

胡毅力, 温一波, 段继平, 太树刚, 王刚, 李建有, 王朝进, 杨江华, 2010. 滇池盆地东缘白邑-横冲断裂南段的浅层地震勘探研究. 震灾防御技术, 5(4): 451—460.

滇池盆地东缘白邑-横冲断裂南段的 浅层地震勘探研究¹

胡毅力¹⁾ 温一波²⁾ 段继平³⁾ 太树刚³⁾ 王刚³⁾
李建有³⁾ 王朝进³⁾ 杨江华³⁾

1) 云南大学地球物理系, 昆明 650091

2) 云南大学城建学院, 昆明 650091;

3) 昆明南方地球物理技术开发有限公司, 昆明 650223

摘要 本文用浅层地震反射波法对可能穿越昆明主城区东部第四系覆盖区的白邑-横冲断裂南段进行了探测, 结果表明: 采用浅层地震反射波法探测隐伏断层是有效的, 在滇池盆地东缘, 白邑-横冲断裂南段东支在隐伏区存在, 断面接近直立, 视倾角约 80°, 具有高倾角张性正断性质, 基岩垂直错距为 10—13m, 断裂规模由北向南减小; 同时, 没有发现西支次级断层存在迹象。据土层测龄结果, 东支断裂最新活动时代为第四纪中更新世晚期。

关键词: 白邑-横冲断裂 浅层地震勘探 反射波法 隐伏断层

引言

在昆明主城区地震小区划工作中, 对已有资料的分析 and 野外地质调查推断 (段永康等, 2008), 滇池盆地东缘白邑-横冲断裂的南段有可能穿越昆明主城区东部第四系覆盖区。为此, 需要追踪查明推断白邑-横冲断裂南段是否存在? 若存在则需要确定其位置、走向和上断点埋深。在追踪探测中, 对隐伏断层的探测主要采用地震反射波法 (周绪文, 1989; 何正勤等, 2010; 姚姚, 2006; 刘保金等, 2007; 连玉平等, 2007; 何正勤等, 2007; Robert 等, 2000), 并通过浅层地震反射波法完成了隐伏断层的野外调查、物探剖面、地质解释、钻孔验证等分析, 结果表明白邑-横冲断裂南段东支确实是存在的。

1 白邑-横冲断裂的研究现状

滇池盆地是滇东高原裂陷带规模最大的第四纪继承性断陷盆地。盆地主要受南北向普渡河第四纪活动断裂控制, 同时还受北东向等多组断裂第四纪活动影响, 成为较复杂的断陷盆地; 盆地内存在第三、第四系湖积、冲积、洪积及残坡积等多种沉积类型的复杂组合, 沉积

1 基金项目 云南省自然科学基金 (2007DOBM) 资助

[收稿日期] 2010-05-16

[作者简介] 胡毅力, 男, 生于 1955 年。1982 年毕业于云南大学地球物理系。副教授。主要从事地震学、实验地球物理及工程物探等工作。E-mail: yihu929@163.com

物厚度变化较大、相变复杂而剧烈。

白邑-横冲断裂是古滇池盆地东缘的一条第四纪活动性断裂,主要发育于古生界,并经历多期构造运动。它北起嵩明白邑盆地西缘,往南经旧关、乌龙、高坡村、果林水库、新册村、吴家营、郑家营、万溪冲东侧,止于横冲南,全长约 70km,总体走向近南北,倾向东或西,倾角较陡(60°—85°)(云南省地质科学研究所,2003;云南省地质矿产局,1987)。断裂北段控制了白邑盆地的发育,受断裂活动影响白邑盆地西缘无 II、III 阶地,表明第四纪晚更新世以前断裂活动较强烈。在断裂的中段,旧关村北断裂通过一山垭口,覆盖数米厚的晚更新统残坡积红土(TL 测年为 $(18.39 \pm 1.56) \times 10^4 \text{a B.P.}$),无断错变形迹象;而在果林水库南至大新册村段,断裂破碎带上覆晚更新统残坡积红土层(底部 TL 测年为 $(21.62 \pm 1.84) \times 10^4 \text{a B.P.}$)(段永康等,2008),无构造变动形迹。

在大新册村以南,白邑-横冲断裂南段控制了古滇池盆地东部边缘,地貌反映清晰。此段断裂进入昆明新城区域,发育于泥盆纪、石炭纪、二叠纪等石英砂岩、白云岩、石灰岩等地层,除局部出露地表外,多为第四系所覆盖。在万溪冲西,局部地段经侵蚀,断裂地貌表现为断阶台地。槽探研究表明,中更新世覆盖层(TL 测年为 $(26.64 \pm 2.93) \times 10^4 \text{a B.P.}$)表现有断错活动,晚更新统残坡积红土(TL 测年为 $(8.97 \pm 0.76) \times 10^4 \text{a B.P.}$)覆盖层无断错活动迹象(段永康等,2008)。

2 浅层地震勘探的工作方法

在吴家营以南,白邑-横冲断裂隐伏于第四纪更新统(Q₁₋₃)之下。据钻探资料,第四系厚度为 40—80m,由冲洪积和湖积相粘性土、砾砂、圆砾和湖相的粘土、粉土以及薄层泥炭质土组成,下覆基岩为前新生代的泥岩、灰岩和玄武岩。为追踪查明隐伏断层的展布,采用浅层地震反射波法进行探测,并结合钻探、覆盖层年龄测试等,对其进行新活动性综合分析研究。

2.1 地震勘探的仪器设备

在浅层地震勘探中,使用重 63kg 的人工夯击震源进行激发,并用国产 QDZ24 型浅层数字地震仪进行数据采集,每个测点用单只 DX-100 型 100Hz 高频垂直检波器接收。

2.2 野外工作方法

利用浅层地震反射波法进行野外勘探工作的合理与否,直接关系到探测成果的可靠性。通过现场试验和分析,在本次浅层地震探测工作中,采用 2m 的检波点距和 6 次覆盖的观测系统,用 GPS 定向,测绳放线定点。在推测断层东支布设了 SL1 和 SL2 测线,采用 30m 的最小偏移距;而在推测断层西支布设了 SL3 和 SL4 测线,由于该区第四系较薄,采用的最小偏移距为 20m。测线位置如图 1 所示。为了压制干扰波,在 SL3 和 SL4 两条测线上,还使用了 35Hz 的低截滤波。

在数据采集中,选取的采样间隔为 0.5ms,记录长度 512ms。数据采集时,对排列附近的车辆和行人进行了警戒,最大限度地降低了人为干扰。同时,还详细记录了各种采集参数和测线所经地面的沟、坎、河、桥及地形突变点的测点位置,并用 GPS 测定了测线起止点、测线拐弯段的经纬度,供数据处理解释时分析异常点参考。

2.3 数据处理

为了尽可能获得最佳的叠加效果,提高信噪比和分辨率,通过处理试验,在数据处理中

根据不同情况采用了以下处理方法:



图 1 浅层地震测线位置图

Fig.1 Location of survey lines of shallow seismic exploration

- (1) 剔除废道;
- (2) 仔细选择增益控制时窗和各种去噪处理参数, 突出有效波能量;
- (3) 选用反褶积方法提高资料分辨率;
- (4) 采用不同的拉伸比和不同的切除时窗, 切除了因动校正拉伸引起的波形畸变;
- (5) 选择速度扫描和速度谱分析二者中叠加效果最佳的速度作为叠加速度, 确保动校正的速度精度和尽可能获得最佳的叠加效果;
- (6) 通过叠后去噪来突出和加强有效波组的能量。

2.4 资料解释与断层判别

首先依据时间剖面上的反射波组特征, 结合钻孔地质资料进行对比分析, 依据断层的识别标志判别测线上是否有断层存在。如果有断层存在, 将确定其倾角、错距和上断点埋深等参数。

隐伏断层的判别, 依据《活动断层探测方法 (DB/T 152005)》(中华人民共和国地震行业标准, 2005) 中对浅层反射地震资料解释提出的 4 条识别标志:

- (1) 反射波同相轴或波组的错断;
- (2) 反射波同相轴数目突然增加或减少;
- (3) 反射波同相轴形态和特征发生突变, 反射波零乱或出现空白异常带;
- (4) 反射波同相轴的强相位反转。

由于灰岩顶面的起伏较大, 单凭基岩埋深的突变来判别断层有可能把基岩陡坎误判为断

层。为了不漏判和误判断层，需遵循以下 3 个原则来判别断层：

- (1) 基岩顶面反射波同相轴错断，界面埋深有突变；
- (2) 基岩内部有局部的反射波出现，并有同相轴错断；
- (3) 异常点两侧的波组特征存在明显差异。

当同时满足上述 3 个条件时，就将该异常点判别为断层。断层最新活动时代的推断则是根据异常点上部的波组是否错断作为依据。

2.5 反射波组特征分析及其地质含义

在所布设的 4 条测线上，经数据处理后得到的地震反射时间剖面如图 2 所示。在 4 条反射剖面中，可以追踪到 1—3 个较强的反射波组 T1、T2 和 T3，图 2 中标注的黄、蓝和红色曲线为同相轴。

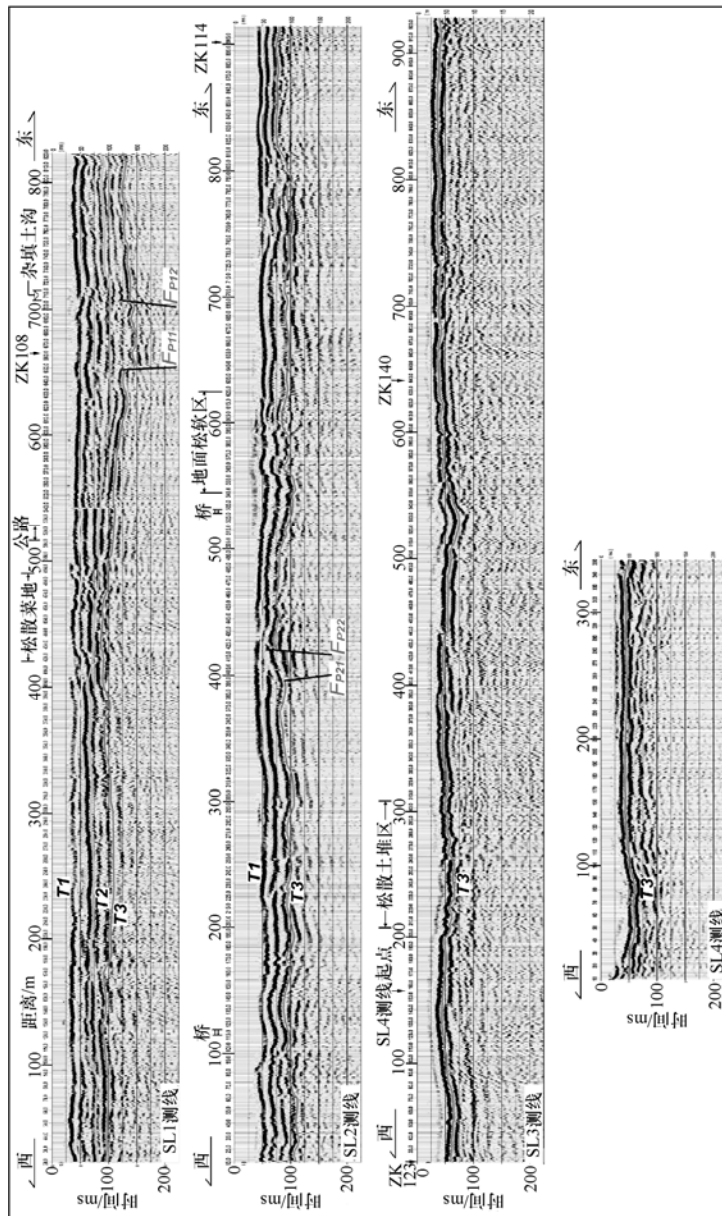


图 2 白邑-横冲断裂隐伏段浅层反射地震勘探时间剖面

Fig.2 Time section of Baiyi-Henchong fault

从图 2 可以看出, T1 和 T3 波组在各条剖面的大部分区域都可以追踪到, 连续性较好, 是明显的优势波组。但二者的频率、能量和深度变化形态明显不同。T1 波组能量强、频率较低、时差变化较小、连续性好; 而 T3 波组能量较强、频率高、时差变化激烈、连续性次于 T1 波组。

根据钻探资料, 测区内第四系厚度变化较大, 基岩顶面起伏剧烈。钻孔波速测定结果表明, 第四系与下覆基岩的物性差异大, 是一个明显的波阻抗分界面, 其反射波的能量也相应较强, T3 波组这种能量和时差变化大的特征正是基岩顶面界面起伏明显的体现。根据双程反射时间和叠加速度求得的深度与钻探揭示地层深度对比, T3 波组应该是第四系底界(基岩的顶面)的反射波, T1、T2 波组是第四系内部界面的反射波。T1、T2 波组的反射界面起伏平缓表现出第四纪沉积地层渐变的特征。

T2 波组(图 2)只出现在 SL1 测线时间剖面上 70—100ms 附近。根据该测线东段南侧钻孔 ZK108 揭示的地层岩性(图 3), T2 波组对应的界面深度应为 45m 处粉土层与其下粘土层分界面。ZK108 钻孔的波速测试结果表明, 深度在 45m 和 76m 处的波速变化明显。因此, 上述对 T2 和 T3 波组所对应的地质层位与岩性判定是合理的。

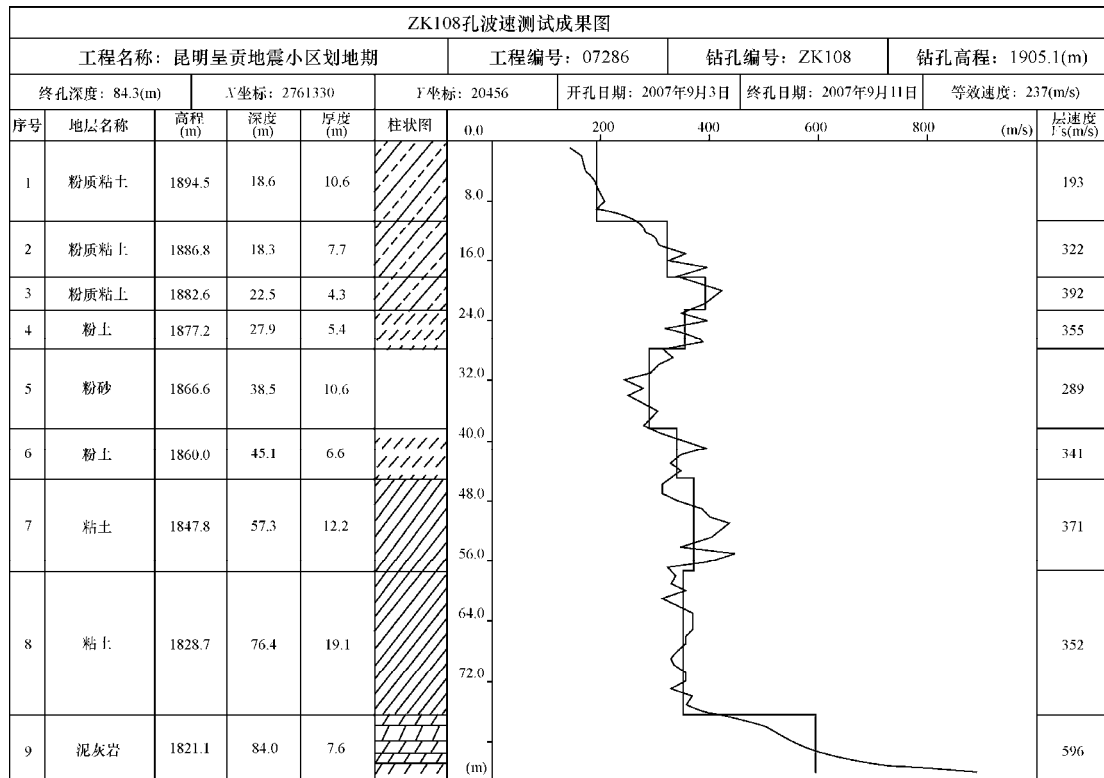


图 3 ZK108 孔剪切波速测试结果

Fig.3 Plot of shear velocity test of ZK108 borehole

2.6 地震剖面的分析结果

SL1 测线位于白龙潭南侧, 全长 848m, 呈东西向展布。在 SL1 测线上, T1 界面埋深变化不大, 大致与地表平行, 埋深为 20m 左右。在距离 T1 界面 400m 以西, 是 3 个波组中能量最强的反射波组, 双程反射时间在 70ms 左右, 界面平坦连续。而在 420—490m 之间, 测线穿过几块松软的蔬菜地, 激发、接收条件都较差, 尽管采取了深埋检波器、提高夯击力度

和增加垂直叠加次数等手段,但这一段的信噪比还是较低,T1和T3波组基本上还能够辨认。尽管T3波组起伏较大,但在420—490m之间没有明显的断层迹象。T2、T3波组都表现出从测线中部开始向东逐渐变深的形态,T2波组的变化幅度明显小于T3波组。在距离T3波组650m和710m附近,分别出现了幅度较大的错断。

SL2测线位于郑家营南侧通往缪家营的土路道上,全长952m,测线上除了在545—625m之间的地表松软外,其它地段的激发接收条件都很好,野外数据采集时,从西向东进行,取得了信噪比较高的资料。同时,由于水渠和蔬菜大棚的阻碍,SL2测线在75—110m段沿土路向北东有约30°的缓慢拐弯,使得该段的所有波组都有上隆现象。从图2可以看出,在该测线上只能追踪到T1和T3两个反射波组,其中T1波组能量强、起伏小,整体表现出测线中部较浅东西两侧较深的趋势;而T3波组起伏较大、西深东浅,在396m和420m两处有明显的错断。

SL3和SL4测线位于前卫营北侧,SL3测线全长938m。布设SL3测线是为了查明SL1和SL2西端控制范围之外,前人推测的西支断裂是否从场地中部通过。SL3测线附近有几个大的建筑工地正在施工,测线西段有高约1—2m、面积数百m²的松散人工堆积土,致使在210—310m测段的激发、接收条件很差,虽然采取了深埋检波器、提高夯击力度和将垂直叠加次数增加10次以上等措施,但这一段的信噪比还是较低。为了排除这一不利地段测线的数据质量差对断层识别的影响,在SL3测线北侧补充布设了SL4测线,SL4测线全长370m。

在SL3和SL4测线的时间剖面上(图2),由于第四系很薄,都只能追踪到1个反射波组T3。T3波组总体呈西深东浅的趋势,西段起伏较大,东段平坦、埋深较浅。位于SL3测线西端的ZK123钻孔揭示的基岩埋深为25m,而测线东段的ZK140钻孔在深度17.7m就钻到了基岩。在钻孔揭示的基岩埋深与时间剖面上,与T3波组对应的深度相当、变化趋势一致。同时,在SL3和SL4测线的时间剖面上没有发现断层。

3 断点参数的确定

在本文给出的4条地震反射剖面中,按照上述的断点判别原则,能可靠地识别出4个断点,它们分别位于SL1测线的东部和SL2测线的中部。

3.1 SL1测线东部断点FP11和FP12

从SL1测线的时间剖面(图2)可以看出,T1、T2和T3三个界面在西段分布较平坦,反应了该段界面之间地层厚度变化不大;而东段在白龙潭南北向路口往东,三个反射界面之间的地层都有不同程度的增厚,T3界面从距离坐标550m开始逐渐变深,并在距离坐标652m和707m两处出现明显的错断,如图4中FP11和FP12所示。断点FP11的基岩错距约为13m;FP12的基岩错距约为6m。2个断点相距55m,2个断面的倾角都很陡、接近直立,在剖面上表现为正断性质。

图4(a)是断点附近的局部时间剖面;图4(b)是相应的解释剖面。在解释剖面中,ZK108的位置是投影到测线上的位置,它显示了这段剖面长150m,地形呈西高东低,东西两端的高差约为3m,在距离坐标710m附近是一个由碎石、渣土堆填起来的宽沟,激发和接收条件都很差。因此,T1波组在710m附近的同相轴扭曲与地面条件有关。而T1波组在其余测段是完整连续的。

参考ZK108钻孔波速测试结果(图3),在T2波组对应的界面深度45m附近,波阻抗变化较小,因此,T2波组的能量相对较弱。同时,从图4(a)可以看出,T2波组近似与T1

波组平行, 埋深变化不大。在 T3 界面出现断点的上方, T2 界面没有错断的迹象。此处断层的上断点埋深大于 45m, 断错了基岩顶面和第四系下部的粘土层。鉴于断错的 T3 界面上部层 (49m 处) 粘土 TL 年龄为 $(20.04 \pm 1.70) \times 10^4$ a、T3 层下部 (66m 处) 粘土 TL 年龄为 $(29.81 \pm 3.28) \times 10^4$ a、T2 层面上部 (39m 处) 粘土年龄为 $(9.24 \pm 0.70) \times 10^4$ a, 此段断裂的最晚活动时期应为第四纪中更新世。

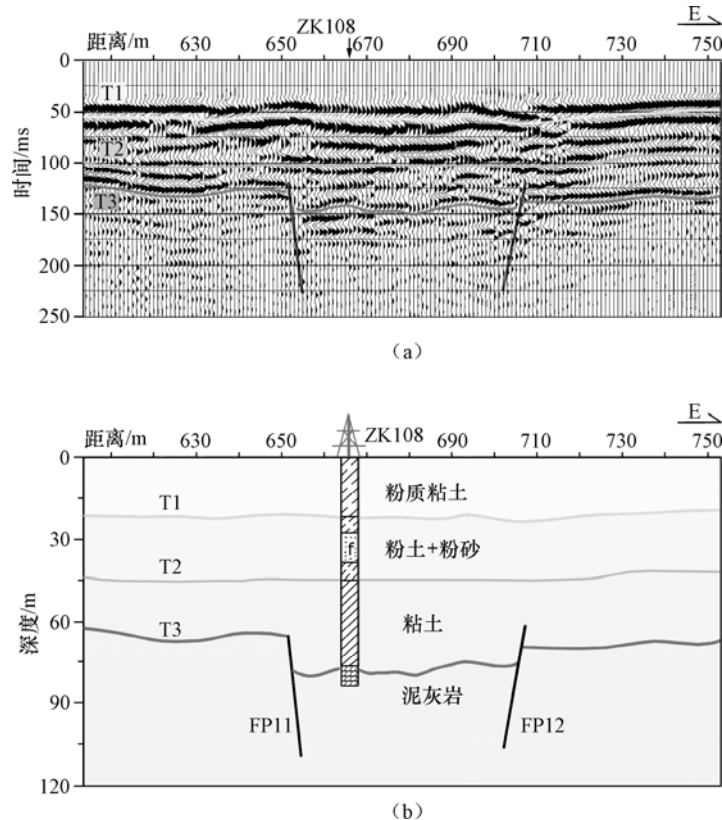


图4 SL1 测线断点附近的浅层地震反射时间剖面和解释剖面
Fig.4 Reflecting time section and interpretation of faulting points
from shallow seismic exploration line SL1

3.2 SL2 测线中部断点 FP21 和 FP22

在 SL2 测线中部发现了 2 个断点, 如图 5 中 FP21 和 FP22 所示。其中, 图 5 (a) 是断点附近的局部时间剖面; 图 5 (b) 是相应的解释剖面。在图 5 (a) 所示的时间剖面中, 距离从 396m 到 420m 之间可以清楚地看到 T3 波组之下出现了新的同相轴, 这些同相轴分别在 396m 和 420m 两处出现明显的错断。在时间 100—140ms 之间, 这个波组边界分别终止于东西 2 个断面处, 显示出截然不同的波组特征变化。按断层判别原则, 将这 2 个异常点判别为断点的依据是充分的。FP21 和 FP22 之间出现了西深东浅的斜坡面, 推断是强风化基岩或第四纪早期沉积物填平了 2 个断面间小地堑而形成的缓坡, 在 FP21 断点以西 (380m 附近), T3 波组下凹处能量的时强、时弱变化, 说明这里基岩的完整性也因断裂的活动而变差。

在图 5 (b) 所示的解释剖面中, 各界面的深度是根据该段的叠加速度转换后, 并参考 SL2 测线东端 ZK114 的基岩深度作了适当调整绘出的。根据测区的钻孔资料, 测线附近第四

系岩性的变化较大。鉴于本测段距离控制性钻孔较远,因此,只笼统地标出了第四系和基岩界面。按照图 5 (b) 所示的解释深度,FP21 的错距约为 4m,FP22 的错距约为 10m,FP21 和 FP22 相距 24m,FP22 为主断面,高角度西倾,上断点埋深约 30m。

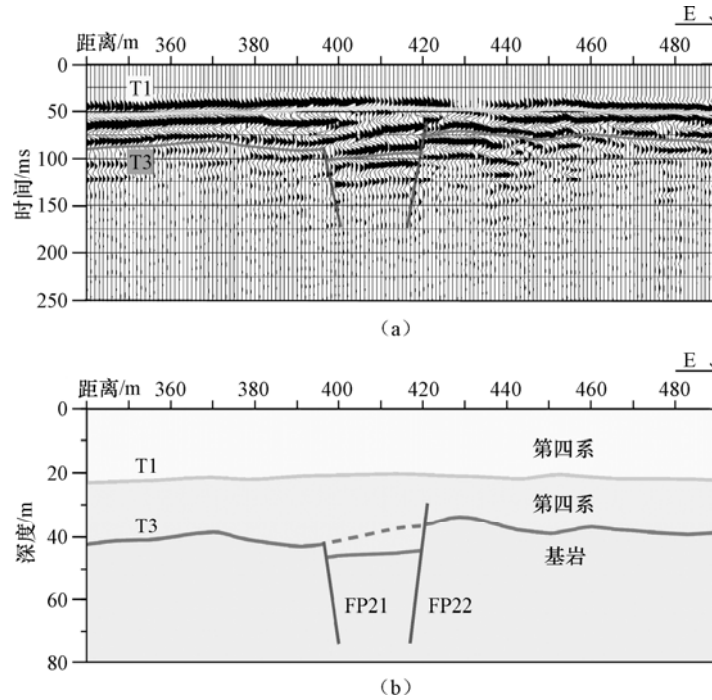


图 5 SL2 测线断点附近的浅层地震反射时间剖面 and 解释剖面

Fig.5 Reflecting time section and interpretation of faulting points from shallow seismic exploration line SL2

3.3 断点性质和位置分布

通过对覆盖区 4 条测线的浅层反射波地震勘探,在 SL1 和 SL2 测线上共发现了 4 个断点,这些断点具有相似的构造特征,在 2 条剖面上都表现为正断的特征,应该同属 1 条断裂。同时,根据区域现代构造应力场和构造形变特征及区域地震地质研究结果,该区北北东-南北向断层都为走滑性质。在上述的地震反射时间剖面上,断层的東西两盘震相特征具有明显的差异和高倾角的产状等特征,也显示出该断层具有走滑断层的特征,故该断裂的南端应为高倾角的走滑兼正断的活动性质。

本文给出了此次探测发现的断点的相关参数(表 1),并将断点位置和断裂走向绘制在图 6 中。

表 1 断错点参数一览表

Table 1 Parameters of fault offset points

所在测线	断点编号	断点桩号	断点坐标		上断点埋深	倾向	倾角	错断性质	可靠性
			纬度(度)	经度(度)					
SL1	FP11	652	102.85555	24.86974	65m	E	近于直立	张性正断层	可靠
	FP12	707	102.85607	24.86977	60m	W	近于直立	张性正断层	较可靠
SL2	FP21	396	102.85820	24.84983	42m	E	近于直立	张性正断层	可靠
	FP22	420	102.85840	24.84993	30m	W	近于直立	张性正断层	可靠

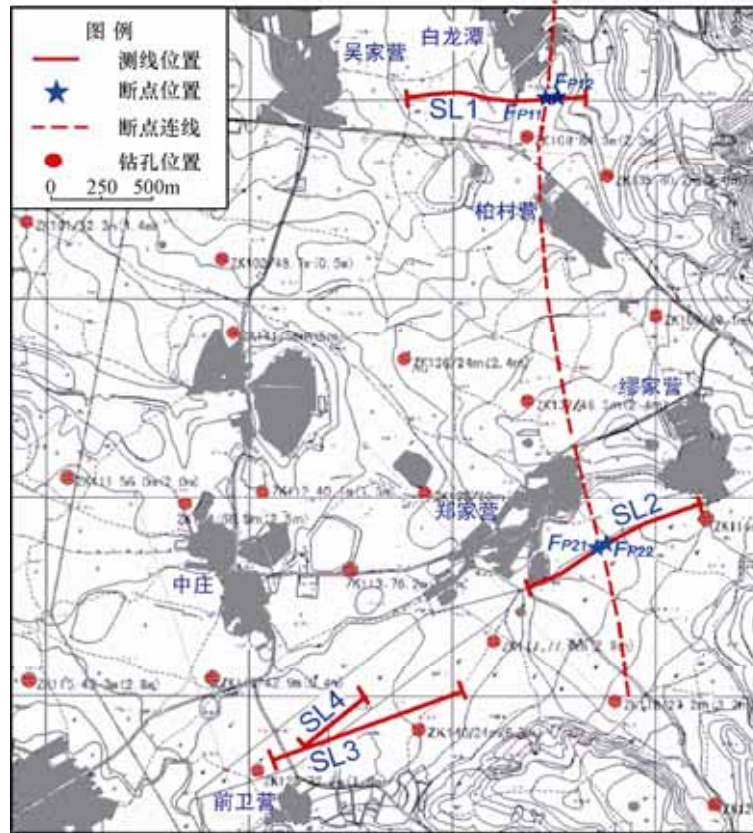


图 6 地震勘探测线和断点位置分布

Fig. 6 Location of faulting points and survey lines

4 结论

综合上述研究结果得到如下结论:

(1) 对于第四系覆盖层较浅的隐伏断层探测, 采用小检波距、小偏移距的浅层地震反射波法是一种有效的物探方法。

(2) 追踪探测结果表明: 推测的白邑-横冲断裂南段东支次级断层在隐伏区是存在的, 而没有发现西支次级断层存在迹象。

(3) 白邑-横冲断裂南段的东支断面接近直立, 视倾角约 80° , 具有高倾角张性正断性质, 基岩垂直错距为 10—13m, 断裂规模由北向南减小; 北部第四系较厚, 上断点埋深约 60—65m; 南部第四系较薄, 上断点埋深约 30—42m。根据北部断点附近钻孔 T3 层上、下部粘土的测龄结果 (49m 处 $(20.04 \pm 1.70) \times 10^4$ a; 66m 处 $(29.81 \pm 3.28) \times 10^4$ a), 推断东支断裂的最新活动时代为第四纪中更新世。

(4) 白邑-横冲断裂南段隐伏断层的探测结果, 为昆明新城地震小区划提供了明确的支撑资料。

参考文献

段永康, 2008. 昆明市新城 II 期地震小区划报告.

何正勤, 潘华, 胡刚等, 2010. 核电厂址隐伏断裂探测中的地震勘探方法研究. 地球物理学报, **53** (2):

326—334.

何正勤, 陈宇坤, 叶太兰等, 2007. 浅海地震勘探在沿海地区隐伏断层探测中的运用. 地震地质, **29** (2): 363—371.

连玉平, 张景福, 林松建等, 2007. 高分辨地震勘探探测隐伏断裂实例. 西北地震学报, **29** (3): 260—263.

刘保金, 沈军, 张先康等, 2007. 深地震反射剖面揭示的天山北缘乌鲁木齐坳陷地壳结构和构造. 地球物理学报, **50** (5): 1464—1472.

姚姚, 2006. 地震波场与地震勘探. 北京: 地质出版社, 75—189.

云南地质科学研究所, 2003. 昆明盆地第四纪地质与基底分阶段深编图说明书.

云南省地质矿产局, 1987. 昆明幅、呈项县幅区域地质调查报告 (1/5 万).

周绪文, 1989. 反射波地震勘探方法. 北京: 石油工业出版社, 201—206.

中华人民共和国地震行业标准, 2005. 活动断层探测方法 (DB/T 152005). 北京: 地震出版社.

Robert B.H., Cyntya L.P. and Jeffrey E.C., 2000. Shallow seismic reflection profiling over Brevard Zone South Caroline. Geophysics, **65** (5): 1388—1401.

Exploration of Southern Segment of Baiyi-Henchong Fault in the Eastern Dianchi Basin Using Shallow Seismic Survey

Hu Yili¹⁾, Wen Yibo²⁾, Duan Jiping³⁾, Tai Shugang³⁾, Wang Gang³⁾,
Li Jianyou³⁾, Wang Chaojin³⁾ and Yang Jianghua³⁾

1) Department of Geophysics, Yunnan University, Kunming 650091, China

2) College of City Construction and Management, Yunnan University, Kunming 650091, China

3) Kunming Southern Geophysical Technology Development, Inc., Kunming 650223, China

Abstract The shallow seismic reflection exploration is applied to explore the buried southern segment of Baiyi-Henchong fault which is located in the east of New City of Kunming. The exploration reveals that the fault plane is nearly vertical, and the apparent dip is about 80° degree. The vertical displacement is between 10 to 13 meters, and the size of fault becomes smaller from the north to the south. The fault is characterized with a normal tensile fault with high dip angle. No evidence of secondary fault was detected in this survey. The results from dating of soil samples indicate the last faulting activity occurred in the late period of middle Pleistocene.

Key words: Baiyi-Henchong fault; Shallow seismic exploration; Reflection method; Buried fault