

综合地球物理勘探在青川县城活动断层探测中的应用

李大虎¹ 何 强¹ 邵昌盛² 石金虎³ 刘保金³ 顾勤平⁴

(1. 四川省地震局工程地震研究院, 成都 610041; 2. 四川省核工业地质局 282 大队, 四川德阳 618000;

3. 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002; 4. 江苏省地震局工程地震研究院, 南京 210014)

[摘要] 针对通过青川县城区的隐伏活动断层问题, 采用了综合地球物理勘探方法, 查明了平武—青川断裂隐伏段在城区内的展布情况, 经探槽开挖验证所确定的主干断裂及其分支断裂的通过位置和相关参数均真实可靠。青川县城区有 3 条隐伏断裂通过, 最北的一支为平武—青川断裂的主干断层, 总体走向 NEE; 中支和南支为平武—青川断裂的次级分支断层, 走向都是 NE 向。3 条隐伏断裂中的北支和中支断裂错到浅地表 2 m 以下的卵石层。

[关键词] 活断层; 隐伏断裂; 青川; 综合地球物理勘探

[分类号] P631

[文献标识码] A

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分发生的汶川 8.0 级地震, 导致青川县城区遭受了重大破坏。科考发现沿平武—青川主干断裂通过位置出现了条带状破坏地震烈度增高的异常现象^[1], 县城的恢复重建工作受到隐伏断裂和强烈的余震活动等因素的严重制约; 尤其是通过城区的隐伏活断层问题, 对能否原址重建及断裂合理避让起着决定性作用。对于被第四纪沉积物所覆盖的从城区通过的断裂, 其准确的位置需要通过物探的手段来确定。针对城区环境复杂、干扰较强、表层介质横向变化较大等一系列问题, 采用传统的单一的活断层探测方法往往会受到种种限制, 因此, 选择何种探测方法以及如何实施才能达到较好的探测效果成为需要解决的首要问题。本文结合青川县活断层探测的工程实例, 阐述了根据城区的场地条件、物性差异和干扰情况等, 选择了浅层地震反射波法结合折射波法联合勘探以及高密度电法勘探等地球物理勘探方法, 系统地介绍了方法实施过程中的野外数据采集、资料处理和解释等工作, 查明了北东向的平武—青川断裂隐伏段在青川县城区内的展布情况, 为灾后重建提供依据。

1 概 况

青川县城区位于位于龙门山前陆逆冲楔和摩天岭地块分界线附近, 属山间河谷地貌类型, 山体海拔高度一般在 1.5 km 以下, 总体地势西北高、东南低。乔庄河自北而南呈“S”形展布, 右岸为堆积岸, 阶地发育, 为青川县城主城区。在 1:50 000 和 1:200 000 区域地质图上, 平武—青川断裂呈 3 支隐伏于第四系之下从县城北部通过。根据地表调查及钻探揭露结果, 场区主要出露的地层情况如下: 第四系全新统人工填土层 (Q_4^{ml}), 第四系晚更新统一全新统冲洪积层 (Q_{3-1}^{al-pl}) 粉质黏土和砂卵石, 志留系茂县群滑天坡组 (Sh) 绢云母千枚岩。

综上, 砂卵石层和基岩之间的波阻抗差异明显, 在地震时间剖面上能形成有效的波阻抗反射界面, 有利于断层的识别。砂卵石层是本场区的高阻标志层, 其电性特征稳定, 与基岩地层具有明显的电性差异, 根据其差异可以划分出断层在剖面形成的低阻异常条带。场区满足地球物理勘探所需要的物性差异条件, 因此可以开展物探

[收稿日期] 2010-03-26

[作者简介] 李大虎(1982—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事地震安全性评价、地球物理正反演算法的研究等工作,

E-mail: lixiang2006@sina.com。

工作。先是在跨平武—青川断裂的3个分支断层 F_1 、 F_2 和 F_3 布设了11条反射地震测线;在反射波法地震勘探的基础上,在具备勘探条件的复杂构造的重点区段,又进行了3条测线的地震折射波法探测;最后在浅层地震勘探异常标志清晰、场地开阔、电磁干扰小的地段补充了10条高密度电法勘探线验证,测线布置如图1所示。

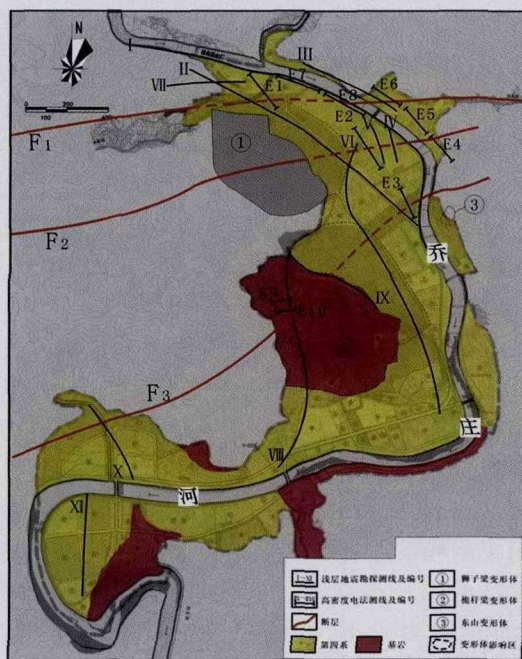


图1 物探测线布置图

Fig. 1 Layout map of geophysical prospecting measuring lines
(底图据成都理工大学和宁波市规划院)

2 浅层地震勘探

浅层地震勘探是探测地下各种地质构造的有效手段之一。其中,反射波法地震勘探是活动断层探测中首选的方法。利用反射剖面上丰富的反射波组特征判定断层的存在并确定其产状等基本参数,与其他方法相比,它在断层定位及其特征的判定上具有较高的精度^[2,3]。研究还发现,地震记录中的初至折射走时资料同样携带了界面构造特征,且具有震相明确、识别可靠等显著优点,可以在一定程度上弥补反射波资料的缺失。因此,在此次活动断层探测中采用了反射波法联合折射波法地震勘探。浅层地震勘探一般适用于在工作环境相对较好的地区探测物性差异大、具有一定规模的地质构造,要把该方法应用到环境复杂、干扰较强的青川县城来探测第四系覆盖层内部的活动断层,还需要解决一系列的技术问题,这主要

包括城区内复杂环境条件下地震波的激发和接收、观测系统的设计和采集参数的选取以及室内资料处理等等。

2.1 野外地震数据采集

本次工作采用具有实时相关处理功能的德国SUMMIT 遥测数字地震仪。该仪器瞬时动态范围达120 dB以上,采样率最低为1/32 ms,频宽1~16 kHz;而且在遥测地震仪的采集站内,地震数据已被数字化,在传输电缆上传输的是编码后的数字信号,数字信号在传输过程中不会引起噪声,因此可以提高地震记录的信噪比^[4]。鉴于本次勘探场区多数位于青川县城繁华地段,无法使用爆破震源,从适应城市工作环境和提高地震资料信噪比的角度出发,抗干扰能力强、激发性能稳定、对城区无破坏性的美国 Minivib 6500 型可控震源成为优选震源。为了提高信噪比,使用了重庆地质仪器厂生产的主频为60 Hz的检波器,采用每串3个检波器,点组合方式接收。在野外数据采集之前,先对地震仪器进行了一致性检测,性能指标都合乎规范后再进行干扰波调查试验,最后是观测系统的选择及采样率、记录长度大等相关参数的确定。

2.1.1 反射波法观测系统和采集参数

a. 干扰波调查。在每条测线施工前,我们都做了干扰波调查试验。干扰波调查试验采用小道间距、长排列接收的工作方式进行(图2)。为了分析地震记录上的干扰波分布情况,捕捉能在地震记录上出现的最浅地层反射,在0 m 偏移距的记录图中可以看出,背景干扰位于初至波之前,整

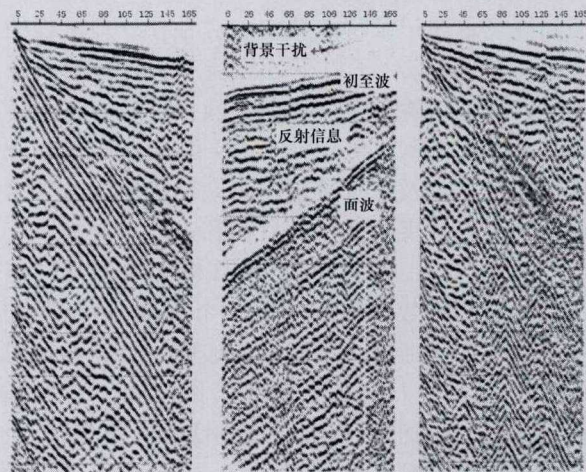


图2 干扰波调查试验

Fig. 2 Survey test for interference wave

个地震波能量的大部分被面波和低频干扰波所占据,在偏移距 200 m 以内可记录到 300 ms 以上的地层反射信息,为后面确定合适的观测系统以及设置工作参数奠定基础。

b. 观测系统和采集参数。地震波的传播随着穿透深度的增大和传播距离的增加其能量变弱、分辨率降低。因此,采用小道间距、小偏移距和短排列接收的工作方法可以保护地震信号的高频成分,提高地震记录的分辨率。采用多次覆盖观测系统进行参数采集可以提高信噪比。根据现场进行的在不同道间距的试验结果比较以及不同偏移距的地震波记录道频谱图的对比研究,最终确定此次反射波法地震勘探的具体工作参数如下:可控震源激发参数采用连续变频扫描方式,扫描频率范围为 30~180 Hz,扫描长度 8 s,起始和终了斜坡取 0.5 s;道间距 2 m,炮间距 8 m,每个地震观测排列采用 120 道接收,多次覆盖观测系统,覆盖次数 15 次。

2.1.2 折射波法观测系统和采集参数

此次折射法地震勘探采用多重追逐相遇观测系统,根据现场试验结果,确定每条测线的具体工作参数如下:道间距 4 m,炮间距 160 m,每个地震观测排列采用 164 道接收。

2.2 地震数据处理

2.2.1 反射波资料处理

数据资料处理采用 Focus 地震反射波软件系统。该系统具备了对野外采集的地震反射波数据处理的基本功能。根据浅层地震勘探数据处理的经验,结合此次勘探的具体环境、测区地质构造特征和现场地震记录特点及室内对各种处理流程的试验对比,特设计了以下处理流程:数据解编及格式转换→增益恢复→叠前去噪→带通滤波→静校正→抽 CMP 道集→NMO 校正及拉伸切除→建立速度模型及速度分析→剩余静校正→共反射点叠加→叠后反滤波→叠后偏移→时深转换。

其中,静校正、去噪、速度分析和偏移是城区活动断层探测数据处理中的几个关键问题(潘纪顺等,2003)。通过反复的试验表明:(1)原始资料中存在的主要干扰有不正常工作道和异常振幅值、初至干扰、面波、低频干扰和线性干扰等,针对不同的干扰波采用相应的方法进行去噪,可以达到提高有效反射能量的目的。(2)为了消除地形起伏和近地表地层介质横向不均匀对地震记录的

影响,采用折射静校正和剩余静校正对数据进行处理,能取得较好的效果。(3)速度的准确求取是地震勘探的重要一环,在速度分析前,采用速度谱分析前宜先作常速度分析,对整个剖面进行变速扫描,初步了解测段整体的速度结构及分布范围;再每 50 个 CMP 道集做一个速度谱,参考速度扫描,求取一个初始的叠加速度;然后,根据初选的 NMO 速度对 CMP 道集进行动校正和剩余静校正处理,并将其结果应用于原始 CMP 道集;最后在剩余静校正后的 CMP 道集上进行第二次速度分析,以获得更为精确的叠加速度。(4)由于探测的对象为隐伏断层,在断层发育的地方,地下地质构造往往很复杂,采用偏移能使地下构造正确归位成像。

2.2.2 折射波资料处理

本次处理过程以初至波有限差分成像方法为主,在波场的正演计算中,先是用 Lecomte 等基于惠更斯原理的波场扩张算子对初至波场传播过程进行动态模拟^[7];然后用 Hole 等人提出的反投影(Backprojection)算法进行反演^[8],得到最终的用于测线下方解释的初至波走时有限差分反演速度结构图。在反演过程中存贮的波场参数成果,如典型测线 I、II 的射线数密度分布图(图 3),除用来对反演结果进行评价外,可用来进行射线分布分析,根据它所反映的射线密度分布情况来圈定反演结果的解释区域,从中识别有关断层形态及展布特征的信息用于解释工作^[3]。

2.3 典型测线解释

城区活动断层探测的主要目标是要确定断层的位置和产状,鉴于篇幅所限,在此选取 2 条典型的测线进行介绍。图 4 在反射波叠加时间剖面上,通过对剖面上的波组对比和层位的追踪就可以确定反射层的构造形态、接触关系及断层的分布情况^[6]。图 5 为测线 I 和测线 II 折射波资料经过有限差分反演得到的速度结构图,构造异常在速度结构图上会表现为速度分布特征的横向差异或突变,因此,可以根据速度分布的横向变化,结合地质和反射波勘探等资料对断裂构造进行分析判断。

a. 测线 I。该测线沿乔庄河西南岸的滨河路布设,它控制了平武—青川断裂的 3 个分支断层 F_1 、 F_2 和 F_3 ,全长 2 592 m。经室内资料处理得到了测线 I 的浅层地震反射时间剖面图(图 4-

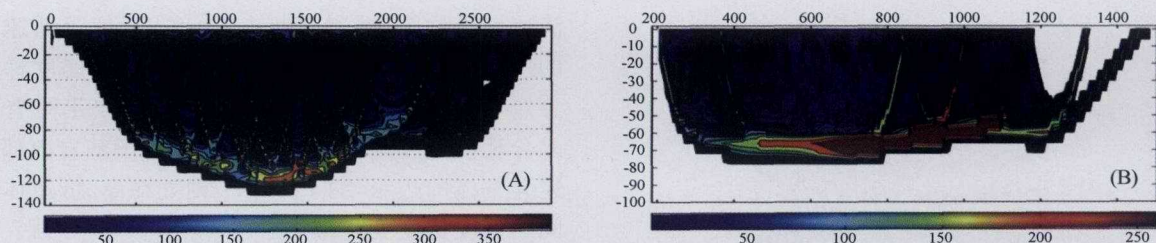


图3 射线密度分布图

Fig. 3 Ray density distribution map

(A)测线 I; (B)测线 II

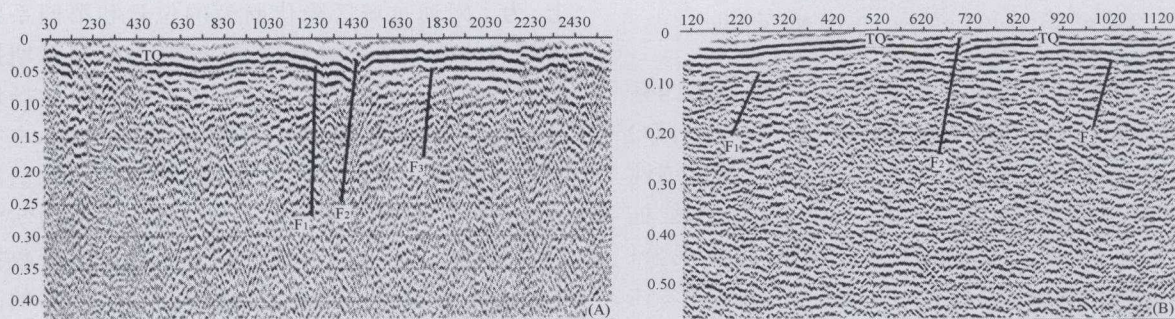


图4 测线 I 反射波叠加时间剖面图

Fig. 4 A superposition of the reflected wave profiles

(A)测线 I; (B)测线 II

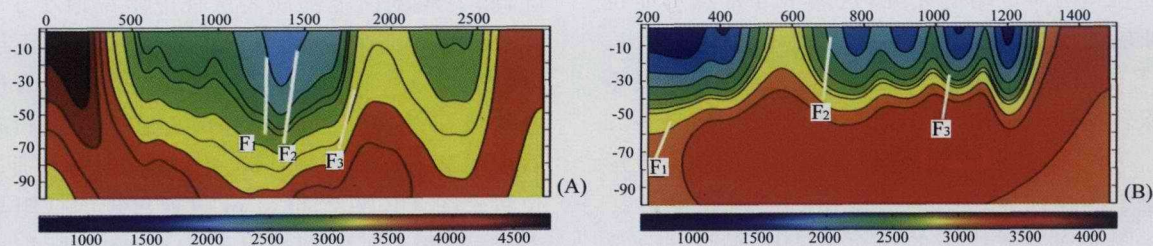


图5 初至波走时有限差分反演速度图

Fig. 5 Finite-difference tomography of profile from first-arrival travel times

(A)测线 I; (B)测线 II

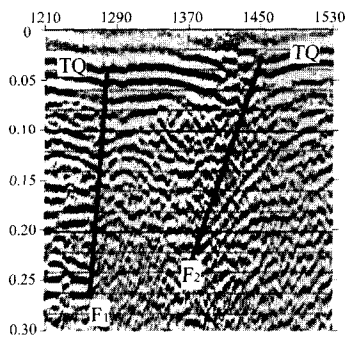
A)。

从测线 I 反射波叠加时间剖面图上的反射信息所显现的基本形态来看, TQ 反射同相轴在整条测线清晰可辨, 反射能量也较均衡, 在测线桩号 0~300 m 区段基岩出露, 在测线的其他区段 TQ 反射界面起伏较为平缓, 在测线中间的 1 450 m 桩号附近存在明显的不连续现象, 在测线桩号 1 280 m 附近 TQ 反射同相轴出现扭曲, 基岩内部的反射特征在其两侧也有较为明显的差异, 说明该测线上仅存在错断第四系的断层 F_2 ; 另外, 在测线桩号 1 810 m 附近, TQ 下方的同相轴存在反射能量的明显变化。根据断层判别依据, 推测在该 2 个异常点附近可能都有断层存在, 在剖

面图中分别用 F_1 和 F_3 标出。

F_1 是一个高倾角的逆断层, 略向西倾, 在地面上的垂直投影点位于测线桩号 1 279 m 附近; F_2 也是一个逆断层, 它在剖面上倾向西, 在地面上的垂直投影点位于测线桩号 1 451 m 附近(图 6); F_3 在剖面上倾向北西, 为逆断层, 它在地面上的垂直投影点位于测线桩号 1 807 m 附近。根据时深转换计算可知, F_1 , F_2 和 F_3 可分辨的上断点埋深分别为 20~23 m, 15~17 m, 23~26 m。

b. 测线 II。测线 II 控制了平武—青川断裂的 3 个分支断层 F_1 , F_2 和 F_3 , 全长 1 198 m, 经室内资料处理得到了测线 II 的反射波叠加时间剖面图, 如图 4-B 所示。

图 6 F_1 和 F_2 在剖面图Fig. 6 F_1 and F_2 on display on the profile

在测线Ⅱ的叠加时间剖面图中,来自第四系的底界反射 TQ 出现在双程走时 40 ms 以上,TQ 之下的基岩内部还有一些反射信息,但其连续性都较差,无法进行追踪、对比。TQ 震相在测线桩号 700 m 附近有明显的同相轴扭曲、错断现象;而在测线的其他区段,TQ 反射同相轴的连续性都较好,反射能量也较均衡,说明该测线上仅存在 1 条错断第四系的断层 F_2 。另外,在测线桩号 270 m 和 1 020 m 附近的下方,基岩内部的剖面特征在其两侧也略有差异,这两个异常点可能也是断层的反应,在剖面图中分别用 F_1 和 F_3 标出。 F_1 、 F_2 、 F_3 均在剖面上倾向北西,为逆断层,根据时深转换计算可知,其上断点的埋深约为 51~55 m, 7~9 m, 35~37 m;它们在地面上的垂直投影点位于测线桩号 270 m, 699 m, 1 029 m 附近。

图 5-A 为测线Ⅰ的初至波走时有限差分反

演速度结构图,推测的断点 F_1 和 F_2 位于低速区的边缘,而 F_3 则位于高、低速交界处的速度梯度急速变化带上;图 5-B 为测线Ⅱ初至波走时有限差分反演速度结构图,推测的 F_1 位于基岩内部高速异常体的边缘,而 F_2 和 F_3 则处在高、低速体之间的速度梯度变化带上。

3 高密度电法勘探

在分析和研究浅层地震勘探工作成果的基础上,为了对通过城区隐伏断裂的位置和第四系覆盖层内的错动情况进行探测,同时为指导后期探槽的开挖选址,我们在可以开展探测工作的场地又进行了 10 条高密度电法测线的探测工作,本文选取 2 条典型测线进行介绍,测线具体布置情况如图 1 所示。数据处理采用 res2dinv 软件包实施成像重建,选用了圆滑约束最小二乘法进行数据的反演成像得到了 2 条典型测线(E_1 和 E_2)的高密度电阻率法二维反演等值断面图(图 7)。

在高密度电阻率二维反演等值断面图上显示了断裂通过的位置和覆盖层内部分层位的错动情况,图 7-A 剖面上部浅表层视电阻率值小于 $100 \Omega \cdot m$ 的局部区域,为探测场区内粉质黏土层的电性反应,中部的相对高电阻层则是砂卵石层的电性特征;剖面 24 m 附近绢云母千枚岩和砂卵石层明显不连续的异常区,推测为 F_1 断裂通过的位置。图 7-B 在剖面 38 m 附近出现的低阻异常条带,推测为 F_2 断裂通过的位置,和实际探槽开

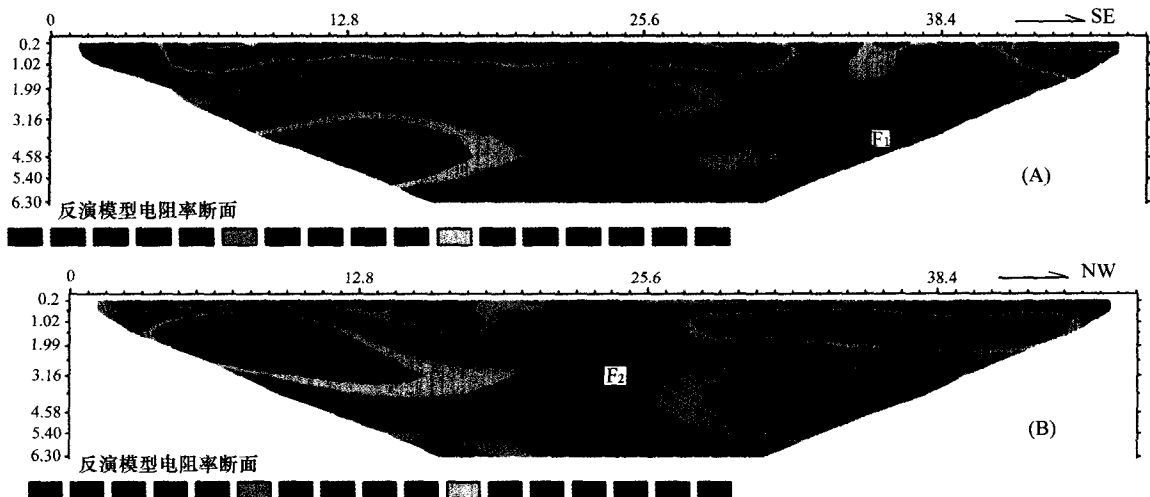


图 7 高密度电阻率法二维反演等值断面图

Fig. 7 High density resistivity two-dimension inversion isoline sectional drawing

(A)测线 E_1 ; (B)测线 E_2

d. 为提高浅层活动断层地震勘探的准确性和解释的分辨率,在以后的工作中可以开展活动断层的 3D 抗干扰高分辨率浅层地震勘探,并通过适当的正演模拟方法研究来分析在活动断层地震勘探中,震源位置和主频以及断层埋深、断层倾角及规模、断层上覆地层属性变化等对地震记录的影响。这也是今后地震勘探研究与应用工作努力的一个方向。

本项目在野外探测过程中还有四川省地震局工程地震研究院其他多位同事参加。其中,浅层地震勘探工作实施单位由中国地震局地球物理勘探中心完成。在论文撰写过程中得到了四川省地震局周荣军研究员的悉心指导和帮助,在此向他们表示衷心的感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 周荣军,黄润秋,雷建成,等. 四川汶川 8.0 级地震地表破裂与震害特点[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(11):2174—2183.
- [2] 方盛明,张先康,刘保金,等. 探测大城市活断层的地球物理方法[J]. 地震地质,2002,24(4):606—613.
- [3] 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]. 地学前缘,2003,10(1):93—104.
- [4] 刘保金,张先康. 城市活断层探测的高分辨率浅层地震数据采集技术[J]. 地震地质,2002,24(4):524—532.
- [5] 徐朝繁,张先康,刘保金,等. 高分辨折射地震资料处理方法及其应用[J]. 地球物理学进展,2005,20(4):1052—1058.
- [6] 潘纪顺,刘保金,朱金芳,等. 城市活断层的抗干扰高分辨率浅层地震勘探研究[J]. 中国地震,2003,19(2):148—157.
- [7] Lecomte I, Gjoystal H, Dahle A, *et al.* Improving modeling and inversion in refraction seismic with a first-order Eikonal solver[J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48: 437—454.
- [8] Hole J A. Nonlinear high-resolution three-dimensional seismic travel time tomography[J]. J Geophysics Research, 1992, 135: 6553—6562.
- [9] 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司. 青川县人民政府青川县城重建项目乔庄镇勘察报告[R]. 四川青川:青川县防震减灾局,2009.
- [10] 中国地震局物理勘探中心郑州应用技术研究. 青川县浅层地震勘探报告[R]. 成都:四川省地震局,2009.

Application of comprehensive geophysical exploration to the detection of active fault in Qingchuan County districts, Sichuan, China

LI Da-hu¹, HE Qiang¹, SHAO Chang-sheng²,
SHI Jin-hu³, LIU Bao-jin³, GU Qin-ping⁴

1. Institute of Engineering Seismology of Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China;
2. No. 282 Brigade of Sichuan Nuclear Geological Bureau, Deyang 618000, China;
3. Research Center of Exploration Geophysics, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China;
4. Institute of Engineering Seismology of Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China

Abstract: For the buried active fault in Qingchuan County district of Sichuan Province, the authors use the integrated geophysical exploration method to identify the distribution conditions of the buried active fault in the city districts of the Pingwu-Qingchuan, the specific location and associated parameters of the main fault and its branches through the trench excavation verification to be reliable. There are three hidden faults in Qingchuan County districts, the most northern one is the main fault in the Pingwu-Qingchuan fault. Its general trend is NEE. The middle and south branches are sub-branches of the fault rupture of the Pingwu-Qingchuan fault. Their trends are NE. Their middle and south branches fault ruptures of the 3 buried faults extend to the pebble bed under 2 m beneath the surface.

Key words: active fault; hidden fault; Qingchuan; comprehensive geophysical exploration