

地质构造复杂地区山前隐伏断裂的地震 反射和折射联合探测

王冉¹, 赵成彬²

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054; 2. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南郑州 450002)

摘要:采用地震反射和折射联合探测方法在襄樊-广济断裂带蕲州段上获得了高精度的反射时间剖面 and 折射速度剖面图像, 这些图像清晰地显示了剖面浅部地层的分层特征和地层的速度变化特征。解释获得了襄樊-广济断裂带主断裂的位置、性质, 初步判断了其活动性特征, 确定了该断裂不是一条简单的断裂, 而是一条由多条断裂组成的断裂带。这不仅在方法上具有一定普遍意义, 而且为评价测区工程和民用建筑物所在区域的断裂活动性提供了可靠的基础资料。

关键词:山前; 隐伏断层; 地震反射; 地震折射; 联合探测

中图分类号: P315; P54 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2016.08.008

引用格式: WANG Ran, ZHAO Chengbin. Joint application of reflection and refraction seismic exploration approach to piedmont buried fault at complex geotectonic conditions[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2016, 46(8): 671-679.

王冉, 赵成彬. 地质构造复杂地区山前隐伏断裂的地震反射和折射联合探测[J]. 中国科学技术大学学报, 2016, 46(8): 671-679.

Joint application of reflection and refraction seismic exploration approach to piedmont buried fault at complex geotectonic conditions

WANG Ran¹, ZHAO Chengbin²

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. The Geophysical Exploration Center of CEA, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Seismic reflection and refraction exploration techniques have its advantages and limitations to exploring the piedmont buried fault in front of mountain at that complex segment in geotectonic aspect. So a joint of reflection and refraction seismic exploration approach is applied for this case and make best use of the advantages and bypass the disadvantages to infer the location, nature and preliminary activity of the faults. Here, seismic reflection and refraction are jointed to detect the Qizhou segment of the Xiangfan-Guangji fault belt and yield a high-precision time profile of reflection and velocity profile of refraction. These results illustrate a sequence in the shallow and a variation velocity of whole strata. Therefore, the main rupture location, fault property and activity were characterized to be a fault belt rather than a single fault. So it's believed that this joint exploration is not only a universal significance in methodology but also

收稿日期: 2015-01-25; 修回日期: 2016-03-03

基金项目: 中国博士后基金特别资助项目(2013T60869)和国家自然科学基金(41402044)资助。

作者简介: 王冉, 男, 1980年生, 博士/高级工程师。研究方向: 地球物理勘探。E-mail: Shiranwang@qq.com

通讯作者: 赵成彬, 高级工程师。E-mail: zcb001001@sina.com

an important data for the evaluation of the fault activity surrounding the civil engineering.

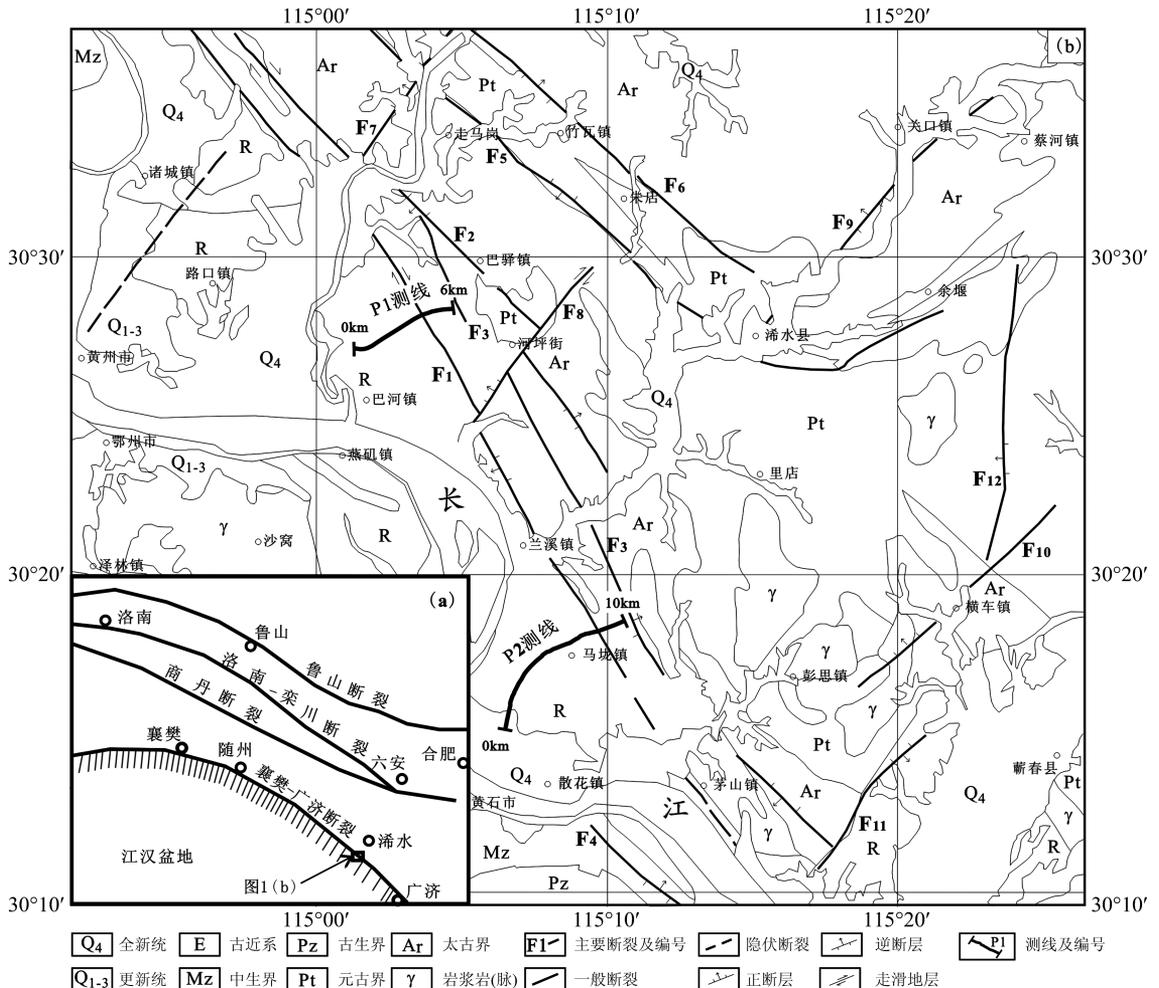
Key words: piedmont; buried fault; seismic reflection; seismic refraction; joint exploration

0 引言

山前隐伏断裂所在区域往往是人口密集区,工业和民用建(构)筑分布较多,对其进行勘探调查有利于建设条件的评价^[1-2],具有十分重要的意义.这类断裂的探测条件往往复杂多样,通常受控于地质构造和地理环境两大要素.为了获得良好的探测结果,必须考虑这些要素.山前隐伏断裂的第四系覆盖层较薄,活动断裂的上断点距地面一般较浅,因此要求最小探测深度要浅;为了获得断裂的几何特征和向下的延伸情况,还要求最大探测深度要大,探测成

果的分辨率要高,分辨薄地层的能力要强.目前探测山前隐伏断层的方法很多,主要有高精度重力测量、多道直流电法勘探、探地雷达探测、航空磁测和浅层人工地震反射勘探、折射勘探和面波勘探等^[3-11].不同方法有各自的适应性.

湖北襄樊-广济断裂带规模大(图 1),延伸千余公里,断裂多个地段处于山前隐伏状态,而这一带地质构造相对复杂,大别山多为变质岩和花岗岩分布区,这类成层性差的岩石也往往延伸至江汉盆地内部,作为下伏基岩.这种下伏基岩为成层性差的变质岩或花岗岩、上覆覆盖层较薄、地形复杂、人口稠密



F1-蕪州断裂, F2-汤铺岭断裂, F3-茅江断裂, F4-石佛洞断裂, F5-走马岗断裂, F6-竹瓦镇断裂, F7-巴河断裂, F8-破塘坳断裂, F9-浠水断裂, F10-横车断裂, F11-三合铺断裂, F12-松林岩断裂

图 1 测区地质构造和浅层地震测线位置图(图 1(a)引自文献[17])

Fig. 1 Geotectonic sketch map showing the location of shallow seismic exploration lines

的探测条件不仅仅出现在大别山山前,在太行山山前^[12-13],秦岭北麓^[14-15]等地也较为普遍.因此探索这类地质构造复杂区山前隐伏断裂的勘探方法具有普遍意义.这类地质构造复杂区的石油地质勘探已进行过地震反射和折射联合探测的探讨^[16],但浅层地震勘探尚需更深入的研究.本文以蕲州一带的隐伏区段为实例,介绍地质构造复杂地区山前隐伏断裂的浅层地震反射和折射联合探测方法.

1 测区山前隐伏断裂的勘探条件

襄樊-广济断裂带实际上是长江沿线,水系发育,人口稠密,村庄较多,道路及来往车辆密集.勘探区地为低山丘陵区,地形起伏较大.襄樊-广济断裂带蕲州段被第四系松散沉积物覆盖,断裂处于隐伏状态,下伏基岩多为侵入岩或变质岩,反射界面不明显.近地表地层以黏土和基岩风化物为主,覆盖层较薄,一般为几米至十几米.因此查明山前隐伏区内是否有断裂存在,确定断裂的位置,断裂的上断点埋深、断距及断裂的最新活动年代^[18],需采用有效的探测方法.

测区位于鄂州市和浠水县之间,测区内断裂构造较为发育,主要存在北西-南东和北东-南西两组断裂.北西-南东方向的断裂主要有襄樊-广济断裂带(F1、F2、F3)、走马岗断裂(F5)和竹瓦镇断裂(F6).北东-南西方向的断裂主要有巴河断裂(F7)、破塘坳断裂(F8)和浠水断裂(F9).本次浅层地震勘探的目标主要是襄樊-广济断裂带的F1断裂(图1).

襄樊-广济断裂带是湖北省境内规模最大的一条断裂构造带.长期以来,许多地学工作者一直认为“襄(樊)-广(济)”断裂构造是一条区域性的深大断裂,是扬子地块与秦岭-大别造山带的分界线,控制着自元古代以来的沉积作用、岩浆活动及构造作用的发展与演化^[19].该断裂横跨湖北省东西,全长断续延伸千余公里,结构复杂,地质特征丰富,地表上构成扬子构造区与秦岭-大别构造带的变形边界.在地表上,常由一系列逆冲断层组成,在剖面上呈叠瓦状产出^[20].不同地段表现形式不同,随州三里岗-房县青峰一带多为不同时期、不同性质、不同特点的多条断层平行展布,断面既有南倾,亦有北倾,以南倾居多,从而构成了断层的复合^[17],由此造成前人对“襄-广”断裂性质认识的争议.在该测区内,该断裂带由3条断裂(F1、F2、F3)组成,为逆断层,总体走向北西-南东,其中F1倾向南西,F2和F3倾向北东.

2 地震数据采集

2.1 测线位置

考虑到测区地理环境和地质构造两大因素.为了有利于测线的布置和地震波的激发和接收,测线沿公路布设,避免了地形起伏造成的影响;并且在野外选择夜晚施工,减少了来往车辆的和人工活动的干扰.在测线布设过程中,主要考虑所要探测的断裂走向以及工作环境,使测线尽可能垂直于断层走向,以便使探测结果能够较准确地反映构造的位置及性质.F1断裂为襄樊-广济断裂带的主干断裂,规模较大,且其位置应向东南方向偏移,因此本次浅层地震测线布设的重点为F1断裂,在测区的南部和北部分别布设了一条方向北东-南西的浅层地震测线(P1和P2),采用反射和折射联合法对F1断裂进行探测.

P1测线:位于浠水县麻桥至黄冈市的S343省道上,方向南西-北东,全长6 km.其中折射测线6 km,反射测线5 km,位于折射测线的西南段.

P2测线:位于浠水县散花镇S201省道上,方向南西-北东,全长10 km.其中折射测线10 km,反射测线8 km,位于折射测线的西南段.

2.2 数据采集方法

数据采集的目的:通过采用一定的地震波激发和接收设备和工作方法,获得高分辨率和高信噪比的地震记录.

要想获得高分辨率的地震记录,一是提高激发地震子波的频率,从而减小地震子波的波长;二是要采用抗干扰能力强、动态范围大的地震仪器;三是采用合适的工作方法.

仪器设备:本次地震数据采集采用法国舍赛尔公司生产的具有高抗干扰能力、高灵敏度、大动态范围的SN408高分辨率遥测数字地震仪.地震波的激发采用18 t变频机械可控震源,最大输出力18 t,采用连续变频扫描,扫描频带30~200 Hz,扫描长度8 s.地震波的接收采用4个/串的60 Hz高频检波器串进行接收.

工作方法和观测系统:目前探测隐伏断裂所采用的方法主要为反射地震方法^[7, 13],反射地震方法有利于在干扰背景较强的自然条件下利用多次覆盖技术压制干扰、提高资料的信噪比,而且地震反射剖面上丰富的反射地震响应有助于有效地判定断裂的存在与否、展布形态及其活动性,确定断裂的最新活

动时代.但是由于测区下伏基岩为变质岩,层位较少,若只采用反射地震方法可能得不到好的反射层位,影响断裂的探测效果,而折射地震方法可以获得浅层的速度结构,通过速度的变化可以判定断裂的位置.因此本次探测采用反射地震和折射地震联合探测的方法.具体采用可控震源激发地震波,采用大能量、小点距、高覆盖次数的数据采集方法,获得了较好的原始记录和探测结果.

折射探测采用追逐相遇的观测系统,反射探测采用单边追逐激发、多次覆盖的观测系统.

折射探测:道间距 5 m,300 道接收,炮间距 100~150 m.

反射探测:道间距 2 m,单边激发,120 道接收,15 次覆盖.

仪器采集参数为:采样间隔 0.5 ms,记录长度 2 s.

图 2 为反射探测原始共炮点地震记录图,从图中可以看出该地区虽然各种干扰波(折射波、面波、声波等)较强,但反射波还是明显存在的,在 200 ms 以上存在 2 组能量较强的反射波.

图 3 为折射探测走时曲线图,从图中可以看出,由于 2 条测线浅部地层性质变化较大,基岩面埋深差别较大,覆盖层和风化壳的厚度及速度变化都较大,从而形成了复杂的走时曲线形态.

3 资料分析与解释

为便于资料的分析对比和解释,根据各条测线的折射波速度剖面特征、反射波时间剖面特征、浅部地层速度结构特征以及本测区的地质构造特征,在折射速度剖面和反射时间剖面图上,地层界面反射波分别用 T_{B1} 和 T_{B2} 标出,根据该区岩土工程勘察地震波速测量结果,在速度结构图上 T_{B1} 代表强风化-中风化基岩的分界面,其速度约为 1 800~2 200 m/s; T_{B2} 代表中风化-微风化基岩的分界面,其速度约为 3 000~3 300 m/s.图中白色虚线为可信度范围线,在该线以上的结果可信度较高,该线以下的结果可信度较低.

3.1 P1 测线

图 4 为 P1 测线的地震反射时间剖面图和折射速度剖面图,其中反射测线位于折射测线的西南段.在反射时间剖面上,在测线西南段 0~3 000 m 之间,在 100 ms 以下可看到一些有规律的反射波,有的呈弧形,有的呈倾斜或曲线状,但反射能量较弱,同相轴连续性较差,这表明该区古近系和白垩系(K_2, E_{1g})内部的成层性较差,层位不明显.但在测线的东北段 3 000~5 000 m 之间,100 ms 以下的反射能量更弱,同相轴连续性更差,很难识别出有规律的反射波组,这充分反映了该地段太古界(Ar)内部

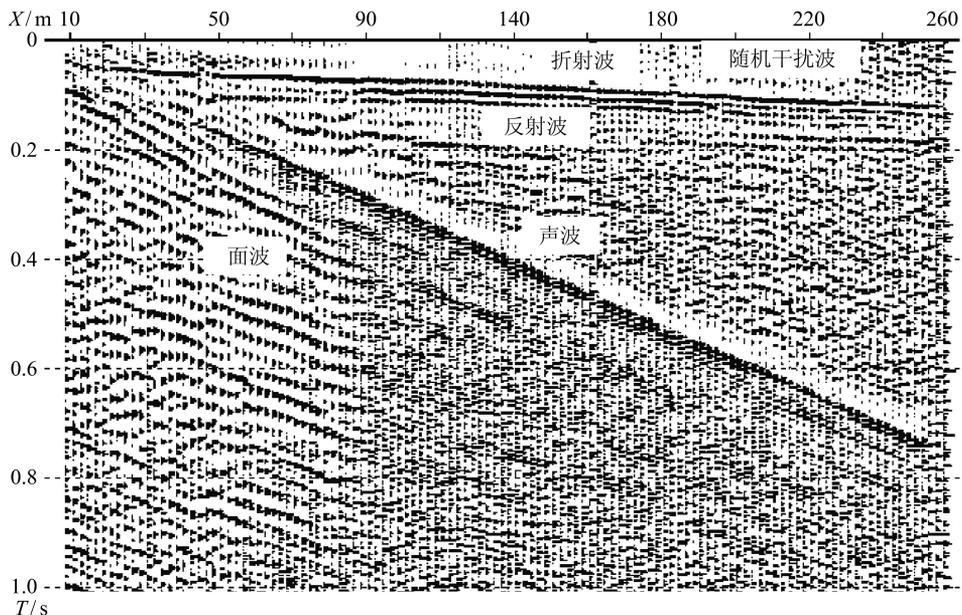
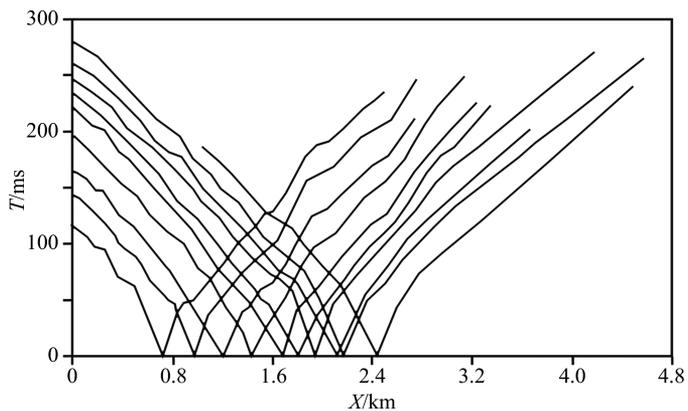
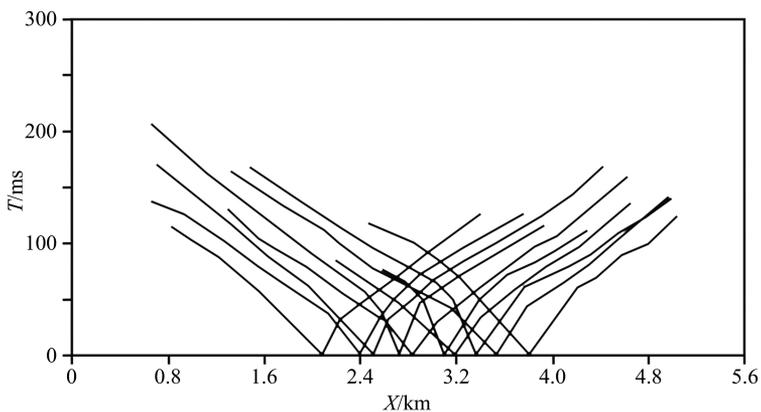


图 2 原始共炮点地震记录图

Fig. 2 Sketch map showing primary common shot point seismic record



(a) P1测线走时曲线



(b) P2测线走时曲线

图 3 折射波走时曲线图

Fig. 3 Refraction wave travel time curve

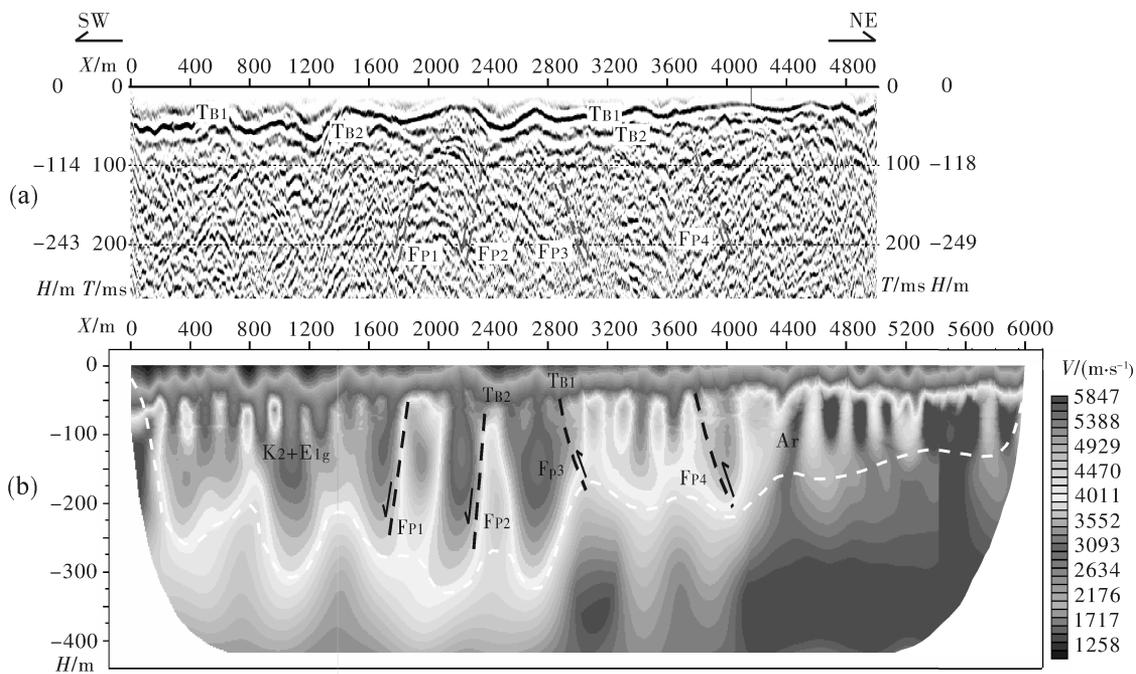


图 4 P1 测线地震反射时间剖面(a)和折射速度剖面(b)

Fig. 4 Reflection time profile (a) and refraction velocity profile (b) of seismic exploration of Line P1

的物性差异较小. 在折射速度剖面上, 在剖面的上部 (50 m 以上), 由于沿测线第四系覆盖层较薄, 横向上基岩表层风化程度差异也较大, 因此浅部剖面形态在横向上起伏变化较大. 在剖面的下部 (50 m 以下), 横向上由于基岩岩性不同, 地震波速度存在较大的变化. 在测线的西南段 0~3 000 m 之间, 地层为古近系和白垩系, 速度相对较低, 一般在 3 500 m/s 以下, 相对变化也较大. 在测线的东北段 3 000~6 000 m 之间, 地层为太古界 Ar, 地震波速度相对较高, 一般在 4 000 m/s 以上, 相对变化较小.

综合分析图 4 的反射波组特征和折射速度特征, 在测线西南段 (0~4 000 m), 反射时间剖面上的 T_{B1} 反射波具有较好的横向连续性, 没有明显的错断现象; 速度剖面上 T_{B2} 以上的速度横向变化比较稳定, 没有明显的速度突变. 在 T_{B2} 之下, 反射剖面上的波组特征和速度剖面上的速度都存在较大的变化, 综合分析该段反射剖面的波组特征和折射剖面的速度变化特征, 在剖面上解释了 4 个特征明显的断点 $F_{P1} \sim F_{P4}$, 位置分别位于测线桩号 1 950 m, 2 390 m, 2 863 m 和 3 790 m. 其中断点 F_{P1} 和 F_{P2} 视倾向南西, 为正断层; 断点 F_{P3} 和 F_{P4} 视倾向北东, 为逆断层. 在测线的东北段 (4 000~6 000 m), 速度剖面上 T_{B2} 以上的速度横向变化也比较稳定, 没有明

显的速度突变. 在 T_{B2} 之下速度都较高, 在纵向上和横向上都比较稳定, 虽然存在局部的速度变化现象, 但变化幅度都较小, 因此认为在测线桩号 4 000~6 000 m 范围内不存在断层. 另外从图中还可以看出在 F_{P1} 和 F_{P2} 断点的右侧在时间剖面上都存在一个弧形的反射波组, 该弧形反射波组在速度结构剖面上对应一个高速体. F_{P3} 和 F_{P4} 在折射速度剖面上也为高速体的边界. 根据这 4 个断点处的反射波组特征和速度结构特征, 认为它们向上仅错断到 T_{B2} 界面, 属基岩断裂.

3.2 P2 测线

图 5 为 P2 测线的地震反射时间剖面图和折射速度剖面图, 反射测线也位于折射测线的西南段. 由图 5 可以看出, 反射时间剖面上反映的第四系覆盖层也较薄, 横向上基岩表层风化程度差异也较大, 表现为西南段覆盖层较厚, 东北段覆盖层较薄. 剖面下部的反射特征差异也较大, 在剖面 2 000~4 000 m 之间, 反射能量较弱, 反射同相轴的横向连续性较差, 很难识别出有规律的强反射波组. 在两端反射能量相对较强, 存在一些起伏变化较大, 但基本能够追踪识别的反射波组. 在折射速度剖面上, 地层结构及岩性变化特征反映得更为明显, 剖面上部的覆盖层和风化壳厚度变化特征与反射时间剖面上的反射波

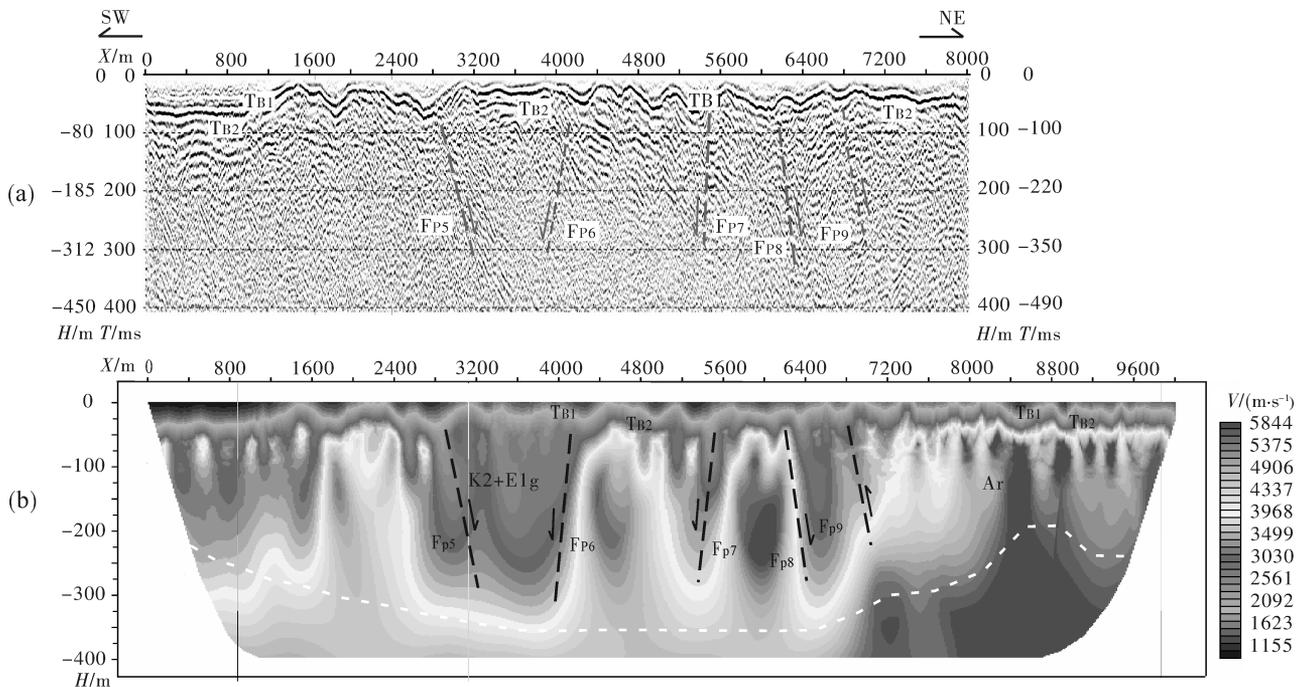


图 5 P2 测线地震反射时间剖面(a)和折射速度剖面(b)

Fig. 5 Reflection time profile (a) and refraction velocity profile (b) of seismic exploration of Line P2

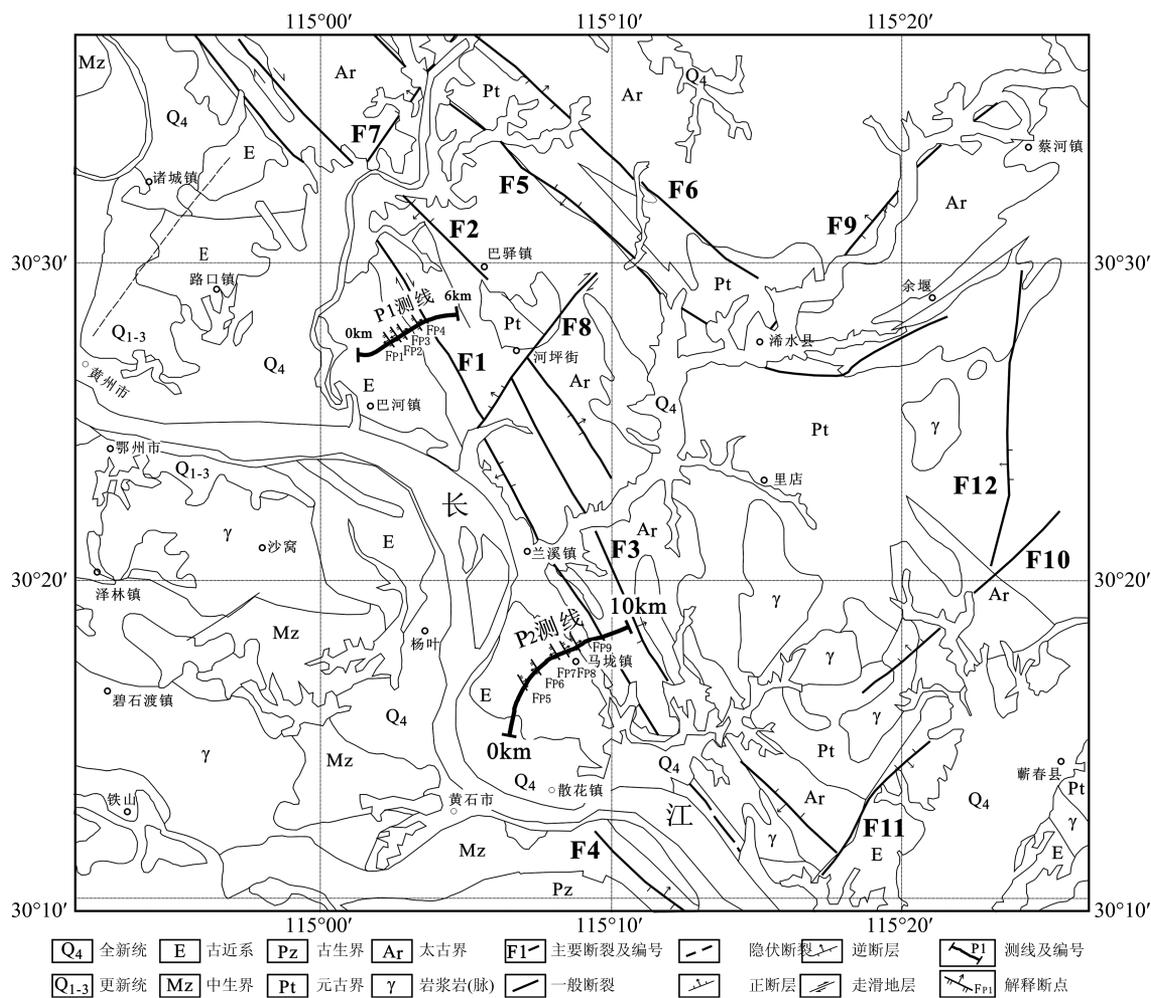
组特征对应的较好. 剖面下部为基岩地层, 速度较上部明显增高, 且在横向上变化较大. 在测线的西南段 0~7 000 m 之间为古近系和白垩系, 速度相对较低, 一般小于 3 500 m/s. 在测线的东北段 7 000~10 000 m 之间为太古界 Ar, 地震波速度相对较高, 一般大于 4 000 m/s.

根据图 5 的反射时间剖面特征和折射速度剖面变化特征, 在 P2 测线的西南段 0~8 000 m 之间, 反射时间剖面和折射速度剖面上的 T_{B1} 和 T_{B2} 界面都比较稳定, 没有明显的错断现象, 但在 T_{B2} 界面以下, 反射剖面上的反射波组特征和速度剖面上的速度结构都存在较大的变化. 而在 P2 测线的东北段 8 000~10 000 m 之间, 虽然速度纵、横变化都较小, 没有较大的速度突变, 但也存在明显的横向速度

变化现象. 综合考虑反射剖面上的波组变化特征和折射剖面上的速度突变现象, 解释了 5 个断点 $F_{P5} \sim F_{P9}$, 其位置分别位于测线桩号 2 898 m, 4 115 m, 5 474 m, 6 185 m 和 6 800 m. 其中, 断点 F_{P6} 和 F_{P7} 视倾向南西, 断点 F_{P5} 、 F_{P8} 和 F_{P9} 视倾向北东, $F_{P5} \sim F_{P8}$ 为正断层, F_{P9} 为逆断层. 根据这 5 个断点处的反射波组特征和速度结构特征, 它们向上仅错断到 T_{B2} 界面, 都属于基岩断裂.

4 结论

本次山前隐伏断裂探测采用折射和反射相结合的方法在 2 条测线上发现断点 9 个(见图 6), 根据本测区的地质构造资料, 认为 P1 测线上的 F_{P3} 、 F_{P4} 断点和 P2 测线上的 F_{P9} 断点反映的是蕪州断裂



F1-蕪州断裂, F2-汤铺岭断裂, F3-茅江断裂, F4-石佛洞断裂, F5-走马岗断裂, F6-竹瓦镇断裂, F7-巴河断裂, F8-破塘坳断裂, F9-浠水断裂, F10-横车断裂, F11-三合铺断裂, F12-松林岩断裂

图 6 解释断裂平面图

Fig. 6 Sketch map of interpretation faults

(F1), 蕪州断裂应在原来的位置上向东南方向偏移, 它可能不是一条单一的断裂, 而是一个由多条断裂组成的断裂带; 而 P1 测线上的 F_{P1} , F_{P2} 断点和 P2 测线上的 F_{P5} , F_{P6} , F_{P7} 断点可能是其他小断裂的反映. 这些断裂都是基岩地层内部的断裂, 没有错断 T_{B1} 地层界面进入第四系, 因此认为第四纪以来没有活动. 结合 2 条测线的速度结构可知, P1 测线的 F_{P1} 断点和 P2 测线的 F_{P9} 断点以东的高速度介质可能是基底抬升的产物.

根据本次探测所获得的反射时间剖面图像和折射速度剖面图像可以看出, 在火成岩或变质岩等地质结构和构造复杂地区采用人工地震方法探测活动断裂时, 仅采用单一的反射、折射或面波等方法难以获得好的探测结果. 由于在火成岩或变质岩内部没有好的反射层位, 采用反射方法很难得到反射能量较强、连续性较好的反射波组, 仅能得到一些断断续续的、具有一定规律的弱反射条带, 若用于判定断裂的存在可靠性较差, 但具有一定的参考价值. 虽然折射方法探测精度相对反射较低, 但可以得到比较准确的地层速度. 由于断裂一般都具有一定宽度的破碎带, 断裂两侧与断裂内部(破碎带)介质物性差异较大, 速度差异也较大, 通过采用折射方法得到地层的速度分布, 根据断裂两侧地层的速度差异可以对断裂的存在进行判定. 因此通过采用反射和折射相结合的方法探测断裂构造, 就能够通过断裂构造的反射波组特征和速度变化特征更加准确地确定断裂的存在, 提高对断裂定位和断裂性质判定的准确性. 在不同地震地质条件下, 隐伏断裂上断点的勘探表现出不同的特点, 不同的方法有各自的适应性. 今后的工作应针对不同地震地质条件设计和实验, 使得断裂构造上的断点勘探有更多可以选择的方法. 襄樊广济断裂本身也应该得到重视, 因为该断裂沿江沿线分布, 不论是对基础地质研究还是实际应用都具有重要意义.

致谢 感谢中国地震局地球物理勘探中心、中广核集团在工作过程中的大力支持. 感谢审稿专家精心审阅了本文, 使得本文得到较大提高.

参考文献(References)

- [1] TIAN Shengqing. Faults investigation and evaluation for seismic safety assessment of nuclear power plants [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1(1): 25-30.
- 田胜清. 核电厂地震安全性评价中的断裂构造调查与评价[J]. *震灾防御技术*, 2006, 1(1): 25-30.
- [2] DENG Qidong, XU Xiwei, ZHANG Xiankang, et al. Methods and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 93-104.
- 邓起东, 徐锡伟, 张先康, 等. 城市活动断裂探测的方法和技术[J]. *地质学前沿*, 2003, 10(1): 93-104.
- [3] CAI Hangsheng, CAI Zhenjing. The application of aero magnetic survey to the selection of sites for a nuclear power station in China [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1995, 19(5): 341-350.
- 蔡航升, 蔡振京. 航空磁测在我国核电站选址中的应用[J]. *物探与化探*, 1995, 19(5): 341-350.
- [4] XU Mingcai, GAO Jinghua, CAI Mingtao, et al. Seismic technique applied to active fault assessment [J]. *Geology and Prospecting*, 1999, 35(1): 36-40.
- 徐明才, 高景华, 柴明涛, 等. 应用于评价活动断层的地震方法技术[J]. *地质与勘探*, 1999, 35(1): 36-40.
- [5] ZHAO Chengbin, LIU Baojin, JI Jifa, et al. The application of integrated geophysical techniques to the investigation of geological hazards [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2001, 25(6): 464-468.
- 赵成斌, 刘保金, 姬继法, 等. 综合物探方法在地质灾害调查中的应用研究[J]. *物探与化探*, 2001, 25(6): 464-468.
- [6] ZHU Tao, HE Zhengqin, FENG Rui, et al. Experiment on joint detection by seismic reflection and electrical imaging: with an example of exploration of active fault in Zibo city [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(2): 373-380.
- 朱涛, 何正勤, 冯锐, 等. 地震-电成像联合探测试验——以淄博市活断层探测为例[J]. *地震地质*, 2007, 29(2): 373-380.
- [7] ZHAO Chengbin, YUAN Hongke, LI Deqing, et al. Exploration and study of buried faults under a loose overburden [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(2): 107-113.
- 赵成斌, 袁洪克, 李德庆, 等. 松散覆盖层内隐伏断层探测研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27(2): 107-113.
- [8] LIU Baojin, ZHANG Xiankang, FENG Shaoying, et al. High-resolution seismic reflection profile across Pengzhou buried fault in the frontal areas of Longmen Shan [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(2): 538-546.
- 刘保金, 张先康, 鄧少英, 等. 龙门山山前彭州隐伏断裂高分辨率地震反射剖面[J]. *地球物理学报*, 2009,

- 52(2): 538-546.
- [9] HE Zhengqin, PAN Hua, HU Gang, et al. Study on the seismic exploration method to detect buried fault in the site of Nuclear Power Plant[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(2): 326-334.
何正勤,潘华,胡刚,等. 核电厂址隐伏断裂探测中的地震勘探方法研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 326-334.
- [10] NOBES D C. Troubled waters: Environmental applications of electrical and electromagnetic methods [J]. Surveys in Geophysics, 1996, 17(4): 393-454.
- [11] CHEN Yong, LI Yijin. Seismic wave radar research: Using active source to detect continental crust structure [J]. Journal of University of Science And Technology of China, 2007, 37(8): 813-819.
陈颢,李宜晋. 地震波雷达研究展望:用人工震源探测大陆地壳结构[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(8): 813-819.
- [12] ZHAN Yan, ZHAO Guoze, WANG Lifeng, et al. Deep structure in Shijiazhuang and the vicinity by magnetotellurics[J]. Seismology and Geology, 2011, 33(4): 913-927.
詹艳,赵国泽,王立凤,等. 河北石家庄地区深部结构大地电磁探测[J]. 地震地质, 2011, 33(4): 913-927.
- [13] XU Mingcai, GAO Jinghua, RONG Lixin, et al. Seismic analysis of the active character of the Taihang Mountain piedmont fault [J]. Applied Geophysics, 2010, 7(4): 392-398.
- [14] FENG Xijie, TIAN Qinjian, SHEN Xuhui. Analysis of activity difference of the west section of the Weihe fault [J]. Geological Review, 2003, 49(3): 233-238.
冯希杰,田勤俭,申旭辉. 渭河断裂西段活动差异性分析[J]. 地质论评, 2003, 49(3): 233-238.
- [15] SHI Yaqin, FENG Xijie, DAI Wangqiang, et al. Distribution and structural characteristics of the Xi'an section of the Weihe fault[J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 30(6): 634-647.
师亚芹,冯希杰,戴王强,等. 渭河断裂西安段的展布及其结构特征[J]. 地震学报, 2008, 30(6): 634-647.
- [16] LIANG Shangyong, SHI Shenglin, JI Hongjun. Application of joint reflection and refraction exploration in JR area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003, 42(2): 186-190.
梁尚勇,石生林,季红军. 反射和折射波联合地震勘探在JR地区的应用[J]. 石油物探, 2003, 42(2): 186-190.
- [17] DONG Yunpeng, ZHANG Guowei, YAO Anping, et al. Deformation and evolution of the Sanligang-Sanyang tectonic mélange belt along the west sector of Xiangfan-Guangji fault[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2003, 38(4): 425-436.
董云鹏,张国伟,姚安平,等. 襄樊-广济断裂西段三里岗-三阳构造混杂岩带构造变形与演化[J]. 地质科学, 2003, 38(4): 425-436.
- [18] LEI Dongning, CAI Yongjian, YU Song, et al. Discussion on characteristic activity of Xiangfan-Guangji fault since the Quaternary, Hubei [J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(6): 38-43, 54.
雷东宁,蔡永建,余松,等. 湖北襄樊-广济断裂第四纪活动特征初步探讨[J]. 地质科技情报, 2011, 30(6): 38-43, 54.
- [19] HBGME. The Regional Geology of Hubei Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
湖北省地矿局. 湖北省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1990.
- [20] YANG Kunguang, CHENG Wanqiang, ZHU Qingbo, et al. A discussion on two times southward thrusting of Xiangfan-Guangji fault in South Dabie Orogen, Central China[J]. Geological Review, 2011, 57(4): 480-494.
杨坤光,程万强,朱清波,等. 论大别山南缘襄樊-广济断裂的两次向南逆冲推覆[J]. 地质论评, 2011, 57(4): 480-494.