

基于探地雷达技术估算喀斯特峰丛洼地不同坡位土壤有机碳密度的方法

夏银行^{1,2,3}, 黎 蕾^{1,2,3}, 陈香碧^{1,3}, 何寻阳^{1,3}, 刘坤平³, 吴金水¹, 苏以荣^{1,3*}

(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.中国科学院大学, 北京 100049; 3.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:在典型喀斯特峰丛洼地区按上、中、下坡位和洼地分别选取四个样方,利用探地雷达技术探测土壤深度,获得各层次土壤体积分数,结合土壤剖面采样获得的土壤有机碳含量、石砾含量和容重等数据,计算土壤有机碳密度。结果表明:该峰丛洼地区上、中、下坡位的土壤主要集中在0~30 cm深度范围内,体积分数范围为72%±16%~78%±6%,洼地的土壤则主要集中在0~70 cm,体积分数为64%±17%;土壤剖面0~30 cm内有机碳含量逐层显著下降($P<0.05$),在深度30 cm以下下降趋势变缓,表层土壤有机碳含量从上坡至洼地逐渐降低,符合喀斯特地区特有的“养分倒置”现象;基于探地雷达法测得的0~20 cm土壤有机碳密度由上坡至洼地逐渐减小,上坡与洼地差异显著($P<0.05$),而0~100 cm土壤有机碳密度则洼地显著大于坡地($P<0.05$);探地雷达法与“平均深度法”相比,后者对前者的相对误差为0.3%~14.5%,未达到显著差异。通过研究建立了基于探地雷达准确获取土壤深度的土壤有机碳密度的估算方法,适用于喀斯特非连续性土壤,为进一步准确估算喀斯特地区土壤有机碳储量提供了更可靠的方法。

关键词:喀斯特峰丛洼地;探地雷达;土壤分布;土壤有机碳密度

中图分类号:S158.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0920-08 doi:10.11654/jaes.2015.05.015

Estimating Soil Organic Carbon Density at Different Slope Positions in a Typical Karst Peak-cluster Depression Area by Ground Penetrating Radar Technology

XIA Yin-hang^{1,2,3}, LI Lei^{1,2,3}, CHEN Xiang-bi^{1,3}, HE Xun-yang^{1,3}, LIU Kun-ping³, WU Jin-shui¹, SU Yi-rong^{1,3*}

(1. The Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, China)

Abstract: High proportion of bare rocks, disconnected soil distribution and large variation of soil depths are the characteristics of Karst land-forms, leading to hardly accurate estimation of soil organic carbon density (SOCD) by the conventional methods. In this study, four quadrats were selected at each of different slope positions (upper-slope, mid-slope, lower-slope and depression) in a typical Karst peak-cluster depression area. Soil depth and soil distribution in each quadrat were measured by ground penetrating radar (GPR) technology, and soil volume fraction was then calculated. Soil profile samples were collected from each quadrat and analyzed for soil organic matter, gravel content and bulk density. The SOCD was then calculated according to soil organic carbon (SOC) content, gravel content, bulk density and soil volume fraction. Results showed that soil depths were between 0~30 cm at upper-slope, mid-slope and lower-slope, with soil volumetric fractions ranging from 72%±16% to 78%±6%; while soil depth was up to 70 cm, with soil volumetric fractions of 64%±17% in depression area. The SOC content decreased significantly from 0 to 30 cm ($P<0.05$) within a soil profile, but it gradually increased from the depression area to the upper-slope, showing a special phenomenon of “nutrient inversion” in the Karst areas. The SOCD in 0~20 cm depth gradually reduced from the upper-slope to the depression positions, and showed significant difference between the upper-slope and depression positions

收稿日期:2014-11-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAD05B03-6);中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070403);国家自然科学基金项目(41171246)

作者简介:夏银行(1987—),男,硕士研究生,主要研究方向为探地雷达在土壤生态学中的应用。E-mail:bank.12345@163.com

* 通信作者:苏以荣 E-mail:yrsu@isa.ac.cn

($P<0.05$). However, the SOCD in 0~100 cm profile in the depression position was significantly higher than that in the slope positions($P<0.05$). Compared to the "Average Depth" method, the GPR method had relative error of 0.3%~14.5%, showing no significant difference. Therefore, GPR method could be used to accurately detect soil depth and soil distribution for estimating SOCD in disconnected soils in Karst area, and is a reliable method to estimate SOC storage in Karst areas with a promising accuracy.

Keywords: Karst peak-cluster depression area; ground penetrating radar; soil distribution; soil organic carbon density

喀斯特生态脆弱区具有岩石裸岩率高、生境异质性高、土壤浅薄且分布不连续的特点,对全球气候变化具有重要的响应和指示功能^[1]。我国喀斯特地貌面积大约 $5.5\times 10^5\text{ km}^2$ ^[2],主要分布在西南滇黔桂三省区。喀斯特峰丛洼地景观是锥状喀斯特景观的典型代表,也是热带、亚热带重要的景观类型之一^[3]。喀斯特峰丛洼地区地形复杂、土壤破碎化严重、石砾含量较高,其独特的地质背景、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显著^[4]。近年来,一些学者采用传统连续性土壤的研究方法对喀斯特地区土壤有机碳密度进行了估算^[5-6],由于未考虑到喀斯特土壤破碎化严重、分布不连续的特征,使得结果不能很好地反映实际情况;Zheng^[7]和 Chen^[8]等采用钢钎测得土壤的平均深度,并基于此估算了其研究区有机碳密度,结果与传统方法相比更接近实际,并指出传统方法可能高估了喀斯特地区土壤有机碳密度,不适用于喀斯特地区土壤有机碳密度研究。然而,扦插法费时费力,而且还可能因局部小石块带来较大误差,因此土壤平均深度法也不能完全反映喀斯特地区土壤异质性的真实情况。目前,估算喀斯特地区土壤的有机碳储量时,获得土壤的实际分布特征是亟待解决的难题。寻求一种快速有效的方法探测喀斯特土壤的分布特征,对准确估算该地区土壤有机碳密度及储量具有重要意义。

探地雷达(Ground Penetrating Radar,简称 GPR)是一种对地下的目标体或界面进行定位的电磁技术,它利用高频电磁波以宽频脉冲形式,由地面通过天线定向送入地下,经过电性差异的地下地层或目标体反射后返回地面,被另一天线接收,根据接收到电磁波的波形、振幅强度和时间的变化特征推断地下介质的空间位置和形态结构^[9],地下介质间的电性差异是利用探地雷达的先决条件。根据不同土层间的土壤特性差异,探地雷达技术已成功应用到非喀斯特地区土壤分布的探测并取得了较好的研究结果^[10-11],在喀斯特地区探测土壤分布的研究还未见报道。喀斯特地区土壤与母质之间缺乏过渡层,其分界线明显,且土壤与母岩之间的岩性差异较大,具有采用探地雷达探测的

先决条件。本课题组通过大量实验,发现探地雷达对喀斯特峰丛洼地土壤分布的探测是可行的^[12],可以准确估测不同层次中土壤所占的体积比。本研究拟在喀斯特峰丛洼地上、中、下坡位和洼地,利用探地雷达探测土壤分布特征,结合土壤有机碳等土壤特性计算不同坡位土壤有机碳含量和密度,旨在为较准确地估算喀斯特峰丛洼地土壤有机碳储量提供参考方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县下南乡古周村($24^{\circ}54'42.06''\sim 24^{\circ}55'17.08''\text{N}$, $107^{\circ}56'48.01''\sim 107^{\circ}57'35''\text{E}$),该区为典型喀斯特峰丛洼地景观单元,属亚热带季风气候区,多年平均气温 $16.5\sim 20.5^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量 $1\,389.1\text{ mm}$,雨季平均持续 $130\sim 140\text{ d}$,主要集中在 4 月至 9 月,10 月至次年 3 月为旱季。该区地形起伏较大,海拔介于 $376\sim 816\text{ m}$ 之间^[13],土壤为碳酸盐岩发育而成的棕色石灰土。古周村土地总面积 186.7 hm^2 ,其中耕地 17.3 hm^2 ,主要集中在洼地^[14],其上坡位和中坡位多为林地和灌丛,下坡位自 2000 年起实行退耕还林还草,现主要为自然草地、灌丛和人工林地;洼地基本为耕地,耕地以种植玉米、大豆和牧草为主,所施肥料主要为农家肥和尿素。

1.2 土壤探测和样品采集与测定

于 2013 年 5 月在研究区的上、中、下坡位和洼地各选取四个样方(图 1)。其中洼地样方设为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$,上、中、下坡位的样方设为 $2\text{ m}\times 3\text{ m}$ 。调查样方内植被情况,并确定植被类型,在样方内每隔 0.5 m 布设一条探地雷达探测的测线,即洼地每个样方 11 条测线,坡上每个样方 5 条测线,利用 GPR 按点测法测定土壤深度,道间距设为 0.05 m ,每个样方中所有测线的起点在一条直线上。GPR 测定后进行开挖验证,每隔 0.1 m 验证一个深度值。在每个样方内随机选取 3 个点(均在测线上),进行剖面取样,每个剖面按 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30$ 、 $30\sim 50$ 、 $50\sim 70\text{ cm}$ 和 $70\sim 100\text{ cm}$ 分层采样,16 个样方共取剖面样 214 个;同时,采用环刀法测定各层土壤容重^[15]。记录各样方的海拔高度、经纬

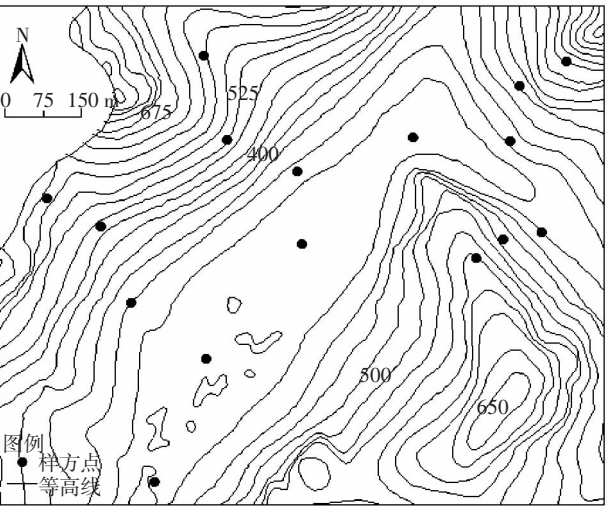


图 1 喀斯特峰丛洼地样方分布

Figure 1 Distribution of quadrats in Karst peak-cluster depression area

度、裸岩率和石砾含量等信息。各样方的基本信息见表 1。

土壤分布探测采用 MALA 公司生产的 ProEx 系统探地雷达主机以及 500 MHz 屏蔽天线, 采集软件为 GroundVision 2。土壤样品经风干、磨细、过 60 目筛

后,利用重铬酸钾外加热法^[15]测定有机碳含量。

1.3 数据处理

不同坡位、不同土壤层次和不同方法土壤有机碳含量的差异采用 SPSS18.0 软件进行单因素方差分析,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

GPR 数据利用 Reflexw 软件进行解读,在每条测线上生成每隔 0.1 m 一个土壤深度值,并利用公式(2)计算样方内每个层次土壤所占的体积分数。探地雷达法是根据土壤有机碳含量、各层土壤体积分数、容重和石砾含量等数据,利用公式(1)计算得到土壤有机碳密度。根据 GPR 探测的土壤深度值计算各样方中土壤的平均深度。平均深度法是根据土壤有机碳含量、容重、石砾含量、裸岩率和平均深度等数据,利用公式(6)^[7]计算得到土壤有机碳密度。

$$SOCD=\sum_{i=1}^k C_i D_i B_i (1-G_i) V_i \tag{1}$$

$$V_i=(A_{i1}+A_{i2}+A_{i3}+\cdots+A_{in})/2(n-1) \tag{2}$$

$$A_{in}=(D'_{in0}+D'_{in1}+D'_{in2}+\cdots+D'_{inf}+D'_{inm})/2mD_i \tag{3}$$

$$D'_{inf} \begin{pmatrix} \max_i \\ \min_i \end{pmatrix} = \begin{cases} 0, & D'_{nf} \leq \min_i \\ D'_{nf} - \min_i, & \min_i < D'_{nf} < \max_i \\ \max_i - \min_i, & D'_{nf} \geq \max_i \end{cases} \tag{4}$$

表 1 各样方的基本信息

Table 1 Basic information of each quadrat

样方编号		土地利用方式	裸岩率/%	每层土壤容重 g·cm ⁻³ /石砾含量%					
				0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~50 cm	50~70 cm	70~100 cm
上坡	SP1	灌丛	17.0	1.18/1.51	1.32/1.50	1.32/1.49	1.35/1.49	—	—
	SP2	灌丛	10.0	1.25/1.51	1.36/1.50	1.37/1.48	1.37/1.48	—	—
	SP3	草地	9.0	1.34/1.42	1.35/1.40	1.36/1.40	1.39/1.40	1.40/1.40	—
	SP4	草灌	8.0	1.30/1.47	1.32/1.45	1.31/1.45	1.32/1.45	—	—
中坡	ZP1	草地	12.2	1.22/1.10	1.22/1.08	1.23/1.08	1.26/1.08	—	—
	ZP2	草地	11.1	1.22/0.88	1.29/0.80	1.30/0.88	1.32/1.88	1.31/0.88	—
	ZP3	灌丛	12.8	1.10/1.10	1.18/1.00	1.25/1.00	1.26/1.00	—	—
	ZP4	草地	7.0	1.36/0.94	1.38/0.94	1.35/0.94	1.39/0.94	—	—
下坡	XP1	耕地	4.2	1.31/0.85	1.35/0.84	1.45/0.84	1.47/0.84	1.49/0.84	—
	XP2	草地	9.0	1.31/0.66	1.36/0.64	1.38/0.64	1.43/0.62	1.47/0.60	—
	XP3	灌丛	7.0	1.29/0.79	1.29/0.78	1.31/0.75	1.34/0.75	1.35/0.74	—
	XP4	灌丛	8.8	1.20/0.83	1.22/0.81	1.26/0.79	—	—	—
洼地	W1	耕地	9.6	1.27/0.41	1.36/0.38	1.55/0.38	1.48/0.38	1.51/0.8	1.50/0.37
	W2	耕地	14.0	1.31/0.32	1.36/0.30	1.40/0.30	1.42/0.28	1.35/0.28	1.39/0.27
	W3	耕地	11.0	1.33/0.38	1.29/0.36	1.37/0.35	1.39/0.35	1.33/0.34	1.23/0.34
	W4	耕地	12.0	1.28/0.32	1.24/0.31	1.36/0.30	1.39/0.30	1.32/0.29	1.32/0.29

注:SP1、SP2、SP3 和 SP4 表示上坡的四个样方;ZP1、ZP2、ZP3 和 ZP4 表示中坡的四个样方;XP1、XP2、XP3 和 XP4 表示下坡的四个样方;W1、W2、W3 和 W4 表示洼地的四个样方。

Note: SP1、SP2、SP3 and SP4 represent four quadrats of the upper-slope position,ZP1、ZP2、ZP3 and ZP4 four quadrats of the midslope,XP1、XP2、XP3 and XP4 four quadrats of the lower-slope, and W1、W2、W3 and W4 four quadrats of the depression area.

$$D_i = \max_i - \min_i \quad (5)$$

$$SOCD = \sum_{i=1}^k C_i D_i B_i (1 - G_i) (1 - R) / 100 \quad (6)$$

式中: $SOCD$ 为土壤有机碳密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; C_i 为样方第 i 层土壤有机碳含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; D_i 为样方第 i 层土壤深度, m ; B_i 为样方第 i 层土壤容重, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; G_i 为样方第 i 层土壤石砾含量, %; V_i 为样方第 i 层土壤所占体积分数, %; R 为样方的裸岩率, %; A_m 为样方第 i 层第 n 条测线下土壤所占面积分数, %; D'_{nf} 为样方第 n 条测线下第 f 点土壤深度, m ; k 为样方所分层数, n 为测线条数; m 为每条测线下测点数, 等于测线长(m)除以 0.1 m ; $\max_i$ 和 $\min_i$ 分别是第 i 层土壤深度的最大值和最小值(例如: $i=1$ 时, $\max=10$, $\min=0$; $i=2$ 时, $\max=20$, $\min=10$; 第 3、4、5、6 层时 $\max$ 和 $\min$ 的取值分别为 30、50、70、100 和 20、30、50、70)。

2 结果与讨论

2.1 基于探地雷达探测的不同坡位土壤分布特征

在探地雷达实地探测中, 一般将 $1/4$ 波长厚度作为 GPR 天线的垂直分辨率下限^[6]。通常, 岩土介质电磁波传播速率为 $0.06 \sim 0.15 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$, 本试验采用 500 MHz 的 GPR 屏蔽天线, 因此其在岩土介质中探测的垂直分辨率在 $3 \sim 8 \text{ cm}$ 范围内。采用 GPR 对各个样方进行探测, 并开挖验证, 结果表明 GPR 探测结果与实

地开挖一致。以中坡位第四个样方中第一条测线探测结果为图 2a), GPR 探测得到的土石分布图中土壤和岩石的分界面比较明显, 可以直接从图中判读出测线下不同位置土壤的深度, 且土壤深度的 GPR 探测值和实测值结果相符, 误差范围在 $0 \sim 10 \text{ cm}$ (图 2b)。用探地雷达探测的土层深度值(y)与挖掘法得到的深度值(x)的相关性达到了极显著($y=0.918 1x+0.739 5$, $n=4100$, $R^2=0.912 6$, $\text{sig}=0.000$)。这表明, 在探测过程中, 走线准确的情况下, GPR 技术能较准确地估算土壤深度, 并较好地反映了喀斯特地区土壤异质性的情况。

基于 GPR 数据, 计算出每个样方内 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 、 $30 \sim 50 \text{ cm}$ 、 $50 \sim 70 \text{ cm}$ 和 $70 \sim 100 \text{ cm}$ 每层土壤所占的体积比(表 2)。结果表明该峰丛洼地区上、中、下坡位的土壤主要集中在 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 深度范围内, 体积分数范围为 $72\% \pm 16\% \sim 78\% \pm 6\%$; 而洼地的土壤则主要集中在 $0 \sim 70 \text{ cm}$, 体积分数为 $64\% \pm 17\%$, 并根据 GPR 测量的深度计算出每个样方内土壤的平均深度(表 2)。与常规利用钢钎测量喀斯特土壤深度的方法^[17]相比, 该探地雷达探测方法可以在不破坏土壤环境的条件下, 获得喀斯特地区土壤的深度, 反映喀斯特土壤的异质性, 并计算出不同层次土壤所占体积比, 从三维立体的角度研究土壤的分布特征。目前该方法还处在方法的建立初步阶段, 方法完

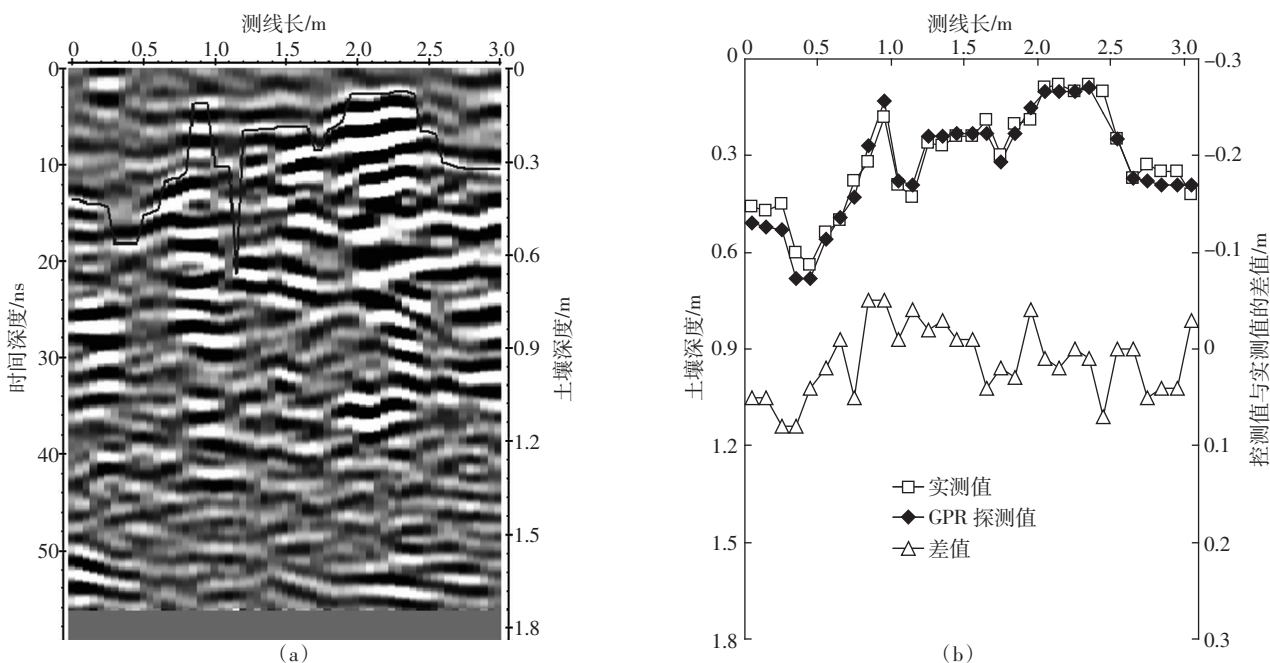


图 2 中坡样方四测线 1 的 GPR 探测图像(a), 实地探测和开挖验证土壤深度对比图(b)

Figure 2 Ground penetrating radargram under the first survey line in the fourth quadrats of midslope(a), and comparison of soil depths by GPR field detection and soil excavation(b)

表 2 GPR 测得各样方中土壤的分布情况
Table 2 Soil distribution in each quadrat detected by GPR

样方编号		每层土壤所占体积分数/%						平均土壤深度/ cm
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~50 cm	50~70 cm	70~100 cm	
上坡	SP1	85	72	40	12	0	0	31
	SP2	94	78	64	33	5	0	37
	SP3	84	76	60	24	9	0	30
	SP4	99	92	66	17	0	0	25
中坡	ZP1	98	89	65	30	25	11	65
	ZP2	96	86	67	36	8	1	37
	ZP3	92	82	52	22	1	0	25
	ZP4	94	72	47	14	2	0	25
下坡	XP1	94	82	54	29	14	7	33
	XP2	98	89	71	34	20	10	43
	XP3	90	80	62	30	18	11	40
	XP4	76	48	23	12	0	0	28
洼地	W1	82	64	50	36	24	17	43
	W2	97	96	93	86	75	61	83
	W3	97	87	74	59	44	35	69
	W4	93	80	68	46	39	11	60

善后,可以根据多个典型样区的探地雷达的探测结果,建立喀斯特土壤分布的模型,为土壤有机碳密度的估算提供基础数据。

2.2 不同坡位土壤有机碳含量的分布特征

在垂直方向上,土壤有机碳含量具有明显的表聚性(图 3)。随土壤深度的增加,有机碳含量逐渐降低,在 0~30 cm 的深度范围内,土壤有机碳含量显著降低($P<0.05$);深度大于 30 cm,土壤有机碳含量缓慢降低,即在 30 cm 附近处有机碳含量出现转折点。这是由于植被凋落物分解后输入土壤的有机碳主要聚集在土壤表层,植物的根系也主要集中在 0~20 cm 土层内,随土壤深度的增加,植被凋落物和根系数量减少,土壤容重增加,因此植被对土壤有机碳含量的影响随深度增加而减弱^[18-19]。此外,坡地的表层土壤有机碳含量明显高于洼地,且由上坡至洼地有机碳含量呈现下降趋势(图 3),符合喀斯特峰丛洼地典型的“养分倒置”规律。其原因在于:①喀斯特峰丛洼地区坡地的植被多为草地、灌丛或林地,其生境湿润,每年都有大量的凋落物积累,有机碳含量相对较高;洼地的土地利用类型多为耕地,每年作物的种植和收割不利于土壤有机碳的积累。②坡地虽然具有较大的坡度,但其岩石出露率远远高于洼地,加上由于表层岩溶带的发育,容易形成封闭或半封闭的阴暗环境,有利于有机质的积累^[20]。③洼地其易旱易涝,淋溶强烈,加之频繁的人为活动加速了土壤有机质的矿化分解,有机碳含

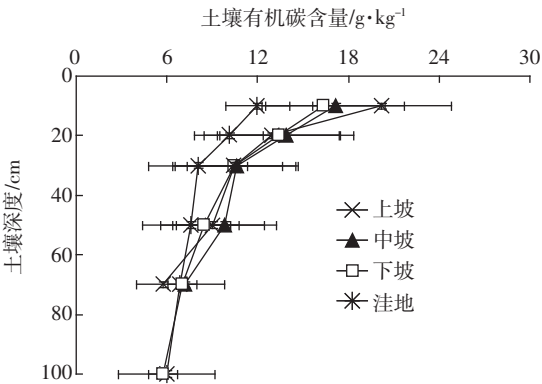


图 3 不同坡位土壤有机碳含量随土壤深度的变化
Figure 3 Changes of soil organic carbon content with soil depth at different slope positions

量相对较低^[21]。因此,在研究喀斯特峰丛洼地景观单元的土壤有机碳分布特征时,需考虑不同坡位土壤有机碳的异质性。

在同一坡位,四个样方中同一土层的有机碳含量差异较大(表 3)。这是由于喀斯特峰丛洼地区的裸岩率、土壤厚度、植被类型差异较大,即同一坡位存在多种植被类型(见本文材料与方法)。不同植被类型下植被凋落物的释归量不同^[22],植被根系的垂直分布也不同,其直接影响着土壤剖面各层次的有机碳含量,决定着土壤有机碳的垂直分布^[23]。研究表明:喀斯特峰丛洼地区不同植被类型下同一层次土壤有机碳含量差异表现为灌丛>草灌丛>草丛,因而造成了同一坡位

表 3 四个坡位各样方土壤有机碳含量
Table 3 Comparison of soil organic carbon content in each quadrat at four slope positions

样方编号		每层土壤有机碳含量/g·kg ⁻¹					
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~50 cm	50~70 cm	70~100 cm
上坡	SP1	22.70±4.79abA	16.90±1.73aAB	14.88±1.90aB	12.58±0.38aB		
	SP2	25.43±5.06aA	11.84±0.32bB	8.76±1.35bB	7.56±0.31bB		
	SP3	13.89±0.97bA	11.06±0.91bA	8.06±0.97bB	6.71±1.47bB	5.75B	
	SP4	18.88±3.37abA	11.37±1.25bB	10.03±3.17bB	9.30±3.45bB		
中坡	ZP1	17.87±0.35bA	15.93±0.77bAB	13.02±1.43bB	12.61±3.40aB		
	ZP2	13.92±1.27cA	10.38±1.63cB	7.47±0.18cC	7.22±0.12bC	7.15±0.04C	
	ZP3	23.34±0.88aA	19.24±0.48aB	15.06±0.35aC	12.95±0.56aD		
	ZP4	13.40±1.22cA	10.12±1.70cB	6.83±0.85cC	6.49±0.81bC		
下坡	XP1	11.48±1.62cA	8.52±3.17cB	6.73±2.33cB	6.37±1.64bB	6.01±1.30aB	5.74B
	XP2	14.64±0.78bA	12.76±0.49bB	10.14±1.91abC	9.57±3.09aC	7.28aC	
	XP3	19.11±0.51aA	14.05±0.65bB	10.64±2.46abC	9.64±2.78aC	7.86aC	
	XP4	20.22±0.86aA	18.38±1.71aA	14.41±1.36aB			
洼地	W1	8.85±0.31bA	6.70±1.84bA	3.18±1.33bB	2.85±1.39bB	2.84±0.49bB	2.65±0.83aB
	W2	13.03±2.05aA	11.21±2.60aAB	9.93±2.80aAB	8.93±2.65aAB	7.46±3.52abAB	4.21±0.06aB
	W3	12.94±1.32aA	11.26±0.31aB	10.08±0.64aB	9.74±0.40aB	9.72±1.29aB	9.73±0.78aB
	W4	13.16±1.61aA	11.23±0.83aB	9.00±1.64aC	8.79±3.44aC	7.54±2.59abC	7.36aC

注:a, b, c 表示同一列相同坡位土壤有机碳含量的差异; A, B, C 表示同一行土壤有机碳含量的差异, $P<0.05$ 。
Note: a, b, and c mean the differences in soil organic content between different quadrats at the same slope position within the same column; A, B, C means the differences in soil organic content between different soil depths within the same row, $P<0.05$.

不同样方间土壤有机碳的差异。对于洼地中的四个样方, 尽管均为农耕地, 但由于耕作管理模式不同, 即施肥量、种植制度等差异造成 W1 和其他 3 个样方中土壤有机碳含量差异较大。因此, 同一坡位土壤有机碳的研究需考虑植被类型、耕作管理模式不同带来的影响。

2.3 不同坡位土壤碳密度的估算

分别根据公式(1)和公式(6)的探地雷达法和平均深度法对样方土壤有机碳密度进行估算, 结果见表 4。对于取样剖面深度不足 1 m 而样方内其他位置超过取样深度的有机碳密度, 按取样剖面最深土层的有机碳含量和土壤容重进行计算。上、中、下坡位和洼

地中 0~20 cm 内土壤有机碳密度范围分别为: 3.72~4.14、2.69~4.17、2.34~3.64 kg·m⁻² 和 2.67~3.11 kg·m⁻²; 而 0~100 cm 土深的有机碳密度范围分别为 3.99~5.70、3.41~7.11、3.83~6.05 kg·m⁻² 和 5.72~9.14 kg·m⁻² (表 4)。0~20 cm 内, 土壤有机碳密度由上坡至洼地逐渐减小, 上坡与洼地差异显著 ($P<0.05$); 而 0~100 cm 内, 洼地土壤有机碳密度大于坡地, 且差异显著 ($P<0.05$)。

Zheng 等^[7]利用平均土壤深度法估算喀斯特峰丛洼地的土壤有机碳密度, 其测量结果与传统方法相比, 准确度大大提高。然而, 土壤有机碳含量随土壤深度增加呈指数减小^[23], 喀斯特土壤分布在垂直和水平

表 4 两种方法计算的土壤有机碳密度及其比较
Table 4 SOCD calculated from two methods and their comparison

坡位	SOCD(探地雷达法)/kg·m ⁻²		SOCD(平均深度法)/kg·m ⁻²		方法间比较 F/sig	
	0~20 cm	0~100 cm	0~20 cm	0~100 cm	0~20 cm	0~100 cm
上坡	3.90±0.22a	4.92±0.70b	3.94±0.45a	5.50±0.77b	0.260/0.880	1.223/0.311
中坡	3.36±0.75ab	5.17±1.65b	3.35±0.31ab	5.92±0.69b	0/0.987	0.409/0.546
下坡	3.07±0.58ab	4.94±1.23b	3.50±0.76ab	5.31±1.23b	0.812/0.402	0.174/0.691
洼地	2.90±0.22b	7.59±1.73a	2.79±0.89b	7.99±0.89a	0.709/0.442	0.128/0.739

注: 不同的小写字母表示不同坡位土壤有机碳密度的差异显著。
Note: Different lowercases mean significant difference ($P<0.05$) in soil organic carbon density (SOCD) between different slope positions.

方向上异质性极大,不同深度有机碳含量差异较大,因此利用平均深度无法准确反映土壤分布的实际情况。本方法基于 GPR 技术测得每层土壤所占的体积分数计算土壤有机碳密度,得到的结果与利用平均深度法公式^[7]计算同一样方中 0~100 cm 的土壤有机碳密度无显著差异(表 4),平均深度法得到的有机碳密度均大于探地雷达法得到的有机碳密度,误差达到 5.3%~14.5%;在 0~20 cm 差异也不显著,在洼地和中坡位中平均深度法得到的有机碳密度小于探地雷达法得到的有机碳密度,而在上、下坡位中前者均大于后者,相对误差为 0.3%~14.0%。两种方法相比,在 0~100 cm 中的误差比在 0~20 cm 中的大,说明采用平均深度法计算土壤有机碳密度,掩盖了深层土壤的深度,忽略了土壤深度分布的差异性,为深层土壤有机碳密度的计算带来误差。本文的计算方法则避免了将土壤作为连续体或者利用平均土深而作为土壤分布带来的误差,其测定结果更符合实际情况。

本研究仅考察了有限的样方,在尺度上推时,建议结合样方和样线法综合计算较大尺度的裸岩率,进而计算出典型喀斯特峰丛洼地的土壤有机碳密度。

3 结论

本研究在不破坏土壤环境的前提下,采用 GPR 技术获得各个层次土壤深度信息,并计算得出各个层次土壤所占的体积分数,GPR 探测获得的喀斯特峰丛洼地土壤分布情况与实地开挖验证的结果相符。基于此,建立了适合喀斯特峰丛洼地非连续性土壤有机碳密度的估算方法。该方法与“平均深度法”相比,更能客观反映喀斯特土壤分布的真实情况,获得的土壤有机碳密度也更为准确。

参考文献:

- [1] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in South-western China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(2): 115-121.
- [2] Sweeting M M. Karst in China[M]. Springer Series in Physical Environment. Springer Berlin Heidelberg, 1995, 15: 15.
- [3] 杨明德, 梁 虹. 峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 44-51.
YANG Ming-de, LIANG Hong. The processes of evolution dynamic of cone Karst and the exploitation of the water resource[J]. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(1): 44-51.
- [4] 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 Hai-yong, ZENG Fu-ping, SONG Tong-qing, et al. Spatial variations of soil organic and nitrogen in peak-cluster depression areas of Karst region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1029-1036.
- [5] 倪九派, 袁道先, 谢德体, 等. 重庆岩溶区土壤有机碳库的估算及其空间分布特征[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6292-6301.
NI Jiu-pai, YUAN Dao-xian, XIE De-ti, et al. Estimation of soil organic carbon storage and the characteristic of carbon spatial distribution in Karst area, Chongqing, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6292-6301.
- [6] 张 勇, 史学正, 赵永存, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究[J]. 环境学报, 2008, 29(8): 2314-2319.
ZHANG Yong, SHI Xue-zheng, ZHAO Yong-cun, et al. Estimates and affecting factors of soil organic carbon storages in Yunnan-Guizhou-Guangxi region of China[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8): 2314-2319.
- [7] Zheng H, Su Y R, He X Y, et al. Modified method for estimating the organic carbon density of discontinuous soils in peak-Karst regions in Southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(6): 1743-1755.
- [8] Chen X B, Zheng H, Zhang W, et al. Effects of land cover on soil organic carbon stock in a Karst landscape with discontinuous soil distribution[J]. *Journal of Mountain Science*, 2014, 11(3): 774-781.
- [9] 肖 兵, 周 翔, 汤井田. 探地雷达技术及其应用和发展[J]. 物探与化探, 1996, 20(5): 378-383.
XIAO Bing, ZHOU Xiang, TANG Jing-tian. Ground-searching radar and its application and development[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1996, 20(5): 378-383.
- [10] Hanninen P. Application of ground penetrating radar techniques to peatland investigations[J]. *Geological Survey of Finland Special Paper*, 1992, 12: 159-162.
- [11] 于秀秀, 马兴旺, 迪力夏提, 等. 探地雷达在土层厚度调查中的试验研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(4): 874-878.
YU Xiu-xiu, MA Xing-wang, DI Li-xia-ti, et al. Using ground penetrating radar in determination of soil depth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 874-878.
- [12] 夏银行, 黎 蕾, 邓少虹, 等. 基于探地雷达探测喀斯特峰丛洼地土壤深度和分布的方法[J]. 水土保持通报, 2016, 1(待刊).
XIA Yin-hang, LI Lei, DENG Shao-hong, et al. Detection of soil depths and distribution based on ground penetrating radar technology in Karst peak-cluster depression area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 1(In press).
- [13] 张 伟, 陈洪松, 王克林, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1828-1835.
ZHANG Wei, CHEN Hong-song, WANG Ke-lin, et al. The heterogeneity of soil nutrients and their influencing factors in peak-cluster depression areas of Karst region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(9): 1828-1835.
- [14] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特地区典型峰丛洼地表层土壤水分空间变异及合理取样数研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 114-117, 134.
ZHANG Ji-guang, CHEN Hong-song, SU Yi-rong, et al. Spatial variations of soil organic and nitrogen in peak-cluster depression areas of Karst region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1029-1036.

- ability of soil moisture content and reasonable sampling number in cluster-peak depression areas of Karst region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2):114-117, 134.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] 汤洪志, 黎正根, 贺小军. 探地雷达在管线探测与工程勘察中的应用[J]. 华东地质学院学报, 1999, 22(2):156-166.
- TANG Hong-zhi, LI Zheng-gen, HE Xiao-jun. Applications of GPR to the buried pipes detection and the engineering geological prospecting [J]. *Journal of East China Geological Institute*, 1999, 22(2):156-166.
- [17] 周运超, 王世杰, 卢红梅. 喀斯特石漠化过程中土壤的空间分布[J]. 地球与环境, 2010, 38(1):1-6.
- ZHOU Yun-chao, WANG Shi-jie, LU Hong-mei. Spatial distribution of soils during the process of Karst rocky desertification[J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(1):1-6.
- [18] 何 宁, 宋同清, 彭晚霞, 等. 喀斯特峰丛洼地次生林土壤有机碳的剖面分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2):374-381.
- HE Ning, SONG Tong-qing, PENG Wan-xia, et al. Profile distribution characteristics of soil organic carbon in secondary forests in depressions between Karst hills[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2):374-381.
- [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 Li, LI Bao-guo, ZHOU Guang-sheng. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1):99-105.
- [20] 张 伟, 陈洪松, 王克林, 等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分布特征的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7):1459-1463.
- ZHANG Wei, CHEN Hong-song, WANG Ke-lin, et al. Effects of planting pattern and bare rock ratio on spatial distribution of soil nutrients in Karst depression area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7):1459-1463.
- [21] 张 伟, 王克林, 陈洪松, 等. 典型喀斯特峰丛洼地土壤有机碳含量空间预测研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(3):601-606.
- ZHANG Wei, WANG Ke-lin, CHEN Hong-song, et al. Use of satellite information and GIS to predict distribution of soil organic carbon in depressions amid clusters of Karst peaks[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3):601-606.
- [22] 赵丽娟, 韩晓增, 王守宇, 等. 黑土长期施肥及养分循环再利用的作物产量及土壤肥力变化Ⅳ. 有机碳组分的变化[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5):817-821.
- ZHAO Li-juan, HAN Xiao-zeng, WANG Shou-yu, et al. Changes of crop yield and soil fertility under long-term fertilization and reutilization on a black soil: IV. Soil organic carbon and its fractions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(5):817-821.
- [23] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2):423-436.