6): 1223 - 1227.
- 王发刚, 王启基, 王文颖, 等. 2008. 土壤有机碳研究进展. *草业科学*, **25**(2): 48 - 54.
- 王世杰. 2002. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. *中国岩溶*, **21**(2): 101 - 105.
- 闫俊华, 周传艳, 文安邦, 等. 2011. 贵州喀斯特石漠化过程中的土壤有机碳与容重关系. *热带亚热带植物学报*, **19**(3): 273 - 278.
- 杨慧, 张连凯, 于爽, 等. 2010. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体特征的影响. *中国岩溶*, **31**(3): 265 - 271.
- 张月鲜, 李素艳, 孙向阳, 等. 2011. 荒漠草原土壤有机质碳稳定同位素特征研究. *水土保持学报*, **25**(3): 164 - 168.
- 朱书法, 刘丛强, 陶发祥, 等. 2007. 贵州喀斯特地区棕色石灰土与黄壤有机质剖面分布及稳定碳同位素组成差异. *土壤学报*, **44**(1): 169 - 173.
- 朱书法, 刘丛强, 陶发祥. 2005.  $\delta^{13}\text{C}$ 方法在土壤有机质研究中的应用. *土壤学报*, **42**(3): 495 - 503.
- Boutton TW. 1991. Stable carbon isotope ratios of natural materials. II. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environments // Coleman DC, Fry B, eds. *Carbon Isotope Techniques in Biological Sciences*. San Diego: Academic Press: 173 - 185.
- Groenendijk FM, Condon LM, Rijkse WC. 2002. Effects of afforestation on organic carbon, nitrogen and sulfur concentrations in New Zealand hill country soils. *Geoderma*, **108**: 91 - 100.
- Jarecki MK, Lal R, James R. 2005. Crop management effects on soil carbon sequestration on selected farmers' fields in northeastern Ohio. *Soil and Tillage Research*, **81**: 265 - 276.
- Kirschbaum MUF. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry*, **27**: 753 - 760.
- Li SL, Liu CQ, Li J, et al. 2010. Geochemistry of dissolved inorganic carbon and carbonate weathering in a small typical karstic catchment of Southwest China: Isotopic and chemical constraints. *Chemical Geology*, **277**: 301 - 309.
- Liu ZH, Li Q, Sun HL, et al. 2007. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: Soil CO<sub>2</sub> and dilution effects. *Journal of Hydrology*, **337**: 207 - 223.
- Schlesinger WH, Andrews JA. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, **48**: 7 - 20.
- Smith P, Fang CM, Dawson JJC, et al. 2008. Impact of global warming on soil organic carbon. *Advances in Agronomy*, **97**: 1 - 43.
- Wang SQ, Tian HQ, Liu JY, et al. 2003. Pattern and change of soil organic carbon storage in China: 1960s - 1980s. *Tellus*, **55B**: 416 - 427.
- Wedin DA, Tieszen LL, Dewey B, et al. 1995. Carbon isotope dynamics during grass decomposition and soil organic matter formation. *Ecology*, **76**: 1383 - 1392.
- Zhong L, Zhao QG. 2001. Organic carbon content and distribution in soils under different land uses in tropical and subtropical China. *Plant and Soil*, **231**: 175 - 185.

作者简介 田丽艳,女,1986年生,硕士研究生,主要从事环境地球化学研究。E-mail: tianqing21@126.com

责任编辑 魏中青