



综合物探方法在张家口某工程场地地震安全性评价中的应用研究^①

温 超¹, 郝海强², 汪慎文², 温来福², 刘国辉²

(1.河北省地震局,河北 石家庄 050031; 2.石家庄经济学院,河北 石家庄 050031)

摘要:结合地质和遥感图像解译资料,以物探方法查找活断层是行之有效的方法。针对单一的物探方法在反演解释中具有多解性的弊端,本文提出以高密度电阻率法为主,浅层地震反射波法为辅的综合物探勘察组合模式。经实际钻探证明,这种综合物探模式对隐伏活断层的勘察是完全可行的,并具有较强的实用推广性。

关键词:综合物探;地震安评;高密度电阻率法;浅层地震反射波法

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0271-05

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0271

Application of a Comprehensive Method for Geophysical Prospecting to Seismic Safety Evaluation on an Engineering Site in Zhangjiakou City, China

WEN Chao¹, HAO Hai-qiang², WANG Shen-wen², WEN Lai-fu², LIU Guo-hui²

(1. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;

2. Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: The survey of a buried active fault is the primary task of a seismic safety evaluation in Zhangjiakou City, China. Geophysical exploration using geological data and the remote sensing interpretation of data is one of many effective methods for locating the active fault. This study used a comprehensive geophysical exploration model that combined the high-density resistivity method and the shallow seismic method. The faults, which were approximately 100 m deep, were found using the high-density resistivity method. This method provided the electrical properties and electrical structures of the active fault. Shallow seismic exploration is one of the most effective geophysical exploration methods and offers the highest resolution in the detection of active shallow urban faults. It also provides the accurate location and size of a fault and can determine the fault's strata deformation age and related parameters. The high-density resistivity method can also improve the reliability of the shallow seismic method and the combination of these two methods can determine the fault's formation properties more accurately. Actual drilling data proved that this comprehensive model is one of the best methods for active fault investigation. It has strong promotional and practical value.

Key words: comprehensive geophysical prospecting; seismic safety evaluation; high-density resistivity method; shallow seismic method

0 引言

工程场地地震安全性评价工作(简称“安评”)的任务是评价未来一定时段内(工程)场地(或区域)遭受地震威胁的可能性及相应的程度,包括地震动及地面破坏两方面的内

容,为工程建设抗震设防及已有工程的抗震可靠性分析、建设规划和其他有关问题(如投资决策、地震保险)提供依据^[1]。

^① 收稿日期:2014-04-20

基金项目:河北省科技计划项目(13210331);河北省地震科技星火重点项目(201307)

作者简介:温 超(1981—),男,工程师,主要从事地震安全性评价及相关工作。E-mail:13833469830@126.com

通讯作者:郝海强(1988—),男,河北邢台人,硕士研究生,主要从事水工环探测技术方向的研究。E-mail:493815446@qq.com

活动断层是诱发地震的主要原因,也是破坏城市建筑设施的主要因素^[2-4]。20世纪以来世界发生了多起强烈地震,对城市造成严重的破坏,地震和地质体活动的直接原因是活动断层的作用。因此,城市安评工作的主要任务是查明活动断层空间位置,评估活动断层地震危险性和危害程度,使城市重要建筑设施有效地避开活动断层,最大限度减轻可能遭遇的地震损失^[5-6]。

根据《工程场地地震安全性评价》(GB17741-2005)的要求,工程场地地震安全性评价近场工作包括场区及其外延25 km范围内主要断层的位置、断层活动性等内容。在基岩出露条件好的场区,通过地质调查手段便可以很好解决^[7]。而在第四系覆盖地区,则需要结合遥感图像解译资料,主要应用物探方法进行追索、定位,提供地下隐伏活动断层分布信息,然后利用少量的钻探工作给予验证的勘察方式。

目前高密度电阻率法和浅层地震反射波法成为勘察隐伏活断层的两种常用方法。其中高密度电阻率法具有工作效率高,能够很好地确定隐伏活断层的存在性;浅层地震法则探测分辨率高,可以准确地确定活断层的位置、规模及空间分布情况。实践表明,由于单一物探方法在反演解释中存在不可避免的多解性^[8],上述任何一种物探方法都难以完成对城市隐伏断层的精细勘察,因此,通过采用综合物探技术和综合解释的思路,可使各物探方法间实现优势互补,取长补短,相互佐证,避免或减少其多解性,以提高物探资料解释的精度和可靠性^[9]。

研究适合城市探测地下隐伏活动构造的综合物探组合方式是近年来人们所探索的重要课题。本文以张家口某工程场地为例开展了相关内容的试验研究,提出了结合地质和遥感图像解译资料,采取以高密度电阻率法为主,浅层地震反射波法为辅的综合物探组合模式,取得了较好的探测效果。

1 场区地震地质特征

1.1 场区地貌、地质特征

张家口某工区位于其市区的东北部,属张家口坝下中低山间盆地的断陷边缘,其紧邻东北侧边坡陡峭的太平山,场区内为第三纪晚更新世(O_3)以来的坡冲洪积砂卵砾石层所覆盖,数十米埋深的基岩为下白垩纪张家口组(K_{1z})凝灰岩分布。

新构造时期以来,在大范围内不同断块之间表现出很大的构造差异运动。垂直升降运动具有间歇性抬升,并遭受河流切割,形成现代河谷和各级冲积阶地和洪积阶地。

1.2 近场区活动断裂

场区位于张家口—渤海活动构造带和山西活动构造带的交汇部位,受到两条构造带的复合作用,表现出NW向和NE向两组断裂的发育和改造,形成复杂的盆断结构,NW向构造占据更为主导地位,而NE向构造在卫片上线性构造清晰。为查明近场区活动断裂的分布,我们对该近场区的卫星遥感图片进行了构造解译,由其解译成果图可见

(图1),近场区内发育有4条断裂,其走向分别为:NE—NNE向和NW—NW向两组,分布于不同的构造部位。

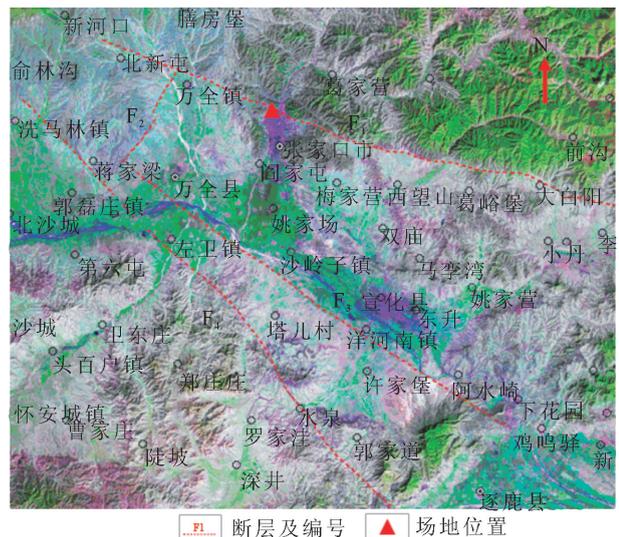


图1 张家口—宣化盆地卫星影像与断层解译图

Fig. 1 Map of satellite image and fault interpretation of Zhangjiakou—Xuanhua Basin

其中, F_1 为NW向的张家口断裂,从本工区及邻域通过;西部 F_2 为NE—NNE向的万全断裂,南部发育NW向的洋河隐伏断裂(F_3)和洗马林—水泉断裂(F_4)。

张家口断裂 F_1 是华北地区著名的张家口—渤海地震构造带西部的一条主要断裂,控制了张家口—宣化盆地的北部边界,总体走向 310° ,倾向SW,倾角 60° ,甚至更大,呈正断或逆断走滑性质。前人在翠屏庵村北冲沟中发现上更新统粉质黏土和70 m厚的磨圆度中等的沙砾石层被错段,断面上可见摩擦镜面和3 cm厚的紫红色断层泥,断层上覆盖1 m厚的粉质黏土和20 cm厚的残坡物。断层泥和上覆粉质黏土的热释光年龄分别为距今 (117.53 ± 9.99) ka和 (24.63 ± 2.09) ka,表明断层在晚更新世初有过活动^[10]。张家口断裂或其伴生的次生断裂属通过本工区的隐伏活动断层。

2 综合物探方法的选取

为查明工区场地及其近区地下隐伏断层,特别是活动断层的分布,在上述已知地质、遥感解译资料的基础上,开展了以查明地下隐伏活动断层为主要目的的综合物探方法有效性试验研究。

2.1 隐伏活动断层地球物理特征及综合物探方法选择

不论是何种类型断层,无论是基岩还是第四纪松散覆盖层中的断层错动,都会形成松散破碎或韧性剪切带,而此带与两侧岩土体或两盘岩土体间存在着一定程度的物性(弹性、密度、磁性、电性)差异,从而为开展物探方法提供了必要的物质基础和地球物理前提条件。活动断层是指晚更新世以来形成的断层,即 O_3 以来的松散土层中的断层。基于上述隐伏活动断层及其地球物理特征可知,位于城区的活动断层两侧一般具备弹性(波速、波阻抗)和电性(导电性、介电性)明显的物性差异,因此浅层地震勘探^[11]和电法勘探是应

用于探测地下隐伏断层的基本方法。鉴于单一方法存在多解性,同时还考虑到每一种物探方法具有不同的探测优势、工作效率和成本,在分析研究两种方法的优缺点基础上,实现优势互补,达到最佳组合方式,使其取得良好的勘探效果。

浅层地震勘探应用于隐伏断层探测,最常用的是反射波法。反射波法的前提条件为不同地层间应存在明显的弹性波阻抗差异,在其探测深度范围内具有标志层存在,使用多次叠加技术还可使其具有较强的抗干扰能力,并对观测场地条件要求不高,勘探深度较大,探测精度也高。隐伏活断层覆盖层和断层破碎带充填物与基岩的波阻抗不同,从而为浅层地震勘探反演解释提供了前提,但其成本较高,工作效率低,又往往存在对所划分地层的属性难以准确判断等不足。

高密度电阻率法具有野外工作便利、效率高、成本较低、受地形影响小等优点,近年来成为隐伏活断层勘察中最常用的电法方法之一。断层形成过程中两盘发生错动,无论是正断层、逆断层还是走滑断层都会形成破碎充填带,必然与两盘物质有所差异,电性差异便由此产生,如果破碎带中充水必然会呈现低阻现象,从而为高密度电阻率法提供了前提条件,异常反映直观,但因存在体积响应,有反演精度不够的不足。

综上所述,高密度电阻率法可对地下百米深度范围内的断层进行调查,提供活动断层的浅部电性特性和电性结构。浅层地震勘探是城市活动断层浅部探测中分辨率最高、最为有效的物探方法之一,可以提供断层或隐伏断层的准确位置、几何形态及断层带宽度、断层活动,在资料完整的条件下研究地层形变时代等有关参数,对了解构造活动历史,研究强震发生的可能性等具有重要作用。高密度电阻率法与浅层地震勘探法相互配合,可提高浅层地震勘探法某些特殊位置解释的可靠性和综合判断地层属性^[12]。鉴于上述地震反射波法和高密度电阻率法在隐伏活断层勘察中的优缺点,提出在工程场地安评中选择以高密度电阻率法为主,浅层地震反射波法辅助佐证的综合物探组合模式。即:先以高密度电阻率法初步确定隐伏活断层的位置所在,再利用浅层地震反射波法对断层的典型或重点部位进行佐证核实、精确判定其具体类型、延展情况及规模大小,最后进行钻孔验证。

2.2 物探方法原理及参数设置

2.2.1 高密度电阻率法

本次工作中使用重庆地质仪器厂生产的 DZD-6A 多功能直流电法(激电)仪和 DUK-2A 高密度电法测量系统,采用温纳观测装置,电极距 5 m,可达最小分辨为 2.5 m,单次测量的最大展布为 150 m。反演软件使用加拿大 RTomo 电法数据处理与解释软件。

2.2.2 地震反射波法

本次浅层地震勘探工作中,采用美国 GEOMETRICS 公司的 STRATAVISORNZXP 地震仪、采用 100 Hz 检波器接收,80 kg 夯击震源。野外数据采集过程中,采用单边放炮多次覆盖反射波法观测系统,即:接收排列在前、激发炮点在后、下倾方向激发、上倾方向接收,72 道接收,24 道备用,9

次覆盖,向前连续追踪的观测方式。其中,道间距 3 m、最小偏移距 6 m,炮间距 12 m,记录长度 0.6 s,采样率 0.25 ms,低截频率 15 Hz,高截频率为 250 Hz,每炮垂向叠加 15 次以上。资料处理应用加拿大 Vista 地震处理软件。

3 综合物探资料解释

3.1 物探测线布置

根据地质和卫星遥感图片解释成果资料,为确定张家口断裂或其次生断裂在该区的准确位置,利用上述提出的综合物探模式和技术措施对其开展了相应的勘察工作。在现场踏勘的基础上,为有效的控制隐伏断层在工程场地范围内的分布,在场地东西两侧垂直该断层可能走向的方向上分别布置了 3 条高密度电阻率法测线和 1 条浅层地震反射波法测线(图 2),测线布置的具体位置见表 1。

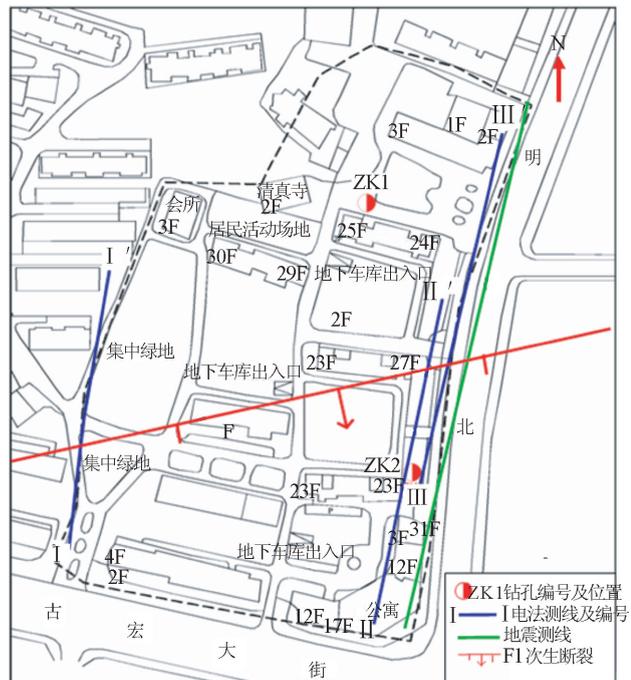


图 2 物探工作布置图

Fig.2 Layout of the geophysical exploration

表 1 地球物理测线布置表

Table 1 Layout of geophysical surveying lines

测线编号	测线端点坐标		剖面长度/m
电法 I-I'	起点	114°52'47.76" 40°50'05.24"	150
	终点	114°52'48.54" 40°50'09.86"	
电法 II-II'	起点	114°52'55.61" 40°50'03.61"	150
	终点	114°52'59.45" 40°50'08.16"	
电法 III-III'	起点	114°52'56.34" 40°50'05.80"	150
	终点	114°52'56.97" 40°50'10.25"	
地震	起点	114°52'55.61" 40°50'03.61"	510
	终点	114°53'04.31" 40°50'22.45"	

3.2 综合物探资料解释

为进一步佐证断裂的存在及其产状,在其 II-II' 和 III-III' 旁边平行布置了浅层地震反射波法勘探剖面(图 2),基

本覆盖两剖面的分布,其反演结果见图3。由地震反射波时间剖面可见(图4),在剖面桩号130 m(CDP90)左右,反射波同相轴出现明显错动,按其同向轴相互错动位置,解释为倾向南的正断层,断距为50 m左右。这与Ⅲ-Ⅲ'电阻率断面低阻异常推断的断层位置完全吻合,从而也佐证了高密度电阻率法推断结果。

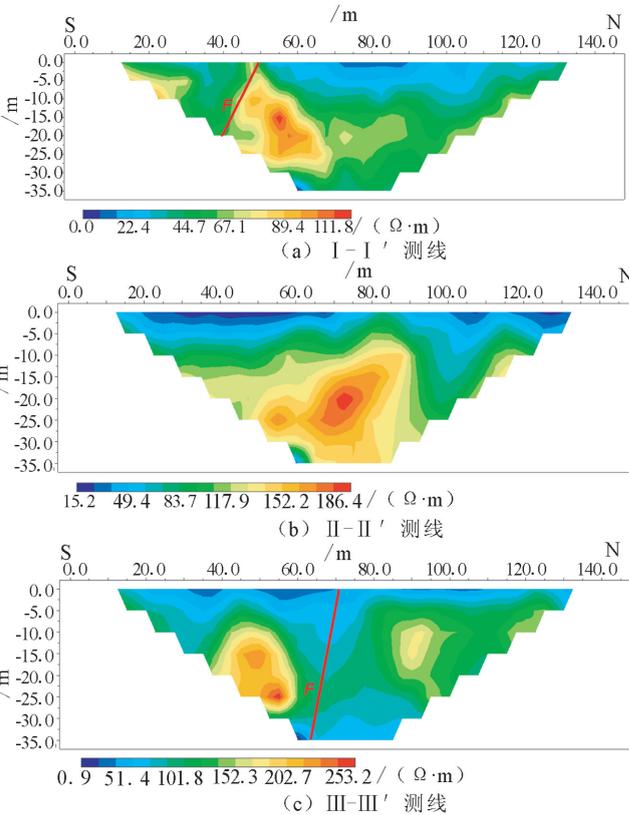


图3 高密度电阻率法各测线反演结果图

Fig.3 Inversion results of each line by using high density resistivity method

上述综合物探资料解释表明,高密度电阻率法所确定的断层与浅层地震勘探法所发现的断层位置是一致的,说明高密度电阻率法探测地下隐伏活动断层的有效性。结合 I-I' 剖面的解释推断断层位置可得出以下结论:由于张家口断裂走向为 NWW 向,而推断断裂走向为 NNW 向,故推断该断裂属张家口断裂的次生断裂,从该测区内穿过(图2),根据近场区活动断裂资料知该断层为晚更新世活动断层^[10]。为验证其综合物探探测效果,在所推断的断层两侧各布验证钻孔 ZK1 和 ZK2(图2)。

验证钻探结果表明(图5),北侧 ZK1 钻孔处第四纪覆盖层厚度为 11.5 m,覆盖层下基岩为凝灰岩;而南侧 ZK2 钻孔处第四纪覆盖层厚度为 45 m,其下为基岩凝灰岩。证实了该地下隐伏断层的存在,从而验证了上述所综合物探方法的有效性。

4 结语

在张家口某工程场地进行地震安全性评价中,结合其地质和遥感解译资料,利用综合物探方法查明了张家口断裂在

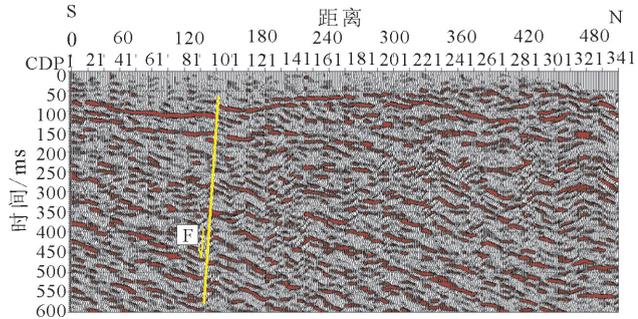


图4 浅层地震剖面地质解释图

Fig.4 Map of geological interpretation of shallow seismic profile

ZK1 钻孔柱状图					ZK2 钻孔柱状图						
孔口标高/m: 784.55 勘探深度/m: 35					孔口标高/m: 780.27 勘探深度/m: 50						
地层编号	层底高程/m	层底深度/m	分层厚度/m	柱状图	岩性	地层编号	层底高程/m	层底深度/m	分层厚度/m	柱状图	岩性
①	780.05	4	4	[Symbol]	杂填土	①	779.6	0.6	0.6	[Symbol]	碎石
②	773.05	11.5	7.5	[Symbol]	黄土状粉土	②	778.8	1.4	0.8	[Symbol]	卵石状粉土
③	749.55	35	23.5	[Symbol]	凝灰岩	③	774.7	5.5	4.1	[Symbol]	碎石
④	735.27	45	39.5	[Symbol]	凝灰岩	④	735.27	45	39.5	[Symbol]	卵石
⑤	730.27	50	5	[Symbol]	凝灰岩	⑤	730.27	50	5	[Symbol]	凝灰岩

图5 验证钻孔柱状图

Fig.5 Histogram of verified drills

该测区内的准确位置,通过高密度电阻率法和浅层地震反射波法推断出该断层为向南陡倾斜的活动正断层,其断距为50 m左右。经钻探验证表明上述推断结论是正确的,可作为该场地地震安全性评价的依据。

理论与实践表明,在城市地震安全性评价中,结合地质和遥感解译资料,以高密度电阻率法为主,浅层地震反射波法佐证为辅的综合物探组合模式,对于有效勘察地下隐伏活动断层的精细结构是完全可行的,它是现有的浅层物探方法兼顾探测效果、效率和成本的最佳组合,既可以避免单一方法的多解性,又能有效地提高城市条件下的探测精度,该模式具有较强的实用推广性。

参考文献(References)

[1] 邓起东,闻学泽.活动构造研究——历史、进展与建议[J].地震地质,2008,30(1):1-30.
DENG Qi-dong, WEN Xue-ze. A Review on the Research of

- Active Tectonics——History, Progress and Suggestions[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(1): 1-30. (in Chinese)
- [2] 王银, 杜克平, 于贵华. 城市活动断层探测中的浅层地震勘探数据库建设——以石嘴山市活动断层探测为例[J]. 地震工程学报, 2014, 36(1): 186-194.
WANG Yin, DU Ke-ming, YU Gui-hua. Database Construction of Shallow Seismic Exploration for Active Fault Detection in Urban Areas: a Case Study of Shizuishan[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1): 186-194. (in Chinese)
- [3] 李碧雄, 田明武, 莫思特. 水库诱发地震研究进展与思考[J]. 地震工程学报, 2014, 36(2): 380-386, 412.
LI Bi-xiong, TIAN Ming-wu, MO Site-te. Research Progress and Thoughts on Reservoir-induced Seismicity [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(2): 380-386, 412. (in Chinese)
- [4] 张守洁, 朱泽, 哈辉. 我国农村震害及农居地震安全工程典型案例分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(4): 936-944.
ZHANG Shou-jie, ZHU Ze, HA Hui. Analysis of Typical Cases of Earthquake Damage in Rural Areas of China and Earthquake Safety Projects for Rural Houses in Recent Years [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 936-944. (in Chinese)
- [5] 张合, 扈本娜, 刘国辉. 综合物探方法探测城市隐伏活动断层的研究[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(6): 776-780.
ZHANG he, HU Ben-na, LIU guo-hui. Research of Integrated Geophysical Exploration Method in Detecting Urban Buried Active Faults[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2012, 9(6): 776-780. (in Chinese)
- [6] 尚浩, 郭秀军, 杨建. 综合物探技术在滨海地区浅层断层探测中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(6): 174-175.
SHANG Hao, GUO Xiu-jun, YANG Jian. Application of Integrated Geophysical Prospecting in Shallow Fault Detection in Coastal Area[J]. China Water Transport(Seceod half), 2009, 9(6): 174-175. (in Chinese)
- [7] 陈蜀俊, 罗登贵, 甘家思. 浅层地震勘探在工程场地地震安全性评价近场工作中的应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(5): 463-466.
CHEN Shu-jun, LUO Deng-gui, GAN Jjia-si. The Applicaton of Shallow Seismic Exploration to the Near-site Researches on the Seismic Safety Evaluation of the Consiruction Sites[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2004, 28(5): 463-466. (in Chinese)
- [8] 刘国辉, 郝海强, 温来福. 综合物探在河北涿源明长城下采空塌陷区勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(5): 714-718.
LIU Guo-hui, HAO Hai-qiang, WEN Lai-fu. Application of Comprehensive Geophysical Prospecting in the Survey of Collapse of Goaf bellow the Great Wall of Ming Dynasty of Hebei Laiyuan[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(5): 714-718. (in Chinese)
- [9] 杜良, 葛宝, 朱丽丽. 综合物探技术在隐伏断层探测中的研究与应用[J]. 工程勘察, 2012(1): 81-85.
DU Liang, GE Bao, ZHU Li-li. The Research and Application of Comprehensive Geophysical Exploration Technique to Buried Fault Detection[J]. Geotechial Investigation & Surveying, 2012(1): 81-85. (in Chinese)
- [10] 尤惠川, 邵翠茹, 杨歧焱. 张家口断裂发现第四纪晚期活动证据[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(4): 474-477.
YOU Hui-chuang, SHAO Cui-ru, YANG Qi-yan. Some Active Evidences in Late Quaternary of Zhangjiakou Fault[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(4): 474-477. (in Chinese)
- [11] 赵富有, 王世煜, 王典. 横波地震勘查技术在长春市活断层探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 284-288.
ZHAO Fu-you, WANG Shi-yi, WANG Dian. Application of Sismic Shear Wave Prospecting in Detection of Active Faults in Changchun City[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1): 284-288. (in Chinese)
- [12] 李大虎, 何强, 石金虎. 隐伏活断层的综合地球物理勘探方法——以青川县城区活断层为例[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2): 164-169.
LI Da-hu, HE Qiang, SHI Jin-hu. Comprehensive Geophysical Exploration Methods of Hidden Active Faults——An Example of Qigchuan Country District hidden Active Faults[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(2): 164-169. (in Chinese)