

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0733-14

# 地质雷达在活动断裂探测中的应用与进展

张迪<sup>1</sup>, 李家存<sup>2</sup>, 吴中海<sup>3</sup>, 任丽丽<sup>2</sup>

(1. 河南工程学院土木工程学院, 郑州 451191;

2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 结合国内外最新研究成果, 对地质雷达技术在活动断裂探测中的应用进行了系统分析和总结, 重点对地质雷达在城市活断层探测、古地震探测和断层识别方法的研究现状进行了阐述, 并结合合理塘活动断裂的应用实例进行评述。最后, 提出了地质雷达探测活动断裂现存的问题, 对该技术探测活动断裂的发展方向和前景进行了展望。

**关键词:** 地质雷达; 活动断裂; 城市活断层; 古地震; 图像解译

**中图分类号:** P546; P627

**文献标识码:** A

## 0 引言

断裂出露于地表或隐伏于地下, 由于沉积、风化等自然动力及人类生产与生活活动影响, 地貌形态会发生一定程度的退化, 而断裂地下部分受周围环境和人类活动影响较小, 最大程度上保留了区域内已发生地震事件的遗迹。传统探槽方法虽然可以将断裂附近浅层地下结构直观反映出来, 但探槽位置的合理选择及开挖将耗费大量人力财力, 且检查频度较低并对地表环境破坏不可恢复。尽管一些地球物理技术(地震波勘探技术、电法仪和磁法仪等)已应用于活动断层空间分布的探测, 但这些方法不同程度上存在设备成本昂贵、采集效率慢、分辨率较低和对地表环境影响等不利因素, 使此类方法对活动断裂探测适用性有限。

地质雷达, 又名探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR), 作为利用电磁波时频和振幅特征来确定中浅表地层构造的无损地球物理探测技术, 具有操作简便、检测范围广、探测深度深和分辨率高的特点, 已被广泛应用于文物考古<sup>[1-2]</sup>、资源勘探<sup>[3-4]</sup>、工程检测<sup>[5-6]</sup>、水文水利<sup>[7-8]</sup>等诸多领域, 并取得了较好的应用效果。近年来, 国外学者对地质雷达探测活动断裂进行了大量深入的研究工作, 并取得了一系列研究成果<sup>[9-12]</sup>。而国内针对地质雷达应用于断裂探测也做了一些研究, 但尚处于起步阶段, 主要集中在验证性研究和定性描述分析方

收稿日期: 2016-04-13

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目“长江经济带活动构造与区域地壳稳定性调查”(121201104000150010); 煤化工资源综合利用与污染治理河南省工程实验室开放基金资助项目(502002-B01)

作者简介: 张迪(1987-), 男, 博士, 讲师, 主要从事激光和探地雷达相结合应用研究。E-mail: zhangdi1987228@163.com

通讯作者: 李家存(1974-), 男, 博士, 副教授, 主要从事遥感技术应用与研究。E-mail: lijiaacun@163.com

面。本文通过国内外大量已有文献, 主要对地质雷达在活动断裂上的国内外研究进展进行综述, 并探讨其中存在的问题及发展方向。

## 1 地质雷达技术简介

地质雷达是采用高频电磁波 (0.1 ~ 3 GHz) 通过介质之间的电性差异 (主要是介电常数和电导率) 来确定介质结构和物性特征的近地表地球物理探测技术。地质雷达系统主要由中心控制单元、发射天线、接收天线和测距轮组成。地质雷达系统工作时, 中心控制单元触发信号控制发射天线发射电磁波, 电磁波在地下介质传播过程中遇到电性差异的界面时发生反射, 接收天线接收反射信号并将异常现象显示出来, 通过后后期数据处理并根据电磁波波形、反射强度和时频特征等可以推断地下异常区域的空间位置、几何形态等参数, 以此实现对地下空间结构的有效探测, 其工作原理如图 1 所示。

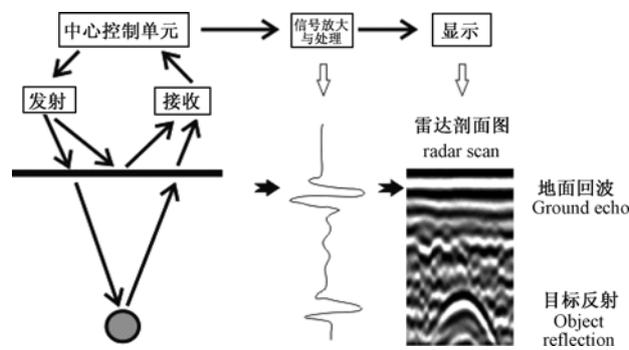


图 1 地质雷达工作原理示意图

Fig. 1 The principle of ground penetrating radar

根据数据采集方式和数据采集过程中收发天线间距是否发生变化, 现有的地质雷达系统可分为收发共置天线对的反射测量、宽角反射测量和透射测量 3 类<sup>[13-14]</sup>。针对不同的研究对象, 选择不同测量方式的雷达天线进行数据采集。

### 1.1 收发共置天线对的反射测量法

数据采集过程中, 发射天线和接收天线以固定的间隔沿测线同步移动的方式称为收发共置天线对反射测量 (见图 2)。当收发天线在地面上同步移动时, 即得到由多道雷达道数据组成的二维时间剖面图。由于收发天线极化方式和天线对的几何结构保持不变, 获取的二维时间剖面可以直观准确地反映地下反射信息随空间位置的变化情况。目前大多数商用地质雷达系统均采用此种反射测量法, 如瑞典 RAMAC/ALA 地质系统、加拿大 EKKO 地质雷达系统和中国电波传播研究所 LTD 系列雷达系统等。

### 1.2 宽角反射测量法

与地震探测中的折射和宽角反射方法类似, 宽角反射测量主要是通过改变发射天线和接收天线之间的间距来记录雷达波传播速度与深度的变化关系, 测量过程中收发天线之间的间距是不断变化的 (见图 3)。宽角发射测量法的优点是可以提高图像信噪比和获取全域波速信息<sup>[15-16]</sup>, 但其数据采集和分析比较复杂。一般的地质雷达系统很少采用宽角反射测量方式, 该方法多用于求地下介质层位的电磁波速度。

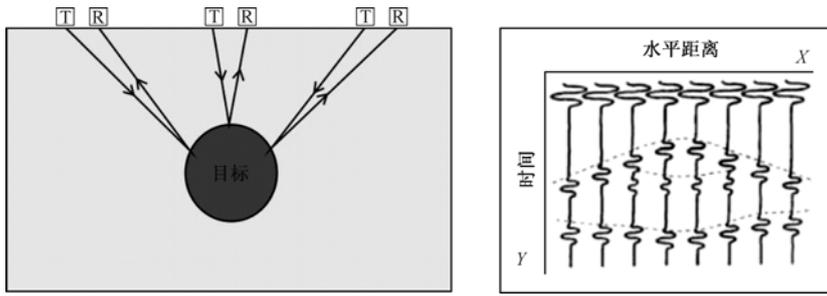


图2 收发共置天线对反射测量方式及雷达图像  
 Fig. 2 The common-offset reflection survey and GPR profile

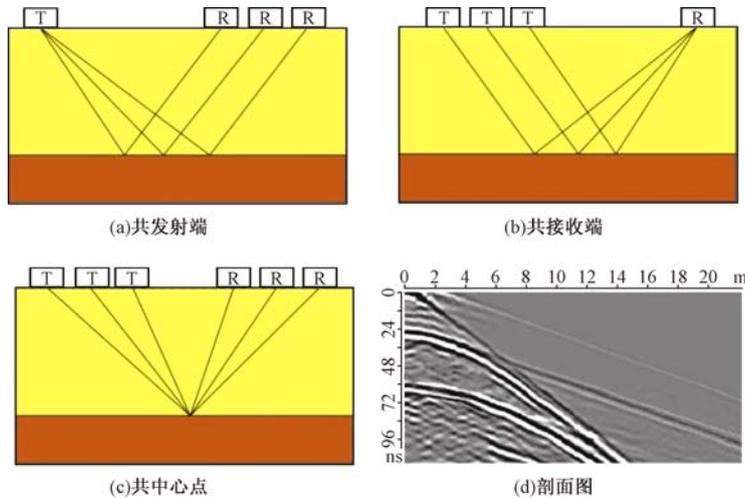


图3 宽角测量方式  
 Fig. 3 The wide-angle reflection survey

### 1.3 透射测量法

与反射探测相比, 透射测量应用领域较少。透射探测的雷达称为钻孔雷达, 通过在2个钻孔中分别移动发射和接收天线来实现测量 (见图4)。由于钻孔探测一般都是在狭长的钻孔中移动天线, 所以一般不考虑天线取向的问题, 但也要考虑工作频率、空间采样间隔、时窗、时间采样间隔和钻孔间距等参数。

## 2 地质雷达在活动断裂研究中的应用

断裂带内或断层面附近的介质成分比较复杂, 与周围介质的结构和组分存在较大差异, 使断层破碎带内的介质与周围介质的相对介电常数相差较大。当雷达天线经过断裂时, 与周围图像相比, 其雷达波的反射强度、波形和时频特征都会发生明显变化, 从理论上论证了地质雷达探测断裂的可行性。20世纪90年代以来, 国内外学者利用地质雷达对世界上不同地区的断裂进行了一些研究, 主要集中在城市活断层探测、古地震探测和断层识别方法3个方面, 由最初单频率天线二维剖面数据采集方式到多频率天线相结合三维剖面方式, 从简单的定性研究逐渐发展到半定量、定量研究。

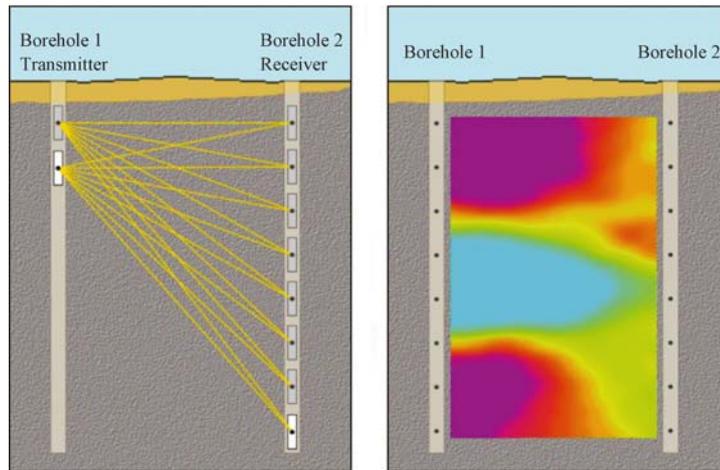


图4 透射探测的方式及成像剖面示意图

Fig. 4 Illustration of a transillumination multioffset gather

## 2.1 城市活断层探测

城市地震和地质体的活动是危及人们安全的主要因素之一，准确查明地表附近活断层的空间分布，确定深部延伸情况，从而揭示地下介质的特性和深部构造环境，评估其地震危险性和危害程度，使重要建筑设施有效避开，最大程度上减少地震灾害<sup>[17-19]</sup>。城市活断层探测常用的技术手段是地震勘探法，但在第四系盖层较浅的地质环境，其分层效果较差，提供的上断点深度往往存在较大偏差。近几年来，地质雷达技术以其操作简便、成本低、分辨率高的优势，在覆盖层薄的地区，作为一种重要的辅助手段被广泛应用于城市活断层探测，尤其对于潜伏断层的位置及活动性，不仅能确定出断层上部的形态特征、上断点埋深和产状，还能清晰地显示出断裂带附近岩石的变形情况。

Audru 等<sup>[20]</sup>利用地质雷达对经过 Wellington 的走滑断裂进行探测，通过 3 个不同位置的二维时间剖面的对比，确定出 Wellington 走滑断裂主断裂经过的区域，并清晰显示出断裂上部的形态特征。Slatera 等<sup>[21]</sup>利用地质雷达评定横穿 Aqaba City 的断裂，通过 50 MHz、100 MHz、200 MHz 和 400 MHz 等 4 种不同中心频率天线地质雷达的探测效果对比，选择 100 MHz 中心频率的分离式天线共采集 7 道二维时间剖面，以共中心点测量方式估算出电磁波的平均速度为 0.095 m/ns，通过雷达剖面与探槽剖面的效果对比，总结出经过 Aqaba City 主断裂的异常特征为倾斜近似 45° 的直线反射，并用于附近地区地质雷达图像的解译。Rashed 等<sup>[22-23]</sup>为确定 Uemachi 断裂区附近的浅层地质构造，通过地质雷达在 Yamato River 区域采集的二维时间剖面确定出断层崖的位置和浅表层断层分布（见图 5），并进一步分析判断出断层呈南北走向。Liberty 等<sup>[24]</sup>结合地震波、地质雷达和磁法仪对 Portland Hills 隐伏断裂进行探测，确定出断裂的变形区域至少为 400 m，结合探槽开挖，最后确定出此断裂历史上至少发生过 2 次较大震级的地震。Khorsandi 等<sup>[25]</sup>利用中心频率为 100 MHz 和 200 MHz 地质雷达确定 Tehran 南部 North Shahre Ray 断裂的区域，综合 3 处不同位置雷达剖面，不仅准确确定出断裂的位置，还判断出断层主要为逆断层，断层倾角呈北方向 60°。Carpentier 等<sup>[26]</sup>在确定 Christchurch City 浅地表层断裂的形态特征中，通过地质雷达将由断裂形成的河流阶地不同时期沉积层在雷达图像上显示出来（见图 6），通过分析图像上异常区域确定出断层的分布位置，并判断其主要以逆断层为主。

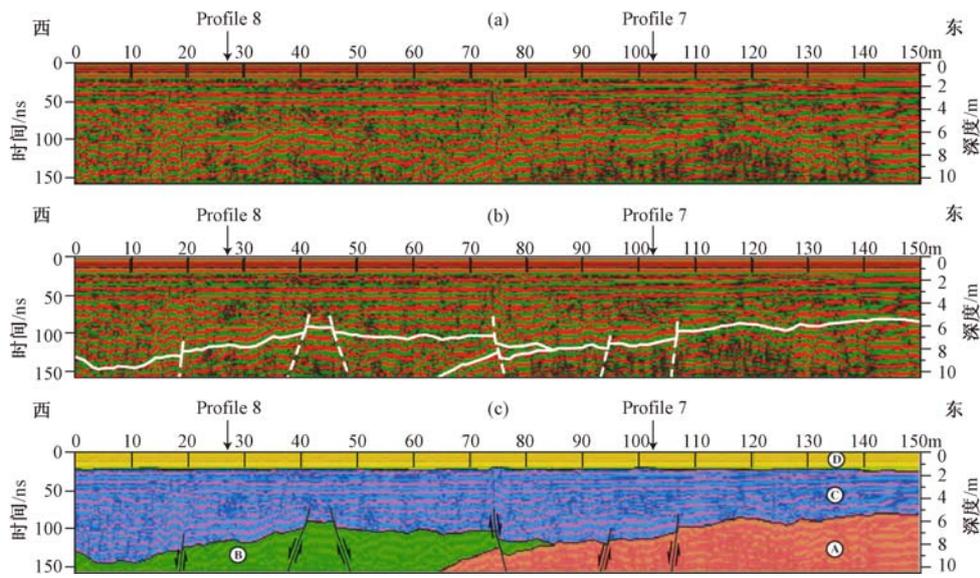


图5 Uemachi 断裂二维剖面图<sup>[22]</sup>

Fig. 5 The 2D profiles of the Uemachi fault

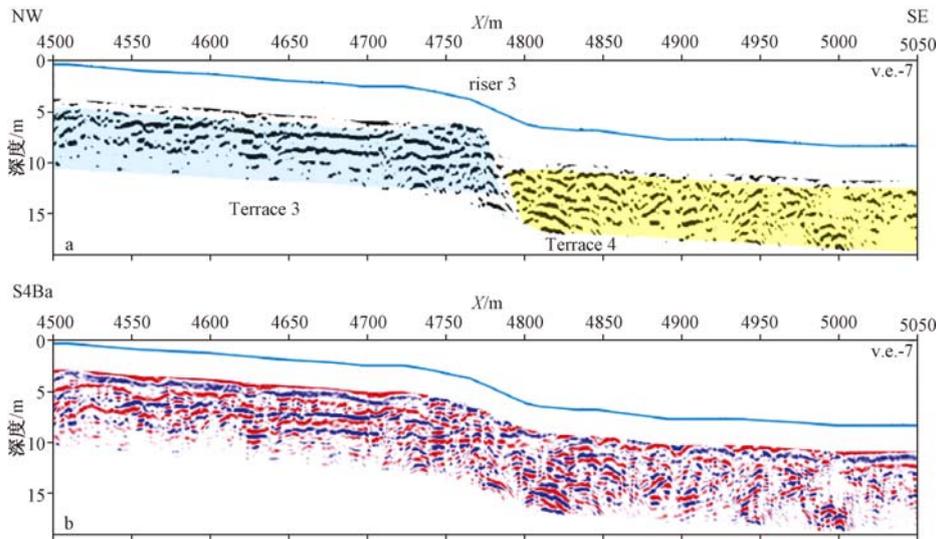


图6 Christchurch city 浅层地表二维雷达图像<sup>[26]</sup>

Fig. 6 The profiles of GPR in Christchurch city

国内的一些学者也利用地质雷达对城市活动断层进行了研究。薛建等<sup>[27-28]</sup>在长春市活动断层的探测与活动评价中,利用地质雷达技术清晰地显示出断层上部的形态特征、上断点埋深和岩土分层,并结合钻孔资料对雷达分层结果进行了确认,初步验证了地质雷达在探测城市活动断层中的有效性。崔国柱等<sup>[29]</sup>和李征西<sup>[30]</sup>对不同地球物理方法探测长春市已知断层的效果进行了对比研究,表明地质雷达对活动断层的剖面形态研究具有很好的作用,可以提供断层的形态特征、近地表的的活动规律,还能为活动断层的分段性研究提供依据。李建军

等<sup>[31]</sup>在东昆仑断裂带潜伏断层的研究中,利用地质雷达技术显示出潜伏断层的形态特征和岩土分层,并结合沉积序列,对断层的活动性进行了分析和评价。

## 2.2 古地震探测

古地震研究可以很大程度上弥补仪器和历史地震记录的短暂性和局限性,对进一步揭示地震的发生时间、空间和强度以及其趋势性变化规律,进而研究该地区的强震活动具有重要意义。地质雷达技术在古地震研究中的应用主要在探槽位置的确定和断层特征参数的获取。

探槽是古地震研究的主要环节,选择合理的探槽位置是进行古地震研究的前提。探槽位置选取一般是根据野外实地调查,在地震地表遗迹比较明显的地方开挖,尤其是地面破裂遗迹保存较完整的地区。但在地质调查中,由于时间比较久远,或者沉积、风化等外界环境的变化和人类活动的持续影响,使地表地震遗迹不明显或已遭受破坏,从而导致古地震研究时探槽位置的选择具有一定的难度。地质雷达作为新型的无损探测技术,可被用于在地表破裂不明显的地区确定探槽的最佳位置。Salvi 等<sup>[32]</sup>采用中心频率为 50 MHz、100 MHz 和 200 MHz 的地质雷达天线根据地表下岩层分布及变形情况,选择 5 处不同的地点,结合探槽剖面确定此处历史上共发生 3 次较大地震事件。Anderson 等<sup>[33]</sup>以南加利福尼亚的逆冲断层为例证明了地质雷达在沉积环境下确定古地震探槽位置的有效性。Malik 等<sup>[34]</sup>在研究 Hajipur 断裂的活动性时,为选择合适的探槽位置,选择 SIR 3000 型中心频率为 200 MHz 的地质雷达采集二维和三维地质雷达图像(见图 7),二维图像上断层处的雷达波呈双曲线反射,连续时间同相轴发生中断,从三维剖面上可以清楚看到断层倾斜方向及沿断裂的变形情况。Cahit 等<sup>[35]</sup>在 Buyuk Menderes Graben 区域正断层探测中,首先采用低中心频率(250 MHz)天线确定出电磁波异常区域,然后用高中心频率(500 MHz)天线对电磁波异常区域进行重点探测,最后结合两种不同频率天线探测结果并开挖探槽进行验证,充分克服了高频和低频天线各自的缺点,建立了利用不同频率天线确定探槽位置的基本方法。

古地震研究中,地质雷达除了用来选择探槽合适的位置外,在地质条件较好的区域也可以代替探槽,通过获取断裂附近的雷达图像,确定古地震地质标志及地下层位分布,探测方法由二维图像逐渐向三维图像发展。Chow 等<sup>[36]</sup>利用地质雷达和高精度地震反射法对 Chihshang 断裂进行研究,通过中心频率为 200 MHz 的地质雷达图像判断出断层上断点、崩积楔和岩土分层,结合地震勘探法重建 Chihshang 断层的浅层地下介质三维模型,为评估地震活动性提供数据。Dentith 等<sup>[37]</sup>以 1968 年 Meckering 地震形成的现已严重风化的断层崖为研究对象,结合附近已知探槽,验证了地质雷达技术在复杂地质条件下探测断层崖的可行性。Ercoli 等<sup>[38-39]</sup>提出利用二维和三维地质雷达图像结合的方式进行古地震探测,首先利用二维地质雷达图像获取区域内大范围的异常区域,然后对电磁波异常集中的区域进行等间距多道二维剖面数据采集,通过后期数据处理生成三维数据,相对于二维图像,三维图像可以将断层上部形态特征和产状等更加形象、直观地反映出来。

## 2.3 断层图像解译方法

在利用地质雷达探测断裂的过程中,由于断裂附近的地质构造比较复杂,断层又分为正断层、逆断层和平移断层,其形态及发育方向不相同且分布不均匀,加之电磁波在介质传播过程中的能量衰减和外界因素的干扰,使获取的雷达剖面中的电磁波特征比较复杂,并伴有多次反射波、信号振铃和电磁波绕射等现象,极大地影响了雷达图像上断层的正确判读。断层图像解译方法最初主要依靠目视解译,与解译者的经验有很大关系。为提高断层解译准确性,一些学者采用结合已知探槽剖面方法进行图像解译<sup>[40-42]</sup>。

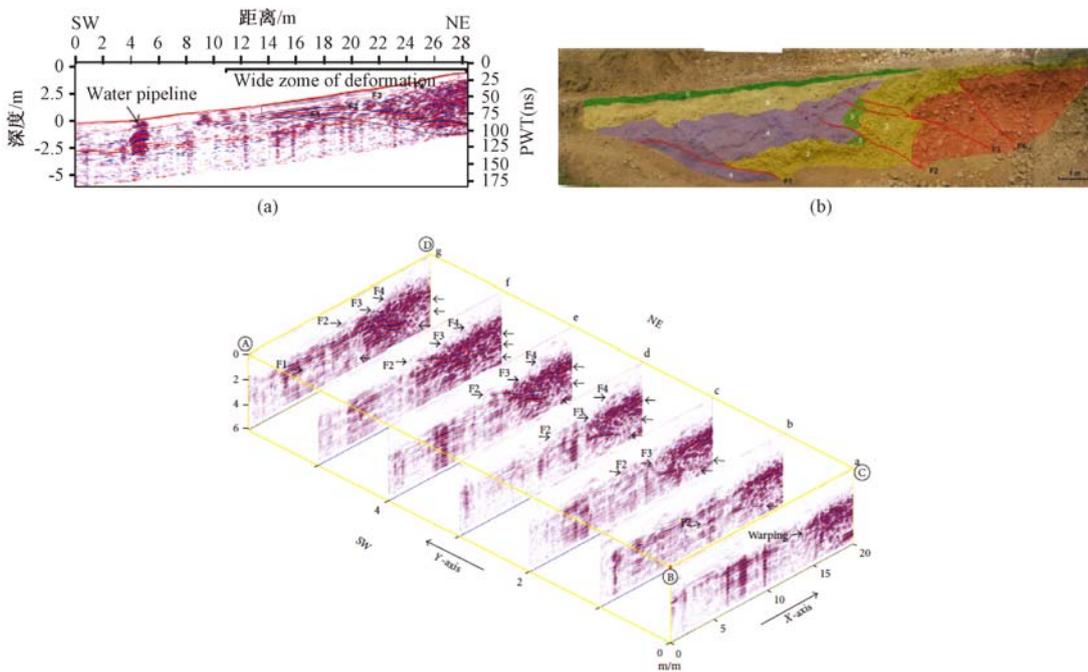


图7 Sandhwal Village 地区处理后频率为 200 MHz 的 2D 和 3D 地质雷达图像<sup>[34]</sup>

Fig. 7 Processed 2D and 3D GPR profiles collected using 200 MHz antenna across the HF2 scarp at Sandhwal Village

随着计算机技术的发展, 数值分析方法被广泛应用于地质雷达图像解译<sup>[43-44]</sup>。地质雷达图像数值模拟的方法较多, 但以时间域有限差分法应用最为广泛, 基本实现方法是利用计算机以离散差分形式在时间和空间上实现电磁波在地下介质中传播路径的模拟。Maurizio 等<sup>[45]</sup>利用已知探槽建立断层的数值模型, 分别模拟出 500 MHz 和 250 MHz 的正演图像, 通过与实际剖面对比, 总结出断层在雷达图像上的雷达波响应特征为: 断裂或断裂区域内的电磁波反射特征与周围介质的电磁波反射特征差异较大, 断裂两侧有时会伴有双曲线绕射现象, 但其强度较弱, 且连续层位反射波信号会发生中断或错断。

二维雷达剖面存在显示形式单一、无法以多角度方式对断层的特征参数进行定量分析等缺点。随着地质雷达硬件及软件技术的进一步发展, 地质雷达探测断裂方法开始由二维向三维和二、三维交互方向发展, 对此国外学者已经进行了某些研究, 并取得了一定的成果<sup>[46-50]</sup>。通过三维或者二维和三维相互交互的显示方式, 不仅能将断裂附近的浅层变形结构以不同的视角显示出来, 而且可以实现对特征参数的定量分析, 例如层位的错距、上断点离地面的距离等。

### 3 应用实例

理塘断裂(禾尼处)位于理塘县西北部, 距县城 57 km (见图 8)。地理位置为东经 99.89°, 北纬 30.23°, 位于川藏公路 318 国道旁, 从地貌上判断主要表现为正断层。正断层陡坎的左边为河流, 右边是公路。靠近河流的地方, 存在少量较明显的地表破裂。由于长时间的沉积作用, 断层陡坎右边的地表形变不太明显。地面较平坦, 夹杂有直径较大的石块,

位置和地貌概况如图 8 所示。

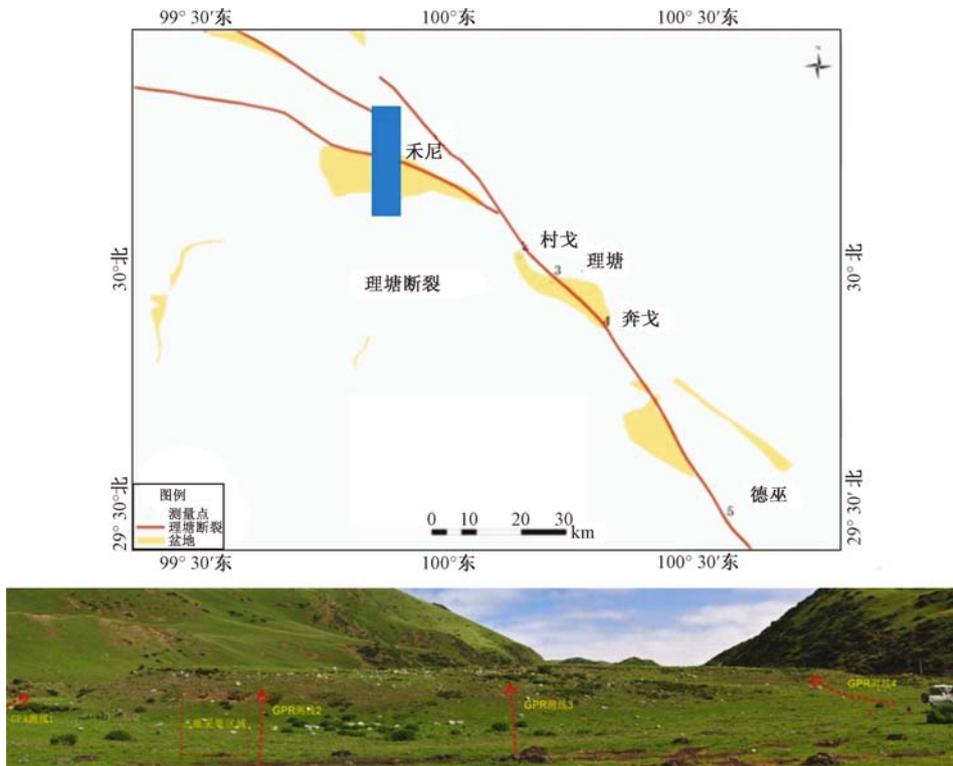


图 8 研究区位置和地貌概况

Fig. 8 Location and geomorphologic environment

根据研究点的地质条件和周围环境, 为了更全面反映断裂的浅层地下几何形态和走向, 沿断裂走向均匀布置 4 条测线, 如图 8 上红色虚线所示, 选择中心频率为 500 MHz 和 250 MHz 的天线沿各测线分别采集水平距离约为 70 m 的二维剖面。

地质雷达图像的初步解译结果如图 9 所示。图 9a 为测线 1 位置处中心频率为 500 MHz 和 250 MHz 经过数据处理后的地质雷达图像, 地形校正后的地质雷达图像基本与采集区域实际地形变化相一致。通过两种不同频率地质雷达图像对比, 根据电磁波反射强度, 可判断在水平距离 58 m 处地表发生明显变化 (红色箭头), 且此处电磁波强度明显比周围强度大 (红色阴影区域)。从 500 MHz 地质雷达图像可以明显看出异常区呈楔状分布, 且异常区域右侧电磁波异常自地表至地下呈倾斜状分布, 初步判断测线 58 m 处为断裂经过区域。

图 9b 为测线 2 位置处中心频率为 500 MHz 和 250 MHz 经过数据处理后的地质雷达图像。对比两种不同频率天线图像, 结合电磁波的强度变化和地形变化情况发现, 水平距离 50 m 处为电磁波异常区域, 形状与测线 1 上红色区域相同, 初步判断为断裂经过区域。水平距离 10 ~ 30 m 之间, 存在电磁波异常区, 根据电磁波变形情况初步断定为沉积区域 (蓝色区域)。

测线 3 位置处的雷达图像如图 9c 所示, 从不同频率的雷达图像上可以清晰地识别水平距离 40 ~ 70 m 之间的电磁波发射强度与周围的反射强度有明显差别 (红色区域), 且变形区呈楔状分布, 此位置与地面上地表破裂位置对应, 并与测线 1 和测线 2 上变形区域相对应, 判断此处为主断裂经过的区域, 并且可以清楚将断裂的地下形态反映出来。水平距离 30 ~ 40 m 之间的异常区域与测线 1 和测线 2 (蓝色区域) 相对应, 测线 1 和测线 2 仅能反映

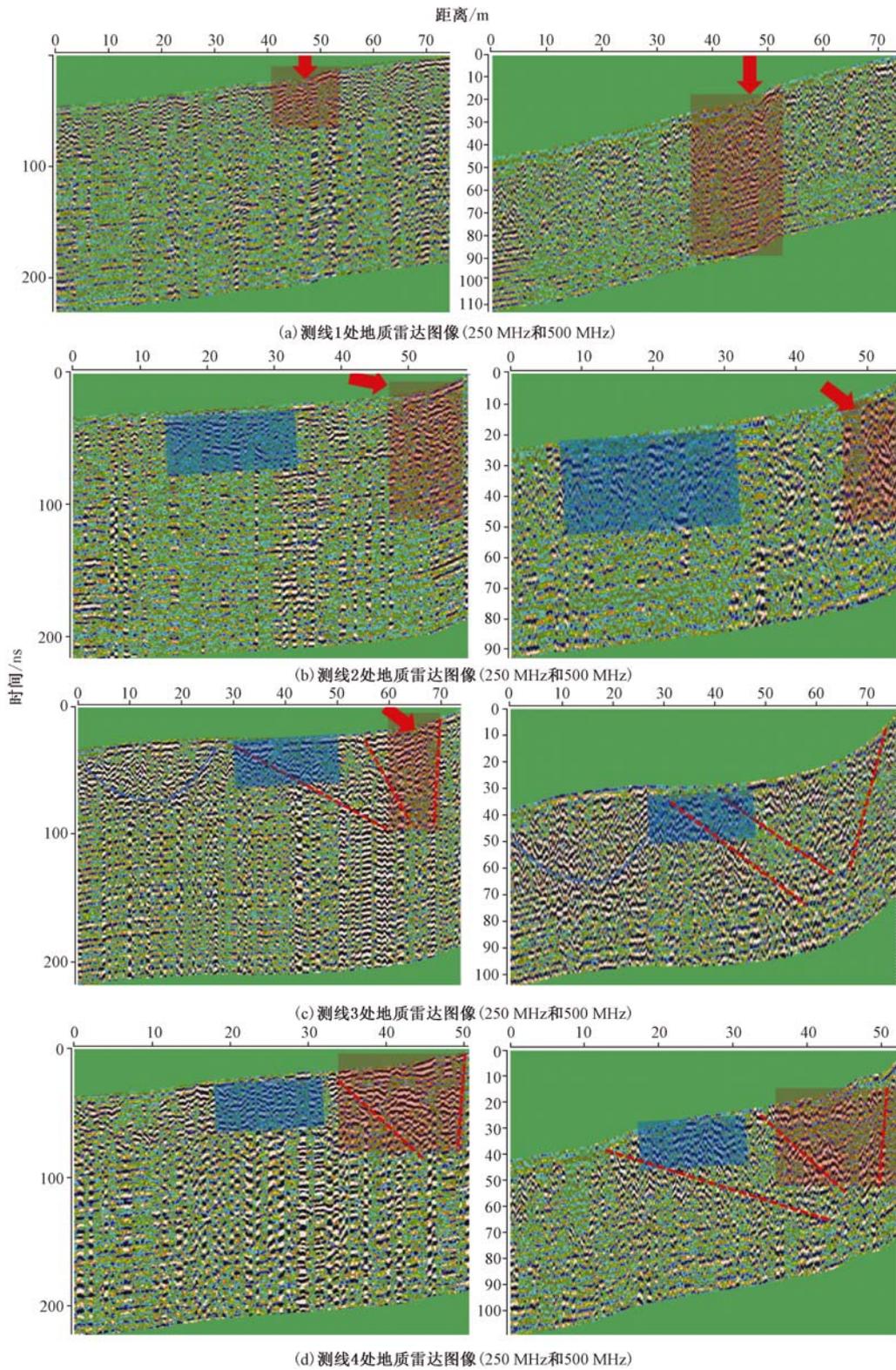


图9 地质雷达断裂区的二维解译图像

Fig.9 The interpreted of GPR profiles (Heni)

处异常区域的局部特征,通过测线3可以清楚判断出此区域为水平距离30~70 m异常区的边界,结合正断层形成的过程,初步推断为沉积区。水平距离0~30 m异常区域在测线3上明显反映出来,在测线1和测线2上没有出现,结合电磁波异常区域的分布形状,初步判断为沉积区。

相对于测线3,测线4位置处的雷达图像(见图9d)中可以清晰地识别水平距离30~50 m之间的电磁波发射强度与周围的反射强度有明显的差别(红色区域),此处为主断裂经过的区域,并与测线1、2和3位置反映出来的一致,蓝色异常区域与测线2反映出来的一致。

从禾尼处4条不同测线雷达图像的解译结果可以得出断裂带的宽度约为20 m,并且通过测线2、3、4可以清楚将地下几何形态反映出来;在距离断裂带10 m和20 m的位置分别存在2个沉积区,靠近断裂沉积区域较大,距离断裂带较远的沉积区只在测线3上显示出来,宽度为30 m,深度约为2 m。

为了将断裂的地下空间分布更形象展现出来,根据4条二维剖面的探测结果,选择在测线1和测线2之间地面比较平坦且碎石分布比较少的区域,利用中心频率为500 MHz的天线,以间隔1 m的距离采集10道二维剖面(见图10a),测线长20 m左右,在实现雷达图像和GPS坐标信息精确匹配的基础之上,利用插值的方法实现此区域内雷达图像的三维显示(见图10b)。相对于二维剖面图,三维效果图对断裂位置及其几何分布形态的展示更形象。

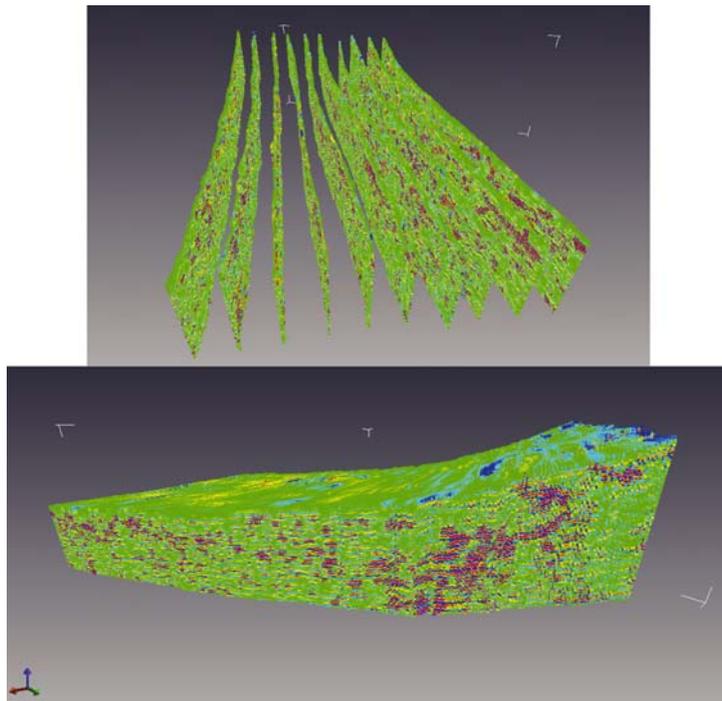


图10 三维雷达图像显示

Fig. 10 The 3D GPR profile

## 4 存在问题与展望

### 4.1 存在问题

纵观国内外已有资料,虽然地质雷达技术在活动断裂探测中的应用取得了较大进展,但仍存在一些需要改进的地方,主要表现在以下几个方面:

①地质雷达的探测效果与研究区地质条件密切相关,土壤中的水含量对探测效果有较大的影响。不同研究区断裂的探测效果存在一定差异,同一研究区不同地方的探测效果也存在一定差异。

②地质雷达技术具有一定的局限性,需与其他地球物理方法相结合,才能最大程度上提高探测的效果和图像判断的准确性。

③虽然地质雷达的硬件和软件方面都取得较大的发展,但断层在雷达图像上的识别仍然是阻碍了地质雷达技术广泛应用于断层探测的最大的技术难题之一。目前断层在雷达图像上的解译仍以人工目视解译为主,对断层在探地雷达图像方面的自动识别和提取有待进一步研究。

### 4.2 展望

经过近几年的不断发展,地质雷达技术已成为一种重要的无损地球物理探测技术,具有较大的发展空间,特别是在后期数据处理及数据解译方面。随着地质雷达技术的不断发展,三维雷达技术、雷达图像解译和多传感器集成将成为未来发展趋势,并将应用于更广泛的领域。从总体的发展趋势上,地质雷达在活动断裂的探测应用中仍处于初步阶段,在数据采集方式、图像解译和与其他方法相互结合应用方面仍具有较大的发展前景。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Zhao W K, Emanuele F, Sara T L, et al. Improved high-resolution GPR imaging and characterization of prehistoric archaeological features by means of attribute analysis [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2015, 54: 77 ~ 85.
- [ 2 ] Bo'niger \* U, Troncke J. Improving the interpretability of 3D GPR data using target-specific attributes: Application to tomb detection [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2010, 37: 672 ~ 679.
- [ 3 ] Hiroko O, Youngjoo K, Toru T. Depositional and erosional architectures of gravelly braid bar formed by a flood in the Abe River, central Japan, inferred from a three-dimensional ground-penetrating radar analysis [J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 324: 32 ~ 46.
- [ 4 ] Li X J, Hu Z Q, Li S C, et al. Anomalies of mountainous mining paddy in western China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 145: 10 ~ 19.
- [ 5 ] Mercedes S, Higinio G G, Henrique L, et al. Uncertainty evaluation of the 1 GHz GPR antenna for the estimation of concrete asphalt thickness [J]. *Measurement*, 2013, 46: 3032 ~ 3040.
- [ 6 ] Arias P, Armesto J, Capua D D, et al. Digital photogrammetry, GPR and computational analysis of structural damages in a mediaeval bridge [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14: 1444 ~ 1457.
- [ 7 ] Brosten T R, Bradford J H, McNamara J P, et al. Estimating 3D variation in active-layer thickness beneath arctic streams using ground-penetrating radar [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 73: 479 ~ 486.
- [ 8 ] Andrea B. Water content evaluation in unsaturated soil using GPR signal analysis in the frequency domain [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, 71: 26 ~ 35.
- [ 9 ] Pitambar P, Parkash B, Awasthi A K, et al. Concealed thrusts in the Middle Gangetic plain, India: A ground penetrating

- radar study proves the truth against the geomorphic features supporting normal faulting [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40: 315 ~ 325.
- [10] Malik J N, Shah A A, Sahoo A K, et al. Active fault, fault growth and segment linkage along the Janauri anticline (frontal foreland fold), NW Himalaya, India [J]. *Tectonophysics*, 2010, 483: 327 ~ 343.
- [11] Mike D, Adam O, Dan C. Ground penetrating radar as a means of studying palaeofault scarps in a deeply weathered terrain, southwestern Western Australia [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, 72: 92 ~ 101.
- [12] Liberty L, Hemphill-Haley M A, Madin I P. The Portland Hills Fault; Uncovering a hidden fault in Portland, Oregon using high-resolution geophysical methods [J]. *Tectonophysics*, 2003, 368: 89 ~ 103.
- [13] 杨峰, 彭苏萍. 地质雷达探测原理与方法研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
YANG Feng, PENG Su-ping. Principles and Methods of Ground penetrating radar [M]. Beijing: Sciences Press, 2006.
- [14] 曾昭发, 刘四新, 冯炬, 等. 探地雷达原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.  
ZENG Zhao-fa, LIU Si-xin, FENG Xuan, et al. The principle and application of Ground Penetrating Radar [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2010.
- [15] Fisher E, McMechan G A, Annan A P. Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar data [J]. *Geophysics*, 1992, 57: 495.
- [16] Grasmueck M. 3-D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss [J]. *Geophysics*, 1996, 61: 1050 ~ 1064.
- [17] 李树德. 活动断层分段研究 [J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1999, 35 (6): 768 ~ 773.  
LI Shu-de. Study on segmentation of active faults [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 1999, 35 (6): 768 ~ 773.
- [18] 徐锡伟. 活动断层、地震灾害与减灾对策问题 [J]. 震灾防御技术, 2006, 1 (1): 7 ~ 13.  
XU Xi-wei. Active faults, associated earthquake disaster distribution and policy for disaster reduction [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1 (1): 7 ~ 13.
- [19] 沈建文, 蔡长青. 地震危险性分析与抗震设防标准的确定 [J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17 (2): 27 ~ 36.  
SHEN Jian-wen, CAI Chang-qing. Seismic hazard analysis and earthquake resistant level [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1997, 17 (2): 27 ~ 36.
- [20] Audrua J C, Banob M, Begge J, 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.
- [21] Slater L, Niemi T M. Ground-penetrating radar investigation of active faults along the Dead Sea Transform and implications for seismic hazards within the city of Aqaba, Jordan [J]. *Tectonophysics*, 2003, 368: 33 ~ 50.
- [22] Rasheda M, Kawamura D, Nemoto H, et al. Ground penetrating radar investigations across the Uemachi fault, Osaka, Japan [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 53: 63 ~ 75.
- [23] Rasheda M, Kawamura D. High-resolution shallow seismic and ground penetrating radar investigations revealing the evolution of the Uemachi Fault system, Osaka, Japan [J]. *The Island Arc*, 2004, 13: 144 ~ 156.
- [24] Liberty L M, Hemphill-Haley M A, Madin I P. The Portland Hills Fault; uncovering a hidden fault in Portland, Oregon using high-resolution geophysical methods [J]. *Tectonophysics*, 2003, 368: 89 ~ 103.
- [25] khorsandi A, Abdali M, Miyata T, et al. Application of GPR Method Due to Active Faults Determination in Urban Area, Case Study: North Shahre Ray Fault, South of Tehran, Iran [C]. 2011 International Conference on Environment Science and Engineering, 2011.
- [26] Carpentier S F, Green A G, Doetsch J, et al. Recent deformation of Quaternary sediments as inferred from GPR images and shallow P-wave velocity tomograms: Northwest Canterbury Plains, New Zealand [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2012, 81: 2 ~ 15.
- [27] 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.

XUE Jian, JIA Jian-xiu, HUANG Hang, et al. Application of GPR in Active Fault Detection [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38 (2): 347~350.

- [28] 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): 63~66.  
XUE Jian, HUANG Hang, ZHANG Liang-huai. The Application of the GPR Method to Detecting and Estimating Active Faults in Changchun [J]. GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION. 2009, 33 (1): 63~66.
- [29] 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.  
CUI Guo-zhu, LI Ee-ze, ZENG Zhao-fa. Active Fault and Geophysical Methods [J]. Global Geology, 2003, 22 (2): 185~190.
- [30] 李征西, 曾昭发, 李恩泽, 等. 地球物理方法探测活动断层效果和方法最佳组合分析 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2005, 35: 110~114.  
LI Zheng-xi, ZENG Zhao-fa, LI Ee-ze, et al. The Function of Geophysical Method in Active Fault Detection and Discuss of Combining Methods [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition). 2005, 35: 109~224.
- [31] 李建军, 张军龙. 探地雷达在探测潜伏活动断层中的应用 [J]. 地震, 2015, 35 (4): 83~89.  
LI Jian-jun, ZHANG Jun-long. Application of GPR in Surveying Underlied Active Faults [J]. EARTHQUAKE, 2015, 35 (4): 83~89.
- [32] Salvi S, Cinti F R, Colini L, et al. Investigation of the active Celano-L' Aquila fault system, Abruzzib (central Apennines, Italy) with combined ground-penetrating radar and palaeoseismic trenching [J]. Geophys. J. Int. 2003, 155: 805~811.
- [33] Anderson K B, Spotila J A, Hole J A. Application of geomorphic analysis and ground-penetrating radar to characterization of paleoseismic sites in dynamic alluvial environments: an example from southern California [J]. Tectonophysics, 2003, 368: 25~32.
- [34] Malik J N, Kumar A, Satuluri S, et al. Ground-Penetrating Radar Investigations along Hajipur Fault: Himalayan Frontal Thrust—Attempt to Identify Near Subsurface Displacement, NW Himalaya, India [J]. International Journal of Geophysics, 2012.
- [35] Cahit C Y, Erhan A, Maksim B, et al. Application of GPR to normal faults in the Buyuk Menderes Graben, western Turkey [J]. Journal of Geodynamics, 2013, 65: 218~227.
- [36] Chow J, Angelier J, Hua J, et al. Paleoseismic event and active faulting: from ground penetrating radar and high-resolution seismic reflection profiles across the Chihshang Fault. eastern Taiwan [J]. Tectonophysics, 2001, 33: 241~259.
- [37] Dentith M A O, Clark D. Ground penetrating radar as a means of studying palaeofault scarps in a deeply weathered terrain, southwestern Western Australia [J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, 72: 92~101.
- [38] Ercoli M, Pauselli C, Frigeri A, et al. 2D AND 3D GROUND PENETRATING RADAR (GPR) CAN IMPROVE PALEOSEISMOLOGICAL RESEARCHES; AN EXAMPLE FROM THE MT. VETTORE FAULT (CENTRAL APENNINES, ITALY) [C], GNGTS 2011.
- [39] Ercoli M, Pauselli C, Frigeri A, et al. 2D-3D GPR signature of shallow faulting in the Castelluccio di Norcia basin (Central Italy) [C]. EGU General Assembly, 2012.
- [40] Gross R, Green A, Holliger K, et al. Shallow geometry and displacements on the San Andreas Fault near Point Arena based on trenching and 3-D georadar surveying [J]. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 2002, 29.
- [41] Cristina P, Costanzo F, Alessandro F, et al. Ground penetrating radar investigation to study active faults in the Norcia Basin (central Italy) [J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, 72: 39~45.
- [42] 张迪, 李家存, 吴中海, 等. 探地雷达在探测玉树走滑断裂带活动性中的初步应用 [J]. 地质通报, 2015, 34 (1): 204~216.

ZHANG Di, LI Jia-cun, WU Zhong-hai, et al. 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.
- [43] 栗毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
LI Yi, HUANG Chun-lin, LEI Wen-tai. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications* [M]. Beijing: Sciences Press, 2011.
- [44] Millard S G, Shaw M R, Giannopoulos A, et al. Modeling of subsurface pulsed radar for nondestructive testing of structures [J]. *ASCE J Mater Civil Eng* 1998, 10: 96 ~ 188.
- [45] 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.
- [46] Green A G, Gross R, Holliger K, et al. Results of 3-D georadar surveying and trenching the San Andreas fault near its northern landward limit [J]. *Tectonophysics*, 2003, 368: 7 ~ 23.
- [47] Gross R, Green A G, Horstmeyer H, et al. 3-D georadar images of an active fault: efficient data acquisition, processing and interpretation strategies [J]. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2003, 4 (1): 19 ~ 40.
- [48] Vanneste K, Verbeeck K, Petermans T. Pseudo-3D imaging of a low-slip-rate active normal fault using shallow geophysical methods: the Geleen fault in the Belgian Mass River valley [J]. *Geophysics*, 2008, 73 (1): B1 ~ B9.
- [49] McClymont A F, Green A G, Kaiser A, et al. Shallow fault segmentation of the Alpine fault zone, New Zealand revealed from 2-and 3-D GPR surveying [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, 70 (4): 343 ~ 354.
- [50] Carpentier S F A, Green A G, Langridge R. et al. Flower structures and Riedel shears at a step over zone along the Alpine Fault (New Zealand) inferred from 2-D and 3-D GPR images [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012: 117.

## APPLICATION AND PROGRESS OF GROUND PENETRATING RADAR IN ACTIVE FAULT DETECTION

ZHANG Di<sup>1</sup>, LI Jia-cun<sup>2</sup>, WU Zhong-hai<sup>3</sup>, REN Li-li<sup>2</sup>

(1. *College of Civil Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451159, China;*

2. *College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;*

3. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)*

**Abstract:** Combining with the recent research at home and abroad, the application of Ground Penetrating Radar in active fault detection was summed up and concluded. Three aspects on the application of GPR in active fault detection were put forward and reviewed; the application of GPR in urban active fault, the application of GPR in paleoearthquake and the interpretation of fault in the GPR profile, and an example of the method was illustrated to demonstrate the effectiveness of GPR method in Litang active. Finally, the existing problems of the application of GPR in active fault detection was put forward, and the direction of development and the prospect of this technology were also denoted.

**Key words:** Ground Penetrating Radar; active fault, urban active fault; paleoearthquake; data interpretation