

## 祁连山地震带地震短期综合预报方案研究

杨立明, 刘小凤

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**在多年地震预报研究和实践工作的基础上,系统研究了祁连山地震带地震活动短期阶段具有共性特征的地震活动增强、群体前兆异常演化、重点前兆和重点地震活动现象等,总结、提炼出了区域短期综合预报方案。

**关键词:** 共性特征; 地震活动增强; 群体前兆; 重点前兆; 短期综合预报方案

**中图分类号:** P315.75 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2006)03-0193-11

## A Composite Scheme of Earthquake Short-term Prediction in Qilianshan Seismic Belt

YANG Li-ming, LIU Xiao-feng

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 73000, China)

**Abstract:** On the base of research projects and practice work for earthquake prediction in past several years, the common features of the increase of seismicity, the evolution of abnormalities precouser in colony style, the key precursory abnormalities and key phenomena of seismicity in Qilianshan seismic belt are studied systematically. A composite scheme of earthquake short-term prediction in the region is summarized and epurated.

**Key words:** Common features; Increase of seismicity; Precouser abnormalities in colony style; Key precursory abnomy; Composite scheme of short-term prediction

### 0 引言

多年来震情跟踪与地震预报工作的实践经验和研究表明,地震前的异常表现是十分复杂的,通常不仅表现为一个指标、一个台项、一个手段的异常,而且表现为前兆异常的群体活动、地震孕育场的系统演化,且不同的前兆异常在震情决策中具有不同的作用。祁连山地震带多次 5 级以上地震前短期阶段异常具有“局部地区地震活动的增强、大范围群体前兆异常的成组同步活动、部分具有较高映震效能的前兆异常或区域显著地震事件的发生”等特征,体现了短期阶段地震孕育演化中不同方面的表现,为进一步开展震情跟踪和分析预报工作提供了初步的判据。本文对祁连山地震带中强震前的地震活动、群体前兆异常、重点前兆异常或显著地震事件等

进行综合分析,以总结、提炼短期阶段祁连山地震带地震综合预报方案。

### 1 祁连山地震带构造基础

祁连山地震带位于青藏高原东北部边缘,由一系列的深大活动断裂组成。作为地震活动主体区域的祁连山次级地块,四周被深大走滑活动断裂包围,形成一个相对独立的十分活动的次级地块。在 NNE 向区域应力场作用下祁连山次级地块内部发生挤压逆冲,形成一系列推覆体构造,由西向东分别为酒西盆地的北祁连山冲断推覆构造、老君庙冲断推覆带和武威盆地的古浪推覆体构造,从而在空间上形成了明显的隆起—盆地交替出现的构造特征,

收稿日期:2005-07-31

基金项目:国家“十五”科技攻关子专题“西北地区地震短期综合预测方法研究”(2004BA601B01-01-03);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC20060038

作者简介:杨立明(1966—),男(汉族),甘肃人,研究员,主要从事地震预报的理论、方法研究和地震监测预报实践工作。

如图 1 所示。

从图 1 中 1980 年—2000 年间祁连山地震带 4 级以上地震空间分布看出,地震空间分布轮廓勾画出明显的密集、起伏特征,与该区的推覆体—盆地交

替出现的构造分布具有较好的一致性,反映了区域地震活动受构造制约的事实,也赋予了区域地震活动的构造物理学含义。

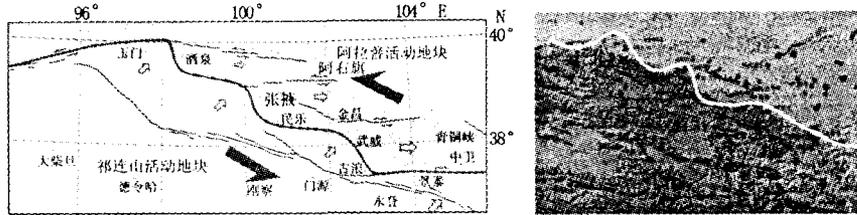


图 1 祁连山活动地块构造特征及 4 级以上地震空间分布

Fig. 1 Tectonic features and distribution of earthquakes with  $M_s \geq 4$  in Qilianshan active region.

有关祁连山地震带的分段研究结果很多。作为具有地震预报研究和实践含义上的构造分段应该具有清晰的基础和便捷的可操作性。图 1 所示的构造和地震活动空间分布特征,客观上划分出了祁连山地震带的以推覆体为中心的三段结构,即祁连山西段、中段、中东段;本文分别用 W、M、ME 来表示。

## 2 祁连山地震带的地震活动增强现象

### 2.1 地震活动增强的两种形式

地震活动增强是祁连山地震带短期阶段较为普遍的一种地震活动现象,对区域地震短期预报具有实用价值。在传统的研究工作中,有关增强的判定较为普遍的采取均值线法,即以均值线为标准,以超过 2 倍方差为异常。这种判定方式可以有效识别出地震活动频次明显高于均值线的异常活跃状态,但是不能识别出地震活动逐月增强的情况。地震的月频次逐月提高,未必就一定会超过两倍方差线。根据我们的总结,祁连山地震带地震活动增强具有两种不同的形式,即持续增强型和突发增强型。持续

增强型是指地震活动增强具有一定的时间延续性,在增强的过程中或增强活动结束后发震;突发增强型是指地震活动突然增强,月频度增大,明显的超过均值线,然后突然发震的情况。

#### 2.1.1 持续增强

图 2(1)是 2000 年景泰 5.9 级地震前祁连山中东段地区 2 级以上地震的月频次图。可以看出从 1 月份起地震活动开始了持续的增强,月频次逐月提高并持续到震前,呈现出显著的增强活动态势。从增强到发震 5 个月。图 2(2)是 1986 年门源 6.4 级地震前祁连山中东段地区 2 级以上地震的月频次图,地震活动增强具有与 2000 年景泰地震前类似的特征,从增强到发震 4 个月。图 2(3)所示的 1996 年天祝 5.4 级地震前的持续增强则有不同的形式:地震活动从 1995 年 10 月起出现明显的持续增强态势,到 1996 年 2 月持续时间达 5 个月,随后地震活动转入相对回返,3 个月后发生了天祝地震。表现为持续增强一回返发震的形态。

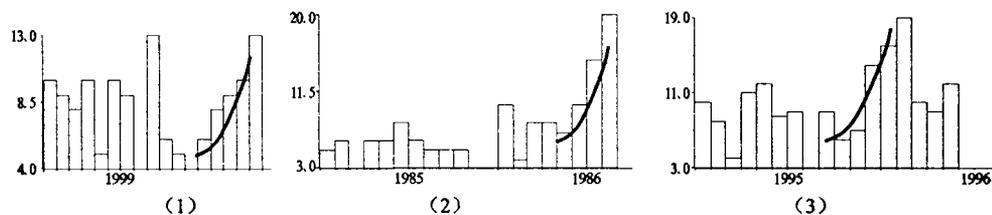


图 2 祁连山中东段地区地震活动持续增强现象

Fig. 2 The increases of seismicity with continual style in ME segment of Qilianshan seismic belt.

对 1985—2004 年地震活动进行逐月扫描,找出类似的持续增强活动现象共 22 次。从中可以得出:(1)持续增强活动是一种较为普遍的增强形式,有持续增强—发震和持续增强—回返发震两种形态;(2)持续增强的时间一般在 3~5 月,距发震一般 1~4

月,平均 2.3 月;(3)除 1992、1997—1998 年间出现过四次增强后没有发生 5 级以上地震外,其余的 19 次增强后均发生了区域 5 级以上地震或附近地区的 7 级以上地震,映震率 86%;另外,1985—2004 年持续增强活动累计时间 85 个月,占总研究时段的

35%。

2.1.2 突发增强

图 3(1)是 1988 年 11 月 8 日肃南 5.3 级地震前祁连山中段地区 2 级以上地震的月频次图,可以看出 1988 年 10 月有一个突出的增强,地震活动的月频次远远超过了历史数值,呈现出显著的突发增强的活动态势,距发震 1 月。图 3(2)是 2001 年 7 月 11 日肃南 5.4 级地震前祁连山中东段地区 2 级以上地震的月频次图,具有类似的突发增强特征。有意思的是该图中 2000 年 1—6 月地震活动呈现明显的持续增强态势,恰好反映了 2000 年 6 月景泰 5.9 级地震前的异常增强。

进一步分析祁连山西段、中段、中东段等不同段的地震活动突发增强过程,寻找出突发增强的区域、突发增强距主震间隔、对应地震等统计如表 1 所示。可以看出:(1)突发增强一般是 1 月尺度的预报指标;(2)突发增强区域与未来主震没有明显的对应关系。

2.2 地震活动增强的组合活动特征

祁连山地震带地震活动增强具有较为复杂的形态,增强活动可能在整个地震带上出现,也可能在地震带上的部分段落出现;既可能出现单纯持续增强

发震的形态,也可能持续增强发震与突发增强发震同时出现;在持续增强发震异常中,既可能存在持续增强发震形态,也可能存在持续增强一回返发震等不同组合。

表 1 突发增强区域与主震关系统计表

| 序号 | 突发增强时间  | 突发增强区域 | 时间间隔/月 | 对应地震                |
|----|---------|--------|--------|---------------------|
| 1  | 1986-08 | 中东段    | 0      | 1986-08-26 门源 6.4 级 |
| 2  | 1988-10 | 中段     | 1      | 1988-11-22 肃南 5.3 级 |
| 3  | 2001-06 | 中东段    | 1      | 2001-07-11 肃南 5.4 级 |
| 4  | 2002-11 | 中段     | 1      | 2002-12-14 玉门 5.9 级 |

图 4 是 2000 年 6 月 6 日景泰 5.9 级地震前祁连山西段、中东段、中段等区域的 2 级以上地震月频次柱状图。可以看出,该次地震前存在持续增强的异常现象,其中西段、中段表现出持续增强一回返发震的特征,而中东段则呈现为持续增强发震的特征。

图 5 是 2002 年 12 月 14 日玉门 5.9 级地震前祁连山西段、中东段、中段的 2 级以上地震月频次柱状图。可以看出,该次地震前存在增强异常现象,其中中段既表现出明显的持续增强一回返发震的异常特征,也具有明显的突发增强发震的特征,而西段、中东段则没有异常显示。

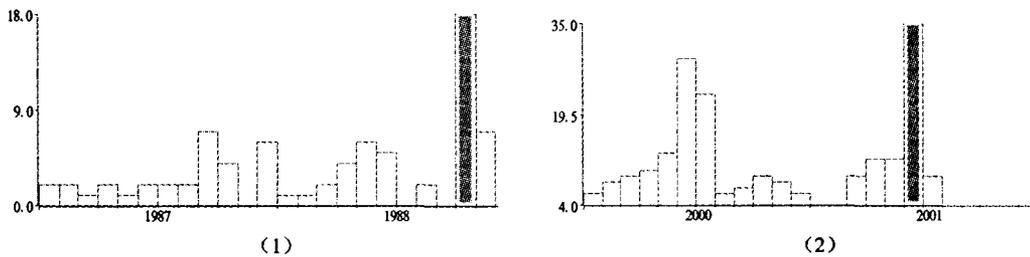


图 3 祁连山地震带地震活动突发增强现象

Fig. 3 The increases of seismicity with sudden style in Qilianshan seismic belt.

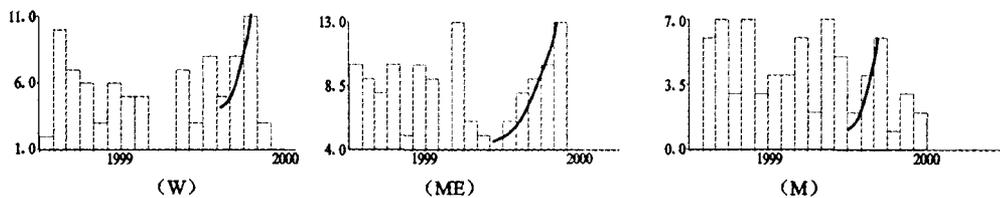


图 4 2000 年 6 月 6 日景泰地震前不同段地震活动增强活动

Fig. 4 The increases of seismicity in three segments of Qilianshan seismic belt before Jintai earthquake on Jun. 6, 2000.

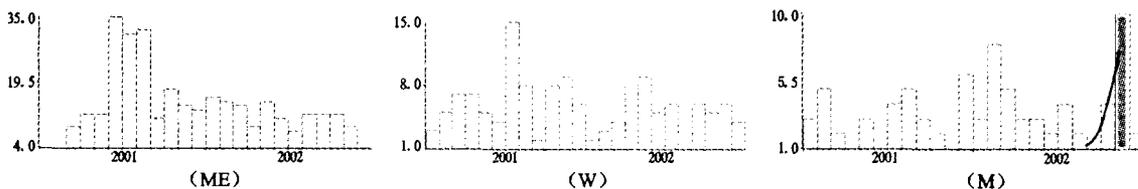


图 5 2002 年 12 月 14 日玉门地震前不同段地震活动增强活动

Fig. 5 The increases of seismicity in three segments before Yumeng earthquake on Dec. 14, 2002.

对 1985—2004 年间祁连山地震带所发生的 5 级以上地震进行全面的研 究, 共计发生 5 级以上地震 15 个, 可以分为 12 组, 与地震活动增强现象的关系见表 2。可以看出: (1) 地震前的增强活动可能在祁连山地震带的一段活动, 也可能在地震带的三个区段都出现; (2) 出现增强活动的区段与未来地震位置的关系不很明了, 未来的地震可能在增强的区段,

也可能不在增强的区段; (3) 突发增强一般距地震在一月左右或一月内; (4) 对持续增强发震型的增强活动来讲, 以持续增强满三个月作为异常开始时间, 未来 1~3 月发震; 对持续增强一回返型的增强活动来讲, 增强的转折可以作为指标, 未来 1~3 月, 最长 4 个月发震。

表 2 祁连山地震带中强地震前不同区段地震活动增强活动统计表

| 序号 | 对应地震       |     |      | 所在区段 | 增强结束到发震时间间隔/月 |   |   | 演化特征                               |
|----|------------|-----|------|------|---------------|---|---|------------------------------------|
|    | 时间         | 地点  | 震级/M |      | ME            | M | W |                                    |
| 1  | 1986-08-26 | 门源  | 6.4  | ME   | 1             |   |   | ME 段震前 3 个多月持续增强                   |
| 2  | 1988-11-22 | 肃南  | 5.3  | M    |               |   |   | M 段震前 1 月突发增强;                     |
|    | 1988-12-26 | 临泽  | 5.1  |      |               | 1 | 2 | W 段增强一回返 2 个月发震                    |
| 3  | 1990-10-20 | 景泰  | 6.2  | ME   |               |   |   | M、W 段增强一回返 1~4 个月发震;               |
|    | 1991-01-02 | 祁连  | 5.1  |      |               | 1 | 4 |                                    |
| 4  | 1991-10-01 | 门源  | 5.2  | ME   |               |   |   | W 段增强一回返 4 个月发震                    |
|    | 1992-01-12 | 嘉峪关 | 5.4  |      |               |   |   |                                    |
| 5  | 1992-06-21 | 祁连  | 5.0  | M    | 1             |   |   | ME 段增强发震                           |
| 6  | 1993-10-26 | 托莱  | 6.0  | M    | 4             |   |   | ME、W 段增强一回返 4 月发震                  |
| 7  | 1995-07-22 | 永登  | 5.8  | ME   | 2             |   |   | ME、W 段增强一回返 2~3 月发震                |
| 8  | 1996-06-01 | 天祝  | 5.4  | ME   | 3             |   |   | ME、M、W 段增强一回返 3~4 月发震              |
| 9  | 2000-06-06 | 景泰  | 5.9  | ME   | 3             |   |   | ME 段持续增强发震; W、M 段增强一回返 2~3 月发震     |
| 10 | 2001-07-11 | 肃南  | 5.3  | W    | 3, 1          |   |   | ME、W 段增强一回返 3~4 月发震; ME 段前 1 月突发增强 |
| 11 | 2002-12-14 | 玉门  | 5.9  | W    |               |   |   | M 段震前 1 月突发增强                      |
| 12 | 2003-10-25 | 民乐  | 6.1  | M    | 4             |   |   | ME、M 增强一回返 2~4 月发震                 |

### 3 青藏块体东北缘前兆场状态与短期综合特征研究

#### 3.1 定点前兆观测网络

青藏块体东北缘地区的前兆观测系统对中强以上地震前兆场的状态及其演化具有一定的监测能力, 主要包括地电、地磁、应变、应力、地倾斜、水(气)氡、水汞、水化、水位、流量、地温、电磁波等, 手段较为齐全, 且大部分具有 1980 年以来的连续记录资料。但是也普遍存在观测质量不高、连续性较差、映震能力参差不齐、台站空间布局不尽合理等问题, 在一定程度上影响了观测结果在地震预报中的应用。为了更好的研究该区前兆场状态, 对该区的前兆观测系统进行筛选、提炼, 形成区域前兆观测网络, 从而使得研究工作建立在统一的前兆观测基础之上。为此, 从区域内 54 个流体台项、13 个定点形变台项、23 个电磁台项中, 按以下约定筛选出部分台项来构建区域前兆观测网络: (1) 观测质量相对较高; (2) 观测数据的时间足够的长; (3) 映震效果较高; (4) 空间布局相对合理。按此约定剔除了资料不连续、观测质量明显不好的台项, 选择的 32 个台项一般具有三次以上的映震效果, 其中包括流体资料 16 台项、电磁 9 台项、形变 7 台项。这些台站按学科、地域统计如表 3 所示。

表 3 前兆观测网络基本情况统计表

| 序号 | 台站      | 测项   | 起始时间 | 映震数 | 序号   | 台站              | 测项    | 起始时间 | 映震数 |
|----|---------|------|------|-----|------|-----------------|-------|------|-----|
| 1  | 嘉峪关     | 水氧   | 1989 | 9   | 18   | 武威              | 地电    | 1985 | 10  |
| 2  | 西武当     |      | 1990 | 3   | 19   | 临夏              |       | 1985 | 9   |
| 3  | 天祝      |      | 1991 | 6   | 20   | 兰州              |       | 1985 | 8   |
| 4  | 平凉附件厂   |      | 1985 | 5   | 21   | 山丹              |       | 1988 | 5   |
| 5  | 白银黄茂    |      | 1998 | 5   | 22   | 嘉峪关             |       | 1991 | 4   |
| 6  | 青海黄源    |      | 1998 | 5   | 23   | 武都              |       | 1991 | 1   |
| 7  | 西宁      | 1986 | 4    | 24  | 定西   | 1985            |       |      |     |
| 8  | 通渭      | 1985 | 5    | 25  | 宁夏固原 | 1991            |       | 1    |     |
| 9  | 武山 1 号泉 | 1989 | 4    | 26  | 高台   | 应变              |       | 1998 | 3   |
| 10 | 天水官泉    | 1985 | 1    | 27  | 武都   |                 |       | 1998 | 3   |
| 11 | 宁夏干盐池   | 1985 | 2    | 28  | 肃南   | 1998            | 4     |      |     |
| 12 | 宁夏王民    | 水位   | 1985 | 2   | 29   | 兰州              | 倾斜    | 1987 | 8   |
| 13 | 兰州大滩    | 1985 | 6    | 30  | 青海乐都 | 1998            |       | 4    |     |
| 14 | 清水      | 流量   | 1985 | 8   | 31   | 青海门源            |       | 1985 | 6   |
| 15 | 礼县      | 1985 | 4    |     |      | CO <sub>2</sub> | 1990  | 3    |     |
| 16 | 青海平安    | 电磁波  | 1999 | 2   | 32   | 固原              | He 气体 | 1990 | 4   |
| 17 | 刘家峡     | 应力   | 1985 | 10  |      |                 | CL    | 1990 | 3   |

#### 3.2 短期阶段前兆异常主要特征及识别

归纳起来主要的异常形态包括快速下降(上升)型、缓升(缓降)型、破年变型等几种。

##### 3.2.1 快速下降(上升)型

武威地电在震前的快速下降变化是一种很典型的异常, 地震后快速或缓慢恢复。2003 年 4 月 17 日德令哈 6.6 级地震前, 武威地电的 EW 道于 3 月 27 日出现快速下降, 于 4 月 18 日达到最低值, 幅度变化量达 23.7%, 震后平稳波动至 6 月 18 日, 随后快

速恢复正常。2003年10月25日民乐6.1级及11月13日岷县5.2级前EW道测值于8月28日快速下降至9月2日,然后转平波动直至发震,12月下旬恢复正常变化(图6)。

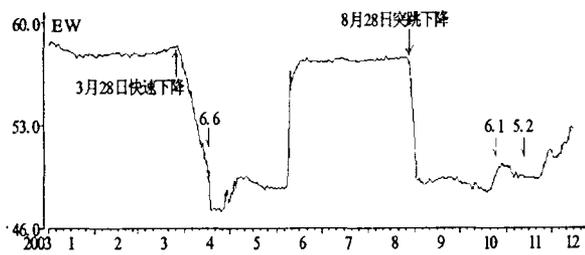


图6 武威地电异常曲线

Fig. 6 The abnormal curve of Wuwei geo-electricity.

### 3.2.2 缓慢下降(上升)型

是该区一种常见的异常形态,武威地电、刘家峡应力、武山水氢、临夏地电等具有这种形态。图7(a)是武威地电的缓变形态,一般出现在震前3月左右;图7(b)是刘家峡应力异常变化形态,该台观测曲线在多次地震前出现各向异性的变化,地震之后恢复正常。

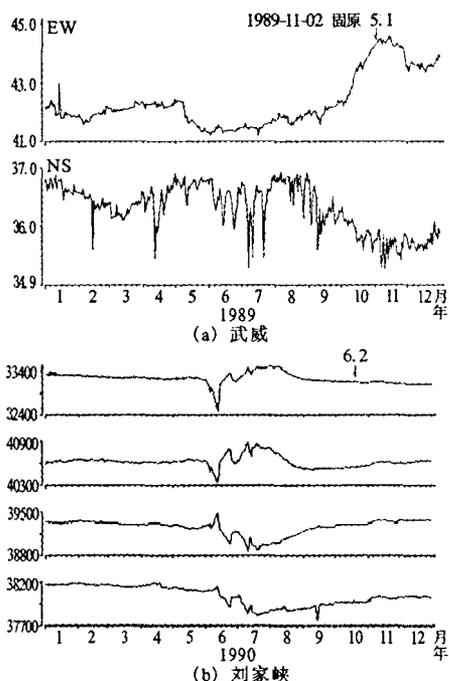


图7 武威地电和刘家峡应力异常曲线

Fig. 7 The abnormal curves of Wuwei geo-electricity and Liujiaxia stress.

### 3.2.3 破年变型

也是该区一种常见的异常形态。兰州大滩水位、平凉附件厂水氢等观测资料常常具有这种形态。图8是兰州大滩水位的异常曲线,其中上面曲线为

无地震时的正常年变曲线,下面两条曲线分别为1996年天祝地震和2000年景泰地震时的曲线。可以看出,震前曲线形态不正常,没有年变形态,但地震之后均恢复正常。

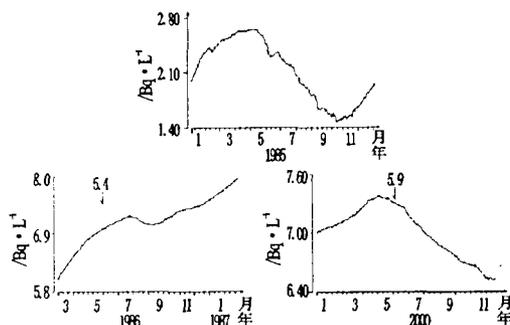


图8 兰州大滩水位异常曲线

Fig. 8 The abnormal curves of Lanzhou Datan water level.

## 3.3 前兆场状态及其与地震活动的关系

### 3.3.1 前兆网整体异常状态及其与地震活动的关系

前述32个地震前兆台站构成了青藏块体东北缘地区的前兆观测网络。就每一个台站而言,其观测结果可能正常,也可能异常,32个台站观测结果的整体起伏和涨落,代表了前兆场的动态过程。以月为单位,月内出现异常的台站数与总台站数的比率可以定量的体现前兆异常场的动态。1985年以来青藏块体东北缘地区前兆观测网络异常月频次时间演化过程如图9所示。可以看出存在明显的阶段性特征:第一阶段为1986年6月至1987年7月,期间青藏块体东北缘在1986年8月至1988年1月期间发生了5次 $M_s$ 5.0以上地震,包括1986年8月26日门源6.4级地震;第二阶段从1989年10月至1991年1月,区内在1989年11月至1992年1月发生了4次5级以上地震,包括1990年4月26日共和7.0级和1990年10月20日景泰6.2级等地震;第三阶段从1994年12月至1996年7月,发生了2次5级以上地震,包括1995年7月22日永登5.8级和1996年6月1日天祝5.4级等地震;第四阶段从1999年6月至2001年9月,期间青藏块体东北缘及边邻地区发生了多次5级以上地震,包括2000年6月6日景泰5.9级、2000年9月12日兴海6.6级、2001年7月11日肃南5.3级、2002年11月14日昆仑山口西8.1级等地震;第五阶段从2002年3月至2004年9月,期间青藏块体东北缘及边邻地区发生了多次5级以上地震,包括2002年12月14日玉门5.9级、2003年4月17日德令哈6.6级、2003年10

月 25 日民乐 6.1 级、2003 年 11 月 13 日岷县 5.3 级、2004 年 9 月 7 日岷县 5.1 级等地震。

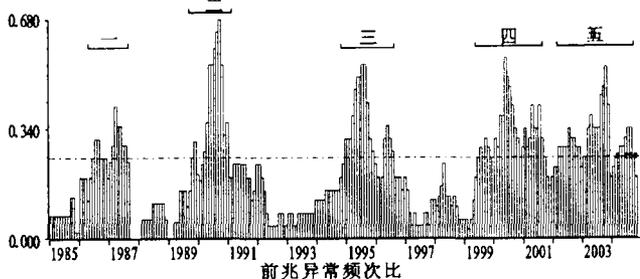


图 9 前兆观测网络异常月频次比

Fig. 9 Monthly abnormal frequencies of the precursor observation network for northeast margin zone of Qinghai-Tibet plateau.

考虑到 2000 年兴海 6.6 级、2001 年昆仑山口西 8.1 级等地震的强度大,影响范围大的因素,则 1985 年以来祁连山地震带及附近地区发生的 8 次 6 级以上地震中,除 1993 年 10 月 26 日托莱 6.0 级地震前前兆异常月频次比未显示出持续增长过程外,其余的 7 次 6 级以上地震均处于前兆月频次的峰值阶段;而 5~6 级地震中,除 1988 年 1 月 4 日灵武 5.5 级、1988 年 11 月 22 日肃南 5.7 级等两次地震外,其余的 5 级以上地震均发生在前兆月频次的峰值阶段。看出区域中强以上地震活动与前兆场的状态变化具有较高的呼应关系。

### 3.3.2 重点前兆观测基本状态

前述 32 个前兆台站的观测资料在地震预报中具有不同的映震效能。部分台站具有较高的预报效能、对应过多次地震;而其余的预报效能一般或较低、对应地震较少。为此将映震能力和效果较突出的、多次对应过中强以上地震的前兆观测作为重点异常。这样的台站有武威地电、清水流量、刘家峡地力、临夏地电和礼县流量等 5 个。

重点前兆异常的月频次曲线时间演化过程与 32 个前兆观测台站的整体前兆场的群体异常时间的演化过程大致一致(图 10),表明这几个台站的观测结果与整个祁连山地震带的前兆场动态演化过程具有较好的一致性,这可能也是这几个台站预报效能较高的原因;同时可以看出,局部范围的前兆异常演化过程也可反映出整体前兆场的变化过程。

### 3.4 前兆场演化过程的短期特征

地震孕育短期阶段,前兆场异常月频次比一般在震前 1~4 个月普遍存在数月尺度的持续增长现象,震后逐步恢复(图 11)。

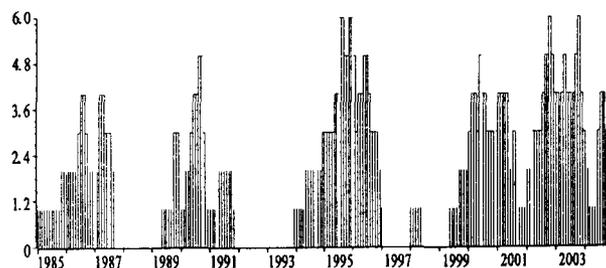


图 10 重点前兆异常月频次曲线

Fig. 10 Monthly abnormal frequency of key precursors stations.

## 4 区域重点地震现象和重点前兆异常研究

### 4.1 显著地震事件研究

#### 4.1.1 显著地震的特征

在青藏块体东北缘地区中强以上地震前,常常出现一些具有特殊含义的中强地震,震级大致分布在  $M_s 3.6 \sim 4.5$  之间;与未来主震的震级差为 1~2 级;时间上距主震几天至 1.5 月内。如 2002 年 12 月 14 日玉门地震前 12 天在距离未来震中约 100 km 的地方发生了  $M_s 4.0$  地震,与主震相差 1.9 级;2003 年 10 月 25 日民乐 6.1 级地震前 20 天内,距离未来主震 98 km、270 km 等处分别发生了  $M_s 3.7$ 、 $M_s 4.1$  地震。这些地震常常对未来短期、甚至临震阶段地震的发生时间、地点等具有一定的指示意义,称为显著地震事件。1984 年以来,祁连山地震带部分 5 级以上地震前显著地震事件统计如表 4 所示,可以看出,祁连山中段、西段地区的 5 级以上地震前的显著地震空间上距主震一般在 120 km 以内;而祁连山东段地区的显著地震距主震可能较远,也可能较近。

表 4 祁连山地震带中强地震前显著地震事件统计表

| 序号 | 地震         |     | 显著地震 |                                  | 空间距<br>离/km | 时间<br>差/天 | 震级差<br>/M  |
|----|------------|-----|------|----------------------------------|-------------|-----------|------------|
|    | 时间         | 地点  | 震级/M | 时间 震级/ $M_s$                     |             |           |            |
| 1  | 1984-01-06 | 武威  | 5.3  | 1984-01-02 3.8                   | 21          | 4         | 1.5        |
| 2  | 1984-02-17 | 祁连  | 5.2  | 1984-02-16 3.9                   | 10          | 1         | 1.3        |
| 3  | 1986-08-26 | 门源  | 6.4  | 1986-07-08 3.8                   | 370         | 48        | 2.6        |
| 4  | 1988-11-12 | 肃南  | 5.3  | 1988-10-01 4.2                   | 6           | 39        | 1.1        |
| 5  | 1990-10-20 | 景泰  | 6.2  | 1990-10-05 4.1                   | 490         | 15        | 2.1        |
| 6  | 1992-01-12 | 嘉峪关 | 5.4  | 1991-10-31 3.8<br>1991-11-30 3.6 | 120<br>50   | 72<br>42  | 1.6<br>1.8 |
| 7  | 1993-10-26 | 托莱  | 6.0  | 1993-08-06 3.4                   | 100         | 80        | 2.6        |
| 8  | 1996-06-01 | 天祝  | 5.4  | 1996-05-27 3.9                   | 410         | 4         | 1.5        |
| 9  | 2001-07-11 | 肃南  | 5.3  | 2001-06-21 3.9<br>2001-07-07 3.9 | 414<br>414  | 20<br>4   | 1.4<br>1.4 |
| 10 | 2002-12-14 | 玉门  | 5.9  | 2002-12-02 4.0                   | 127         | 12        | 1.9        |
| 11 | 2003-10-25 | 民乐  | 6.1  | 2003-10-06 3.7<br>2003-10-10 4.1 | 98<br>270   | 19<br>15  | 2.4<br>2.0 |

在实际应用中如何区分显著地震事件,即如何区分 4 级左右地震与后续将发生破坏性地震的 4

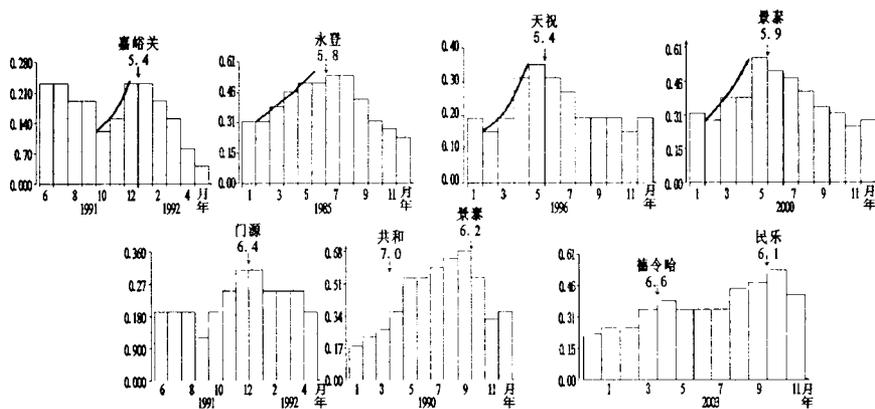


图 11 前兆异常月频次短期特征

Fig. 11 The short-term features of monthly abnormal frequency.

为了对显著地震的异常属性进行研究,以下从调制属性、地震频谱特征等方面对显著地震事件所具有的特征进行研究,以便区分显著地震事件与正常地震活动。

#### 4.1.2 显著地震的调制属性

中小地震活动的调制属性是中强以上地震前区域应力场增强到一定的程度时地震活动的一种表现,反映了区域应力水平已处于较高的水平,有利于强震的发生。一般将阴历二十八至初二(朔期)、初八至初九(上弦期)、十五至十七(望期)、二十二至二十五(下弦期)等期间发生的中小地震作为调制地震。

对 1984 年以来青藏块体东北缘地区发生的 12 次 5 级以上地震前半年时间内发生的  $M_L 4.0$  以上地震事件进行调制属性的分析如表 5 所示。

可以看出,在统计的 11 次中强地震中,震前  $M_L 4.0$  地震发生在调制时期内的有 9 次,占 82%。因此,中强以上地震具有调制属性可能是区分显著地震与正常地震的一个特征,如果再综合考虑 4 级左右地震发生时的前兆场状态,则大致可以识别出显著地震。

#### 4.1.3 显著地震的频谱特征分析

近年来景泰地震台数字化资料的频谱特征研究表明,临近中强以上地震前,中小地震的频谱存在频谱范围变窄、向低频端偏离等现象;而孕震早期或没有 5 级以上地震前的中小地震的频谱范围较宽、没有向低频端偏离的现象。

图 12(a)是 2000 年 9 月 12 日兴海 6.6 级地震前景泰台记录的两次地震,(1)是 7 月 13 日天祝 3.

2 级地震,该次地震具有频谱较宽的特征;(2)是 8 月 22 日九条岭 3.4 级地震,该次地震的频谱具有向低频偏移的特征,宽度也发生了较大的变化,集中在了低频端。两次地震的空间位置相距较近、地震的大小也相当,唯一的差异是第一次地震距离兴海地震时间约 2 月,而第二次地震距离兴海地震仅 20 天。

图 12(b)是 2001 年 7 月 11 日肃南 5.4 级地震前景泰台记录的两次地震,(1)是 6 月 18 日景泰 3.9 级地震,具有频谱较宽的特征;(2)是 7 月 6 日天祝 3.0 级地震,频谱具有向低频偏移的特征,宽度也发生了较大的变化。两次地震的空间位置相距较近,明显的差异是第一个地震距离肃南地震 23 天,第二个地震距肃南地震仅 5 天。

类似的现象还在 2000 年 6 月 6 日景泰 5.9 级、2000 年 12 月 27 日景泰 4.9 级地震、2004 年 9 月 7 日岷县 5.0 级等多次地震前出现。

破裂过程的声发射实验证实,随着微破裂的集结和裂纹的扩展,所辐射波的频谱会逐渐向低频移动。从不同压力作用下的声发射频谱对比图 13 可以看出,在 111 MPa 时发射的能量主要集中在低频部分,而压力为 54 MPa 时的声发射的能量频谱分布较广。对照这一实验结果,强震前出现的频谱变化也许可以理解为中强地震前由于区域应力场的累积,不同时段的中小地震的频谱特征会有所差异,越是临近主震,区域应力场越强,中小地震的频谱就越向低频移动。尽管中强震前显著地震事件的频谱变化的机理还不清楚,以上分析也许还存在各种问题,但是作为一种现象,中等地震所表现出的频谱变化

表5 中强地震前的  $M_L 4.0$  地震调制

| 序号 | 主震         |       |       | 显著地震(震前半年) |            |       |                |   |
|----|------------|-------|-------|------------|------------|-------|----------------|---|
|    | 时间         | 地点    | 震级/M  | 公历         | 农历         | 地点    | 震级/ $M_L$ 调制属性 |   |
| 1  | 2003-10-25 | 民乐-山丹 | 6.1   | 2003-10-10 | 2003-09-15 | 肃南    | 4.6            | 是 |
|    |            |       |       | 2003-10-06 | 2003-09-11 | 肃南    | 4.2            | 非 |
|    |            |       |       | 2003-07-18 | 2003-06-19 | 肃南    | 4.9            | 非 |
|    |            |       |       | 2003-07-02 | 2003-06-03 | 景泰    | 4.9            | 非 |
|    |            |       |       | 2003-04-19 | 2003-03-18 | 张掖    | 3.8            | 非 |
|    |            |       |       | 2003-04-18 | 2003-03-17 | 张掖    | 4.0            | 是 |
| 2  | 2002-12-14 | 玉门    | 5.9   | 2002-12-02 | 2002-10-28 | 酒泉    | 4.5            | 是 |
|    |            |       |       | 2002-11-16 | 2002-10-12 | 肃北    | 3.8            | 非 |
|    |            |       |       | 2002-09-03 | 2002-07-26 | 玉门    | 4.2            | 非 |
|    |            |       |       | 2002-03-04 | 2002-01-21 | 肃南    | 4.0            | 非 |
| 3  | 2001-07-11 | 肃南    | 5.3   | 2001-07-07 | 2001-05-17 | 天祝-武威 | 4.4            | 是 |
|    |            |       |       | 2001-06-21 | 2001-05-01 | 天祝-武威 | 4.4            | 是 |
|    |            |       |       | 2001-03-31 | 2001-03-07 | 门源    | 4.4            | 非 |
|    |            |       |       | 2001-02-08 | 2001-01-16 | 金塔    | 4.1            | 是 |
| 4  | 1996-06-01 | 天祝    | 5.4   | 1996-05-27 | 1996-04-11 | 天峻-祁连 | 4.0            | 非 |
|    |            |       |       | 1996-05-27 | 1996-04-11 | 天峻-祁连 | 4.4            | 非 |
| 5  | 1993.10.26 | 托来    | 6.0   | 1993-08-06 | 1993-06-19 | 托来    | 4.0            | 非 |
| 6  | 1992-01-12 | 嘉峪关   | 5.4   | 1991-11-30 | 1991-10-25 | 玉门    | 4.1            | 是 |
|    |            |       |       | 1991-10-31 | 1991-09-24 | 肃南    | 4.3            | 是 |
| 7  | 1990-10-20 | 景泰    | 6.2   | 1990-10-05 | 1990-08-23 | 天峻    | 4.6            | 是 |
| 8  | 1988-11-22 | 肃南    | 5.3   | 1988-10-02 | 1988-08-22 | 肃南    | 4.0            | 是 |
|    |            |       |       | 1988-10-01 | 1988-08-21 | 肃南    | 4.7            | 非 |
| 9  | 1986-08-26 | 门源    | 6.4 前 | 1986-07-08 | 1986-06-02 | 海原    | 4.3            | 是 |
|    |            |       |       | 1986-03-22 | 1986-02-13 | 海原    | 4.0            | 非 |
| 10 | 1984-02-17 | 祁连    | 5.2   | 1984-02-16 | 1984-01-15 | 祁连    | 4.4            | 是 |
| 11 | 1984-01-06 | 武威    | 5.3   | 1984-01-02 | 1983-11-30 | 武威    | 4.3            | 是 |
|    |            |       |       | 1984-01-01 | 1983-11-29 | 天祝-武威 | 4.0            | 是 |

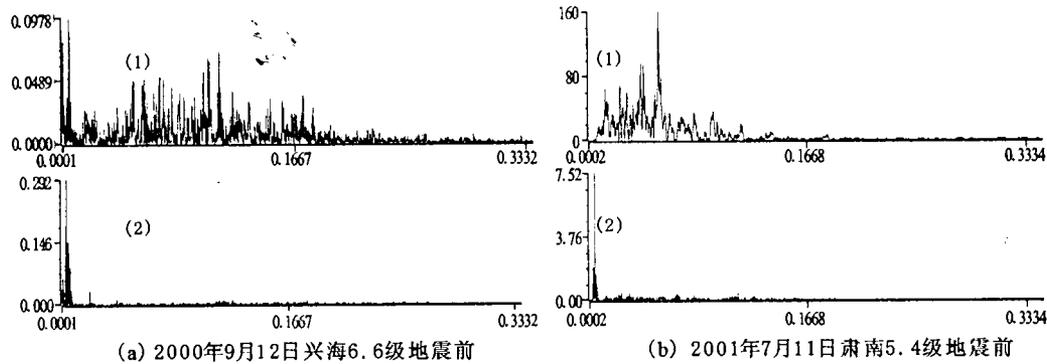


图12 震前景泰台显著地震频谱变化

Fig. 12 The changes of frequency spectrum of the outstanding earthquake recorded by Jingtai station before earthquakes.

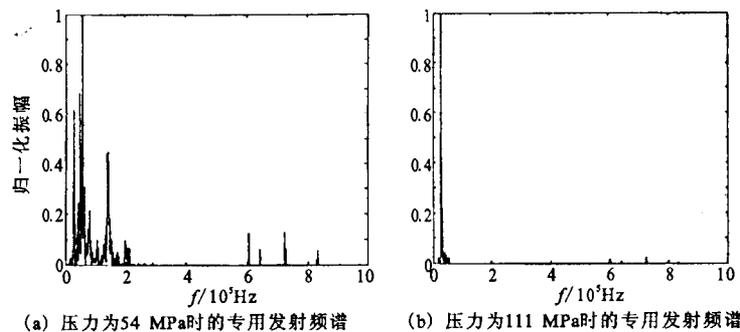


图13 不同压力下声发射频谱对比

Fig. 12 The frequency spectrums of acoustic emission with different presses.

特征可能对区域地震活动短期、乃至临震预报具有实用价值。

2004 年省内发生的多次显著地震事件的频谱变化及其与实际地震的关系也表明上述结论的有效性:

(1) 2004 年 6 月—8 月在祁连山西段地区发生了多次  $M_L \geq 4.0$  显著地震事件,均位于肃南以西。最近的台站为肃南台,利用肃南台的波形记录进行类似的计算,结果显示均未出现频谱范围变窄、向低频端偏离的特征。其后祁连山地震带也没有发生 5 级以上地震。

(2) 2004 年在甘东南地区发生了几次中等地震。选用合作台(震中距约 210 km)的波形记录,分析结果显示 8 月 26 日礼县  $M_L 4.9$  地震出现了频谱分布较窄,略向低频偏移的趋势,随后发生了 9 月 7 日岷县  $M_S 5.0$  地震,距发震 10 天时间。

(3) 2004 年 6 月临泽震群是一次非常显著的地震事件。选用山丹台(震中距约 100 km)的波形记录对其中较大的几次 4 级地震波形进行分析。结果均未出现向低频集中的现象,且频谱分布较宽,其后也没有发生 5 级以上地震。

#### 4.2 区域重点前兆研究

青藏高原东北缘地区的重点前兆观测除了前文提及的 5 个点外,还有青海省的格尔木水氦、平安电磁波及宁夏窝子滩形变。

##### 4.2.1 武威地电

武威地电的观测仪器是 DDC-2A 电子自动补偿仪,人工半自动化观测。由于 1980 年以前的观测资料不够连续,故采用 1983 年 1 月—2004 年 12 月期间的观测结果,对  $M_S 5$  级以上地震前的异常特征进行分析。20 余年的观测资料显示,该台的异常形态主要具有剧变型和缓变型。其中剧变型表现为快速下降(上升)—转折波动发震;缓变型表现为缓慢的持续数月的各向异性变化,然后发震。

(1) 剧变型:剧变型的震例主要包括 1984 年 1 月 6 日武威 5.3 级、1984 年 11 月 23 日灵武 5.3 级、

1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级、1987 年 8 月 10 日灵武 5.5 级、1987 年 10 月 25 日礼县 5.1 级、1990 年 10 月 20 日景泰 6.2 级、1991 年 10 月 1 日皇城 5.6 级、1992 年 1 月 12 日嘉峪关 5.4 级、1992 年 6 月 21 日祁连 5.0 级、1995 年 7 月 22 日永登 5.8 级、1996 年 6 月 1 日天祝 5.4 级、2001 年 7 月 11 日肃南 5.3 级、2003 年 4 月 17 日德令哈 6.6 级、2003 年 10 月 25 日民乐 6.1 级、2003 年 11 月 13 日岷县 5.2 级等地震。其中 2003 年德令哈地震、民乐地震前的异常形态具有十分典型的剧变型态(图 6)。剧变型异常的发生距地震大多数在 10 余天至 2 月之间。

(2) 缓变型:缓变型的震例主要包括 1988 年 11 月 22 日肃南 5.7 级、1989 年 11 月 2 日固原 5.0 级、2000 年 6 月 6 日景泰 5.9 级、2002 年 12 月 14 日玉门 5.9 级等地震。其中 1989 年固原 5 级地震前的形态是典型的缓变形态(图 7)。缓变型异常的发生距地震基本在 2 月至 3 个多月之间。

##### (3) 缓变型与剧变型的映震地域分析

由武威地电的震例特征可以得出,在距离武威较近的祁连山中东段及中段地区(景泰—托莱地区),异常表现为剧变型,对应的地震以短期或短临为主;在距离武威较远的祁连山地震带的西段张掖—肃南地区(托莱以西)、东段西海固地区(景泰以东)区域异常变化为缓变型或剧变型,对应的地震以短期阶段为主。

##### (4) 武威地电映震效能较高的根源分析

由以上分析可以看出,武威地电对区域内 19 次地震前均有较好的异常反应,映震效能较高。为了对这种较高的预报效能的根源进行分析,对 1980 年以来甘肃地区 11 个地电台站的观测资料按照类似的方式进行分析,统计出各个台站的映震次数见表 6。根据不同台站的观测极距,在均匀介质假设下利用地电阻率台站的探测深度计算公式计算出各个台站的探测深度  $H$ (表 6)。可以看出,台站极距越大,探测深度就越深,映震范围也就越大,映震率也就越高。

表 6 地电台的探测深度与映震频次表

| 台名    | 兰州  | 临夏    | 武威    | 平凉  | 武都  | 通渭  | 定西  | 天水  | 山丹  | 嘉峪关 | 四零四厂 |
|-------|-----|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $H/m$ | 600 | 1 000 | 1 680 | 595 | 700 | 600 | 700 | 724 | 700 | 700 | 294  |
| 频次    | 8   | 19    | 17    | 4   | 1   | 1   |     | 3   | 5   | 3   | 1    |

##### 4.2.2 刘家峡应力

该测项在 1984 年 1 月 6 日武威 5.5 级、1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级、1988 年 11 月 22 日肃南 5.7 级、1990 年 10 月 20 日景泰 6.2 级、1995 年 7 月 22

日永登 5.8 级、1996 年 6 月 1 日天祝 5.4 级、2000 年 6 月 6 日景泰 5.9 级、2000 年 9 月 12 日兴海 6.6 级、2002 年 12 月 14 日玉门 5.9 级、2003 年 10 月 25 日民乐 6.1 级等地震前具有较好的异常显示。异常

发生距发震平均 5.3 月,异常转折距离地震一般在 1~5 月之间,平均 3.5 月。

1984 年以来青藏块体东北缘地区 5 级以上地震与刘家峡应力对应关系如图 14 所示,其中四边和椭圆形区域内的地震前没有出现刘家峡应力的异常变化,而区域外的地震前出现了刘家峡应力的异常变化。可见祁连山东段地区的地震前几乎都有刘家峡应力的变化;祁连山西段部分地震前出现刘家峡应力的异常变化;甘东南及西秦岭北缘—南祁连山地震带的地震前几乎都没有刘家峡应力的异常变化。刘家峡应力的映震范围具有明显的构造属性。其原因可能与其所处的地质构造背景密切相关。刘家峡台位于 NNW 向逆冲性质的庄浪河断裂和 NWW 向左旋逆冲性质的马衔山北缘断裂的交汇部位。而庄浪河断裂相交于祁连山—海原断裂带这个大型构造体系,该构造体系中的祁连山北缘断裂带是比较贯通的深大断裂系;马衔山北缘断裂是西秦岭北缘断裂带的一支,虽然没有地质证据,但重力、地磁等资料显示西秦岭北缘断裂带向西延伸入青海境内并与拉脊山断裂相交。在这样的背景下,刘家峡应力对区域构造活动和应力、应变场变化自然非常“敏感”,但对发生在祁连山南缘断裂及其分支上的地震,则可能受到断层的“阻隔”作用影响而反应不明显。至于 1990 年共和 7.0 级地震,它是发生在盆地内部,既没有较大的断裂相连,更可能也受断层的“阻隔”作用影响而没有反映。

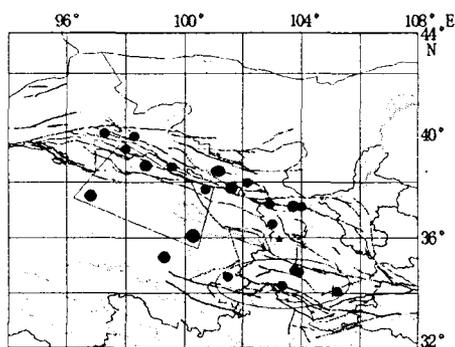


图 14 刘家峡台所对应地震的空间分布图  
Fig. 14 Distribution of earthquakes responded by Liujiaxia stress station.

#### 4.2.3 窝子滩形变

观测场地位于景泰以东,是跨海原断裂的短水准流动观测场地,多年来呈现压性长趋势变化。1995 年永登 5.8 级、1996 年天祝 5.4 级和 2000 年景泰 5.9 级等地震前 3 或 4 个月内出现显著的“趋势加速—转折”异常形态(图 15)。

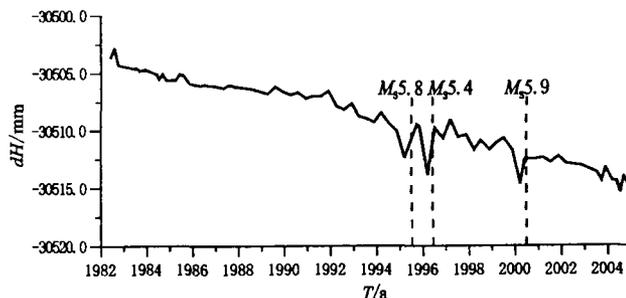


图 15 窝子滩场地垂直形变观测曲线

Fig. 15 The curve of vertical deformation in Wozitan station.

## 5 祁连山地震带短期阶段地震综合预报方案研究

地震短期阶段时间、地点、强度的综合判定是一项系统的科学问题,其中孕震系统进入短期的判定是核心,地点判定是难点。合理的思路、充足的资料、不断完善的判据和方案等则是逐步提高地震预报能力和水平的前提和基础。

以下在祁连山地震带地震预报实践和相关研究工作的基础上,从短期预报的时间、地点、强度判定等方面开展综合预报方案的总结、提炼。

### 5.1 短期时间判定综合方案

如前所述,祁连山地震带多次 5 级以上破坏性地震前短期阶段异常表现的共性特征可概括为“局部地区地震活动的增强、大范围群体前兆的成组同步异常、部分具有较高应震效能的前兆异常或区域显著的地震事件的发生;等。这几个方面的共性特征体现了短期阶段地震孕育演化中不同方面的表现,概括了地震活动进入短期阶段的最主要特征,为区域短期预报方案提供了判据和思路,也是 2003 年 10 月 25 日民乐—山丹 6.1 级地震成功的短期预报的主要依据。

在综合区域构造框架、前兆观测网络、形变观测网络、地震活动场、前兆活动场等的基础上,祁连山地震带短期阶段时间判定预报方案如图 16 所示。

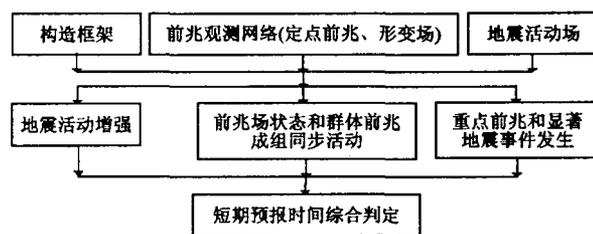


图 16 祁连山地震带短期阶段时间判定方案

Fig. 16 The scheme flowchart of earthquake time prediction in short-term stage for Qilianshan seismic belt.

### 5.2 地点判定综合方案

地点判定一直是祁连山地震带地震预报中最困难的问题。多次中强以上地震前的前兆异常出现在整个祁连山地震带,甚至整个青藏块体东北缘。因此提高地点判定能力是一个需要不断研究探索的问题。根据祁连山地震带构造框架、地震活动特征、前兆和形变场演化特征,有关地点判定的依据主要包括:

- (1) 祁连山地震带推覆体隆起—盆地交替出现的构造框架提供了地震活动的空间基本区域;
  - (2) 祁连山地震带地震活动所具有的东西向来回迁移的特征提供了空间判定的大致范围;
  - (3) 形变场动态演化、重点前兆所具有的对危险地区的指示意义等为地震空间危险区提供了大致的范围;
  - (4) 地震活动的空区、条带等特征提供了地震危险的空间区域;
  - (5) 强震后的快速响应地震、区域显著地震事件等为未来地震提供了空间位置判据。
- 祁连山地震带短期阶段地点判定方案归纳如图

17 所示。

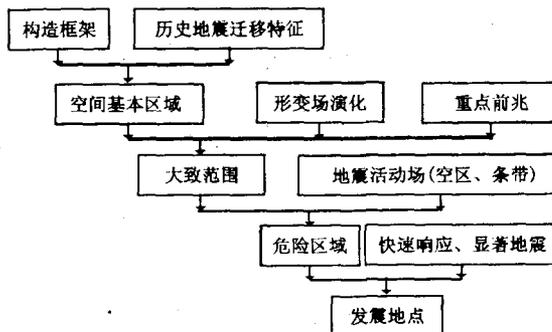


图 17 祁连山地震带短期阶段时间判定方案  
Fig. 17 The scheme flowchart of earthquake site determination in short-term stage for Qilianshan seismic belt.

### 5.3 强度判定综合方案

根据祁连山地震带历史地震强度特点等,有关强度判定的主要依据包括:(1)历史地震活动强度;(2)区域蠕变积累和释放;(3)地震空区的计算。

### 5.4 祁连山地震带短期震情三要素判定依据

在前述时间判定综合方案、地点判定综合方案、强度判定综合方案的基础上,祁连山地震带短期阶段三要素判定主要依据如表 7 所示。

表 7 祁连山地震带短期阶段三要素判定主要依据

| 三要素      | 时间判定  | 空间判定  | 强度判定                              |
|----------|---|---|-----------------------------------|
| 主要判定依据结论 | 1 地震活动增强;<br>2 群体前兆成组同步活动;<br>3 重点前兆或显著地震事件的出现。 | 1 构造框架;<br>2 祁连山地震带强震迁移特征;<br>3 形变场演化;重点前兆的形态特征;<br>4 地震空区,条带;<br>5 强震后的快速响应地震;<br>6 显著地震的空间分布。 | 1 历史地震强度特征;<br>2 蠕变积累;<br>3 空区计算。 |

致谢:本文是由作者负责完成的国家科技攻关子专题“西北地区地震短期综合预测方法研究”(2004BA601B01-01-03)的部分研究结果。在研究过程中,张国民研究员、傅征祥研究员、陆远忠研究员、韩渭宾研究员等给予了多方指导;中国地震局监测预报司车时副司长、刘桂萍处长、李永林副处长、黄慰北调研员等给予了大力的帮助;在与张晓东、江在森、刘杰、王海涛、卢军、牛安福、陈学忠等研究员的讨论中得到了有益的启发;中国地震局兰州地震研究所梅秀萍、燕明芝、李晓峰、郑卫平、张昱副研究员,青海省地震局马玉虎副研究员,宁夏地震局赵卫民研究员,中国地震局第二测量中心张希研究员等作了大量的工作,在此一并表示感谢。

### [参考文献]

- [1] 杨立明,王兰民.民乐—山丹 6.1 级地震短期预报的科学总结[J].西北地震学报,2004,26(1):1-9.
- [2] 王海涛,杨立明,马文静,等.西北地区强地震短期前兆特征和预测方法研究[M].北京:地震出版社,2006.
- [3] 马文静,陈玉华.兴海 6.6 级地震的科学问题及思考[J].高原地震,2001,13(1):1-13.
- [4] 朱丽霞.2000 年兴海 6.6 级地震震(前)兆分析及预报过程综述[J].高原地震,2000,12(1):1-11.
- [5] 刘小凤,杨立明.青藏高原北部地区弱震空间图像特征与中短期地震预测方法[J].地震研究,2004,27(2):209-215.
- [6] 赵和云,钱家栋,夏玉胜,等.甘肃、宁夏和青海地区地震前兆的某些特征[J].西北地震学报 1997,19(3):1-10.
- [7] 程建武.地震活动增强现象与时间破裂模型研究[D].兰州:兰州地震研究所,2001.

(下转 209 页)

B 为其大致断裂构造线。因此,在震中附近区域地震应力作用使地壳产生“X”型构造及相应形变。利用合成孔径雷达差分干涉提取的上述形变场,可作为地震学家进行地震预测预报、分析地震机理和研究地震发展的重要参考资料。

#### 4 结论

合成孔径雷达干涉测量中的干涉相位是参考面、地形起伏和地表位移等因素贡献的结果。地表未发生形变时的干涉相位由参考面相位和地形相位构成,形变前后两幅影像形成的干涉相位由参考面相位、地形相位和形变相位构成。因此利用干涉测量提取数字高程模型时,影像经配准后形成干涉图的基础上需要去平地效应处理,再进行噪声滤波和相位解缠,最后提取数字高程模型。利用差分干涉测量获取地表形变信息时,除了去除参考面相位外还要剔除地形相位。

利用差分干涉测量可研究地震形变,从获取的地震形变场中分析出地震形变量的大小及方向,并进一步分析出震中位置以及地震形成的主体断裂构造。合成孔径雷达差分干涉测量为地震研究提供了一种新的技术手段和方法。

#### [参考文献]

- [1] 廖明生,林琚. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础[M]. 北京:测绘出版社,2002:3-100.
- [2] 舒宁. 雷达影像干涉测量原理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003:14-16.
- [3] 罗小军,刘国祥,黄丁发,等. 几种卫星合成孔径雷达影像配准算法的比较研究[J]. 测绘科学,2006,31(1):19-21.
- [4] Bert Kampes. Delft Object-oriented Radar Interferometric Software User's manual and technical documentation[EB/OL]. 1999:85-122.
- [5] Giorgio Franceschetti, Riccardo Lanari. Synthetic Aperture Radar Processing[M]. Boca Raton London New York: CRC Press, 1999. 135-241.
- [6] Gordon W. Davidson, Richard Bamler. Multiresolution Phase Unwrapping for SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing, 1999, 37(1): 163-175.
- [7] Curtis W. Chen, Howard A. Zebker. Network Approaches to Two-dimensional Phase Unwrapping: Intractability and Two New Algorithms[J]. Journal of Optical Society of America, 2000, 17(3): 401-414.
- [8] 刘国祥,丁晓利,等. 极具潜力的空间对地观测新技术——合成孔径雷达干涉测量[J]. 地球科学进展,2000,15(6):734-740.
- [8] 毛可,孙景芳,张国英,等. 1995年7月22日甘肃永登5.8级地震前兆异常的研究[J]. 高原地震,1995,7(4):31-40.
- [9] 赵和云,阮爱国. 地电台址大范围介质条件的数值模拟研究[J]. 西北地震学报,1992,14(3):64-70.
- [10] 燕明芝,白亚平,梅秀苹,等. 震(前)兆远场异常与德令哈6.6级地震临震特征分析[J]. 地震地磁观测与研究,2004,25(3):14-23.
- [11] 燕明芝,白亚平,张维友. 青新交界8.1级地震与远场地电阻率前兆异常的分析[J]. 地震地磁观测与研究,2003,24(6):58-63.
- [12] 张永仙,余素荣,张晓东,等. 中国大陆西部前兆异常涨落与强震短期预测研究[J]. 地震,2004,24(1):7-18.
- [13] 李献智,侯建智. 应用综合前兆月异常判定地震进入中短期的研究[J]. 地震,1998,18(4):337-347.
- [14] 李献智,李纲. 综合前兆异常月频次在地震预报中的应用及其意义[J]. 地震,1999,19(4):323-330.
- [15] 梅世蓉,冯德益,张国民,等. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社,1993.

(上接 203 页)