

## 新疆乌什地震带断裂研究的综合地球物理方法

史丽艳<sup>1</sup>, 朱传庆<sup>2</sup>, 杨书江<sup>3</sup>, 杨大克<sup>4</sup>(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;  
3. 东方地球物理公司, 河北涿州 072751; 4. 地壳运动监测工程研究中心, 北京 100036)

**摘要:**本文介绍了重力、磁力、大地电磁测深、地震等地球物理资料与地震相关的活动断裂的识别标志,并以新疆乌什地震带为例分析了综合各种物探资料研究活动断裂的方法。结果显示根据不同的研究目的选择合适的针对性方法可以较好的获得断裂的展布、深部或者活动性等特征。

**关键词:**乌什地震带; 活动断裂; 地球物理方法; 重、磁力; 大地电磁测深

中图分类号: P631; P315.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2007)02-0156-05

Comprehensive Geophysical Method for Active Fault Research  
in Wushi Seismic Belt, XinjiangSHI Li-yan<sup>1</sup>, ZHU Chuan-qing<sup>2</sup>, YANG Shu-jiang<sup>3</sup>, YANG Da-ke<sup>4</sup>(1. Institute of Earthquake Prediction, CEA, Beijing 100036, China;  
2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;  
3. Bureau of Geophysical Prospecting Co. Ltd., CNPC, Hebei Zhuozhou 072751, China;  
4. Crust Movement Monitoring Engineering and Research Center, CEA, Beijing 100036, China)

**Abstract:** In this paper the marks for distinguishing the active fault relating to earthquakes in geophysical data, such as gravity and geomagnetic fields, magnetotelluric exploration and seismic prospecting, are introduced. Taking the Wushi seismic belt as the example, the method of synthesizing those geophysical exploration data for active fault research is analyzed. The result shows that choosing different data group according to different research purpose could get information of the seismic belt such as fault distribution, deep structure and active features.

**Key words:** Wushi seismic belt; Active faults; Geophysical method; Gravity and magnetic force; Magnetotelluric exploration

## 0 引言

断裂活动是地震的最主要原因之一,强震的孕育和发生与断裂活动有密切的关系,这不仅被大量的实验和地震现象所揭示,而且也被现代地震学所证实。近年来邵辉成、刘华峰等<sup>[1]</sup>应用最优化模型建立了断层与地震的相互关系模型:总体上距活断层越近,地震发生的概率值越高。表明活断层与地震的关系较为明确。

断裂带地表坡度陡,重力梯度值大,重力、磁力等地球物理场上特征明显。而因其规模较大,变形强烈,所以深部结构又容易被大地电磁测深、地震测

深等物探方法揭示。根据不同的研究目的,选择合适的针对性方法,可以较好的获得断裂的展布、深部或者活动性等特征。通过各种地球物理资料的结合,研究地震相关活动构造的平面展布、深部结构,是一个行之有效的,对认识地震带的区域分布规律有一定的参考意义。虽然地球物理手段已成为研究地震活动的常用手段,也有许多科技工作者在这方面做出了理论和实践上的创新<sup>[2-7]</sup>,但以往的研究多是通过一种手段研究单一问题,或者虽用多种手段研究,但对各种方法的优劣性缺乏综合的研究

收稿日期:2007-02-14

作者简介:史丽艳(1981-),女(汉族),山东烟台人,硕士研究生,专业方向为固体地球物理学。

和阐述。本文以新疆乌什地震带为例,对运用综合地球物理方法研究地震相关断裂做了阐述,并对比了各种地球物理方法的特性,及在断裂研究上的不同作用。

## 1 地球物理资料对活动断裂的反映

重、磁、电、震是最常用和最成熟的地球物理探测方法,对断层探测和识别技术都比较成熟,并各具不同的效果和作用。许多研究者利用不同地球物理方法探测活动断层取得了较好的效果,这些成果对总结断裂在地球物理资料上的表现特征,探索识别断裂的新手段铺垫了坚实的基础。

### 1.1 重磁资料

不同级别的断裂往往是不同级别构造单元的分界线,并且造成两侧地层的物性差异,因此在地球物理场上往往表现为不同异常区的分界线或者线性的异常。布格重力异常图上断裂的识别标志主要有:线性重力高与重力低之间的过渡带;两侧异常特征明显错动的部位;串珠状异常的两侧或轴部所在位置;两侧异常特征明显不同的分界线;封闭异常等值线突然变宽、变窄的部位;等值线图扭曲部位。在磁异常图中主要表现为:磁异常的密集带或正负异常的突变带;磁场分布性质的突变带或异常走向的突变带;串珠状、带状或雁行排列的异常带<sup>[4]</sup>。

另外,如果重磁测量剖面图上台阶状的重力异常形态和“马鞍形”的磁异常(两边高、中间低)反映了断层的可能位置(图1)。

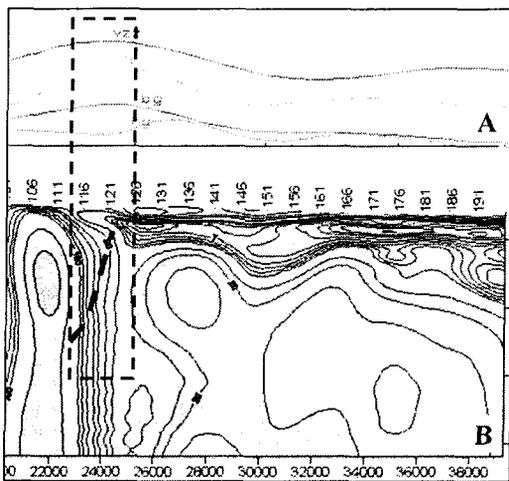


图1 电法、重磁剖面上断层的综合识别

Fig.1 Synthetically distinguish fault on the electrical exploration, gravity and magnetic sections.

### 1.2 地球物理测深

最常用的地球物理测深手段有两种:大地电磁

测深和人工地震测深。大地电磁测深主要用于研究地壳和上地幔构造,不同周期的电磁场信息具有不同的穿透深度,因此研究大地对天然电磁场的频率响应可获得地下不同深度介质电阻率分布的信息。大地电磁测深可以提供多种电性断面(如曲线断面、相位断面、视电阻率断面,反演剖面等)。各种断面对断裂都有较好的反映,如曲线断面上相邻测点曲线形态发生明显变化,相位等值线断面图上等值线密集带或发生扭曲畸变等,都代表了断裂可能发育的位置。连续大地电磁测深(CEMP)二维反演剖面是研究深部结构较常用的地球物理资料,断裂在剖面上的表现也比较清楚:主要为电阻率等值线的扭曲畸变,逆冲断裂发育部位高阻向低阻逆掩的特征明显;断层面破碎含水有时显示为线性低阻。

地震剖面上断层特征与地质剖面特征相对应。断层在地震剖面上显示特征多种多样<sup>[4]</sup>,主要有:

(1) 反射波发生错断。断层两侧同相轴发生错断,但反射波特征清楚,波组或波系之间关系稳定,一般为中、小型断层的反映。

(2) 反射波同相轴数目突然增加、减少或消失。波组间反射波同相轴数目发生突变,表现为下降盘同相轴数目逐渐增多,上升盘同相轴数目突然减少。

(3) 反射波同相轴形状突变,反射零乱并出现空白反射。由于断层错断引起两侧地层产状突变,或断层的屏蔽作用造成下盘反射同相轴零乱并出现空白反射,一般指示为边界大断层。

(4) 反射波同相轴发生分叉、合并、扭曲和强相位与强振幅转换等,一般是小断层的反映。

(5) 异常波的出现。时间剖面上反射波错断处往往伴随发育异常波,量常见的是断面波、绕射波,这些特殊波的出现是识别断层的一种标志。

由于不同的地球物理方法,具有不同的探测深度和效果,所以结合各种地球物理方法在活动断层探测中的不同作用,利用不同组合的地球物理方法探测与识别活动断层,对于提高断层识别的可靠性和精确性具有重要的作用。如图1为塔里木盆地西昆仑山前某剖面的重磁(A)和电法(B)异常特征图。在虚线矩形所圈部位重力(vzz、res、bg)为由低到高变化的梯级带;磁力(hg)表现为马鞍状异常;电法剖面上显示为高阻和低阻的陡变带,且高阻具有向低阻逆掩的特征。通过各种资料的综合约束,可以较准确的判断断层的发育位置和深部特征(虚线表示可能发育的断裂)。

## 2 地球物理方法在乌什地震带断裂研究上的应用

天山地震带是塔里木盆地的地震多发区之一,包括北天山地震带、中天山地震带和南天山地震带等<sup>[8]</sup>。该区的地震发生多与断层活动有关<sup>[6]</sup>,如中天山地震带 1889 年阿拉木图 8¼ 级地震,发震构造为山前逆断裂—褶皱带;南天山最大震级为 8¼ 级的 1902 年阿图什地震,发震构造为天山构造带与昆仑山构造带间带有走滑分量的 NEE 向托特拱拜孜—阿尔帕雷克逆断裂。天山地区 7 级以上地震常发生在新生代前陆盆地边缘的逆断裂—褶皱带上;6 级左右地震或者发生在山间盆缘/山麓近 EW 向逆断裂—褶皱带上,或者发生在 NW 向“类转换断层”上。发震构造主要为 NEE、NW 和近 EW 向逆断裂,其次为 NW 向走滑断层或“类转换断层”<sup>[6]</sup>。

乌什属于南天山地震带(图 2)。2005 年以来该区发生里氏 5.1 级以上地震 3 次(据中国地震台网中心信息):于 2005 年 2 月 15 日、16 日两天连续分别发生 6.2 级、5.1 级地震;同年 4 月 6 日又发生 5.1 级地震。据柔洁等的研究<sup>[9]</sup>,2005 年 2 月 15 日乌什 6.2 级地震的南北两端曾分别发生过 1915 年 12 月 17 日的 6.5 级地震及 1969 年 2 月 12 日的 6.5 级地震,地震点呈 NE 向条带分布,与 NE 方向展布的区域构造方向一致<sup>[9]</sup>。证实了该地区地震发生分布在平面上和断层的展布有着密切的关系。乌什县处于断层交汇部位,本次地震的烈度等震线,大体沿 NE 方向断裂带展布<sup>[9]</sup>。迈丹断裂、阿合奇和喀拉塔格断裂、乌什断裂为这一地区的主要断裂(该区主要断裂编号为:F<sub>1</sub> 阿合奇断裂;F<sub>2</sub> 古木别兹断裂;F<sub>3</sub> 乌什北断裂)。

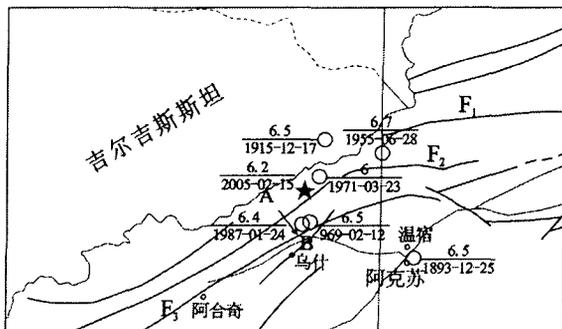


图 2 新疆乌什地区历史地震资料图  
(据文献[9]修改)

Fig. 2 Distribution of historical earthquakes in Wushi area.

### 2.1 发震断裂的深部结构

研究深部构造的主要手段有大地电磁测深(MT)、连续大地电磁测深(CEMP)和人工地震测深,技术上较为成熟,勘探深度大,分辨率较高。在地震发生区对于确定发震断裂、发震部位等,有一定的参考意义。

F<sub>1</sub> 阿合奇断裂在电法(MT、CEMP)反演电阻率剖面显示,该断裂主要为冲断推覆特征,推覆距离一般在 5~10 km,在不同段断裂样式有很大的差异。推测为一条长期活动的断裂,其继承性活动主要受南天山造山带的影响。野外可见古生界泥盆系、第三系上新统冲断披覆于第四系下更新统西域组砾岩之上。

F<sub>2</sub> 古木别兹断裂在电法剖面上(图 3)显示为山前高阻体向盆地内的逆冲断裂,断裂切穿了基底和地表,表明是新构造运动时期仍在活动的断裂。地震资料(图 4)显示断裂在发育的过程中可能存在过反转,即早期可能有控制古生界南深北浅沉积的张性断裂性质;后期发生反转,南部温宿凸起,古生代末中生代初抬升形成逆断层;中生代以后仍有后期构造变动;最终的表现形式是逆断层<sup>①</sup>。

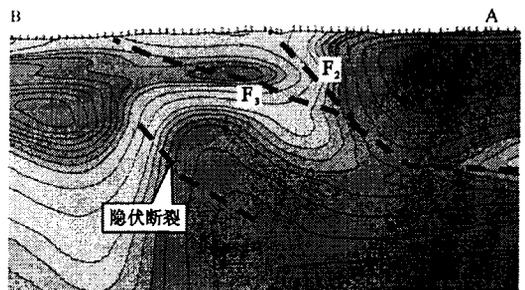


图 3 乌什地区断裂在 CEMP 二维反演剖面上的反映  
Fig. 3 The image of fault F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub> on CEMP section, Wushi area.

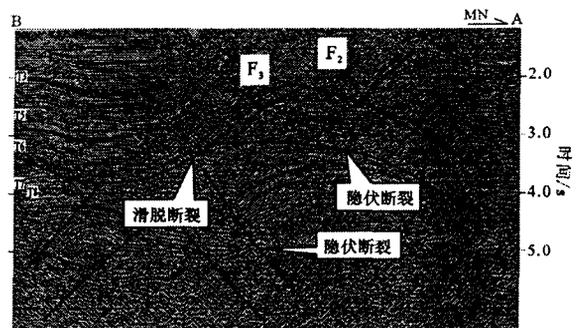


图 4 乌什地区断裂在地震剖面上的反映  
Fig. 4 The image of fault F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub> on seismic section, Wushi area.

① 何毅,王耀辉.乌什西部地区重磁力勘探.2003.东方地球物理公司.

F<sub>3</sub> 乌什断裂为基底断裂,而以第三系膏盐岩层、中生界煤层为滑脱层的盖层断裂受控于这一断裂系(图 4)。电法 CEMP 剖面 and 地震剖面都显示这一断裂系的断裂一般断开古生界基底和中生界,而止于下第三系膏盐岩层中为断面北倾的逆断层。乌什断裂推覆特征明显,错断了地表,深部断达基底,断面较平缓。

李涛等<sup>[8]</sup>对库车/南天山盆山耦合带的 2 200 多个有效记录的震源深度/频次进行了统计研究,得出如下认识:地震频次从浅到深逐渐增大,在 19~20 km 深度段达到最大峰值后又下降;共在 4 个深度段出现峰值:①5~6 km,②11~12 km,③19~20 km 和④41~42 km。其中,峰值①对应盖层底面,即库车前陆冲断带的主滑脱面;峰值②对应于褶皱基底底面;峰值③对应于结晶基底底面(中地壳顶面);而峰值④应该是下地壳内的一个速度差不明显的未名界面。由于南天山的俯冲,这几个界面,特别是中浅部的①②两个界面,是山前断裂的主要发生界面。乌什地震带地震的产生机制,被证实和山前断裂的活动有关。从电法和地震剖面上看,F<sub>2</sub>、F<sub>3</sub> 在 6 000 m 深度附近(该区地震波速度为 4 000 m/s 左右,双旅时间 3 s 处,深度约为 6 000 m)断面收敛到同一界面上。这与李涛等的研究是一致的,是可能的发震深度,本文对此不作深入讨论。

另外,剖面上可见深部发育隐伏断裂,在南天山的挤压作用下,也有活动的可能性。

## 2.2 断裂及地震带分布

重磁场对该区的主要断裂反映良好,通过重磁力异常可以追踪该区主要断裂的展布、走向特征。因此结合历史地震分布和断裂的关系图,可以总结出地震发生的规律,并可以划分潜在的地震危险区。

F<sub>1</sub> 阿合奇断裂:塔里木盆地的北部边界,划分开南天山晚古生代的泥盆纪、石炭纪地层与塔里木的古生代、中生代和新生代地层。该断裂总体为由北向南逆冲推覆。在有重磁力资料段,重力上表现为异常梯度陡变带及在断裂南、北两侧异常走向明显不同;磁力上为不同磁场区的分界线,并且沿断裂展布有局部高频串珠状磁异常。

F<sub>2</sub> 走向北东,断面南东倾。该断裂总体为由南向北逆冲,重力上表现为异常梯度陡变带。

F<sub>3</sub> 该断裂系主要表现为重力梯度陡变带及局部等值线的扭曲(图 3)。根据地层岩石密度资料分析,中生界盖层之间密度差较小,不足以引起这样的重力梯度变化;而中生界与古生界之间的密度差

较大,是引起重力梯度变化的主要因素。

重力水平总梯度更有效的反映了断层的平面分布信息,从乌什地区的重力水平总梯度异常图(图 5)上可以看到,南天山山前发育多组平行与造山带,向盆地呈弧形俯冲的断裂。由剖面上(图 3、4)可见,这些断裂有的呈推覆状态断达地表,铲式或反铲式深入基底;有的则沿盖层与基底间的活脱面发育(图 4),深部与根部的山前断裂一起收敛于基底内部。在扩张盆地边缘(即盆地与山脉结合带)散布的地震点以浅源为主,地震点围盆地分布,其中较深地震位于远离盆地的山脉中,地震常可能倾向于山脉<sup>[6]</sup>。这些地震形成的机制是由于盆地扩张,使盆地与山脉的结合带不断受到挤压产生脆性破裂引起的,构成盆地中部为稳定区、而盆地周围山脉为地震频繁区的格局。结合文献<sup>[8]</sup>、<sup>[9]</sup>的认识,乌什地区地震的产生机制是南天山向盆地俯冲,断层活动的结果。这些未断达地表的断层,伴随南天山的俯冲而活动,理论上产生地震活动的可能,应引起下一步研究的重视。而通过求取重力水平总梯度,或者通过重磁力剥层技术(将上覆地层的重磁力效应减掉,求取深部地层的重磁力效应)都可以将隐伏断裂的信息有效的提取出来,为划分地震的潜在危险区提供了地球物理证据。

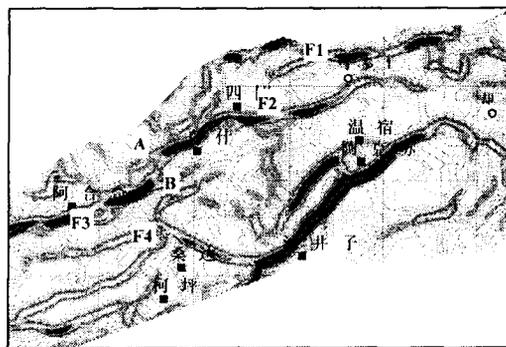


图 5 新疆乌什地震带重力水平总梯度异常图

Fig. 5 The gravity grads of Wushi seismic belt.

## 3 结论及讨论

断层活动只是地震活动的主要因素之一。地震活动除与地震断裂有关外,还与活动褶皱、活动盆地等有关,也可能与各自所处位置的断块运动有关。因此,讨论地震与活动断层的关系还应结合区域地质、地震资料、以及板块和地块的运动等。在中国大陆内部,活动断裂等与地震活动之间的相关性也是划分地震潜在震源区、分析强震构造和发震地点的依据。在挤压构造区,深部的断裂构造比浅部的断

裂构造与地震的关系更加密切,而盆地区地震往往发生在盖层以下的基底断裂上<sup>[2]</sup>。活动断层不仅与发震有关,还与地震的传播、衰减等有着密切的联系。而本文仅仅讨论了如何应用地球物理方法研究断裂的几何形态、展布特征等,断裂与地震的更深的关系,应当结合更全面、更专业的地震学理论来研究。

不同的地球物理方法采用的地球物理场具有不同穿透能力,因而探测深度也不同。分辨率上的组合与探测深度对应,不同的地球物理方法具有不同的分辨率。地球物理资料存在不可避免的多解性,单方法的研究受到的限制很多,各种方法的组合则可相互验证和补充,提高探测的精度和可信度。

另外,还可根据研究目的选择不同的方法。例如只需要了解活动断层的地表位置,重磁方法和联合剖面方法是快速而廉价的方法;需要了解断层的剖面宏观特性,电磁法和电阻率测深等方法非常有效;但如果需要对断层的内部结构和断层面等参数进行探测,需要有较高分辨率的地球物理方法,如地震方法<sup>[3]</sup>。活动断层最重要的一个研究内容是其活动性的探测,在这一项研究中了解断层的顶端和第四纪的关系是非常重要的,这时高分辨率地震测量并辅助放射性的氦气测量,能为该问题提供重要的信息<sup>[3]</sup>。

目前,国土资源、石油物探等部门在全国做了大量的地球物理勘探工作,积累了丰富的地球物理资

料,而地震部门在这方面开展的工作还很少,因此搜集和利用高精度的地球物理资料用作地震研究将可以节约大量成本,并可以在地震带划分、发震构造的深部结构等方面取得一定的研究成果。地球物理采集、处理、解释技术发展迅猛,三维可视化、人工神经网络等技术的采用,使解释结果更精确和直观。

#### [参考文献]

- [1] 邵辉成,刘华峰,岳珠峰.应用最优化模型分析活断层与地震的关系[J].地震地质,2006,28(3):405-410.
- [2] 沈军,陈建波,王翠,等.2003年2月24日新疆巴楚—伽师6.8级地震发震构造[J].地震地质,2005,28(2):205-212.
- [3] 李征西,曾昭发,李恩泽,等.地球物理方法探测活动断层效果和方法最佳组合分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2005,35(专辑):109-114.
- [4] 王秀明.应用地球物理方法原理[M].北京:石油工业出版社,2000:56-197.
- [5] 徐鸣洁,王良书,钟锴,等.塔里木盆地重磁场特征与基底结构分析[J].高校地质学报,2005,11(4):585-592.
- [6] 高长林,叶德燎,张玉笈,等.塔里木中新生代盆地扩张和盆地俯冲与地幔柱[J].石油实验地质,2003,25(6):661-678.
- [7] 徐锡伟,张先康,冉勇康,等.南天山地区巴楚—伽师地震( $M_s6.8$ )发震构造初步研究[J].地震地质,2006,28(2):161-178.
- [8] 李涛,王宗秀.塔里木盆地及邻区岩石圈拆离解耦与盆山格局关系的天然地震分析[J].地学前缘,2005,12(3):125-136.
- [9] 柔洁,艾买提·乃买提.2005年2月15日新疆乌什6.2级地震的地震环境及强震加速度记录[J].国际地震动态,2005,315(3):19-22.