

基于探地雷达的喀斯特峰丛洼地土壤深度和分布探测

夏银行^{1,2,3}, 黎蕾^{1,2,3}, 邓少虹⁴, 陈香碧^{1,3}, 何寻阳^{1,3}, 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, 湖南 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; 4. 广西大学 农学院, 广西 南宁 530005)

摘要: [目的] 研究喀斯特土壤的深度和分布, 为利用探地雷达(GPR)技术开展喀斯特地区峰丛洼地土壤分布的研究提供理论依据。[方法] 通过室内模拟试验, 建立喀斯特地区 3 种典型质地土壤(砂质黏壤土、黏壤土、粉(砂)质黏土)中探地雷达电磁波波速和土壤含水量的关系式。通过实地测定土壤质地和含水量, 选择合适的关系式, 对探地雷达图像进行校准、解译, 获得土壤深度, 并采用开挖法进行验证。[结果] 得到了 3 种质地土壤中电磁波波速(ν)与含水量(θ)关系的三次多项式。利用该关系式探测的喀斯特土壤理论深度与实地开挖的结果相符, 误差为 0—10 cm。利用探地雷达软件生成了反映测线下不同位置土壤深度的二维图像和样方内土壤深度分布的三维图像, 表明土壤主要分布在 0—50 cm。[结论] 利用探地雷达技术探测喀斯特地区土壤深度和分布是切实可行的。

关键词: 喀斯特地区; 探地雷达; 土壤深度; 电磁波波速; 土壤含水量; 土壤质地

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)01-0129-07

中图分类号: S152, TN95

文献参数: 夏银行, 黎蕾, 邓少虹, 等. 基于探地雷达的喀斯特峰丛洼地土壤深度和分布探测[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 129-135. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2016. 01. 023

Detection of Soil Depths and Distribution Using Ground Penetrating Radar Technology in Karst Peak-Cluster Depression Area

XIA Yinhang^{1,2,3}, LI Lei^{1,2,3}, DENG Shaohong⁴,

CHEN Xiangbi^{1,3}, HE Xunyang^{1,3}, WU Jinshui¹, SU Yirong^{1,3}

(1. The Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region,

Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha,

Human 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, Guangxi 547100, China; 4. College of Agronomy, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530005, China)

Abstract: [Objective] To analyze the depth and distribution of karst soil in order to provide theoretical basis for using ground penetrating radar(GPR) in the research on soil distribution in karst peak-cluster depression area. [Methods] Through laboratory simulation experiment, this study established the relationship between GPR velocity of electromagnetic wave and soil water content in three types of soil texture(sandy clay loam, clay loam, silty clay) in karst region. Through the field measurement of soil texture and water content, the GPR image was calibrated and interpreted based on the right formula. Then the soil depth was estimated and verified by excavation. [Results] We found the theoretical models of cubic polynomial relationship between electromagnetic wave velocity(ν) and soil water content(θ) for the three soil textures. It showed that soil depth in the field was consistent with the results estimated with theoretical model, and the error range was 0—10 cm. The 2-dimension images reflecting soil depths in the different location under the survey line and the 3-dimension images reflecting soil depths distribution in the quadrant were generated using GPR soft-

收稿日期: 2014-12-05

修回日期: 2015-03-08

资助项目: 国家科技支撑计划项目“喀斯特石漠化中低产土壤改良技术集成示范”(2012BAD05B03-6); 中国科学院战略性先导科技专项“典型石漠化地区植被恢复和增汇技术的试验示范”(XDA05070403); 国家自然科学基金资助项目“喀斯特非连续性土壤有机碳的剖面分布研究”(41171246)

第一作者: 夏银行(1987—), 男(汉族), 河南省开封市人, 硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达在土壤环境中的应用。E-mail: bank. 12345@163. com.

通讯作者: 苏以荣(1962—), 男(汉族), 湖北省松滋县人, 硕士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为土壤生态与植物营养调控。E-mail: yrsu@isa. ac. cn.

ware. Soil mainly distributed within the depth of 50 cm. [Conclusion] GPR technology was feasible to detect the depths and distribution of discontinuous soil in karst region.

Keywords: karst area; ground penetrating radar; soil depth; electromagnetic wave velocity; soil water content; soil texture

中国喀斯特地貌面积大约 $5.50 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[1], 主要分布在西南滇黔桂 3 省。喀斯特地区土壤母质在水的冲蚀和溶蚀作用下, 形成基岩出露面积大、地形起伏多变、形成的微地貌复杂, 且土壤分布不连续、土壤浅薄, 这些性质不同于同纬度地带性土壤的连续分布^[2], 研究其土壤的深度和分布特征是深刻理解喀斯特土壤生态过程的基础。现有土壤深度的研究方法主要是传统的开挖法和扦插法, 在喀斯特土壤性质的研究中也有一定成功的应用^[3-4]。但开挖法破坏性大, 对脆弱的喀斯特生态系统可能造成较大的影响, 不适用于喀斯特地区; 而扦插法不仅费时费力, 而且误差较大, 无法准确反映非连续性土壤深度的分布特征。因此, 亟需一种原位无损的土壤深度的探测方法。

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)作为一种快速无损的地球物理探测技术, 它通过一组发射天线向地下或者物体内部发射高频电磁波, 在传播过程中遇到电性差异的地层或物体反射后返回表面, 被另一组接收天线接收, 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、结构、形态和埋藏深度。目前, GPR 在非喀斯特地区土壤深度的调查得到了初步的研究^[5-6]。喀斯特地上地下二元结构, 土壤与母岩间缺乏过渡层, 土壤、岩石之间以及溶蚀洞、溶蚀裂缝带与周围岩石之间存在较大的电性、电磁性差异^[7], 适合采用 GPR 技术探测土壤深度。在喀斯特地区探地雷达技术主要应用于地下含水层、考古和溶洞的探测^[8-9], 而在土壤深度方面的研究尚未见报道。

确定电磁波波速是应用 GPR 技术的首要前提。在实际工作中如何确定波速, 前人做了大量的研究^[10-12]。袁明德^[13]总结出了 7 种确定电磁波波速的方法: 已知介电常数, 估算波速; 利用已知埋深的目标, 反求平均速度; 采用地震探测中的 CMP(共中心点)法求速度; 利用地下点目标上反射双曲线的弧度求速度; 用反射系数求速度; 用初至波速求速度; 迭代偏移处理求速度。然而, 这些方法都有一定的不足, 如必须获得介电常数、钻孔资料、测量信号的振幅等信息, 或需要分离的发射和接收天线, 是这些方法的先决条件。基于此, 吴信民等^[14]尝试通过建立土壤含水量与电磁波波速关系的模型, 进而确定粘质土壤中电磁波波速, 并且通过实地验证, 该模型可靠。利用该模型可以通过土壤含水量直接估算电磁波速度。

电磁波波速受含水量主要影响外, 同时电磁波波速还受土壤的其他性质影响, 如土壤质地、密实度和孔隙比等^[14-16]。不同质地土壤, 其组成和性质存在很大的差异。在喀斯特地质背景下, 不同质地土壤中含水量与电磁波波速的关系如何, 目前尚不清楚。

本研究拟选取喀斯特地区 3 种典型质地的土壤, 拟通过室内模拟试验, 建立不同质地土壤中含水量与电磁波波速的关系, 并将所建立的关系应用到实地样方探测中, 根据样方的土壤质地, 选择对应的土壤的含水量与电磁波波速关系式, 计算电磁波的传播速度; 将电磁波波速代入 GPR 数据的处理中, 进而得到土壤深度的分布情况。以期利用 GPR 技术开展喀斯特地区土壤分布的研究提供理论依据。

1 材料与方 法

GPR 在土壤中的波速是探测土壤深度的关键因素, 其受到土壤含水量和介电常数的影响。为了获得土壤含水量与介电常数和 GPR 电磁波波速的关系, 本文设置了 2 个室内模拟试验和实地探测试验。

1.1 室内模拟试验

试验在中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站进行, 设置两个室内模拟试验。

(1) 试验 1。在大棚内修筑 3 个人工水泥池(长×宽×高: $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$), 分别在每个水泥池距顶部 60 cm 和距左墙约 50 cm 的前后墙壁地方留直径 6 cm 的孔, 水泥池底部留有排水孔。供试土壤为喀斯特地区 3 种典型质地的土壤(表 1): 砂质黏壤土、黏壤土、粉(砂)质黏土, 黏粒含量基本上涵盖了喀斯特地区大部分的土壤, 其土壤类型均为白云岩发育的棕色石灰土。土壤风干后按实地容重(砂质黏壤土: 1.2 g/cm^3 , 黏壤土: 1.3 g/cm^3 , 粉(砂)质黏土: 1.1 g/cm^3)分别填入 3 个水泥池内, 并在直径为 6 cm 的孔处插入一根直径为 5.1 cm 的钢管, 填满土后加水至完全饱和, 待其稳定后自然风干, 并在自然风干过程中间隔 3~5 d 利用 GPR(500 和 800 MHz 屏蔽天线)在其上方横切面处分别以点测法和轮测法测 3 条测线(距前墙分别为 40, 50, 60 cm), 具体探测参数见 1.3。利用已知埋深的目标物, 根据公式(1)求出电磁波在介质中的平均速度。同时测定 0—60 cm 平均土壤含水量(每 20 cm 测其质量含水量), 计算电磁波波速与含水量的关系。

$$H=vt/2 \quad (1)$$

式中: H ——目标物(钢管)放置的已知深度(m);
 v ——电磁波波速(m/ns); t ——目标体对雷达波的
反射双程波时间(ns)。

表 1 3 种质地土壤中各粒级的含量 %

土壤质地	土壤粒级		
	砂粒	粉(砂)粒	黏粒
砂质黏壤土	55.98	21.97	24.12
黏壤土	31.83	31.30	38.92
粉(砂)质黏土	3.70	50.34	49.92

(2) 试验 2。3 种质地土壤风干后经过 2 mm 筛,按上述实际容重将土壤装填于高 40 cm,直径 40 cm 的 PVC 管内,土柱高 30 cm,土柱底部用 200 目尼龙纱封口。每种土壤设置 3 个重复,置于大棚内,加水至完全饱和,并在自然风干过程中测定土柱含水量(质量含水量)和介电常数。并计算含水量与土壤介电常数的关系。

1.2 探地雷达法获取土壤深度及验证

在广西环江县典型喀斯特峰丛洼地(24°54′42″—24°55′17″N,107°56′48″—107°57′35″E)的上、中、下坡位分别选择 3 个典型样方,样方大小均为 2 m×3 m,移除样方内土壤表面的植物及凋落物(与地面齐平清除),在样方内按 0.5 m 等间距设置 5 条测线,每条测线长 3 m,测线起点一致。以 500 MHz 屏蔽天线为例对测线进行点测法测量,道间距设为 0.05 m,测量完毕后测定样方内土壤深度范围的平均含水量(每 20 cm 测其质量含水量,最大深度测至 100 cm),测定其土壤质地,并用开挖法原位测定土壤深度,每 0.1 m 验证一个深度值,用来验证含水量与电磁波波速之间的关系和估算土壤深度分布特征。

1.3 数据采集

GPR 数据的采集采用瑞典 MALA 公司生产的 ProEx 系统 GPR 主机以及 500 和 800 MHz 屏蔽天线采集波速数据,采集软件为 GroundVision 2。采样参数设置如下:500 和 800 MHz 天线的时窗分别选择 62.09 和 38.68 ns;而采样频率分别选择 7 730.26 和 12 409.1 MHz;天线偶极子间距分别设为 0.18 和 0.14 m;道间距都设为 0.01 m(实地验证时设置为 0.05 m);叠加次数均设为自动叠加。

水泥池内和实地样方内的土壤含水量采用烘干法进行测量。PVC 管内的土壤含水量采用称重法测定。土壤介电常数采用美国 CAMPBELL SCIENTIFIC 公司生产的 TDR 100 时域反射仪进行测定。

土壤质地利用 GB7845-1987 森林土壤颗粒组成(机械组成)的测定方法测定。

1.4 数据处理

试验 1 中的电磁波波速与含水量的关系和土壤深度频数分布利用 Excel 2010 作图,利用电磁波波速和含水量的关系式并根据各样方实测的含水量计算探测时的波速。

(1) GPR 二维图像。利用 Reflexw 软件处理后进行解读。基本步骤为:带入电磁波波速、一维滤波/去直流漂移(1D-Filter/Subtract-Dc-Shift)、静校正/移动开始时间(Static Correction/Move start time)、增益/能量衰减(Gain/Energy decay)、二维滤波/抽取平均值(2D-Filter/Subtracting average)、一维滤波/巴特沃斯带通滤波(1D-Filter/Bandpassbutterworth)、二维滤波/滑动平均(2D-Filter/Running average)。根据以上步骤获取土壤深度数据。

(2) GPR 三维图像。利用 Easy 3D(1.3.3)软件处理后进行解读。基本步骤为:带入电磁波波速、DC 校正(DC adjustment)、自动增益控制(AGC)、删除平均道>Delete mean trace)、时域的带通滤波(FIR)、在二维点阵取平均值(Average),生成土壤深度分布的三维图像。

根据以上获得的土壤深度,利用公式(2)计算样方内不同层次土壤所占的体积比。

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

式中: V_i ——样方内第 i 层内土壤所占的体积分数(%); A_{in} ——样方第 i 层第 n 条测线下土壤所占面积分数(%); i ——样方所分层数; n ——样方内测线条数。

$$A_{in} = (D'_{in0} + D'_{in1} + D'_{in2} + \dots + D'_{inf} + D_{imm}') / 2mD_i \quad (3)$$

式中: D'_{inf} ——样方第 i 层第 n 条测线下第 f 点土壤深度(cm); m ——每条测线下测点数,等于测线长(m)除以 0.1 m。

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

式中: D'_{nf} ——样方第 n 条测线下第 f 点土壤深度(cm); \max, \min ——分别是第 i 层土壤深度的最大值和最小值(cm),例如 $i=1$ 时, $\max=10, \min=0$,而 $i=2$ 时, $\max=20, \min=10$,第 3,4,5,6 层时 \max 和 \min 的取值分别为 30,50,70,100,20,30,50,70;

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

式中: D_i ——样方内第 i 层土壤的深度值(cm)。

2 结果与讨论

2.1 土壤干湿程度对介电常数与电磁波波速关系的影响

3 种质地土壤的湿度越大,介电常数越大,电磁波传播的波速则越小,反之亦然(表 2)。在土壤含水量非饱和的情况下,土壤含水量是介电常数的主要影响因子^[17],土壤含水量与介电常数的关系可以利用 Topp 经验公式^[18]:

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \quad (6)$$

式中: θ ——土壤含水量; ϵ ——介电常数。

电磁波在土壤中的传播速度由土壤的相对磁导率和介电常数决定,大多数土壤的相对磁导率近似为 1,电磁波波速主要受土壤的介电常数控制,两者之间的关系可由公式^[19]:

$$\nu = c / \sqrt{\epsilon'} \quad (7)$$

式中: ν ——电磁波波速(m/ns); c ——真空中的电磁波速度(m/ns); ϵ' ——相对介电常数(F/m)。

实际上,土壤水分是通过影响土壤介电常数、继而影响电磁波波速的,不同土壤的介电常数同时受水分含量、质地、电导率、孔隙度等多种因素的影响,但对同一土壤,含水量是主要的影响因子。由电磁波波

速与介电常数、土壤介电常数与水分含量关系式知道,土壤水分与电磁波波速间并不是简单的线性关系,为了研究两者的关系,因此采用直接建立土壤含水量与电磁波波速拟合关系式的方法,为进一步探测喀斯特地区土壤深度和分布提供技术支撑。

表 2 3 种质地干湿土中介电常数与电磁波波速的关系

土壤类型	介电常数/(F·m ⁻¹)	速度/(m·ns ⁻¹)
湿砂质黏壤土	7.2~23.8	0.12~0.069
干砂质黏壤土	2.6	0.18
湿黏壤土	6.1~28.5	0.11~0.059
干黏壤土	2.9	0.16
湿粉(砂)质黏土	7.2~24.0	0.11~0.067
干粉(砂)质黏土	3.6	0.13

2.2 水分含量和土壤质地对 GPR 电磁波波速的影响

利用 500 和 800 MHz 两种屏蔽天线分别测定喀斯特 3 种质地土壤含水量与波速之间的关系,发现同一土壤中含水量对电磁波波速影响较大,电磁波波速随含水量增加而下降;两种频率天线拟合的电磁波波速与含水量的曲线基本一致(图 1),说明采用这两种天线频率测定的电磁波波速结果一致。不同质地土壤对波速与含水量的拟合曲线不同。在 3 种质地土壤中电磁波波速与含水量的关系式为三次多项式($R^2 > 0.95$,表 3)。

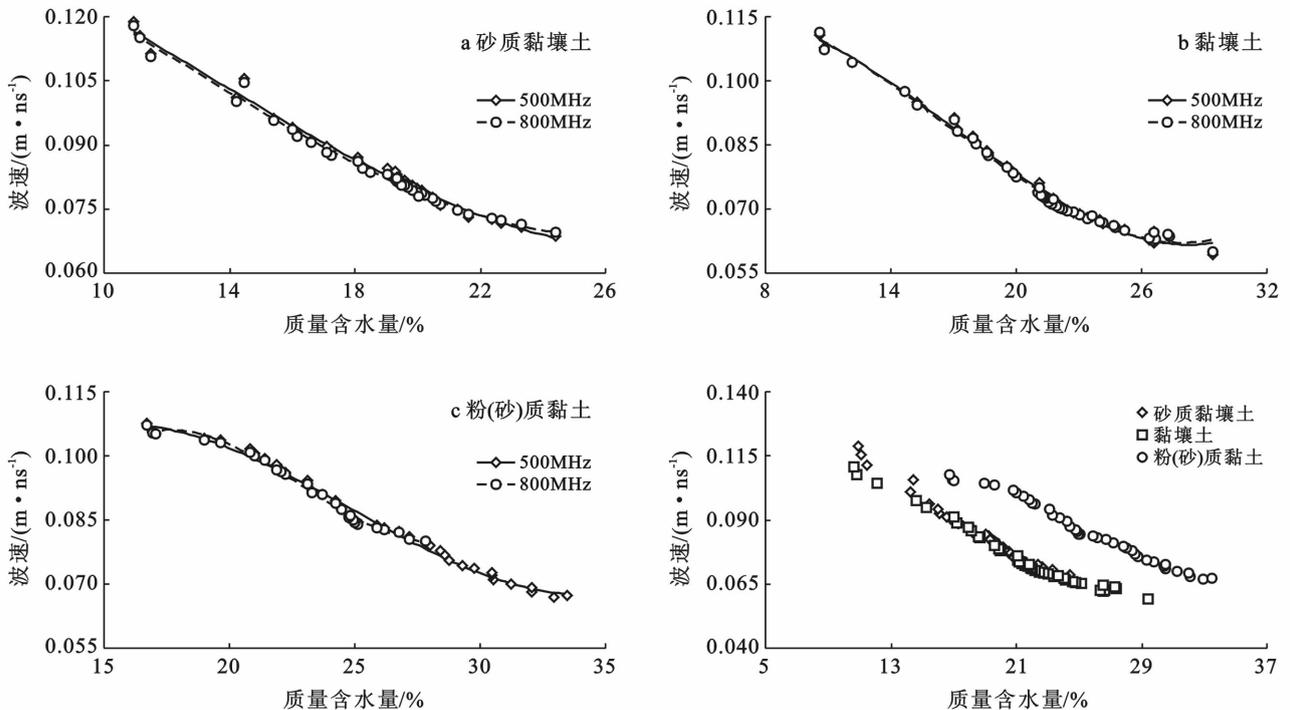


图 1 不同质地土壤中电磁波波速与含水量的关系

不同质地土壤 $\nu-\theta$ 关系式的 4 个系数有较大的差异;通过表 1 比较可得 3 种质地土壤的黏粒含量:

粉(砂)质黏土 > 黏壤土 > 砂质黏壤土,三者黏粒含量存在较大差异;3 种质地土壤的容重也存在差异;这

些表明判断电磁波在土壤中传播的快慢与所使用的 500 和 800 MHz 频率天线无关,与土壤本身的性质和含水量有关。在土壤中影响电磁波传播速度的因素较多,如土壤质地、含水量、密实度、含盐量等^[14-15]。土壤质地通过影响土壤物质组成(如黏粒含量)、容重等影响电磁波波速。土壤含水量易发生变化,它通过改变土体介电常数进而影响电磁波的传播速度。本研究重点考虑了喀斯特土壤质地和土壤含水量对电磁波波速的影响,并建立了喀斯特母质发育的 3 种典型质地土壤中电磁波波速与含水量的关系式。介于这些关系式的相关系数 R^2 均超过 0.95,因而通过不同质地土壤含水量来计算电磁波波速是可行的。未来在完善探地雷达实地应用于喀斯特土壤深度分布的技术时,还可考虑其余土壤性质如:孔隙度、电导率等对电磁波波速的影响。

表 3 不同质地土壤中电磁波波速和质量含水量的经验关系式

土壤质地	经验方程式	R^2
砂质黏壤土	$v=5.918 4\theta_m^3-2.140 3\theta_m^2-0.184 1\theta_m+0.155$	0.988 9
黏壤土	$v=9.733 9\theta_m^3-4.993 5\theta_m^2+0.491 2\theta_m+0.102$	0.993 3
粉(砂)质黏土	$v=12.745\theta_m^3-9.511 2\theta_m^2+2.041 5\theta_m-0.028$	0.991 4

2.3 GPR 电磁波波速和土壤含水量关系式的实地验证与应用

在喀斯特峰丛洼地的上、中、下坡位分别选择 3 个典型的样方,测定上、中、下坡位样方的土壤质地(表 4),然后根据样方内的土壤含水量,通过不同质地土壤的电磁波波速与含水量关系式计算此时样方内的电磁波波速。将此波速代入 Reflexw 软件和 Easy 3D 软件对 GPR 测得数据进行解读,其测线下的土石分布情况如图 2a,土壤深度的实际值与探测值对比如图 2b,样方内土石分界面如图 2c 所示。

将 GPR 剖面中能够区分一个以上反射界面的能力,称为垂直分辨率。实际工作中,一般将 1/4 波长厚度作为垂直分辨率下限^[20]。该实例采用的 GPR 天线中心频率为 500 MHz,由岩土介质中电磁波波速为 0.06~0.1 m/ns 推算出,在岩土介质中 500 MHz 天线的垂直分辨率为 3~5 cm。图 2b 的差值表明,采用 GPR 探测的结果与实地开挖调查的结果相符,误差范围为 0~10 cm。误差的来源除了仪器本身的系统误差外,一部分是因为土壤内的碎石引起的;其次在不同层次土壤电磁波传播速度不同,而本研究采用的平均速度进行解析,会造成一定的误差。图 2a 能够很好地表明测线下不同位置土壤的深度情况,土壤与岩石的分界面较为明显;图 2c 中土石的分界面分布图则能反映出土壤主要分布在地表 50 cm 以内。

基于 GPR 二维图像获得的土壤深度值建立土壤深度频数图(图 3)。由图 3 可知在上、中、下坡位中,土壤深度在 10—50 cm 范围内出现的频数最多,土壤深度表现为:下坡>中坡>上坡,且整个坡上小于 1 m 的深度占 97%,即超过 1 m 深度的土壤很少。在实地探测中利用 500 MHz 屏蔽天线探测的土壤深度能达到 1.8 m 左右(图 2a),即利用 500 MHz 屏蔽天线探测喀斯特峰丛洼地坡上土壤深度时,能满足绝大部分土壤深度探测的要求。将每个样方分成 0—10, 10—20, 20—30, 30—50, 50—70 和 70—100 cm 的不同层次,根据探测的土壤深度通过公式 2 计算出样方在 1 m 深度范围内每层土壤所占的体积分数(表 4)。结果表明:在上、中、下坡位的样方中,随着深度的增加,每层土壤所占的体积逐渐减小,主要集中在 0—50 cm 的范围内,这与图 2c 的三维图像结果相符,在整个坡上 1 m 深的范围内土壤所占的体积大小为:下坡>中坡>上坡。

表 4 GPR 测得各样方中土壤的分布情况

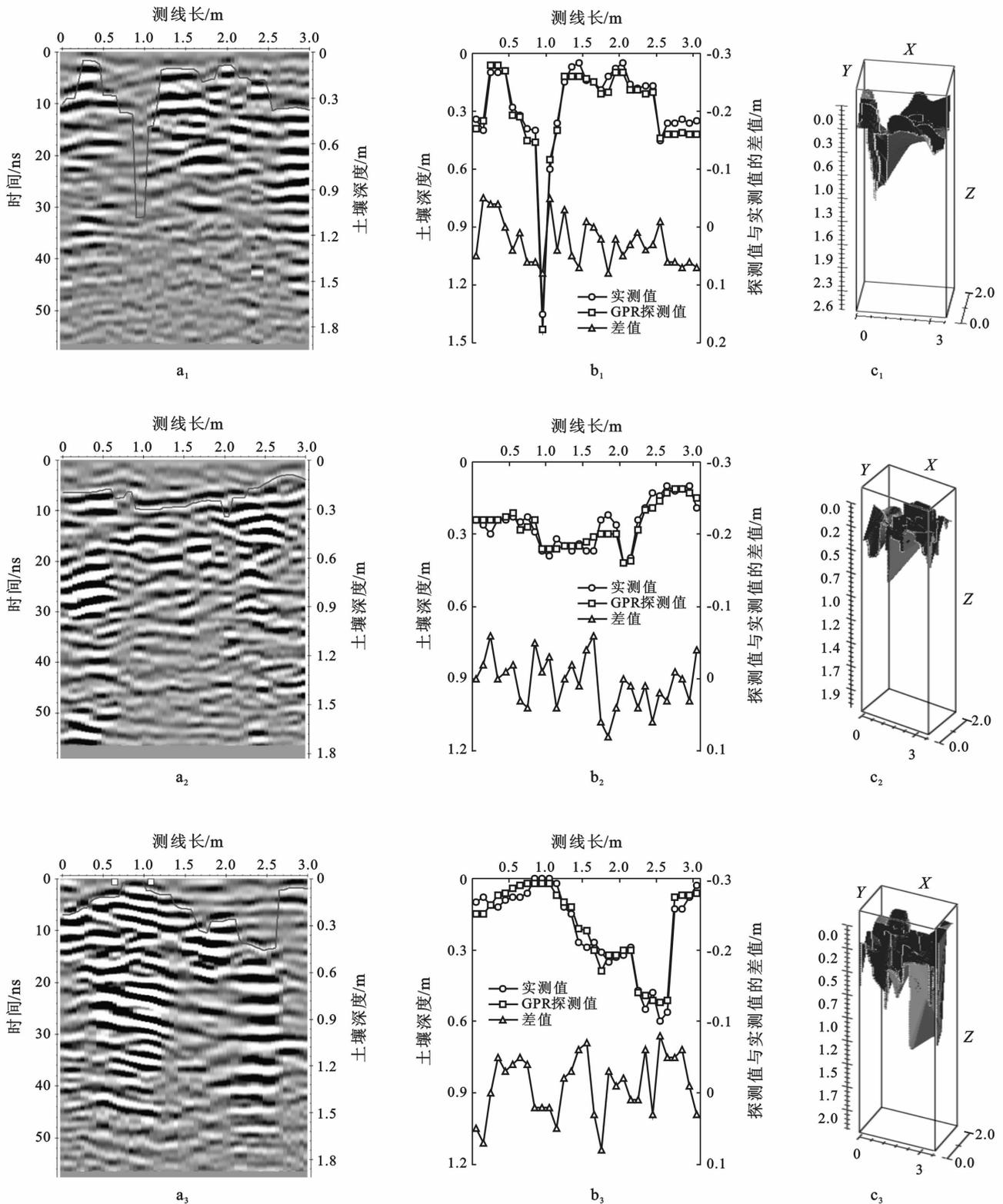
样方编号	土壤质地	土壤含水量	样方内各层土壤所占的体积分数/%					
			0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	50—70 cm	70—100 cm
上坡 1	粉(砂)质黏土	0.335 0	94	78	64	33	5	0
上坡 2	黏壤土	0.291 0	84	76	60	24	9	0
上坡 3	粉(砂)质黏土	0.324 5	99	92	66	17	0	0
中坡 1	粉(砂)质黏土	0.327 0	98	89	65	30	25	11
中坡 2	粉(砂)质黏土	0.334 5	96	86	67	36	8	1
中坡 3	黏壤土	0.292 1	94	72	47	14	2	0
下坡 1	砂(质)黏壤土	0.256 5	94	82	54	29	14	7
下坡 2	黏壤土	0.290 8	98	89	71	34	20	10
下坡 3	粉(砂)质黏土	0.346 3	90	80	62	30	18	11

该实例表明,通过电磁波波速与含水量关系的建立,计算不同含水量条件下的电磁波波速,并应用到

喀斯特地区土壤深度的探测中,得到的 GPR 二维图像可以较准确地估算土壤深度,通过计算反映出土壤

的分布情况,GPR 的三维图像能反映出喀斯特地区土壤与岩石的分布状况。目前该方法还处于初步建立阶段,仅限于小尺度范围内利用样方法反映土壤的深度情况,由于喀斯特地区特殊的地貌,土壤空间异

质性较大,存在很多小生境,对于 GPR 深度的大范围的探测还需要进一步的研究和验证。待方法进一步完善后,可以通过样方法和样线法相结合,在较大尺度上描绘喀斯特峰丛洼地土壤的空间分布情况。



注: a_1, b_1, c_1 代表上坡 1; a_2, b_2, c_2 代表中坡 3; a_3, b_3, c_3 代表下坡 1; 分图 c_1, c_2, c_3 中 X, Y, Z 轴分别表示样方长、宽、深(m)

图 2 测线二维图(a)、实地探测和开挖验证土壤深度对比图(b)、样方三维图(c)

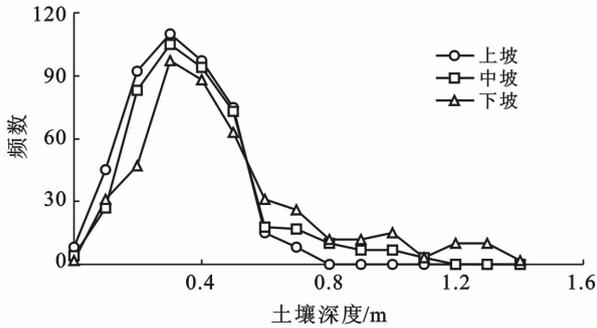


图 3 上、中、下坡位土壤深度频数分布

3 结论

(1) 喀斯特地区 3 种典型质地土壤中 GPR 电磁波波速随含水量的增加呈逐渐下降趋势,电磁波波速与土壤含水量呈三次多项式关系。

(2) 利用 GPR 探测对电磁波波速与土壤含水量的关系式进行实地探测,发现 GPR 探测的喀斯特土壤分布与实地开挖的结果相符,二维图像反映了测线下不同位置土壤的深度,三维图像则反映出样方内土壤的深度分布情况,探测的样方内土壤主要分在 0—50 cm 范围内。表明利用探地雷达技术探测喀斯特地区土壤深度和分布是切实可行的。

[参 考 文 献]

[1] Sweeting M M. The Karsts of North China[M]//Karst in China. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995:151-180.

[2] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. Land Degradation & Development, 2004,15(2):115-121.

[3] 李豪,张信宝,王克林,等. 桂西北倒石堆型岩溶坡地土壤的¹³⁷Cs 分布特点[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 42-47.

[4] Chen Xiangbi, Zheng Hua, Zhang Wei, 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.

[5] 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.

[6] Allred B J, Daniels J J, Ehsani M R. Handbook of Agricultural Geophysics[M]. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2008.

[7] 余中明,丁强. 地质雷达探测工程的几个问题[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(B10): 182-184.

[8] Al-fares W, Bakalowicz M, Guérin R, et al. Analysis of the karst aquifer structure of the Lamalou area(Hérault, France) with ground penetrating radar[J]. Journal of Applied Geophysics, 2002, 51(2): 97-106.

[9] 张开伟. GPR 技术在隐伏岩溶探测中的异常识别及应用[J]. 工程勘察, 2010(S1): 619-627.

[10] Podvin P, Lecomte L. Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: A massively parallel approach and its associated tools[J]. Geophysics, 1991, 105(1): 271-284.

[11] Tillard S, Dubois J C. Analysis of GPR data: Wave propagation velocity determination[J]. Journal of Applied Geophysics, 1995, 33(1): 77-91.

[12] Greaves R J, Lesmes D P, Lee J M, et al. Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground-penetrating radar [J]. Geophysics, 1996, 61(3): 683-693.

[13] 袁明德. 探地雷达检测中如何计算波速[J]. 物探与化探, 2003, 27(3): 220-222.

[14] 吴信民,曹俊昌,杨亚新,等. 黏土中电磁波波速与含水量关系研究及应用[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(5): 120-122.

[15] 刘恒柏,朱安宁,张佳宝,等. 不同水分条件下粗砂土剖面中目标物的 GPR 图像特征及其解译[J]. 土壤, 2009, 41(1): 112-117.

[16] 吉丽青,朱安宁,张佳宝,等. 低频探地雷达地波法测定土壤含水量的可行性研究[J]. 土壤, 2011, 43(1): 123-129.

[17] Grote K, Hubbard S, Rubin Y. Field-scale estimation of volumetric water content using ground-penetrating radar ground wave techniques [J]. Water Resources Research, 2003, 39(11): 1-13.

[18] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582.

[19] Huisman J A, Hubbard S S, Redman J D, et al. Measuring soil water content with ground penetrating radar[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(4): 476-491.

[20] 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, 1992, 22(2): 156-166.