

探地雷达在探测玉树走滑断裂带活动性中的初步应用

张迪^{1,3}, 李家存^{1,3}, 吴中海², 钟若飞^{1,3}, 田婷婷^{2,4}, 张铎^{1,3}, 刘晓东⁵
ZHANG Di^{1,3}, LI Jiacun^{1,3}, WU Zhonghai², ZHONG Ruofei^{1,3}, TIAN Tingting^{2,4},
ZHANG Duo^{1,3}, LIU Xiaodong⁵

1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;
2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 首都师范大学三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048;
4. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;
5. 长春市天测科技有限公司, 吉林 长春 100026

1. *College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;*
2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China;*
4. *College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*
5. *Changchun Tiance Technology Co. Ltd., Changchun 100026, Jilin, China*

摘要:探地雷达具有快速、检测范围广、探测深度深、分辨率高及对地表环境无破坏等特点,在活动断层探测应用中具有很大的优势。在简要介绍玉树走滑断裂带活动性的基础上,选择高分辨率的探地雷达对隆宝、昔日达和盘琼沟处断裂带附近的断层进行探测。采用时间域有限差分法建立活动断层的数值模型对其雷达波响应特征进行模拟,分析断层在探地雷达剖面上的反射波特征。根据断层的反射波特征解译探地雷达图像,判断断层的位置、走向及空间展布。结合探槽开挖对比,探地雷达图像的解译结果与探槽开挖后的断裂带剖面展示的断层活动性质基本一致。根据隆宝、昔日达和盘琼沟处的探地雷达图像与探槽剖面上断层反射波特征的对比研究,解译了玉树地震震中位置探地雷达剖面上的断层展布。研究表明,探地雷达是一种快速探测活动断层的有效方法,尤其是在地表破裂不明显的区域,不仅可以准确地判断断层的位置、走向及空间展布,还可以将断裂带附近地下岩层的层位信息及探槽断面之外的地表下图像清晰地呈现出来,为以后运用探地雷达探测活动断层提供参考。

关键词:探地雷达;时间域有限差分法;活动断层;探槽

中图分类号:P542+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2015)01-0204-13

Zhang D, Li J C, Wu Z H, Zhong R F, Tian T T, Zhang D, Liu X D. A preliminary application of ground penetrating radar to the detection of active faults along Yushu strike-slip faulted zone. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1):204-216

Abstract: GPR (Ground Penetrating Radar) has such characteristics as rapidness, wide range, great detection depth and high resolution, with no damage to the surface environment, so it seems to be quite effective in the study of active faults. Based on depicting ac-

收稿日期:2013-11-07;修订日期:2014-01-21

资助项目:中国地质调查局项目(编号:1212011120163、12120114002101)、国家科技支撑计划课题(编号:2012BAH34B01)、国家自然科学基金项目(批准号:41371434)、测绘地理信息公益性行业科研专项项目(编号:201412020)和国家863项目(编号:2012AA12A308)

作者简介:张迪(1987-),男,在读博士生,从事三维数据获取与应用。E-mail: chandlerdi1987@gmail.com

通讯作者:李家存(1976-),男,博士,副教授,从事遥感技术应用与研究。E-mail: lijiaacun@163.com

tive faults along Yushu strike-slip faulted zone, the authors employed high-resolution GPR to delineate active faults in Yushu faulted zone distributed in Longbao, Xirida and Panqiongou. The characteristic responses of electromagnetic waves were simulated on the basis of the numerical model by Finite-difference time-domain method (FDTD), and then the reflected characteristics of active faults on the GPR profiles was summarized. In this way, the GPR images are interpreted and the location, the orientation and the spatial distribution of the active fault can be accurately determined. Combined with exploratory trench cutting, GPR profile is extremely consistent with the trench section. Finally, according to the comparative study of the characteristic responses of electromagnetic waves between the GPR profiles and the trench sections, the GPR images of the earthquake epicenter are interpreted. Preliminary studies show that GPR seem to be an effective and fast technique in detecting active faults, especially in the area without clear evidence of surface rupture. It not only accurately determines the location, the orientation and the spatial distribution of the active fault but also describes the layer in the subsurface and the section outside the trench, thus providing a reference for the detection of active faults by GPR.

Key words: GPR; FDTD; active faults; trench

探地雷达 (Ground Penetrating Radar, 简称 GPR), 又称地质雷达, 是一种利用宽频带高频电磁 (10MHz~3GHz) 反射探测浅表层地面下地质构造和目标物的新型地球物理探测方法。探地雷达工作时, 发射天线发射的电磁波在传播过程中遇到电性差异较大的目标体或介质界面时会发生反射和透射^[1], 反射的电磁波被接收天线接收, 中心控制单元记录下时间剖面并在屏幕上显示出来。另一部分能量则透过界面继续向下传播, 在遇到更深处目标体或界面处发生反射。根据时间剖面上反射波的时频特征和振幅特征来推断地下介质空间的位置、结构及几何形态, 从而实现对地下目标体或介质界面的有效探测^[2-3]。探地雷达发射的电磁波与地震勘探中的地震波传播运动学特征十分相似, 地震勘探中的许多理论可以直接应用于探地雷达的探测。

与钻探、探槽等传统勘探方法相比, 探地雷达具有操作简便、检测频度大和范围广的优势。与传统物探方法相比, 具有比地震勘探法分辨率高, 比电阻率法探测深度大, 且对地表环境无破坏和作业环境不受地形条件限制的特点, 近年来被广泛地应用于活动断层的探测中。国内外学者对应用探地雷达探测活动断层开展过不同程度的研究, 主要体现在以下 3 个方面: ①在断层出露不明显或者被湮没的地区, 探地雷达作为一种重要的物探辅助技术应用于探槽位置的确定^[4-7]; ②应用探地雷达判断城市活动断裂带走向及其准确的空间位置, 对评估活动断层的地震危险性和危害程度具有重要的意义^[8-13]; ③应用探地雷达探测活动断裂带附近的断层, 可以将断层上部的形态特征和断裂带附近的构造环境在探地雷达图像上显示出来^[14-18]。本文在前人研究的基础上, 通过时间域有限差分法系统总

结断层在探地雷达图像上的反射波特征, 并将探地雷达初步应用于玉树走滑断裂带活动断层的探测。将最新的地球物探技术与传统的地质调查技术相结合, 以探槽剖面为参考, 检验探地雷达探测玉树断裂带断层最新活动性的可行性和有效性。

1 研究区背景

甘孜—玉树断裂带是在前第四纪基岩断裂带基础上发展起来的一条强烈活动的典型左旋走滑断裂, 同时是川滇菱形块体重要的边界断裂和鲜水河断裂系西部重要的组成部分, 形成于早华力西期, 印支期发生过强烈的活动, 第四纪以来活动比较明显^[19-22]。该活动断裂带东南起四川甘孜, 向西经青海玉树, 向 NW 方向延伸, 全长逾 500km, 整体呈 NWW-NW 走向, 断层面呈波状陡立, 以 NE 向为主, 倾角近直立, 70~85°, 如图 1 所示。该断裂带规模宏大, 基岩破碎带一般宽 10m 至数百米^[23-24]。

研究区玉树断裂带位于甘孜—玉树断裂带中段, 总体走向 120~130°, 西起陇蒙达, 沿 SE 方向延伸至玉树以南的巴塘盆地, 全长约 150km。历史地震活动显示, 玉树断裂带是显著的区域强震活动带, 沿该断裂带玉树地区附近曾发生过 3 次 Ms6.5 及以上的地震, 分别为 1738 年 12 月 23 日青海玉树附近及西北的 Ms6.5 地震 (关于此次地震的位置和强度, 目前学界还存在争议), 1896 年 3 月 14 日四川石渠县境内的 Ms7.0 地震和 2010 年 4 月 14 日玉树 Ms7.1 地震^[25]。根据雁阵展布特征, 玉树断裂带自西向东大致可分为 3 段: 陇蒙达—结隆段、结隆—结古段和结古—查那扣段。陇蒙达—结隆段全长约 40km, 走向 120~125°, 断裂带整体较平直, 主要表现为左旋走滑运动性质。沿该段断裂带的要钦陇沟谷中可见小型拉分盆地, 其东

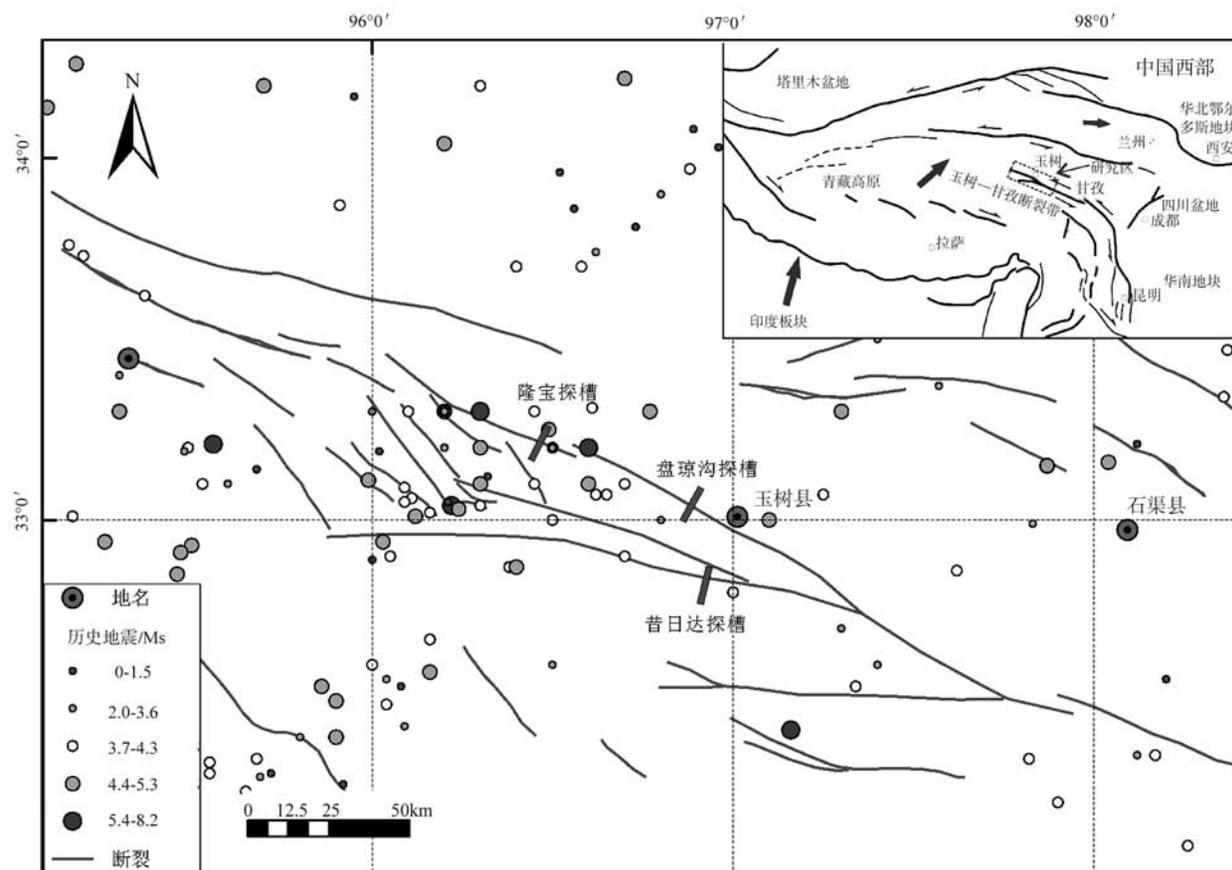


图1 甘孜—玉树断裂带分布

Fig. 1 The distribution of the Garze-Yushu faulted zone

侧有长轴NW向的挤压脊地貌,在昌德下拉附近,可见北侧山体发生左旋错动。结隆—结古段走向 120° ,延伸约40km,呈直线状展布。东南段上显示出明显正断层性质的地貌,沿断裂带可见断层三角面,2010年玉树地震形成的地表破裂主要在该段展布。结古—查那扣段,断裂总体走向 $130^\circ\sim 135^\circ$,延伸约30km,沿此段断裂在巴塘河东岸桑卡村处,可见切穿巴塘河流阶地陡坎的基岩古断层出露,断层产状 $50^\circ\angle 89^\circ$,显示出明显的逆断层运动成分。玉树断裂带整体表现为左旋走滑运动性质,但各次级断裂显示出有所差异的运动学特征。断裂带西北段上显示出较强的拉张效应,而东南段上则表现出拉张效应相对减弱,挤压效应明显增强的特点^[26-29]。

2 数值模拟

探地雷达发射的电磁波具有高频特征,波长较短,向下传播的过程中由于介质吸收和散射导致能

量衰减较大,加之易受地面干扰,使图像解译比较困难。前人研究时多选择时间域有限差分法,采用二阶精度的中心差分近似把Maxwell旋度方程直接转换为差分方程组,从而实现在一定体积内和一段时间上对连续电磁场的的数据取样压缩^[30],最终实现探地雷达在时间域的模拟探测。这对认识实际探地雷达的时间剖面,提高探测的效果和判读的准确性具有重要的意义。首先根据已知断层的形状特征建立其数值模型,然后采用时间域有限差分法对断层雷达波响应特征进行数值模拟。通过模拟后的时间剖面,分析出断层在探地雷达图像上的雷达波响应特征。断层的数值模型如图2-a所示,3个多边形A、B、C分别代表地下不同的介质层。为了减少雷达波绕射现象,3个介质层模型大致呈水平规则形状分布。模型上共有2处断层,分别位于水平距离6m和14m处。数值模型的参数设置如表1,由于磁导率一般对电磁波传播的影响较小,因此往往

忽略不计,其值设定为 1,介质的电阻率设定为 $3000\Omega\cdot\text{m}$ 。

图 2-b、c 为中心频率为 250MHz 和 500MHz 的天线数值模拟断层的雷达剖面。从两幅雷达剖面上可以得到,不同介质层之间由于介电常数差异,在雷达图像上分界面处呈现明显的水平连续反射信号,当遇到断层时,连续层位反射信号的同相轴会发生中断或错断。当天线经过断层时,断层破碎带中的介质因结构和组分的变化,使破碎带内的介质与周围介质的相对介电常数存在一定的差异,交界处会发生双曲线绕射现象^[28]。除此之外,由于数值模型的边界效应,在天线开始和结束的位置产生电磁波绕射现象,如图 2-b、c 中的箭头。探地雷达图像上,A、B 层分界面处雷达波反射强度远大于 B、C 层分界面处的反射强度。这是因为电磁波在传播的过程中,能量会发生散射和衰减,反射波的强度随探测深度的增加而减小。通过不同频率天线模拟的雷达剖面比较,高频率为 500MHz 的天线比 250MHz 的天线具有更高的分辨率,可以将地面下的层位信息更精确地反映出来。与图 2-b 相比,图 2-c 上雷达波的层位反射和断层的双曲线反射现象更清晰、更容易识别。

通过不同频率天线对断层的数值模拟,其雷达波特征可以总结如下:断层两侧有双曲线绕射现象,其强度较弱;连续层位反射波的同相轴会发生中断或错断;断层处雷达反射波跟附近介质反射波特征差异较大。以上特征可直接用于雷达图像的解译,作为判定断层存在的理论依据。

3 数据获取与处理

探地雷达系统主要由中心控制单元、发射天线、接收天线和测距单元组成。本研究选用瑞典 MALA 公司研制的 RAMAC 型探地雷达系统,采用发射天线与接收天线等距离一体化的方式采集数据,如图 3-a 所示。中心频率较高的探地雷达天线分辨率高,但探测深度浅,中心频率较低的探地雷达天线探测深度深,但分辨率较低。野外地质调查中探槽开挖的深度一般为 2~4m,综合考虑探测深度和分辨率之间的关系,选择中心频率为 500MHz 的屏蔽天线探测活动断层。为了增加断层异常识别的可靠性,避免采集过程中漏掉横向尺度较小的断层^[29],采集数据的道间距设为 0.02m。数据采集的时间窗口设定为 80ns,每道数据采样点数为 534,采样频率设为 6615MHz。为了

提高探地雷达图像的信噪比,采集后的每道数据在垂直方向进行 8 次叠加,探地雷达数据采集参数见表 2。探地雷达将地面下的图像以二维时间剖面的方式显示出来,横坐标轴表示天线在地面上行进的距离,纵坐标轴表示电磁波到达目标物并反射回来的时间差,如果电磁波的传播速度已知,那么经过时深变换处理可以计算出目标物或岩层的深度。

探地雷达采用测距轮触发的方式沿测线进行数据采集,雷达工作时,经过标定的距离测距轮在雷达天线行进的过程中精确记录下水平方向的距离并触发中心控制单元采集数据,如图 3-a 所示。由于沿测线方向地形起伏变化,需进行地形校正以实现探地雷达图像与实际地形起伏变化相一致。地形数据可通过全站仪^[33]、GPS(Global Positioning-

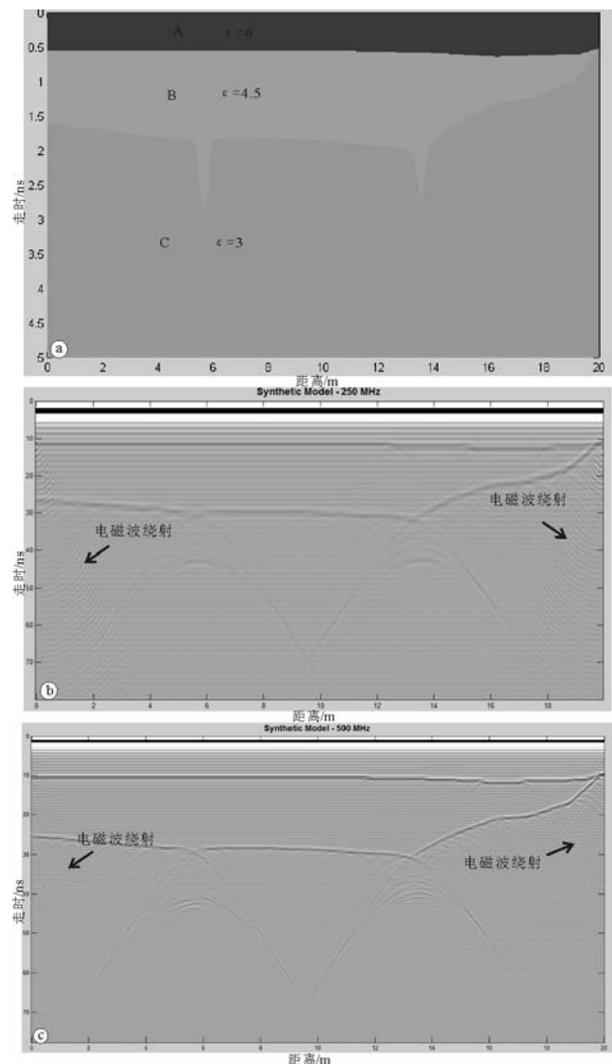


图 2 断层数值模型及模拟结果

Fig. 2 Numerical model and modeling result of the faults

表1 断层正演模拟参数设置

Table 1 The parameters of fault forward model

天线中心频率	250MHz	500MHz
水平距离/m	20	20
深度/m	5	5
相对介电常数/ ϵ	A=7.0	A=7.0
	B=5.0	B=5.0
	C=3.5	C=3.5
电阻率/ $\Omega \cdot m$	3000	3000
磁导率/ μ	1	1

System)^[34]、倾角仪^[35]和激光测距仪^[36]获取。基于野外地形数据获取工作量和成本的考虑,采用倾角仪沿着测线方向每20cm距离采集地形数据,如图3-b,以应用于后期探地雷达图像的地形校正处理。

数据处理选用Reflex W商用软件,处理图像过程如图4所示。(a)为原始数据;(b)为解振荡滤波:消除信号中的直流成分或直流偏移以及随后产生的延迟振荡,或者是低频信号拖尾;(c)为去地面波处理:雷达图像时深转换之前,需将电磁波到达地面的双程时间差去除,以提高目标体或地下介质的定位精度;(d)为自动增益:电磁波在传播过程中由于信号衰减和几何传播衰减的影响,后时信号的幅度通常较小。为增强后时信号的可视效果,需要做时间自动增益处理;(e)为背景滤波:去除背景噪声和水平信号,对去除天线的振铃信号尤其有效;(f)为带通滤波:择巴特沃斯带通滤波器(Butterworth Band pass Filter),低通截止频率和高通截止频率分别选择130MHz和750MHz对雷达图像进行滤

表2 探地雷达数据采集参数

Table 2 Acquisition parameters of GPR survey

天线频率(Antenna frequency)	500MHz
道间距(Trace interval)	0.02m
采样点数(Samples)	534
采样频率(Samples frequency)	6615MHz
叠加次数(Stacks)	8
时间窗口(Time windows)	80ns

波处理,以去除环境或者系统噪声;(g)为图像平滑:主要是压制信号的散射,去除图像上的噪声点;(h)为地形校正:选择探地雷达测线上最高点或最低点所在平面为基准参考面,根据时间移位原理计算各道数据到基准参考面的时间差,从而实现探地雷达图像的地形校正。

4 图像解译

选择玉树断裂带上隆宝、昔日达和盘琼沟采集断层剖面,根据数值模拟出断层的雷达波特征对探地雷达剖面进行初步解译分析,并结合实地探槽剖面,对2010年玉树地震震中位置的雷达剖面进行解译,验证探地雷达探测玉树断裂带断层最新活动性的可行性。

4.1 隆宝

图5-a为数据处理后的玉树断裂隆宝处探地雷达图(图1)。方向为自南向北,长23m,深2~3m。从图5-a可以初步确定出雷达波异常区和明显的层位反射。雷达波异常区主要分布在水平距离15~16m、18~20m、22~23m处,分别用A、B和C表示。A处雷达波杂乱无序,呈多次震荡且无向深部延伸的



图3 探地雷达数据和地形数据采集

Fig. 3 Acquisition of GPR and topographic data

趋势,推断此处地质构造比较复杂。B处水平反射波信号强烈,层位特征明显且中间层位夹杂有无规则的不连续现象,结合周围的地质环境,推断此处可能为多层沉积物分布。C处雷达波呈高频多次波,形状为不完全或部分双曲线,异常区发育于近地表面且一直延伸到深部,雷达波反射强度与周围介质明显不同,此处可能为断层破碎带。

探地雷达图像自上而下存在3段比较明显的水平层位反射,如图5-b红色、蓝色和绿色层位所示,将断面自上而下分为4层。红色层位以上一般为地表面覆盖层,厚度为十几厘米到几十厘米。蓝色层位在水平距离0~10m时层位反射明显,0~6m呈水平走向,7m时开始向下倾斜。11~14m由于上层地质构造比较复杂,导致层位反射不明显。14~23m层位随地形

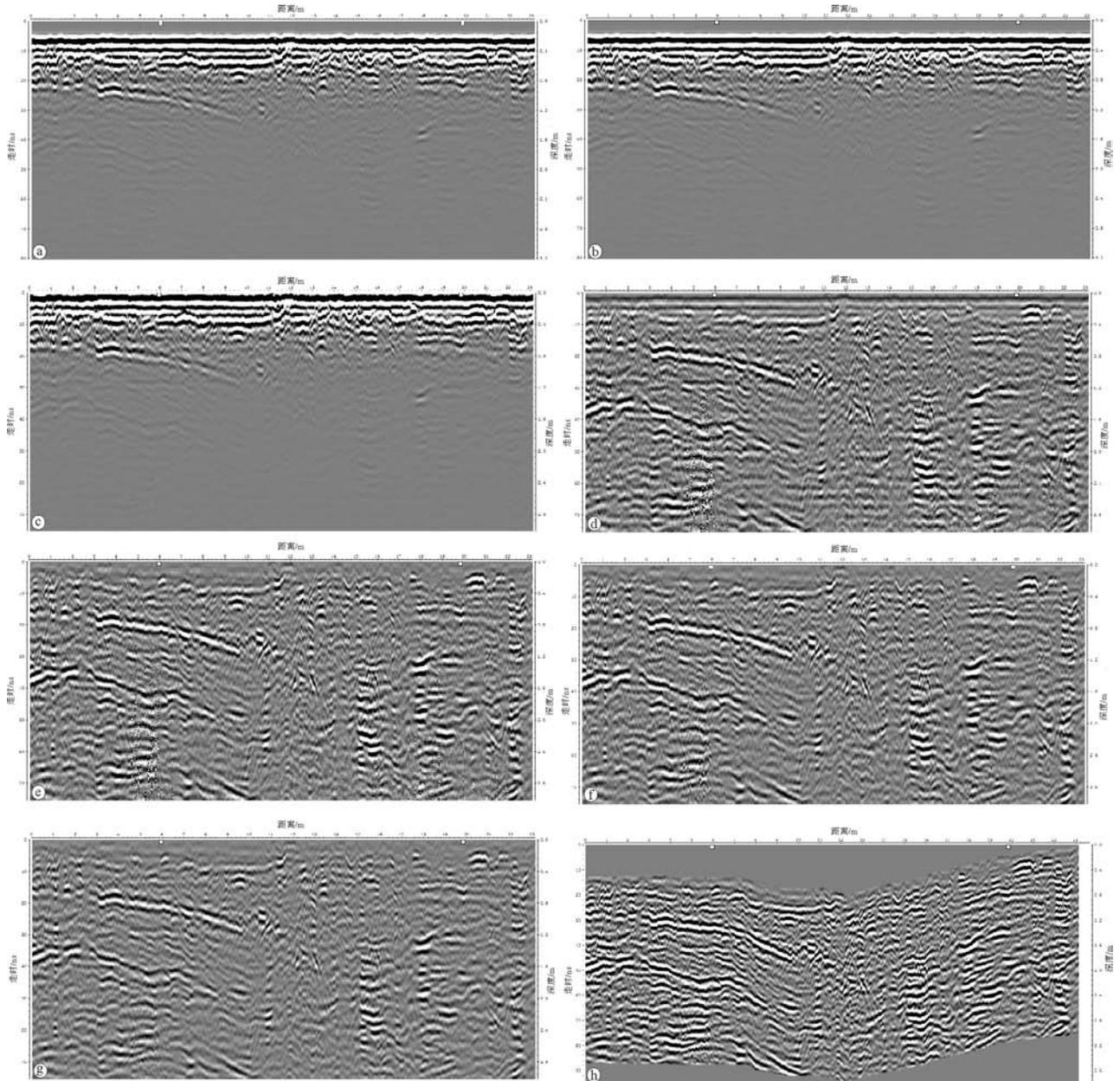


图4 探地雷达图像处理

Fig. 4 Processing steps of a GPR profile

- a—原始数据;b—解振荡滤波;c—去地面波处理;d—自动增益;
- e—背景滤波;f—带通滤波;g—图像平滑;h—地形校正

变化而缓慢上升。绿色层位在0~10m和15~23m与蓝色层位走向基本一致,但在水平距离10m和15m处存在明显的错断。另外,蓝色层位和绿色层位中间存在明显的层位反射,如图5-b中黄色层位。

根据断层在探地雷达图像上的反射波特征,隆宝处的探地雷达剖面自北向南存在7处断层,分别用 F_1 ~ F_7 表示,其分布和走向如图5-b所示。 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_6 具有共同的特点,连续的层位经过断层时,发生中断,且在断层两端有双曲线散射。 F_4 和 F_5 发生连续的层位错断,层位移动距离比较明显。 F_7 所在区域可能为断层破碎带。

图5-c为探槽剖面,全长17m,对应探地雷达剖面上4~21m的位置,深2~3m。自上而下分为5层:层1为表土层,厚10~30cm,期间主要有草根发育;层2为灰黑色含炭砂土层,厚20~40cm,呈楔状填充于断层楔中;层3为灰白色的砾石层,中部夹有薄细砂层;层4为灰白色的砾石层,厚50~60cm,中部钙质沉积较多,中上部有砂质透镜体;层5为灰黄色砾石层夹砂层透镜体,此层在探槽中间断陷,两端抬升,北侧为正断层,南侧为逆断层。在图5-c中,A处位于2条逆断层 F_5 和 F_6 之间,砾石粗细相间,在探地雷达图像上表现为雷达波杂乱无序,呈现多次震荡。B处为砾石层分布,顶部为不连续砂层,底部砾石相对较粗,雷达波层位特征比较明显。由于探槽开挖长度限制,C处异常区无法验证。探槽剖面自北向南共分布4处断层,对应探地雷达剖面上的断层 F_3 ~ F_6 ,其中断层 F_3 为2010年玉树地震形成的; F_5 处为断层填充楔,此现象揭示本段发生过古地震事件。

与探槽剖面对比,探地雷达可以将玉树断裂带隆宝处断层的位置、走向和空间展布及地下岩层分布在时间剖面上反映出来。

4.2 昔日达

昔日达位于玉树巴塘乡昔日达村北部,距玉树机场北东方向约2km处(图1),探地雷达数据采集方向自南向北。处理后的探地雷达剖面如图6-a,由于高程变化达2.5m,地形校正后图像发生了一定的形变。从图6-a可以确定3处雷达波异常区域,分布在水平距离7~8m、11~15m和21m处,分别用A、B和C表示。A处电磁波呈高频多次波特征,形状比较规则,为不完全或部分双曲线,另外连续层位同相轴发生中断,推断可能存在断层分布;B处异常区较大,从上部到下部异常区宽度逐渐减小;雷

达波杂乱无序,反射波强度大,且在异常区交界处有电磁波绕射,如红色箭头所示,推断B区可能为主断裂带分布区;C处电磁波杂乱,反射强度与周围介质反差明显,且呈低频特征。结合实地采集环境,C处旁边为一溪水,此区域含水量较大,使电磁波主要表现为低频特征。根据电磁波的相位特征和振幅的变化,自上而下可将昔日达处探地雷达剖面分为6层,解译后的图像如图6-b所示。

图6-c为探槽剖面,长14m,宽3m,深1~2m。通过与探槽剖面对比,探地雷达图像可以将昔日达段玉树断裂附近地下岩层层位的分布在图像上显示出来,特别是主断裂带的位置分布及走向。但对于主断裂带中分布的3处断层,由于主断裂带中填充物比较复杂,使电磁波连续层位反射信号不明显,在雷达图像上无法判定主断裂带中断层的分布及走向。水平距离7~8m处由于地势较高,探槽的开挖深度有限,无法对A处断层进行验证。

4.3 盘琼沟

盘琼沟处探槽位于玉树县西部山前地带,依山麓坡积台地的坡壁形态修整而成,走向自南向北(图1)。探地雷达剖面是沿探槽壁获取的,数据处理后的探地雷达剖面如图7-a所示,水平距离7m和10.5m处有明显的双曲线反射,如黄色箭头所示。根据周围地质环境,此2处为明显的地表破裂,如图7-b、c所示,其中7m处地表破裂较10.5m处宽度大,在雷达剖面上双曲线反射较明显。从图7-a可以确定4个雷达波异常区,分别用A、B、C和D表示。A处存在明显的地表破裂,中部连续层位反射中断,如红色箭头所示,下部雷达波反射较强,推断A区域存在断层分布;B处有明显连续的反射层位,当延伸到水平距离9m处时呈双曲线状,反射波强烈。推断连续层位反射可能为介质层交界面,9m处双曲线异常可能为地面下异常体;C处位于连续的层位反射下面,呈高频多次波特征,反射强度较强且部分呈双曲线状,周围存在电磁波绕射现象,推断C处为断层分布区或地质构造较特殊的区域。水平距离9~10m自上而下存在明显层位中断,初步断定此处可能存在断层。10~11m处存在地表破裂,连续的层位信号在此处发生中断,如红色箭头所示,推断此处存在断层分布。地表层反射信号在11~12m处发生中断,深部雷达波信号呈高频多次波状且向深部发育,此处可能存在断层。通过以上分析,探地雷达剖面自上

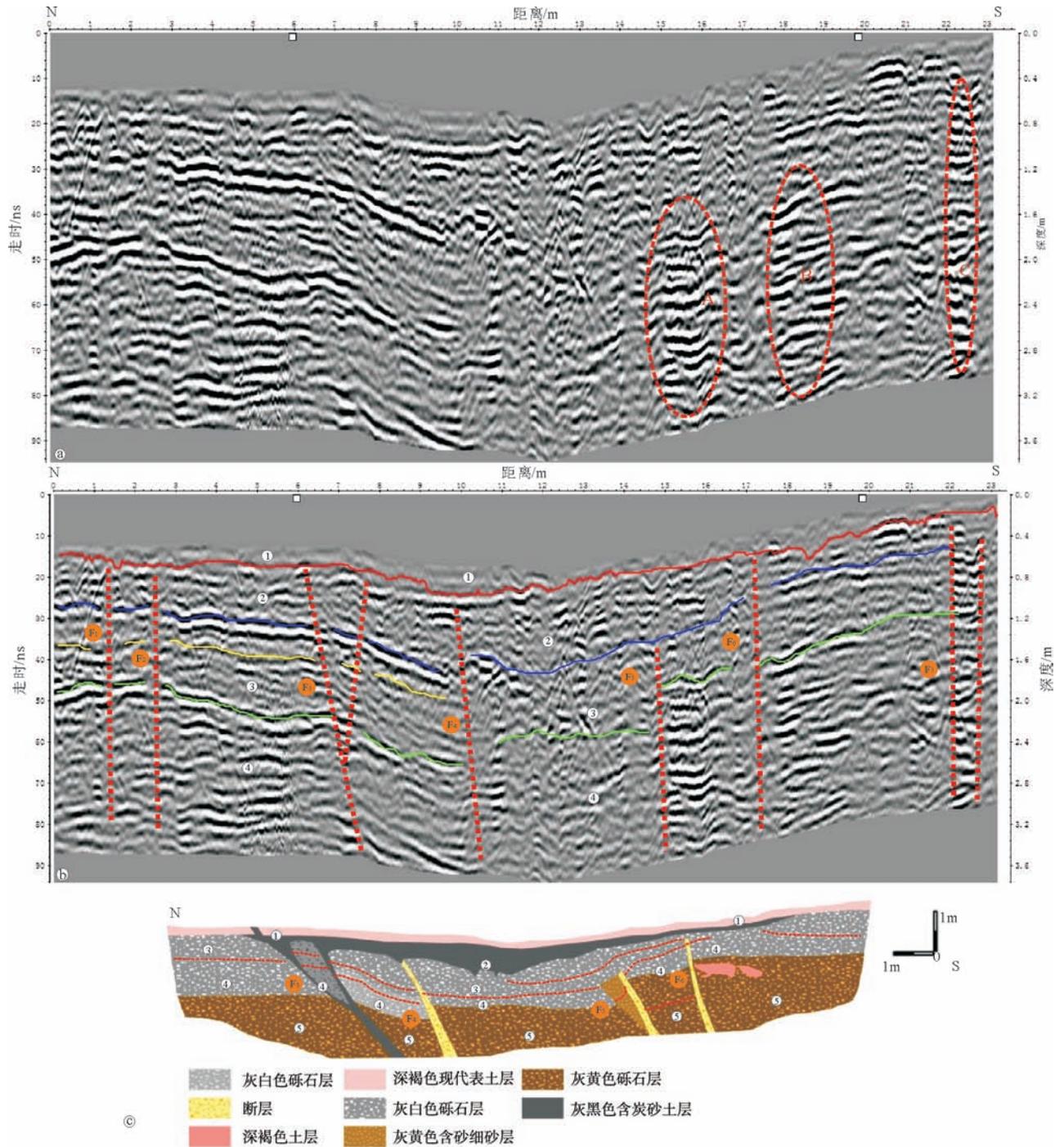


图 5 雷达剖面与探槽对比(隆宝段)

Fig. 5 Comparison of the GPR profile with the trench

a—雷达剖面;b—解译后雷达剖面;c—探槽图

而下大致可分为6层,存在4处断层(F₁~F₄),解译后的探地雷达剖面如图7-d所示。

图7-h为探槽剖面,长10m,深2m。A处为2010年玉树地震形成的填充楔,填充物为灰色、灰

黑色土体;B处水平距离9m处存在断层,中间夹有砾石,在探地雷达图像上表现为双曲线异常。由于断层的下半部分位于砾石下方,因此探地雷达无法探测并在时间剖面上显示出来,如图7-e所示;C处为

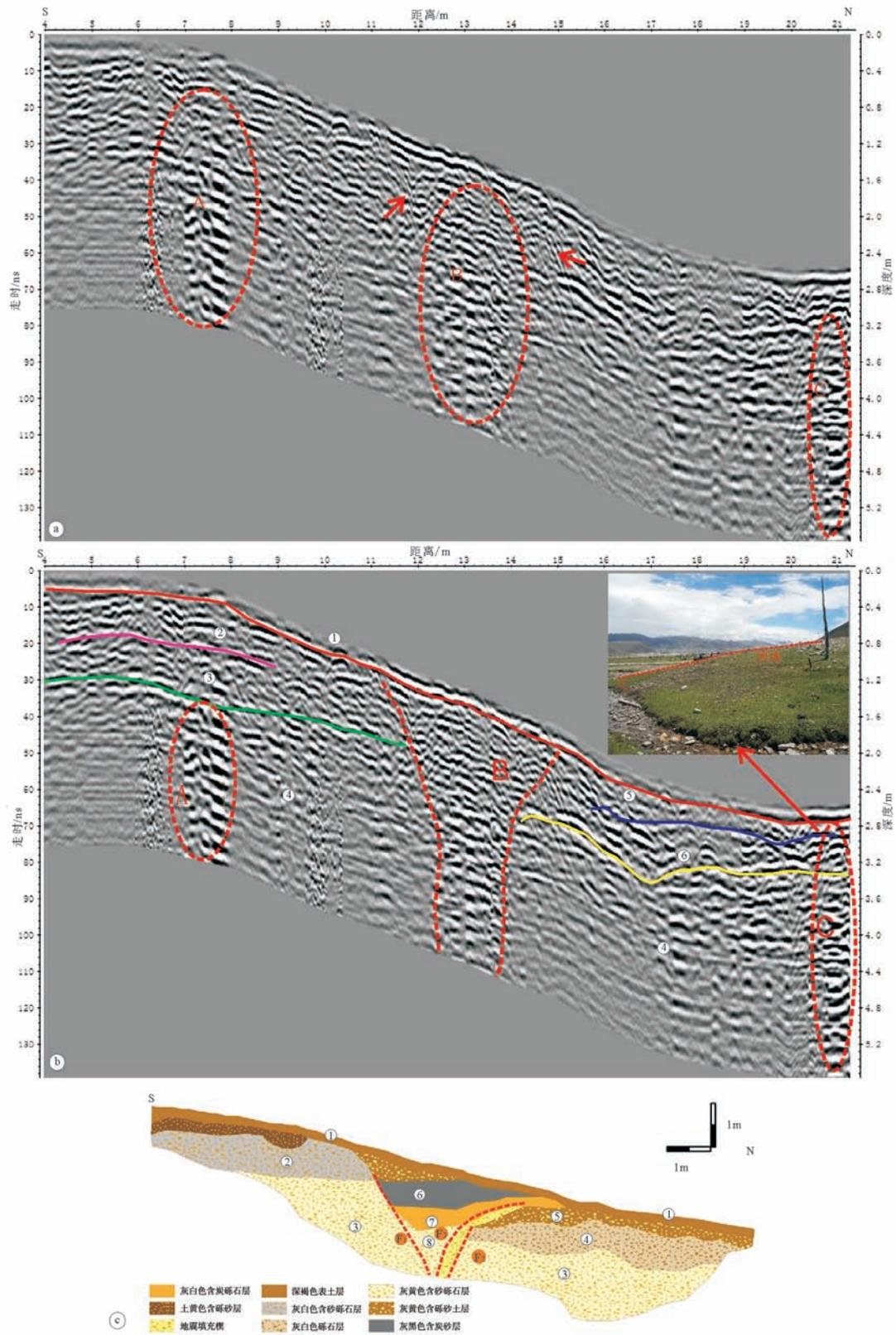


图6 雷达剖面与探槽对比(昔日达段)

Fig. 6 Comparison of the GPR profile with the trench

a—雷达剖面;b—解译后雷达剖面;c—探槽图

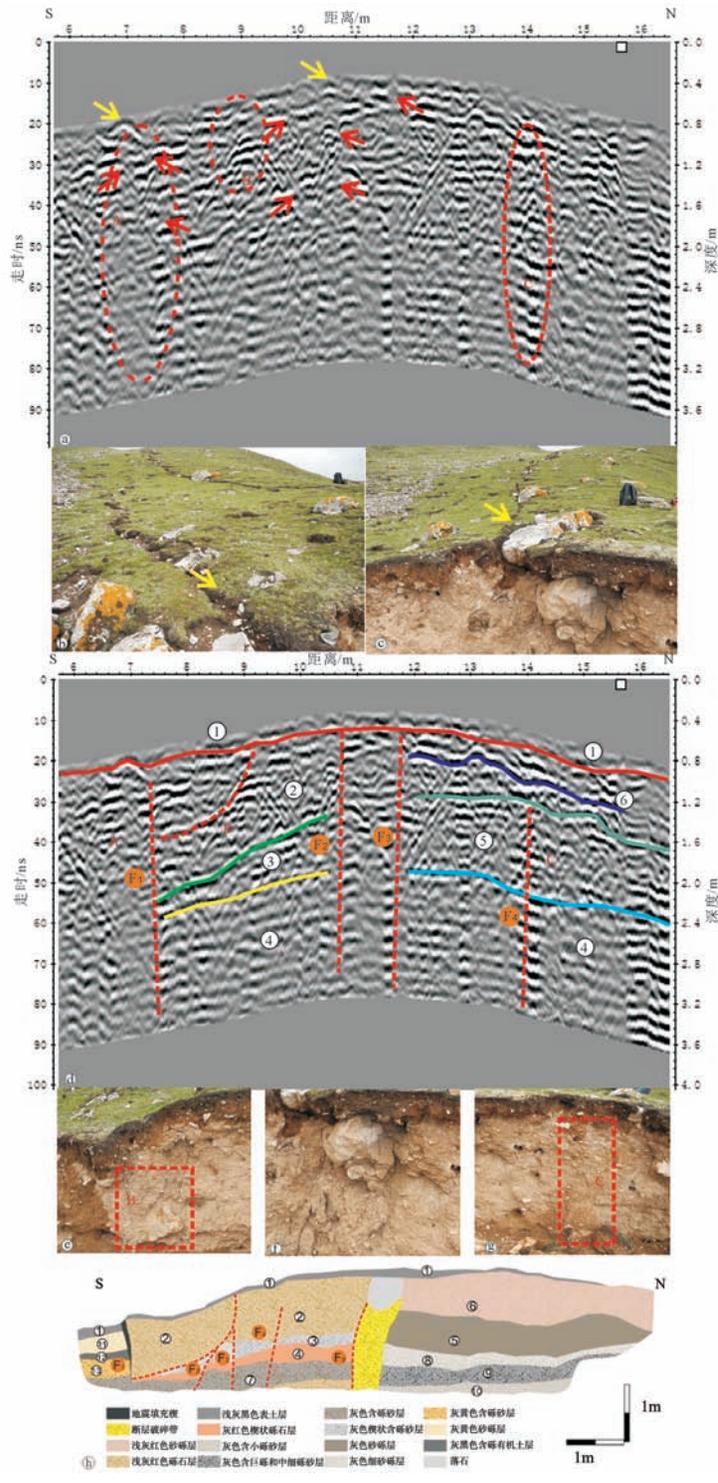


图 7 雷达剖面与探槽开挖对比(盘琼沟段)

Fig. 7 Comparison of the GPR profile with the trench
 a—雷达剖面; b、c—地表破裂分布; d—解译后雷达剖面; e—g—剖面异常区域;
 h—探槽图; ①—浅灰黑色表土层; ②—浅灰红色砾石层; ③—灰色楔状含砾砂层;
 ④—灰红色楔状砾石层; ⑤—灰色砂砾层; ⑥—浅灰红色砂砾层; ⑦—灰色含砾
 砂层; ⑧—灰色细砂砾; ⑨—灰色含巨砾和中砾砂层; ⑩—灰色含小砾砂层;
 ⑪—灰黄色砂砾层; ⑫—灰黑色含砾有机土层; ⑬—灰黄色含砾砂层

含砂砾层带(图 7-g),砾石杂乱分布,占 40%~60%不等,砾径以 1~5cm 为主,少量 6~8cm,个别 10~20cm,使雷达波比较杂乱,当遇到砾径较大的砾石时,电磁波会发生强反射。F₂和 F₃之间为断层破碎带,当天线经过断层破碎带时,与周围介质相对介电常数差异较大,电磁波反射应该会发生明显的变化,但时间剖面上无明显反射(图 7-d)。通过探槽开挖,显示断层破碎带处存在 40~50cm 的落石(图 7-f),断层破碎带位于落石的下方,雷达波传播过程中能量发生衰减,使断层破碎带在雷达剖面上无明显特征显示。

4.4 震中雷达剖面

2010 年玉树地震宏观震中位于 N33.2°、E96.6°,震源深度 14km,盘琼沟处探槽位于震中附近,数据采集位置位于山谷凹槽之间,地形起伏较大,存在明显地表破裂现象。探地雷达测线长 48m,覆盖整个地表破裂带。地表破裂主要分布在 24~48m 之间,因此重点对此区域探地雷达数据进行解译。数据处理后雷达剖面如图 8-a 所示,水平距离 30m、31m、35m、42m 和 46m 处存在明显的双曲线反射,如黄色箭头所示。30m 和 31m 处双曲线向下开口较小,反射强度较弱,其他处双曲线向下开口较大,反射较强。结合实地数据采集,明显的双曲线反射是地表破裂在雷达剖面上的反映,如图 8-b、c 所示,其中 35m、42m 和 46m 处的地表破裂宽度较大,30m 和 31m 处地表破裂宽度较小。

雷达剖面上异常区域主要有 3 处,分别位于 A、B 和 C 处(图 8-d),其中 A 和 C 位于地表破裂附近。电磁波信号快速变低,同相轴连续均一,呈层面状高频水平信号反射和多次震荡,断定 A、B 和 C 区含水量可能比较丰富。雷达剖面自左向右可能存在 7 处断层, F₁ 和 F₂ 具有共同的雷达波特征:波形杂乱,电磁波反射较强。F₃、F₄ 和 F₆ 都位于地表破裂明显的断裂带内,深部存在高频双曲线或部分双曲线反射。F₅ 处连续的层位同相轴信号发生错断,如红色箭头

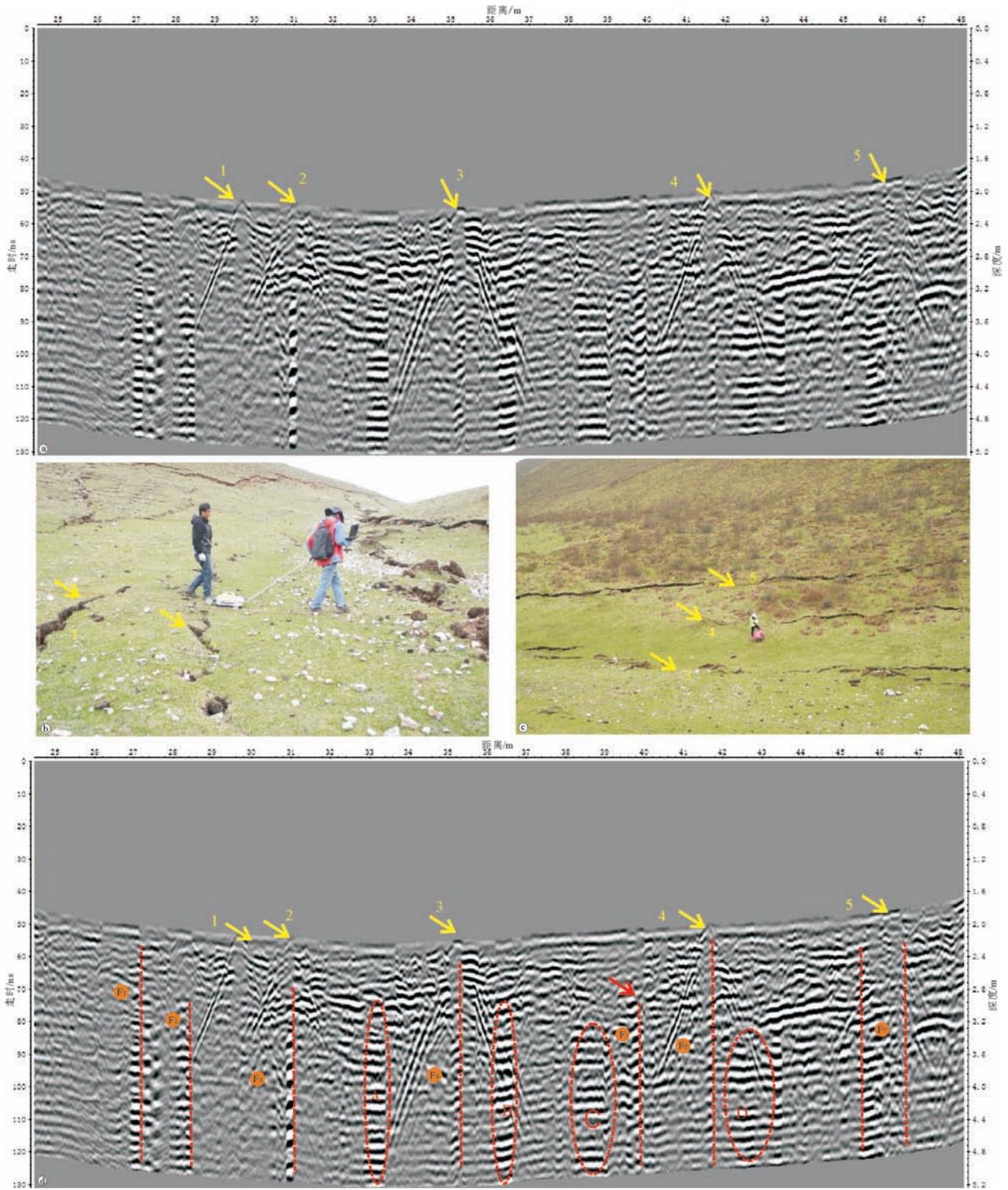


图 8 雷达剖面(震中)

Fig. 8 The GPR profile in the earthquake epicenter

a—雷达剖面;b、c—地表破裂;d—解译后雷达剖面

所示,在断层深部伴有高频双曲线或部分双曲线反射。F₇处有明显的地表破裂,连续的层位信号发生错断,断距比较明显,判断此处可能为断层破碎带。

5 讨论

通过玉树断裂3处探地雷达剖面与探槽的对比,隆宝处和昔日达处探地雷达探测效果较好。隆宝处处理后的图像无明显杂波干扰,探地雷达图像上层位反射明显,断层分布比较容易解译。昔日达处雷达剖面由于地形高程变化较大,地形校正后图像存在一定变形,导致雷达剖面上层位反射没有隆宝处明显,但基本可以反映出断层破碎带附近的地下分布。与隆宝和昔日达相比,盘琼沟处雷达剖面是在雨后获取的,由于表土层潮湿等影响,信号衰减比较严重,导致层位信号反射不明显,探测效果较差;加上探槽中存在巨型落石,也一定程度上影响了探地雷达对断层的探测效果。由于无法精确计算电磁波在介质中的传播速度,探地雷达图像都没有经过偏移处理,使探地雷达图像上断层的走向与实际探槽剖面揭示的断层走向有一定的偏差。

电磁波经过电性差异较大的地下介质层时,其振幅会在两介质层界面处发生变化。从相位和振幅的变化规律可以判断出上、下层介质的介电常数的大小关系。如图5-b所示,红色层位的雷达波相位正好与黄色、绿色层位的雷达波相位相反。从反射系数的正负可以确定出不同介质层中雷达波传播速度的关系 $V_1 < V_2$ 和 $V_2 > V_3 > V_4$, 那么不同介质层中相对介电常数的大小为 $\epsilon_1 > \epsilon_2$ 和 $\epsilon_2 < \epsilon_3 < \epsilon_4$ 。这与探槽揭示的结果相一致,层1为表土层,其含水量一般较大,导致介电常数较大。层2为含炭砂土层,其介质导电性较好,相对介电常数较小。层3与层4为砾石层,相对介电常数大于含炭砂土层。

玉树断裂带探地雷达剖面的探测效果表明,采用天线中心频率为500MHz的探地雷达基本可以实现浅表层的层位分布及几何形状的有效探测,但当地下岩层比较复杂时,如盘琼沟处存在落石的地质环境,无法实现对地下岩层和断层的有效探测。实际探测活动断层时,可以选择低频率(如100MHz)和高频率(500MHz)的雷达天线组合方式进行探测,既实现了对浅表层断层及层位的高分辨率探测,又实现了对复杂地质环境下深部断层的探测。

为了获取探地雷达剖面精确的位置信息,探地雷达天线可以和高精度的GPS结合。

6 结论

选择中心频率为500MHz的探地雷达对玉树断裂带隆宝处、昔日达处和盘琼沟处活动断层进行探测。探地雷达数值模拟断层的反射波特征、探地雷达图像显示结果与探槽开挖后断裂带剖面展示的断层活动性质基本一致,证明探地雷达可以实现对玉树断裂带活动断层快速、有效的探测。根据断层在雷达剖面上的反射波特征,对2010年玉树地震宏观震中位置的探地雷达剖面进行解译,取得了较好的效果。探地雷达应用于玉树断裂带活动断层的探测,不仅可以判定断裂带附近断层的位置、走向及空间展布,还可以将断裂带附近地下岩层层位分布和地质构造在探地雷达图像上显示出来。本文得到如下3点结论。

(1)探地雷达作为一种重要的物探技术,可用于快速地确定探槽开挖的位置,尤其是在断层出露不明显或者被湮没的地区。但探地雷达的探测效果在很大程度上受地下介质的介电常数和含水量变化的影响。为了得到活动断层的形态分布并准确评价其活动性,探地雷达技术必须与地质调查技术或其他物探技术相结合应用于活动断层的调查研究。

(2)玉树断裂带隆宝处、昔日达处、盘琼沟处地质构造虽然不同,但断层破碎带在探地雷达图像上的雷达波异常都很明显。与探槽剖面相比,探地雷达图像上断层的走向有一定的偏差,但通过分析仍可以判断出玉树左旋走滑断裂带总体呈NWW走向展布。

(3)断层两侧有双曲线绕射现象,其强度较弱;连续层位反射波的同相轴会发生错断;断层处雷达反射波跟附近介质反射波特征差异较大。以上特征为断层在雷达剖面上的反射波特征,可以作为判定断层存在的依据。

致谢:中国地质大学地球科学与资源学院研究生蒋瑶、刘艳辉在数据采集过程及地质专业方面提供了帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]白冰,周健.探地雷达测试技术发展概况及其应用现状[J].岩石力学与工程学报,2001,20(4):527-531.

- [2]曾昭发,刘四新,冯晖,等.探地雷达原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2010:13-20.
- [3]Harry M J. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications [M]. Elsevier, 2011: 3-10.
- [4]Javed N M, Ashutosh K, Sravanthi S. Ground Penetrating Radar in Investigation along Pinjore Garden Fault: Implication toward identification of shallow subsurface deformation along active fault, NW Himalaya[J]. Research Communications, 2007, 93(10): 1422-1427.
- [5]Cristina P, Costanzo F, Alessandro F, et al. Ground Penetrating radar investigations to study active faults in the Norcia Basin (central Italy) [J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, 72: 39-45.
- [6]Salvi S, Cinti F R, Coini L, et al. Investigation of the active Celano-L'Aquila fault system, Abruzzi (central Apennines, Italy) with combined ground-penetrating radar and palaeoseismictrenching[J]. Geophys. J. Int., 2003, 155: 805-818.
- [7]Kevin B A, Janmes A S, John A H. Application of geomorphic analysis and ground-penetrating radar to characterization of paleoseismic sites in dynamic alluvial environment: an example from southern California[J]. Tectonophysics, 2003, 368: 25-32.
- [8]Lee M L, Mark A H, Ian P M. The Portland Hills Fault: uncovering a hidden fault in Portland, Oregon using high-resolution geophysical methods[J]. Tectonophysics, 2003, 368: 89-103.
- [9]Mohaned R, Daisaku K, Hiroo N, et al. Ground penetrating radar investigations across the Uemachi fault, Osaka, Japan[J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, 53: 63-75.
- [10]Lee S, Tina M N. Ground-penetrating radar investigation of active faults along the Dead Sea Transform and implication for seismic hazards within the city of Aqaba, Jordan[J]. Tectonophysics, 2003, 368: 33-50.
- [11]Jean C A, Maksim B, John B, et al. GPR investigations on active faults in urban areas: the Georisc-NZ project in Wellington, New Zealand [J]. Earth and Planetary Sciences, 2001, 333: 447-454.
- [12]Jorge A, Avila O, Victor H G. A GPR study of subsidence-creep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico [J]. Engineering Geology, 2008, 100: 69-81.
- [13]薛建,黄航,张良怀.探地雷达方法探测与评价长春市活动断层[J].物探与化探,2009,33(1):63-65.
- [14]Alastair F M, Alan G G, Anna K, et al. Shallow fault segmentation of the Alpine fault zone, New Zealand revealed from 2-D and 3-D GPR surveying[J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, 70: 343-354.
- [15]Maurizio E, Cristina P, Alessandro F, et al. "Geophysical paleoseismology" through high resolution GPR data: A case of shallow faulting imaging in Central Italy[J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 90: 27-40.
- [16]Mark D Y, David C N. Recent vertical offset and near-surface structure of the Alpine Fault in Westland, New Zealand, from ground penetrating radar profiling[J]. New Zealand Journal of Geology & Geophysics, 1998, 41: 485-492.
- [17]薛建,贾建秀,黄航,等.应用探地雷达探测活动断层[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(2):347-350.
- [18]崔国柱,李恩泽,曾昭发.活动断层与地球物理方法[J].世界地质,2003,22(2):185-190.
- [19]闻学泽,徐锡伟,郑荣章,等.甘孜-玉树断裂的平均滑动速率与近代大地震破裂[J].中国科学(D辑),2003,33(4)(增刊):200-207.
- [20]孙鑫磊,徐锡,陈立春,等.2010年玉树地震地表破裂带典型破裂样式及其构造意义[J].地球物理学报,2012,55(1):155-170.
- [21]徐锡伟,闻学泽,郑荣章,等.川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J].中国科学(D辑),2003,33(增刊):151-162.
- [22]张培震,邓起东,张国民,等.中国大陆的强震活动与活动地块[J].中国科学(D辑),2003,33(增刊):12-20.
- [23]任俊杰,谢富仁,刘冬英,等.2010年玉树地震的构造环境、历史地震活动及其复发周期估计[J].震灾防御技术,2010,5(2):228-233.
- [24]程丰,李德威, Jerry B, 等.玉树地震地表破裂特征及其破裂方式[J].大地构造与成矿学,2012,36(1):69-75.
- [25]陈正位,杨攀新,李智敏,等.玉树7.1级地震断裂特征与地震地表破裂带[J].第四纪研究,2010,30(3):628-631.
- [26]闻学泽,黄圣陆,江在雄,等.甘孜-玉树断裂带的新构造特征与地震危险性估计[J].地震地质,1985,7(3):23-32.
- [27]周荣军,闻学泽,蔡长星,等.甘孜-玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计[J].地震地质,1997,19(2):115-124.
- [28]李闽峰,邢成起,蔡长星,等.玉树断裂活动性研究[J].地震地质,1995,17(3):218-224.
- [29]周荣军,马声浩,蔡长星.甘孜-玉树断裂带的晚第四纪活动特征[J].中国地震,1996,12(4):250-260.
- [30]孙伟.地下管线探测数据处理及可视化技术研究[D].解放军信息工程大学博士学位论文,2012.
- [31]卢成明,秦臻,朱海龙,等.探地雷达检测公路结构层隐含裂缝实用方法研究[J].地球物理学报,2007,50(5):1558-1568.
- [32]郭士礼,朱培民,施兴华,等.裂缝宽度对探地雷达波场影响的对比分析[J].电波科学学报,2013,28(1):130-136.
- [33]Mercedes S, Henrique L, Alexandre N, et al. Evaluation of ancient structures by GPR (ground penetrating radar): The arch bridges of Galicia (Spain)[J]. Scientific Research and Essays, 2011, 6(8): 1879.
- [34]Urbini S, Baskaradas J A. "GPR as an effective tool for safety and-glacier characterization: experiences and future development," Proc of the XIII Int. Conf. on Ground Penetrating Radar, Lecce, Italy, 2010: 489-494.
- [35]Vitalii P, Volodymyr I, Sergiy K, et al. Topographic correction of GPR profile based on odometer and inclinometer data[C]//14th International Conference on Ground Penetrating Radar, Shanghai, China, 2012.
- [36]Davis P, Curt P. Rapid acquisition of ground penetrating radarenabled by LIDAR[J]. Digital Mapping Techniques, 2006: 183-185.