

云南 11 组 $M_s \geq 6.5$ 强震前 h' 值异常研究*

钱晓东, 和宏伟, 刘正荣

(云南省地震局, 云南 昆明 650041)

摘要: 利用极限时间法对云南省 1970 年以来 $M_s \geq 6.5$ 11 组强地震进行 h' 值计算, 结果显示: 11 组强震前出现 h' 值异常, 表现为不同程度的大幅(平均减幅达 28%)突然减小现象, 即地震活动出现异常平静的现象, 可成为地震预报意见的关键指标, 强震前出现 8 次地震活动增强-平静-主震的发震模式, 占 73%, 出现 3 次增强-平静-增强(短期内)-主震的发震模式, 占 23%。 h' 值量板图对强震前的地震活动平静和地震活动增强现象展现得较为清晰, 通过对 11 组强震进行预测, 预测时间约为 5 个月。

关键词: 强震; 极限时间; h' 值; 归一化累积时间

中图分类号: P315.75 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2004)02-0137-07

0 前言

云南省是中国大陆地震活动较为频繁、地震强度大和震害比较严重的地区, 探索简单适用的短临预报方法已成为地震工作者的重任。极限时间法是一种可操作性较强的方法, 笔者通过对 1970 年以来发生于云南地区的 11 组强震所作的检验, 结果令人满意。此方法对于前震序列较为有效, 余震序列效果不如 h' 值方法显著, 可以由一些较小的地震预测较大的地震, 对于那些无较大突出的前震序列, 也能检测出临震阶段出现的 h' 值异常现象, 能判别某地区出现的地震前兆序列是正常还是异常。这就为我们正确地发出短临预报意见提供了依据。

1 方法概述

刘正荣在讨论极限时间法时, 导出二个地震的时间差满足如下关系^[1]:

$$\Delta t_n = T \frac{1}{n^{h'}} \quad (1)$$

式中 Δt_n 表示每两个地震的时间差, T 表示第 1、2 个地震的时间差, 即 $\Delta t_1 = T$, n 为地震发生的序号, h' 为随地震前兆序列的不同而不同的常数。

根据式(1)可以求出每次地震的发震时间

$$t_n = t_0 + \sum_{i=1}^{n-1} T \frac{1}{(i+1)^{h'}} \quad n \neq 1 \quad (2)$$

式中 t_0 为第一次地震的发震时间。在式(2)两端除以 T 得到

$$T_n = \frac{t_n}{T} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{(i+1)^{h'}} \quad (3)$$

式中 T_n 为归一化的累积时间, 是一个无量纲的量。令 $h' = 1.0, 1.1, \dots, 1.0$; $n = 2, 3, \dots$; 可以求出一系列归一化累积时间 T_n 值。以 $\log(n)$ 为横坐标, T_n 为纵坐标, 得到不同 h' 值所对应的曲线, 称此理论图形为

* 收稿日期: 2003-03-05

基金项目: 中国地震局“十五”重点科研项目资助(100501-05-07)。

作者简介: 钱晓东(1965-)男(汉族), 云南人, 副研究员, 主要从事地震预报及数字地震研究工作。

h' 值量板。

在将实际地震资料的值绘制于在 h' 量板上时,据经验可在地震目录中选择时间差较大的地震作为第一、二次地震,第 $n+1$ 次地震的时间是已知的,事实上,由于

$$T_n = \frac{t_{n+1} - t_0}{T} \quad (4)$$

式中 t_{n+1} 是第 $n+1$ 个地震的发震时间, t_0 是第一个地震的发震时间; T 是 1 个和第 2 个地震的时间差,故可以求出 T_n 。把相应的 n 和 T_n 点在单对数 h' 量板上即可得到 h' 值。

2 地震参数及研究范围

所研究的地震为 1970 年以来发生于云南省境内 $M_s \geq 6.5$ 强震(图 1)。孟连 $M7.3$ 地震发生在中、缅边境附近,也纳入研究对象。一些双震由于发震时间间隔短,故算为一组。得到共 11 组 14 次强震。其中 7 级以上大震 6 组, 6.5 级强震 5 组。表 1 为强震的基本参数和研究区范围。

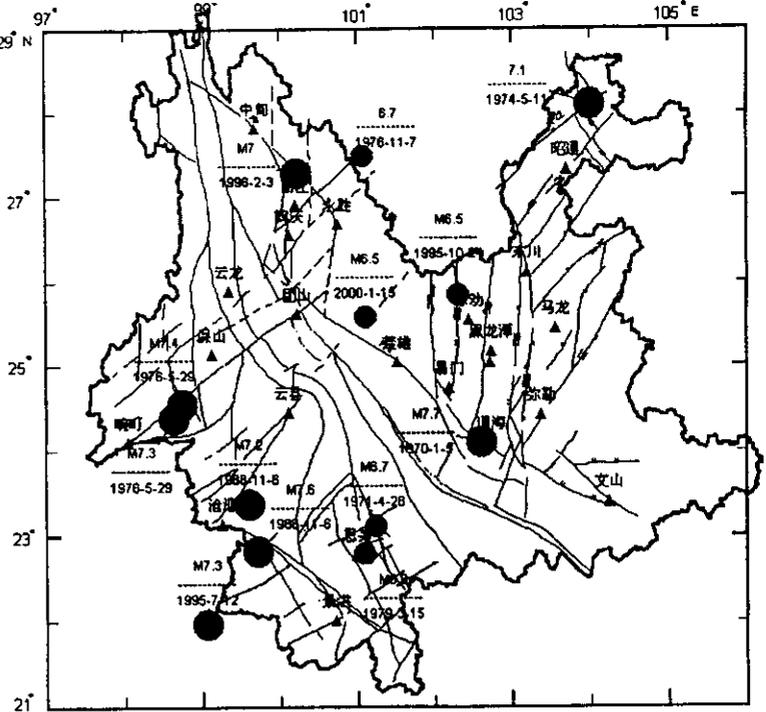


图 1 1970 ~ 2002 年云南 $M_s \geq 6.5$ 地震震中分布图

Fig. 1 Epicentral distribution of $M_s \geq 6.5$ earthquakes in 1970 ~ 2002 in Yunnan.

表 1 1970 年至今云南 11 组 $M_s \geq 6.5$ 强震参数及研究区域范围

编号	主震参数					研究区参数		
	发震日期	北纬/°	东经/°	震中	震级/ M_s	控制震级	研究区半径/km	研究时段
1	1970-01-05	24.1	102.6	通海	7.7	4.7	220	1959-03-30 ~ 1970-01-05
2	1971-04-28	22.8	101.1	思茅	6.7	3.0	200	1970-01-28 ~ 1971-04-28
3	1974-05-01	28.1	104.0	大关	7.1	4.5	220	1967-05-05 ~ 1974-05-11
4	1976-05-19	24.4	98.6	龙陵	7.3 7.4	4.5	220	1967-11-04 ~ 1976-05-29
5	1976-11-07	27.5	101.1	宁蒗	6.7 6.4	3.7	170	1973-01-14 ~ 1976-11-07
6	1979-03-15	23.1	101.3	普洱	6.8	4.0	170	1976-10-16 ~ 1979-03-15
7	1988-11-06	22.8	99.7	澜沧	7.6 7.2	4.0	170	1986-04-17 ~ 1988-11-06
8	1995-07-12	21.9	99.1	孟连	7.3	4.5	220	1992-05-16 ~ 1995-07-12
9	1995-10-24	25.8	102.3	武定	6.5	3.0	110	1994-11-30 ~ 1995-10-24
10	1996-02-03	27.3	100.2	丽江	7.0	3.7	220	1994-03-15 ~ 1996-02-03
11	2000-01-15	25.6	101.1	姚安	6.5	3.5	110	1996-08-29 ~ 2000-01-15

根据云南地区的台网控制能力,考虑到所研究的地震是 6.5 级以上强震,选取一个适当的初始最小震级(如 3.0 级)求出较长时间段的二地震之间的时间间隔,考察是否存在地震活动较为平静的时间段,如果不存在,则适当加大初始控制震级重复以上计算,直到满足条件的控制震级出现。相应的研究时间表

示强震前孕震区大于控制震级的地震在某段时间出现较长时间的平静,从那时起 \$h'\$ 值开始出现异常。

图2给出研究时间和控制震级与未来强震震级大小的关系。从图2(a)可以看到,如果剔除一个离散点(澜沧7.6级地震),未来地震震级大致与研究时间的长短成正比例关系,即预测的震级越大,研究的时间段相对就要长些,最小二乘法拟合给出(相关系数 \$R=0.61\$)

$$t = 6.57M_s - 41.2 \tag{5}$$

从图2(b)给出的控制震级与未来地震震级的关系图可以明显看出,所用地震起始震级与未来预测地震的大小成很好的正比例关系,未来地震的震级越大,则控制震级也应相应增大,最小二乘法拟合给出(相关系数 \$R=0.66\$)

$$M_{min} = 1.14M_s - 4.05 \tag{6}$$

3 强震前 \$h'\$ 值异常

在实际应用中计算每一个地震的 \$h'\$ 值有两种方法。(1)人工方法:根据式(3)计算不同 \$h'\$ 值对应的 \$T_n\$, 得到理论 \$h' - T_n\$ 表。此表较长,根据式(4)计算的实际 \$T_n\$ 值再在 \$h' - T_n\$ 表中查找对应的 \$h'\$ 值。此方法较为繁杂且需人工查找。(2)计算机自动识别:根据式(3)可以得到 \$h'\$ 值的理论曲线,当 \$h'\$ 在一定的区间内等于不同值时, \$\log(n) - T_n\$ 图上可得到不同的直线。对于第 \$n\$ 个实际地震,根据式(4)在理论量板图上可画出一个点(第 \$n\$ 个点),由于 \$h'\$ 理论直线当 \$n\$ 较小时人工是很难分辨的,因此必须计算第 \$n\$ 个实际点距离哪条理论直线最近。分别取 \$h' = 1.0, 1.1, \dots, 10\$, 步长为 \$0.01\$ (精确到小数后2位即可)。对于一定的 \$n\$ 值,由式(3)计算出不同 \$h'\$ 值对应的 \$T_n\$ 值(理论 \$T_n\$ 值),由式(4)计算的实际 \$T_n\$ 值与理论 \$T_n\$ 值最接近的 \$h'\$ 值就是第 \$n\$ 个点的 \$h'\$ 值。如此可计算出整个序列的 \$h'\$ 值。本文采用方法(2)。

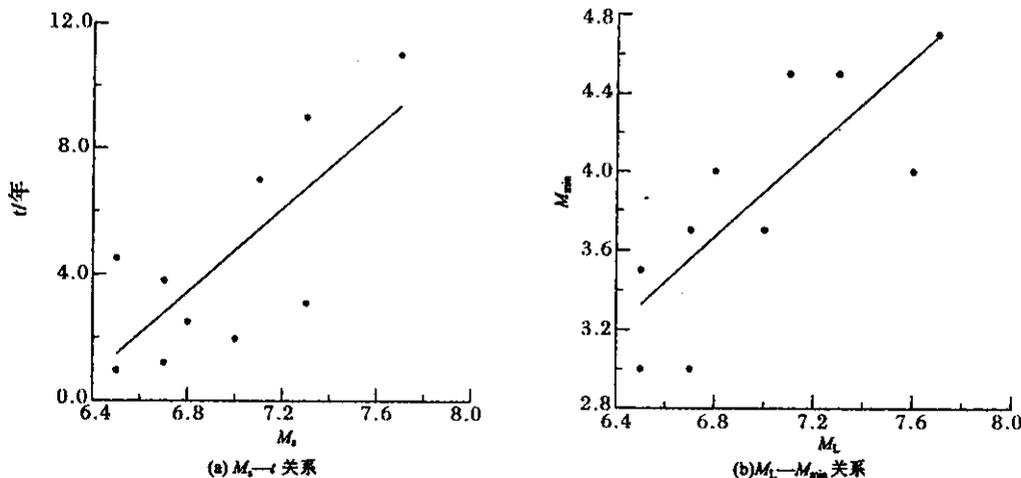


图2 研究时间(\$t\$)及控制震级(\$M_{min}\$)与未来强震震级(\$M_L\$)的关系

Fig.2 Relationship among studing time(\$t\$), control magnitude(\$M_{min}\$) and magnitude(\$M_s\$) of forthcoming strong earthquake.

从图3(a)~(k)及表2可以看出:

(1)在11组强震之前 \$h'\$ 值都出现了异常现象。如1995年3月24日武定 \$M6.5\$ 地震之前 \$h'\$ 值最高达 \$7.01\$, 异常是相当大的。之后 \$h'\$ 值逐渐减小,接近于 \$1\$, 强震发生于这一缩小的过程之中。

(2)地震活动异常平静。每次地震前 \$h'\$ 值都出现大幅度的突降,成为判断强震是否将要发生的关键,只有出现这种情况时才能确定起报时间。如1995年10月武定 \$M6.5\$ 地震前,在4月12日之前发生了一系列 \$3 \sim 4\$ 级地震, \$h'\$ 值也在 \$3.63 \sim 3.19\$ 之间波动;7月19日 \$h'\$ 值突然降低至 \$1.45\$, 幅度达 \$54\%\$。从11组强震来看,最小降幅 \$10\%\$, 最大降幅 \$74\%\$, 平均降幅为 \$28\%\$。

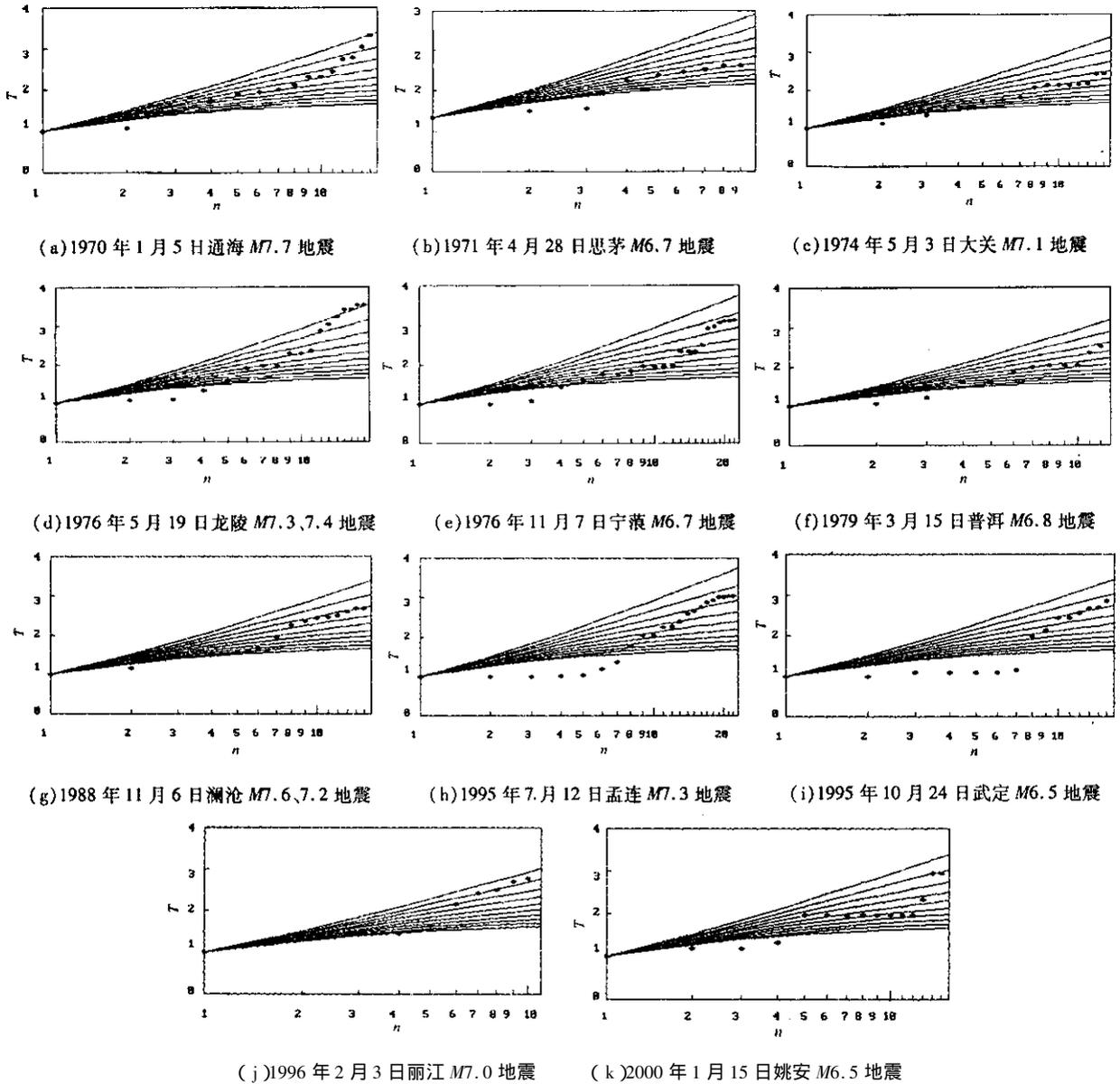


图3 云南1970~2002年 $M_s \geq 6.5$ 地震 h' 值

(斜线从上到下 $h' = 1.0, 1.1, \dots, 2.0$)

Fig. 3 The h' values of $M_s \geq 6.5$ earthquakes in 1970~2002 in Yunnan.

(3) 地震活动异常增强。按照极限时间理论, 出现 h' 值异常之后 h' 值缓慢、均匀减小趋向于1, 主震发生于 h' 值将要等于1的时间。我们注意到, 绝大部分地震在 h' 值出现突降(地震平静)前面都有段时间不降反升, 表明该时期地震活动在增强。例如1974年5月3日大关地震, 在1973年4月22日~8月2日期间 h' 值从1.39缓升到1.45, 之后突然降到1.31主震发生; 1995年10月24日武定地震, 在4月5~12日期间 h' 值从3.63上升到3.75, 后突降至1.45, 缓慢减小直到发震。这种情况还有2000年1月15日姚安地震、1988年11月6日澜沧地震、1979年3月15日普洱地震、1996年2月3日丽江地震、1970年1月5日通海地震及1976年11月3日宁蒗地震, 共8次。

表2 强震前 h' 值异常统计

编号	地名	起始异常		突变异常			起报时间及 h' 值	发震时刻及 h' 值
		开始时间	h'	起始时间	h'	幅度		
1	通海	1962-06-24	3.51	1967-02-17 ~ 1968-02-10	1.25 ~ 1.13	10%	1968-02-10 $h' = 1.15$	1970-01-05 $h' = 1.01$
2	思茅	1971-01-29	3.03	1971-02-14 ~ 1971-04-02	2.93 ~ 1.49	49%	1971-04-02 $h' = 1.49$	1971-04-28 $h' = 1.51$
3	大关	1970-03-25	3.05	1973-08-02 ~ 1974-05-11	1.45 ~ 1.31	10%	1973-08-02 $h' = 1.31$	1974-05-11 $h' = 1.33$
4	龙陵	1970-04-06	3.67	1973-08-15 ~ 1974-10-22	1.27 ~ 1.09	14%	1975-09-04 $h' = 1.01$	1976-05-29 $h' = 0.99$
5	宁蒗	1974-04-06	3.81	1976-02-07 ~ 1976-08-12	1.31 ~ 1.15	12%	1976-09-03 $h' = 1.13$	1976-11-07 $h' = 1.15$
6	普洱	1977-09-30	3.87	1978-09-28 ~ 1979-01-14	1.47 ~ 1.29	12%	1978-09-28 $h' = 1.29$	1979-03-15 $h' = 1.23$
7	澜沧	1987-04-02	2.67	1987-11-25 ~ 1988-06-18	1.69 ~ 1.25	26%	1988-06-18 $h' = 1.23$	1988-11-06 $h' = 1.23$
8	孟连	1993-05-30	6.75	1993-06-12 ~ 1994-09-19	5.13 ~ 1.35	74%	1995-01-23 $h' = 1.23$	1995-07-12 $h' = 1.17$
9	武定	1995-03-24	7.01	1995-04-12 ~ 1995-07-16	3.19 ~ 1.45	54%	1995-07-16 $h' = 1.37$	1995-10-24 $h' = 1.15$
10	丽江	1994-11-19	1.77	1995-04-27 ~ 1995-11-05	1.69 ~ 1.11	34%	1995-11-05 $h' = 1.11$	1996-02-03 $h' = 1.07$
11	姚安	1997-11-23	2.44	1998-12-02 ~ 1999-05-01	1.57 ~ 1.35	13%	1995-05-01 $h' = 1.11$	2000-01-15 $h' = 1.13$

需要特别注意的另外一种情况是,在地震活动处于异常平静之后出现较短时间的地震活动增强现象,地震发生于 h' 值缓慢增大的过程中。如 1995 年 7 月 12 日孟连地震,在 5 月 12 日 ~ 7 月 10 日这段时间内, h' 值从 1.15 缓升到 1.17,表明异常在增大,地震活动呈现快速、非线性增长,预示着极短的时间内将要发震。属于这种情况的地震还有 1976 年 5 月 19 日龙陵地震和 1971 年 4 月 28 日思茅地震,共 3 次。

大震前在近源区出现地震活动增强-平静-(前震)-主震现象,是许多地震工作者都注意到的一种普遍现象。刘蒲雄等通过对多次强震震例的研究发现,大震前地震活动具有背景空区-增强活动-平静的演变形式^[2];钱晓东等在对云南多次强震前应变扰动 ε_i 值的空间动态图象演化研究时,认为大震前在近源区 ε_i 值有由零星、随机分布逐渐向未来震中区收缩、集中并增强的趋势^[3];刘祖荫详细地分析了澜沧-耿马大震前地震活动的平静现象。但是,以上的研究都未提及平静-主震期之间是否存在如本文所述的地震活动增强现象。顾瑾平等在分析 1998 年 1 月 10 日张北-尚义 6.2 级地震时对出现的这一情况作了较为客观的讨论^[4]。认为 1997 年 11 月唐山 3 级地震的重新活动以及从北京至山西北部出现一系列 3 级地震和震群活动,这一较短的时间才是作出短临预报的关键。从地震发生的机理来看,到孕震中后期应变能在震源区高度集中,外围的应力强度降低,于是出现所谓“平静”现象;一旦震源区的抗剪强度达到极限,其边缘首先出现微破裂,表现为地震的重新活动,这可能才是真正进入临震阶段。

(4) 从实际发震时间和起报时间之差(即预测时间)来看,最大预测时间为通海 $M7.7$ 地震,为 1.91

年,最小为思茅 $M6.6$ 地震,预测时间为 0.07 年(约为 26 天);平均值为 0.55 年。考虑到通海地震使用到了部份 1965 年以前的资料,而 1965 年以前的地震记录只能控制 4.7 级以上地震,还可能存在遗漏地震,故如果不算通海地震,则平均预测时间变为 0.40 年(约 5 个月),可见效果是非常明显的。

4 讨论

用极限时间法进行地震预测,笔者经过较长时间的探索,认为从以下几方面进行考虑,是充分发挥此方法优势的关键:首先,根据前人研究成果,应用常规求地震学参数的方法,可以勾划出未来地震潜在危险区。其次,用极限时间法分地区进行计算来确定 h' 值出现异常的区域。如果它们与地震潜在危险区重叠一致,则作为重点危险区来进行短临跟踪监视;如果勾划出的区域 h' 值无异常(h' 值小于 1),则认为该区地震活动处于正常状态;如果某些地区 h' 值出现异常,而相应地其它地震学指标未达到异常值,则应该加以注意。最后,对于重点危险区,若异常的 h' 值未出现明显减小,说明该区短时间内(据以上研究为 5 个月)发生 6.5 级以上强震的可能性较小;若 h' 值出现大幅度减小(减小 28% 以上),则应考虑作出短期预报意见;若 h' 值大幅度减小后又缓慢增大,则应发出临震预报意见。

2001 年 11 月昆仑山 $M8.1$ 巨震之后,从 2002 年 4 月 10 ~ 5 月 28 日,短短的一个半月时间内,在云南的东部和四川云南交界及云南越南边境地区,连续发生了 5 次 $M4.0$ 以上地震,沿小江断裂形成了一条近北西向走向的 4 级地震条带。历史上滇东地区是强震多发地区,有地震记录以来共发生 7 级以上大震 13 组;1965 年有地震台网记录至今云南省境内发生的 5 组 7 次 $M7.0$ 以上大震中,2 组发生在滇东。昆仑山巨震之后,云南省境内发生的最大地震也是在滇东(2002 年 5 月 13 日嵩明 $M4.8$ 地震)。面对这样严峻的地震形势,快速判断未来是否存在发生中强震的可能性就显得极为重要和迫切。我们分地区计算了滇东地区的 h' 值,发现所得到的 h' 值均小于 1,属于正常值范围。滇东无异常 h' 值出现。据此得出了未来短时间内滇东地区发生 $M6.5$ 以上地震的可能性较小的结论。

综上所述,极限时间法由于方法简单、可操作性强,可以直接用前震资料来预测本地较大地震,进而发出临震预报。 h' 值量板图对于强震前的地震活动平静或增强现象有比较清晰的显示,这对于提高我们预测预报水平和能力是大有帮助的。

[参考文献]

- [1] 刘正荣. 地震发生的极限时间[J]. 地震研究, 2002, 25(2): 95 - 99.
- [2] 刘蒲雄, 陈兆恩, 高伟, 等. 大震前地震活动图像演变及中期向短期过渡的地震活动性标志[J]. 地震, 1997, 17(2): 113 - 125.
- [3] 钱晓东, 刘祖荫. 云南地区强震前的应变扰动异常[J]. 西北地震学报, 2000, 22(1): 47 - 52.
- [4] 顾瑾平, 陈学忠, 张北. 6.2 级地震测震学指标短临判定分析[J]. 地震, 1999, 19(2): 161 - 167.

STUDY ON H' VALUES ANOMALIES BEFORE 11 GROUPS OF M_s 6.5 STRONG EARTHQUAKES IN YUNNAN

QIAN Xiao-dong , HE Hong-wei , LIU Zheng-rong

(*Seismological Bureau of Yunnan Province , Kunming 650041 , China*)

Abstract : According to limit time method , the h' values of 11 groups of M_s 6.5 strong earthquakes since 1970 in Yunnan province are calculated. The results show : h' anomalies appeared before 11 groups of M_s 6.5 strong earthquakes with sudden decrease of 28% (the average amplitude) , meaning quiet anomaly of seismicity. It is the key index for make prediction. In 11 groups of strong event , 8 of the seismic process show the seismogenic mode of activation - quiet - main earthquake , which posses 73% of all ; 3 are activation - quiet - activation (short - term) - main shock mode , which posses 23% ; It was displayed clearly for quiet or activation of seismicity before strong earthquakes. Making forecasting to 11 groups of strong earthquakes suggests that forecast time is about 5 months.

Key words : Strong earthquake ; Limit time ; H' value ; Normalization of accumulative time