

# 昆明盆地基底断裂地震勘探线设计 及施工参数试验分析<sup>\*</sup>

解 丽, 虎雄林, 郭若瑾

(云南省地震局, 昆明 650224)

**摘要:** 为了对昆明市活断层构造的深浅关系有更深入的了解, 在浅层地震反射勘探的基础上, 布设了一条东西向、横跨昆明盆地的中深层探测剖面 KM4 测线, 通过对测线参数的试验与分析, 确定了适合昆明盆地反射地震勘探的施工参数, 采用该施工参数, 开展了有效勘探深度为 2~3 km 的中深层反射地震勘探, 确定了目标区隐伏活断层在盆地深部与盆地基底展布的异同及空间关系, 探测到了昆明盆地深部断层的基本位置, 确定了浅部断层与盆地基底断裂间的关系。对该测线的设计和参数采集试验分析, 为城市和山区的活断层探测提供了宝贵的经验。

**关键词:** 昆明盆地; 基底断裂; 地震勘探; 参数试验

**中图分类号:** P315.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2009)01-0062-06

## 0 前言

昆明盆地是云南规模最大的第四纪继承性凹陷盆地, 它位于扬子准地台中康滇古隆起的东南侧, 呈 SN 向展布。盆地内第四系发育的总体特征可以概括为厚度变化巨大、相变复杂。受断裂活动和起伏较大的地形的影响, 盆地内第四系沉积相变非常迅速, 存在湖积、冲积、洪积及残坡积等多种沉积类型的复杂组合 (姜朝松等, 1999)。地球物理资料和钻探资料证实, 昆明盆地发育有多组断裂, 并以 SN 向为主。普渡河—西山断裂、普吉—韩家村断裂、蛇山断裂、黑龙潭—官渡断裂、盘龙江断裂等均由北向南进入盆地, 控制了主要基底构造和地层走向。盆地基底地层较为复杂, 从震旦系到上古生代的地层均有分布。据 500 多孔见基岩钻孔和其它物探资料, 昆明盆地基岩埋深达 1 200 m 以上, 其中第四系厚达 1 000 余米, 上更新统埋深 60~80 m (俞维贤等, 2004; 姜朝松等, 2003)。

断裂构造在盆地内处于隐伏状态, 由于盆地周围一般缺少第四系冲积、洪积和湖积层, 通常在裸露区采用露头观测、探槽和剖面测量手段研

究断裂活动特征, 在昆明盆地内则主要用地震勘探和钻探方法。对盆地的地震探测通常分 3 个不同深度层次: ① 100~300 m 深度的浅层地震反射勘探 (杨润海等, 1999), 主要查明断裂构造浅部位置。② 2~3 km 的中深层反射地震勘探, 主要探明浅部断裂与盆地基底断裂间的关系, 即探明浅部断裂延深, 确定哪些浅部断裂是主要的断裂构造。③ 目标深度到达莫霍面的宽角人工折、反射地震勘探, 探明浅部几千米深度的断裂构造与深部构造的关系 (方盛明等, 2002)。

基于昆明盆地的地质条件, 仅采用浅层地震探测和深部孕震环境分析是不能弄清楚断裂构造的深浅关系的。为了对断裂构造的深浅关系有更深入的了解, 2004 年 10 月, 根据中国地震局“中国地震活断层探测技术系统”项目中“城市活断层探测与地震危险性评价”技术要求, 云南省地震局启动了“昆明市活断层勘探与地震危险性评价控制性中深层地震勘探工程”子项目, 开展昆明地区活断层探测以及建立相关数据库。鉴于昆明盆地由北向南基底逐渐加深至 1 200 m 以上的事实, 我们部署了 KM4 测线, 沿测线开展了有效勘探深度至 2 km 的中深层地震勘探。本文主要论述中深层反射勘探测线布设与参数试验工作。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-05-12

基金项目: 中国地震局十五重点项目——昆明活断层探测与地震危险性评价资助

# 1 测线设计

## 1.1 测线布置

基于主要断裂呈 SN 向展布的地质情况，为了弄清楚断裂构造的深浅关系，在浅层地震反射勘探的基础上，我们布设了一条 EW 向、长约 23 km 横跨昆明盆地的中深层探测剖面 KM4 测线（图 1），沿测线开展有效勘探深度为 2~3 km 的中深层反射地震勘探，以确定目标区隐伏活断层在盆地浅部、深部和基底展布的异同及空间关系，探测盆地深部断层的位置、错断性质、断距和倾角等（邓起东，2002）。测线跨越的主要断裂有普渡河—西山断裂、普吉—韩家村断裂、盘龙江断裂、黑龙潭—官渡断裂和白邑—横冲断裂等。

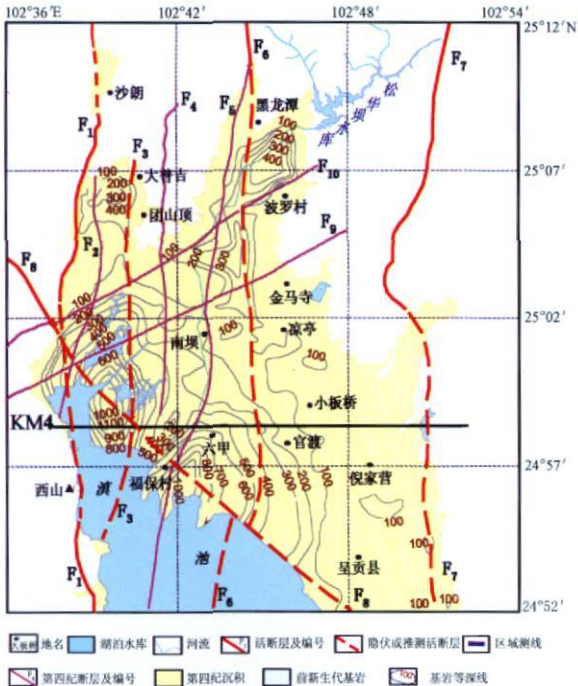


图 1 KM4测线基本位置图

## 1.2 技术要求

- (1) 技术指标：激发震源为炸药震源，道间距 20 m，水平叠加次数 20 次，激发井深与药量通过野外试验而定。
- (2) 仪器设备要求：A/D 转换 24 位，动态范围 144 dB，仪器记录道数不少于 60。
- (3) 勘探精度：平面定位精度 20 m，剖面定位精度为深度的 10%。

## 1.3 观测系统

我们根据《中国数字地震观测网络技术规程》（2005）的要求，布设了本次探测的观测系统。空炮距离超过 400 m 地段进行加炮控制。由于该测线经过滇池、滇池国家旅游度假区、滇池高尔夫球场及大型村庄，必然会出现一些空炮地段，对这些空炮地段的处理方式会直接影响探测质量。

按地震勘探常规，正常井深、药量激发的物理点为Ⅰ级炮点；在建筑物、水渠等障碍附近需适当减小药量激发的物理点为Ⅱ级炮点；距障碍非常近，需减药量至最低限度，用于弥补剖面缺口的物理点为Ⅲ类炮点。本次测线满覆盖总长 22.6 km，探测炮点总数为 220 个，其中Ⅰ级炮点 103 个、Ⅱ级炮点 99 个、Ⅲ类炮点 18 个。

根据盆地地质情况以及总体设计参数论证结果，确定 KM4 测线基本施工参数如下：

- 观测系统：2400—20—0—20—2400
- 接收道数：240、300
- 道距：20 m
- 炮距：120 m
- 覆盖次数：20 次
- 采样间隔：1 ms
- 记录长度：6 s
- 激发井深：由试验确定
- 炸药类型：低密炸药
- 激发药量：由试验确定
- 检波器类型：SN-10
- 检波器组合方式：单串线沿测线组合，组内距 1 m，基距 8 m

按昆明盆地地质模型进行射线追踪（图 2），对比各部位射线路径分布情况，采用 2400—20—0—20—2400 观测系统不会造成反射盲区，能够完整接收到地下反射信息。在特殊地形区域，通过局部变观设计完成所要求的地质任务。

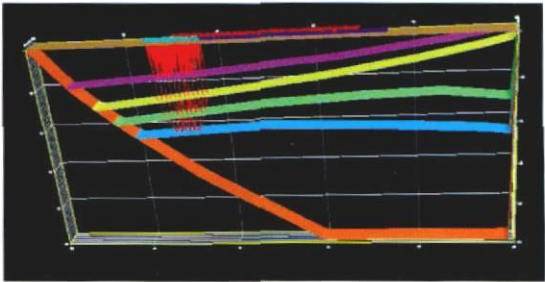


图 2 射线追踪图

2 试验工作

2.1 试验目的

了解昆明盆地低降速带结构，确定适合昆明盆地的激发井深与激发药量，为 KM4测线提供合理选用的地震施工参数。

2.2 试验方法

根据工区内不同位置，在盆地东部民办科技园附近 2033 桩号布置 S<sub>1</sub> 综合试验点，确定适合 KM4测线的基本激发井深与激发药量；在南昆铁路附近 1916 桩号布置 S<sub>2</sub> 验证试验点，进一步验证综合点确定的施工参数在进入平坝区后的适应性。

2.3 基本施工参数

观测系统为 2400—20—0—20—2400 240道接收，道距 20 m，记录长度 6 s，采样间隔 1 ms，记录格式为 SEG-D，检波器组合为单串线沿测线组合，组内距 1 m，基距 8 m，检波器组合高差小于等于 1 m。采用 SN4-10宽频检波器接收，采用乳化炸药激发。

2.4 试验内容

本次试验工作的主要内容有：低降速带调查、激发井深和激发药量试验。试验点工作量见表 1。

表 1 实验工作表

试验点	试验内容	配合因素	工作量/(d)
	表层调查(微测井)	H=30 m	1
S <sub>1</sub>	井深试验: H=10 m 14 m 18 m 22 m	Q=2 kg	4
	药量试验: Q=0.5 kg 1 kg 2 kg 4 kg	H=18 m	4
S <sub>2</sub>	井深试验: H=16 m 18 m 20 m	Q=2	3
	药量试验: Q=1.5 kg 2.0 kg 2.5 kg	H=18 m	3

点位特征：S<sub>1</sub>点位于 KM4线中部，接收排列为 1913—2153，桩号为 2033，地势相对平坦，地表第四系覆盖。S<sub>2</sub>点位于 KM4测线的 1916 桩号，地势平坦，地表出露第四系表土，所用接收排列为 1796—2036。

微测井采用岩性录井及测井相结合来确定表层结构情况。如图 3 所示，单井微测井设计井深 30 m，采用井下放炮地面接收（6道以井口为圆心、半径 1 m 埋置）方式进行，由井底向井口按照 2 m×12—1 m×5—0.5 m 的观测系统进行激发测定，对所得资料进行计算解释，并绘制 H—T 曲线来确定表层结构成果。

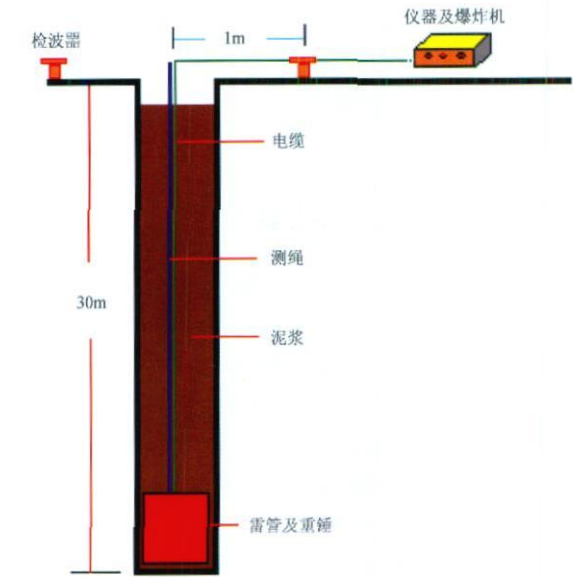


图 3 微测井施工示意图

2.5 试验资料分析

(1) 激发井深试验

S<sub>1</sub>试验点从原始单炮上看，随井深增加，面波能量逐渐减弱，视频率升高，反射波组特征变化不大，初至波能量足够，扫描后不同频段信号基本相当（图 4 d）。通过能量分析（图 4 b），10~14 m 激发能量较低，18~22 m 激发能量相对较强，14~22 m 信号信噪比基本相当（图 4 a），都能满足要求。频谱分析（图 4 c）表明，18~22 m 激发能量相对略占优势，子波旁瓣能量随井深增加略有减小，16 m 以上激发井深基本能够满足勘探要求。

S<sub>2</sub>试验点原始单炮上地震反射波在远、近炮检距上 16 m、18 m、20 m 三种井深能量差异不大，反射波组特征也没有明显差异，分频扫描各频段信号特征基本一致。子波分析显示，16 m 井深主瓣和旁瓣振幅比值较大，能量向主瓣集中，有利于提高地震资料信噪比，不同井深子波频率差异不明显，对提高反射分辨率影响不大，频谱分析振幅能量基本相当，信噪比差异不大。S<sub>2</sub>试验点确定的 18 m 井深比较合适，综合确定 16~18 m 井深激发比较合适。

(2) 激发药量试验

S<sub>1</sub>单炮记录上随着药量增加，激发能量有逐渐增大的趋势，但在 2 kg 以上增加幅度减小，同时随着药量增加，浅层噪音强度加强，信噪比有所降低，扫描记录上无明显差别。定量分析显示，0.5 kg 药量激发的主频最高，随药量增大主频逐渐降低，振幅逐渐提高。药量为 4 kg 时主频最低，



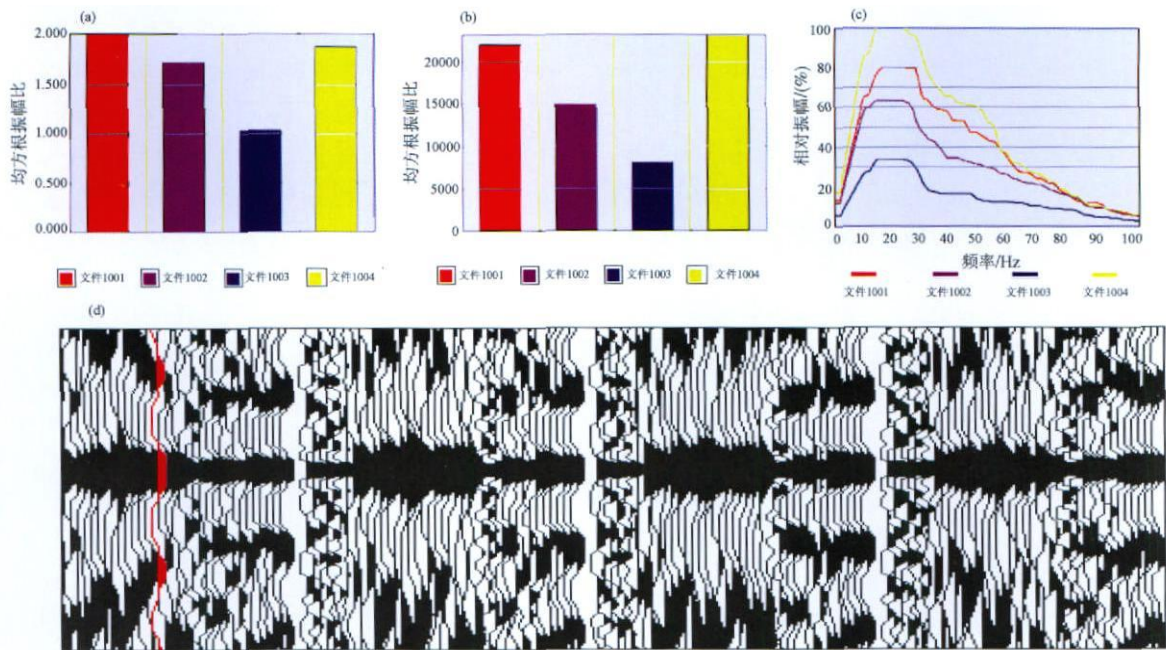


图 4 S<sub>1</sub>井深试验分析

(a) 信噪比分析图；(b) 能量分析图；(c) 频谱分析图；(d) 能量扫描图

注：图中，文件 1001 代表井深 10 m 文件 1002 代表井深 14 m 文件 1003 代表井深 18 m 文件 1004 代表井深 22 m

频带宽度最窄（图 5 a）；能量分析显示，0.5 ~ 1 kg 药量与 2 ~ 4 kg 药量激发的能量有差异，后者在绝对振幅上有优势（图 5 b）；信噪比分析显示不同药量的信噪比波动不大（图 5 c）；2 kg 药量能够达到饱和激发要求。对 S<sub>2</sub> 试验点定性分析，发现 1.5 ~ 2.5 kg 药量激发能量略有差异，但幅度不大，扫描信号基本接近，定量分析表明信号频谱及反射能量无规律性。S<sub>2</sub> 试验点确定的 2 kg 药量激发基本合适。综合 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 点结果确定 2 kg 药量激发基本合适（潘纪顺等，2002）。

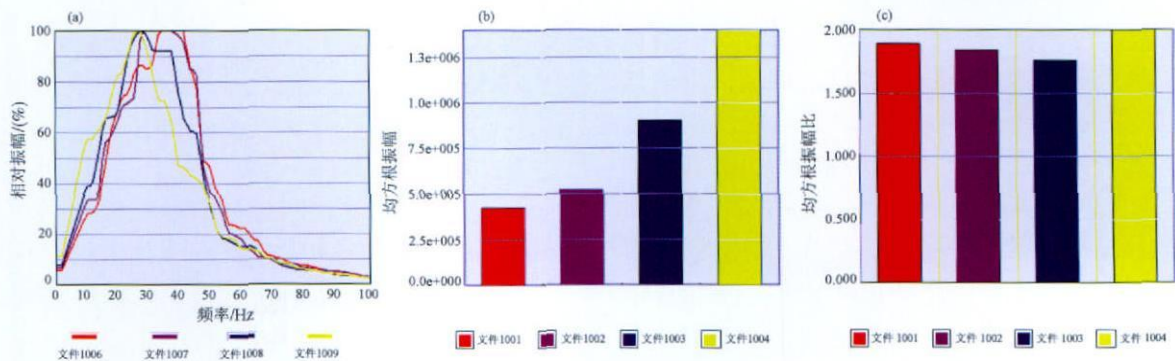


图 5 S<sub>1</sub>药量试验定量分析图

(a) 频谱分析；(b) 能量分析；(c) 信噪比分析

注：图中，文件 1006 代表药量 0.5 kg 文件 1007 代表药量 1 kg 文件 1008 代表药量 2 kg 文件 1009 代表药量 4 kg

(3) 微测井

根据测井结果，测线东部低速层速度为 732.7 m/s，土层厚度为 1.9 m，降速层速度为 1 376.5 m/s，厚度为 3.8 m。5.7 m 以下为高速层，地震波速度为 2 815.7 m/s。通过表层结构数，试验点确定的激发井深都已进入高速层，从而实

现在在高速层中激发的目的。

3 数据处理

按照该设计方案和试验参数确定的施工参数施工，收集到基本的地震资料后，采用 1 950 m 基

准面、3 000 m/ 替代速度进行高程静校正；采用 1 500 ~4 000 m/ 速度进行初至折射波静校正；采用 800 ~1 400 m/ 速度去除线性干扰；采用小于 1 300 m/ 的速度进行面波压制；采用分频的高能压噪方法进行分频高能干扰压制；采用 120 m s子波长度、38 H主频、1015白噪系数进行地表一致

性反褶积，采用 2 000 m参考层位，5 000 m/ 速度，进行地表一致性振幅补偿；经多次速度分析和三次自动剩余静校正叠代后，采用 450 m s动平衡因子进行保幅叠加，采用偏移速度 90% ~95% 进行波动方程逆时偏移，最后进行叠后偏移，得到地震波叠加剖面图（图 6）。

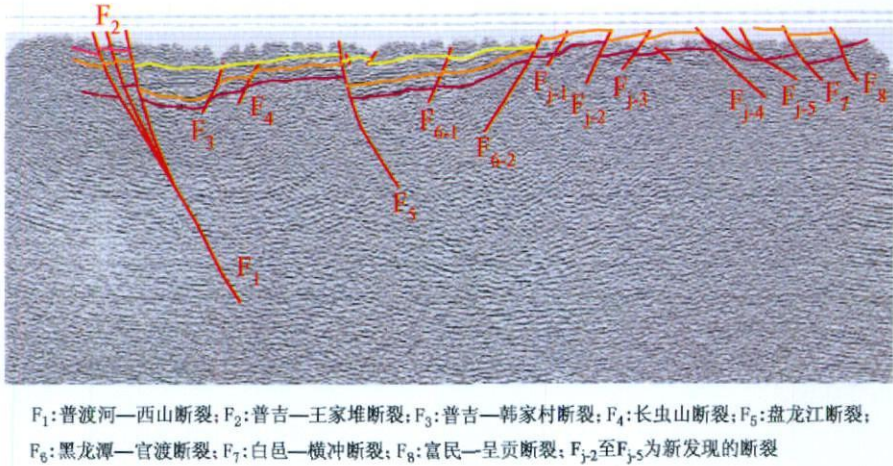


图 6 地震资料叠加剖面图

4 结论与讨论

4.1 结论

地震资料处理后的剖面图剖面构造形态清晰（图 6），普渡河断裂带清晰可见，断面波明显，准确揭示了断层的存在。剖面上断点清楚，基底明确，基底之上新生代地层超覆现象明显。剖面西端老地层出露，阻抗特征不明显，信噪比相对较低，盆地最深处在滇池及官渡两处，中部有六甲隆起，隆起两翼断裂痕迹明显。测线东部基底出露地表，受灰岩影响信噪比降低。昆明地区地震资料散射干扰较发育，记录长度取值 4 000 m s基本可以达到地质要求。昆明盆地地腹存在阻抗界面，反射信噪比、连续性能满足地质解释的要求，剖面能反映真实的地下地质形态，对于研究昆明盆地特征有较好参考价值，这说明测线布置合理，试验选取和得到的参数比较科学。在设计测线时，为了给 KM4测线提供地震施工参数，对低降速带调查、激发井深、激发药量等内容进行了试验，为观测系统的参数选取提供了依据。

通过实施跨盆地中深层反射地震勘探，清晰地揭示了对盆地发育具有控制性作用且规模较大、切割较深的主要断裂以及仅发育于浅部的次级断

层的几何结构和空间分布状态，如浅表较明显但切割深度非常有限的  $F_6$  和浅表不明显但切割较深的  $F_5$ 。这不仅为浅层勘探位置和测线的布设提供了重要依据，还为目标区地震构造的深浅耦合关系的分析提供了重要线索，起到了承上启下的“桥梁”作用。

4.2 讨论

KM4测线位于昆明市境内，地处昆明南郊，地质上跨越了昆明盆地及其边界，工业区内经济发达，有工厂、矿山、旅游景区、学校、机关、公路与铁路等。布设该条地震勘探测线主要有如下特点和技术难点：①接收点埋设困难。城市内大量的柏油路以及混凝土地面、密集建筑物和过往的行人，给接收点的埋设带来困难，当地表无法埋设接收点时，过多地作空道处理将损失来自地下的反射信息。我们采取的措施是：利用石膏把检波器埋置在路面上，做到“平、稳、正、直、紧”，确保检波器与水泥混凝土和柏油路面耦合，达到同步振动，尽可能多地获取地下目的层的反射信息，避免空道。②环境噪声问题。环境噪声是在城区进行地震勘探面临的难题，城区内交通线路四通八达，人和车辆来往十分频繁，环境噪声随时存在。这些噪声的频率、速度与有效信号重叠在一起，很难将它们完全分开，从而影

响采集资料的信噪比。面对环境噪声的干扰, 我们采取的措施是: 利用“时间差”进行施工, 通过对环境噪声的调查, 寻找噪声相对小的时间段进行采集。结合现场实际及试验结果, 埋设好检波器, 克服因埋设带来的虚反射, 尽最大可能压制干扰 (李桂林等, 2004)。在保证探测目标具有足够分辨率的情况下, 尽可能提高叠加次数, 为资料处理人员提供各方面的反射信息, 以便在处理过程中进行噪声压制。③测线经过了很多大型障碍物。我们采取的措施是实地分析障碍物的特点, 在技术规范允许范围内偏移检波点和炮点, 水塘区采用沉沙法、插杆法等, 尽量减少空炮, 并在障碍物两端加密炮点, 确保覆盖次数符合设计要求 (刘祖珉, 2007)。本次试验中测线的设计和信号的采集过程, 为城市和山区的活断层勘探提供了宝贵的经验。

本文得到云南省地震局张建国、杨润海、姜朝松、崔建文研究员和谢英情、赵晋明高级工程师的帮助, 在此表示感谢。

### 参考文献:

- 邓起东. 2002 城市活动断裂探测和地震危险性评价问题 [J]. 地震地质, 24 (04): 601—604.
- 方盛明, 张先康, 刘保金, 等. 2002 探测大城市活断层的地球物理方法 [J]. 地震地质, 24 (4): 606—612.
- 姜朝松, 樊友心, 邵德晟, 等. 1999 昆明市地面沉降 [M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 姜朝松, 周瑞奇, 胡耀雄. 2003 昆明盆地的地质构造特征 [J]. 地震研究 26 (1): 68—75.
- 李桂林, 梁运基, 王德志, 等. 2004 渐变观测系统的设计原则及其应用 [J]. 石油地球物理勘探, (4): 101—104.
- 刘祖珉. 2007 城市工程中灵活宽线地震勘探及数据处理研究 [D]. 成都: 成都理工大学.
- 潘纪顺, 刘保金, 朱金芳, 等. 2002 城市活断层高分辨率地震勘探震源对比试验研究 [J]. 地震地质, 24 (04): 533—539.
- 杨润海, 许昭永, 王彬, 等. 1999 多波浅层地震勘探中的断层识别 [J]. 地震研究, 22 (3): 280—283.
- 俞维贤, 谢英情, 张建国, 等. 2004 昆明盆地周边地区主要断裂活动时代研究 [J]. 地震研究, 27 (4): 67—72.
- JSGC—04 中国数字地震观测网络技术规程 [S].

## Design of Seismic Exploration Line on the Basement Rift in Kunming Basin and Experimental Analysis for Construction Parameters

XIE Li, HU Xionglin, GUO Ruojin

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

In order to have a further understanding for the distribution of depth of active faults in Kunming, we deployed an EW-trending KM4 exploration line crossing mid-deep layer detection profile in Kunming Basin on the basis of the exploration of shallow seismic reflection. Through the experiment and analysis of the construction parameters, we determined the parameters fit for reflection exploration of Kunming Basin, carried out mid-deep layer seismic reflection exploration (2-3 km effective exploration depth), and gave the spatial relationship of active concealed faults in the deep part and basement of studied area, the location of deep faults, and the relationship between shallow faults and basement faults in the basin. This work provides cherish experiences for exploring active faults in urban and mountainous areas.

Key words: Kunming Basin, basement fault, seismic exploration, parameter experiment