

# 云南断层形变强震异常特征<sup>\*</sup>

刘 强<sup>1,2</sup>, 陈 燕<sup>2</sup>, 王永安<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026 2. 云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 运用 1983~2009 年云南地区跨断层短水准短基线观测资料, 研究了该时段 3 组 7 次  $M \geq 6.5$  地震 (澜沧—耿马 M7.6、M7.2 孟连 M7.3 武定 M6.5 丽江 M7.0 姚安 M6.5 缅北 M7.0) 的形变前兆特征。以断层运动速率与基准值之比定义异常参数  $R$  定量分析了异常与本区域强震的关系, 提出强震预测指标。结果表明,  $R$  值出现异常后 0.5~16 个月, 川滇菱形块内发生  $M \geq 6.5$  或菱形块外围 400 km 范围内发生  $M \geq 7.0$  并表现出不同的异常特征。菱形块外强震前比菱形块内强震前  $R$  值异常出现时间早, 异常持续时间较长; 菱形块外强震前  $R$  为正值异常, 菱形块内强震前  $R$  为负值异常。研究结果对预测云南地区  $M \geq 6.5$  强震有一定的应用价值。

关键词: 断层形变; 异常参数  $R$  强震预测指标; 云南地区

中图分类号: P315.72<sup>+</sup>7 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2010)04-0301-07

## 0 引言

国内外公认地壳形变前兆是与孕震过程直接有关的前兆, 大地形变是最重要的地震预测预报方法之一。跨断层形变监测是大地形变监测的一种重要方法, 它主要监测现代活动断裂构造的运动特征 (江在森等, 2001)。分析强震孕育过程中断层形变的发展演变过程, 对提高预测预报地震的能力有着重要意义。

地震由地壳介质的破裂所引起, 在远离震源的地方可能出现地壳的突然形变, 运动速率高的断层很可能会引起一次大的错动 (力武常次, 1978), 这已为唐山 7.8 级地震前观测到的断层活动异常所证实 (国家地震局《1976 年唐山地震》编辑组, 1982)。因此, 断层形变速率明显超出正常值时可视为地震前兆。

物体运动加速度的增大反映了应力—应变积累的情况。当累积应变达到地壳的极限应变值 ( $10^{-5} \sim 10^{-4}$ ) 或已有断层上的应力积累达到断层的抗剪强度时 (Ritsema 1984), 地壳便突然破裂而发生地震。所以, 从断层形变资料中提取断层运动速率异常, 作为分析地震前兆的依据是完全可行的。

刘祖荫等 (2002) 基于对 20 世纪云南 4 个强震活动时段的分析, 认为云南下一个强震活动时段将在 2007~2012 年到来, 并且强震活动主体地区在红河断裂以东。断层形变的实际观测结果是否支持这一统计结论? 这也是本文将要讨论的问题。

1982 年以来, 云南地区先后建立了 12 个跨断层形变监测场地, 它们主要分布在川滇菱形块体西南边界、东南边界断裂带上, 对菱形块内部及外围附近地区断层活动有一定的监控能力。

对跨断层资料进行断层形变速率的分析处理, 已取得一些有意义的结果 (郭良迁等, 2001; 刘强等, 2003~2004)。本文处理了 1983~2009 年云南地区持续时间较长、较完整的 10 个场地的资料, 提取断层形变速率异常参数  $R$  值, 分析震前异常的特点及其时空演变特征, 给出资料时段内云南地区 6.5 级以上强震前断层形变异常特征, 并对未来云南地区  $M \geq 6.5$  强震危险性进行判定。

## 1 资料选取及提取异常信息数学方法

云南跨断层流动监测场地, 其基线长度为 24~144 m 短水准监测的基线长度为 49~104 m 不

\* 收稿日期: 2010-02-02

基金项目: 云南省政府“十项措施”“地球物理场和化学场动态变化与强震活动关系研究”(JCYB-20080601-05) 和“云南强震活动与边缘动力学机制研究”(JCYB-20080601-04) 联合资助。

等。两项跨断层测线均跨过断层主断面，而未完全跨越断层破碎带。仪器使用德国蔡司 N1002水准仪和前苏联产的 24 m线状钢瓦基线尺。根据现有的观测成果精度统计，每千米中误差小于 0.23 mm，短基线相对误差均达到  $10^{-6}$ ，满足提取异常所需的精度要求（黄雍等，2002）。12个场地中，宜良和洱源 2个场地分别于 1997年 7月、2001年 9月开始投入观测，时间相对较晚，为了更有效地提取强震前的异常信息，本文选取观测时间最长的剑川、丽江、永胜、下关、楚雄、峨山、通海、石屏、建水和寻甸共 10个场地 1983年 1月至 2009年 12月的资料进行分析处理，对 3组 7次  $M \geq 6.5$ 地震（澜沧—耿马 M7.6，M7.2，孟连 M7.3，武定 M6.5，丽江 M7.0，姚安 M6.5，缅甸 M7.0）的异常特征进行分析（图 1，表 1）。

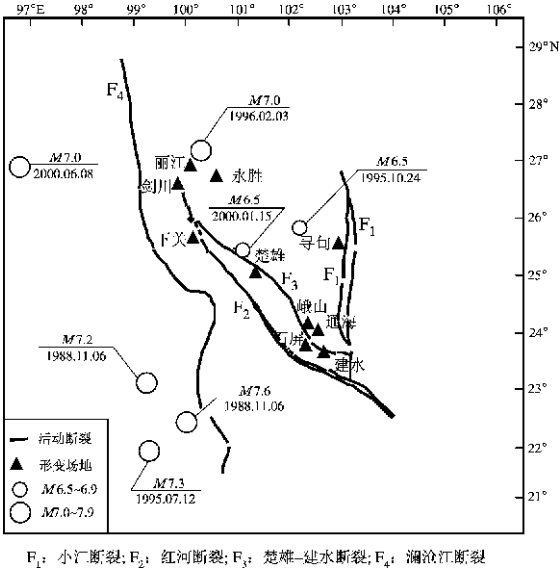


图 1 形变场地和  $M \geq 6.5$ 地震震中分布图  
Fig 1 Distribution of stations and  $M \geq 6.5$  earthquakes

表 1 形变场地概况  
Tab 1 The parameters of stations

测点	高程/m	断裂	断层走向/倾向	岩性（上盘/下盘）
剑川	2 345	剑川断裂	N10°E/NW 75°	第三系砂岩与火山角砾岩/石碳系灰岩
丽江	2 640	丽江断裂	N10°W/SW 70°	丽江角砾岩/丽江角砾岩
永胜	2 160	程海断裂	N5°W/SW 35°	泥盆系灰岩/三迭系页岩
下关	1 980	洱海断裂	N40°W/NE 60°	石灰岩/紫红色粉砂岩
楚雄	1 880	楚雄断裂	N30°W/NE 58°	浅黄色粉砂岩/紫红色泥质页岩与砂岩
峨山	1 630	曲江断裂	N55°W/SW 60°	灰白色高岭土/黄色泥质粉砂岩
通海	1 480	曲江断裂	N65°W/NE 68°	紫红色澄江砂岩/第四纪砾石层
石屏	1 400	楚雄—建水断裂	N50°W/NE 70°	灰色页岩夹黄色泥岩/灰色页岩夹黄色泥岩
建水	1 410	楚雄—建水断裂	S81°W/ES 70°	第四系红土层/灰白色石灰岩
寻甸	2 350	小江断裂西支	N25°E/SE 73°	石灰岩/紫色砂岩

我们处理云南 10个跨断层短水准短基线场地资料，用每月的测值减去上年同期测值，再除以 1 年时间尺度，得到相应月份的形变年速率值。为

为了更好地提取速率异常信息，本文采用平均速率加上其变化中误差作为基准值，以速率值与基准值之比  $|R_{ij}| \geq 1$  作为异常阈值。

$$R_{ij} = \frac{m_{ij} - m_{i-1,j}}{t_j - t_{i-1,j}} - \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{m_{ij} - m_{i-1,j}}{t_j - t_{i-1,j}} \right| + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \left| \frac{m_{ij} - m_{i-1,j}}{t_j - t_{i-1,j}} \right| - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{m_{ij} - m_{i-1,j}}{t_j - t_{i-1,j}} \right| \right)^2}}{1}$$

(1)

其中，n为所用资料总年数减去 1，i表示年（i=1, 2, 3, …, n），j表示月（j=1, 2, 3, …, 12）， $m_{i-1,j}$ 、 $m_{ij}$ 分别为第 i-1 年和第 i 年的第 j 月观测值， $t_{i-1,j}$ 、 $t_{ij}$ 为第 i-1 年和第 i 年的第 j 月观测时间值， $R_{ij}$ 为第 i 年第 j 月异常参数值。

2 断层形变异常参数 R 异常频次特征

本文选取 1983 ~ 2009 年跨断层短水准短基线

资料，根据公式（1）计算了 29 条跨断层短水准短基线测边资料，给出 1983~2009 年断层形变异常参数  $R$ ，把  $|R_{ij}| \geq 1$  定为异常。统计 10 个跨断层观测场地  $R$  值异常频次，发现 1983~2009 年  $R$  值异常率  $P \geq 38\%$ ，即月异常量  $N \geq 11$  的有 4 个时段，分别为 1987 年 8 月、1995 年 3 月、2000 年 1 月和 5 月和 2009 年 11 月。

将异常频次  $N \geq 11$  视为异常，作异常频次图（图 2）。从图 2 中可以看出，在 1987 年 8 月、1995 年 3 月、2000 年 1 月和 5 月 3 个异常时段后

0.5~16 个月内，相继在菱块内部发生  $M \geq 6.5$  或菱块外围 400 km 范围内发生  $M \geq 7.0$  共 3 组 7 次强震：（a）澜沧  $M7.6$ （1988-11-06）、耿马  $M7.2$ （1988-11-06）；（b）孟连  $M7.3$ （1995-07-12）、武定  $M6.5$ （1995-10-24）、丽江  $M7.0$ （1996-02-03）；（c）姚安  $M6.5$ （2000-01-15）、缅北  $M7.0$ （2000-06-08）。2009 年 11 月  $R$  值异常频次  $N=13$  达异常指标，这对未来 1~2 年，菱块  $M \geq 6.5$  或菱块外围 400 km 范围内  $M \geq 7.0$  有一定指示意义。

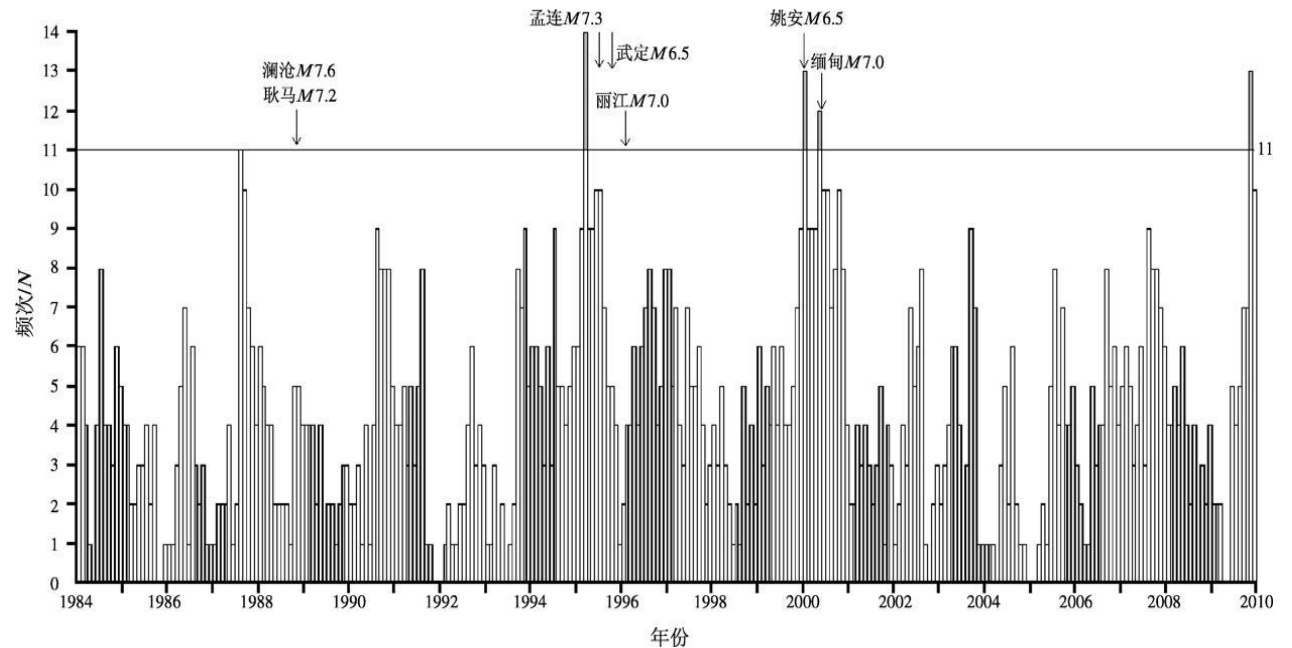


图 2 R 值异常频次图  
Fig 2 The histogram of monthly frequency of R anomaly

10 个观测场地异常参数  $R$  值的点值曲线（图 3）表明， $|R_{ij}| \geq 1$  异常持续时间共 291 个月，与选用资料时间 3 120 个月之比为 9%，异常时间只占所用资料时间段很小一部分，说明把  $|R_{ij}| \geq 1$  定为强震异常指标是合理的。

3 断层形变异常参数  $R$  时空演变特征

跨断层基线测边缩短以及断层上盘上升的垂直运动为断层的压性运动，相反的运动视为张性运动（江在森等，2001）。为了便于资料处理，我们约定断层上盘向上的运动与水平边长缩短的运动一致。本文选取 1983~2009 年的跨断层短水准短基线资料，以断层上盘测桩为基准点统一各测点高差，求

得跨断层短水准短基线的异常参数  $R$  值，则  $R < 0$  表示断层的压性运动， $R > 0$  表示断层的张性运动。绘制  $R$  值的空间分布图（图 4~图 8），分析断层形变速率异常参数  $R$  的时空演变特征（表 2）。

如图 4 所示，澜沧  $M7.6$ （1988-11-06）、耿马  $M7.2$ （1988-11-06）地震前 16 个月，即 1987 年 8 月，异常参数  $R$  值出现大面积正值，最大值出现在建水， $|R_{ij}|_{\max} = 2.58$ 。菱块边界断层主要表现为张性活动。1987 年 8 月至 1988 年 3 月峨山场地  $R$  值出现连续 8 个月正异常，1987 年 8~11 月建水、丽江场地  $R$  值出现连续 4 个月正异常，异常呈现成组特征。峨山场地异常持续时间最长，建水场地异常最突出，这对澜沧  $M7.6$ 、耿马  $M7.2$  地震有中长期指示意义。

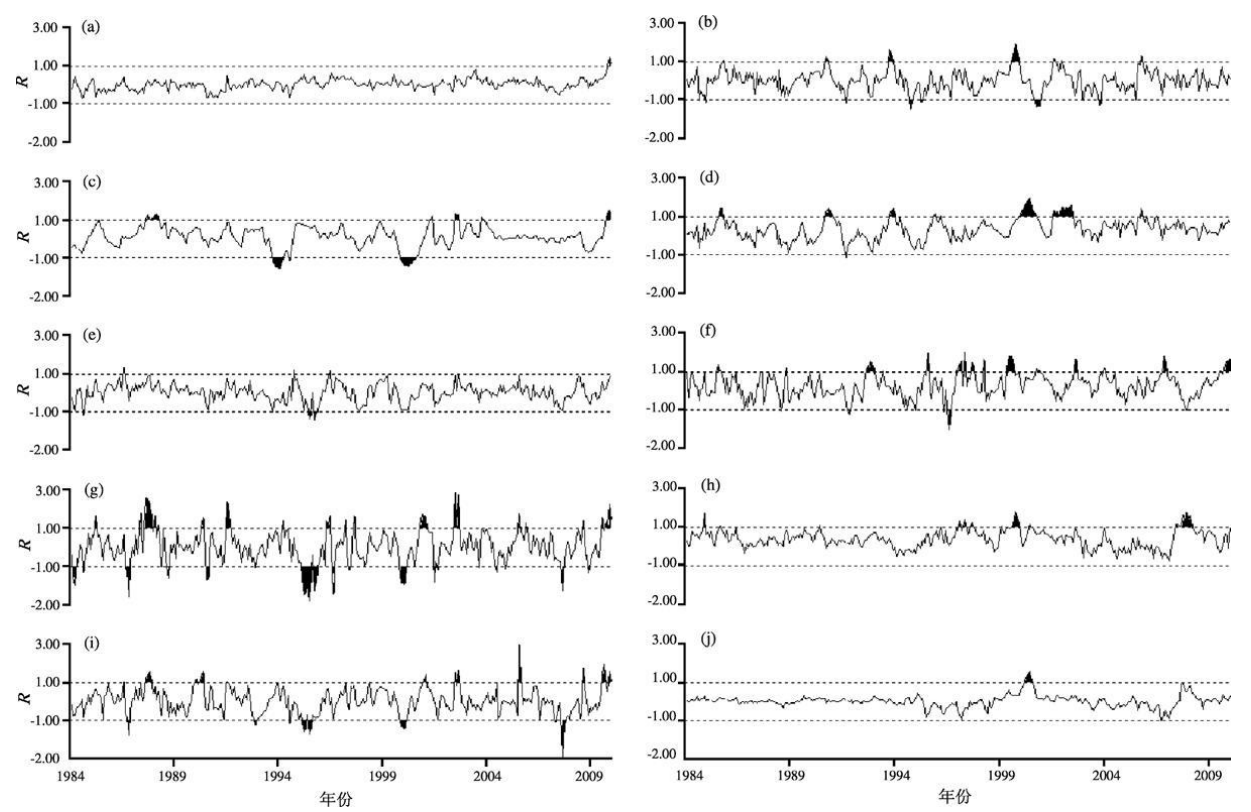


图 3 R值时序图

(a) 楚雄; (b) 石屏; (c) 峨山; (d) 通海; (e) 剑川; (f) 寻甸; (g) 建水; (h) 下关; (i) 丽江; (j) 永胜

Fig 3 R value curves

表 2  $M \geq 6.5$  地震异常特征统计表

Tab 2 The statistics of anomaly characteristic of  $M \geq 6.5$  earthquakes

序号	地震	震中坐标	发震日期	发震位置	R值异常特征		
					距发震时间	持续时间	最大幅度
1	澜沧 M7.6	22°5'N 100°0'E	1988-11-06	菱块外围 240 km	16个月	8个月	+2.58
	耿马 M7.2	23°2'N 99°3'E	1988-11-06	菱块外围 250 km			
	孟连 M7.3	22°0'N 99°3'E	1995-07-12	菱块外围 330 km			
2	武定 M6.5	25°9'N 102°2'E	1995-10-24	菱块内部	2个月	2个月	-2.44
	丽江 M7.0	27°2'N 100°3'E	1996-02-03	菱块边界	5个月	2个月	
3	姚安 M6.5	25°5'N 101°1'E	2000-01-15	菱块边界	0.5个月	4个月	-1.89
	緬北 M7.0	27°0'N 96°8'E	2000-06-08	菱块外围 250 km	7个月	10个月	+1.97

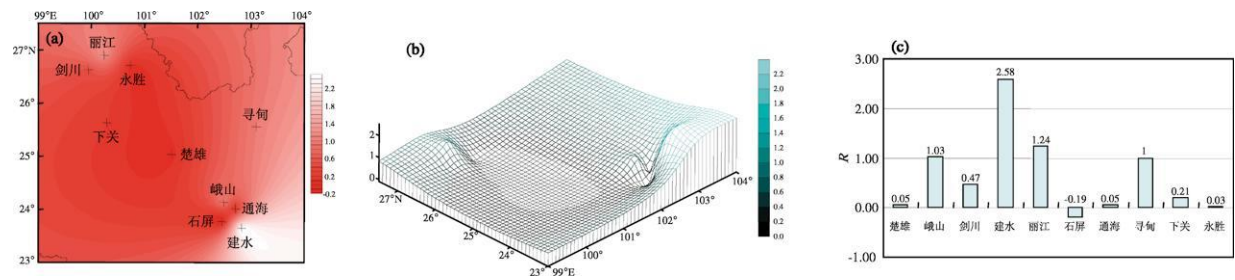


图 4 1987年 8 月 R 值空间分布图

Fig 4 Spatial distribution of R value (Aug., 1987)

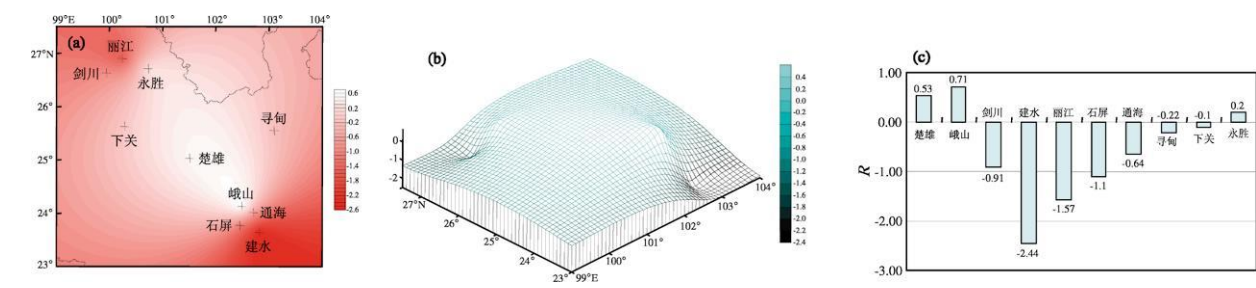


图 5 1995 年 3 月 R 值空间分布图  
Fig 5 Spatial distribution of R value (1995-03)

如图 5 所示, 孟连 M7.3 (1995-07-12)、武定 M6.5 (1995-10-24)、丽江 M7.0 (1996-02-03) 地震前 4~11 个月, 异常参数 R 值在 1995 年 3 月出现大面积负值, 最大值出现在建水,  $|R_i|_{\max} = 2.44$  测区受压应力作用控制。1995 年 2~7 月和 9~10 月建水场地 R 值出现两组负异常, 1995 年 2~4 月和 6~7 月丽江场地 R 值出现两组负异常, 1995

年 3~4 月石屏场地负异常持续 2 个月, 异常呈现组性。

如图 6 所示, 姚安 M6.5 (2000-01-15) 地震前 (震前已完成当月数据采集), 2000 年 1 月异常参数 R 值除永胜、通海等场地呈正值变化外, 其余场地呈现负值, 最大值出现在建水,  $|R_i|_{\max} = 1.89$  表明临震前测区以压性作用为主。

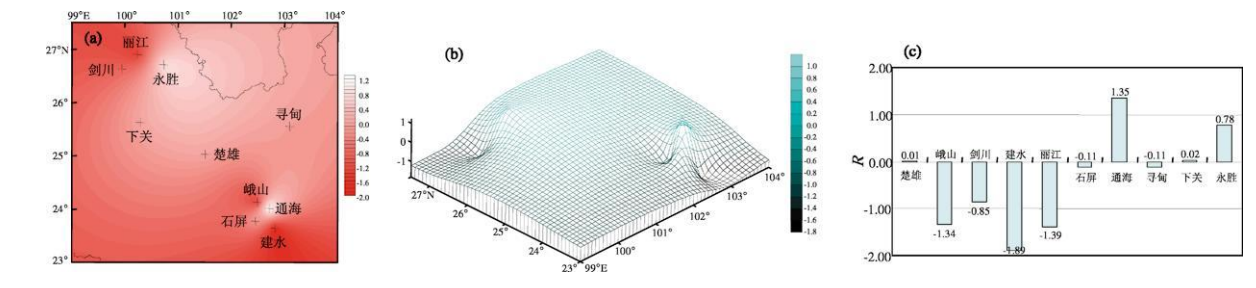


图 6 2000 年 1 月 R 值空间分布图  
Fig 6 Spatial distribution of R value (Jan, 2000)

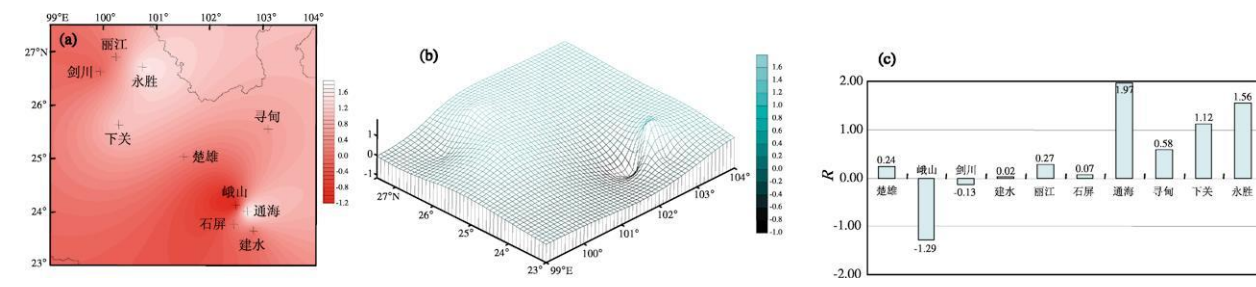


图 7 2000 年 5 月 R 值空间分布图  
Fig 7 Spatial distribution of R value (May 2000)

如图 7 所示, 缅北 M7.0 (2000-06-08) 地震前 1 个月, 即 2000 年 5 月, R 值除峨山为负异常外, 其余场地主要呈正值变化, 正值区域较 2000 年 1 月向缅北沿东西向有所扩大, 最大值出现在通海,  $|R_i|_{\max} = 1.97$ 。

1999 年 11 月至 2000 年 2 月建水场地 R 值持续

4 个月负异常, 1999 年 11 月至 2000 年 1 月丽江场地连续 3 个月出现负异常, 1999 年 11 月至 2000 年 7 月峨山场地连续 9 个月出现负异常, 1999 年 12 月至 2000 年 9 月通海场地持续 10 个月出现正异常, 异常呈现成组特征。姚安 M6.5 地震后, 峨山持续呈压性变化, 建水、丽江场地压性异常消失, 而通海的



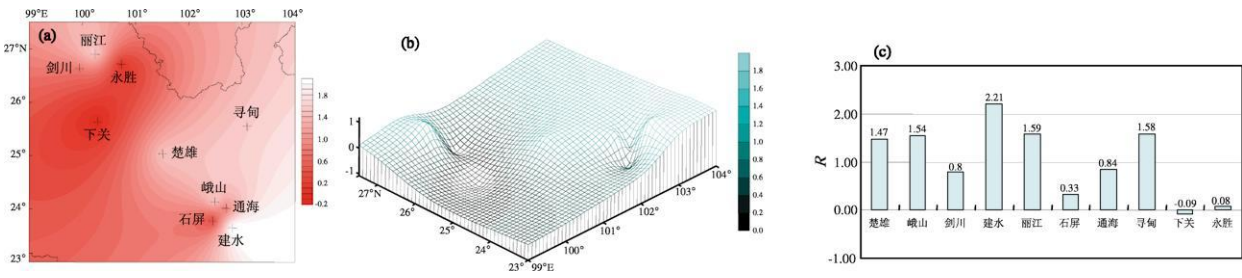


图 8 2009 年 11 月 R 值空间分布图  
Fig 8 Spatial distribution of R value (Nov, 2009)

张性变化仍在持续，测区以张性变化为主，这对菱块外围的缅北 M7.0 地震在地点上有一定指示。

如图 8 所示，2009 年 11 月，楚雄、峨山、建水、丽江、寻甸均出现正值异常，最大异常点为建水， $|R_i|_{\max}=2.21$ ，测区以张应力活动为主。

4 结论与认识

(1) 孕震过程可分为岩石弹性变形、非弹性变形和破裂加速 3 个阶段 (张国民等, 2001)。孕震过程的前期主要是弹性应变的积累阶段，孕震过程的后期非弹性应变快速增长，而弹性应变的增长减慢，所以孕震过程后期的高应力阶段是非弹性应变阶段 (里兹尼钦科, 1982)。本文研究的 R 值异常主要反映了孕震的中后期阶段，即非弹性应变阶段的断层活动特征。

(2) 地震预报实践表明，如果存在一个强震孕育过程，可能有多个地块及相关构造活动受到影响，或处于闭锁或加速活动状态 (刘强, 石绍先, 2005)。本研究的三组 7 次  $M \geq 6.5$  地震前 0.5 ~ 16 个月 R 值出现异常，异常持续时间为 2 ~ 10 个月，异常幅度为 -2.44 ~ +2.58，异常呈成组特征 (表 2)，表明强震前孕震区可能存在一个非弹性的应力加速积累过程。川滇菱块在强震前会呈现整体性闭锁或加速活动。

(3) 菱块外围 400 km 内  $M \geq 7.0$  地震前，R 值于震前 6 ~ 16 个月出现异常，异常持续时间为 6 ~ 10 个月；菱块边界及内部  $M \geq 6.5$  地震前，R 值于震前 0.5 ~ 5 个月出现异常，异常持续时间为 2 ~ 4 个月 (表 2)。可见，菱块外强震前比菱块内强震前 R 值异常出现时间早，异常持续时间也较长。预报实践表明，一般而言，震级越大，孕震范围会增大，孕震时间也较长。

(4) 菱块外围 400 km 内  $M \geq 7.0$  地震前，R 值

呈正异常，菱块呈持续张性变化；菱块边界及内部  $M \geq 6.5$  地震前，R 呈负异常，菱块受持续挤压。受压有利于区域内的应力积累，持续的张性变化则可能指示了区域外的应力积累过程。

(5) 3 组 7 次地震中，除缅北 M7.0 地震外，建水、丽江场地 R 值异常均最为显著，可能为区域构造活动的 2 个敏感点。

(6) 2009 年 11 月，R 值出现成组性正异常，川滇菱块受张应力主控特征明显，对未来 1 ~ 2 年菱块外 400 km 范围内  $M \geq 7.0$  地震有较强指示。表明 2010 ~ 2012 年为云南未来强震活动的主要时段，地震主体地区在红河断裂以西，这与刘祖荫等 (2002) 基于 20 世纪云南强震统计得出的推论在时间上吻合，但在发震主体地区上不一致。

(7) 第 2 组 (孟连 M7.3、武定 M6.5、丽江 M7.0) 和第 3 组 (姚安 M6.5、缅北 M7.0) 地震孕震区较分散，组内地震发震间隔时间短，给辨别各次地震异常带来一定困难；由于监测场地数量有限且测点分布不均匀，复测周期较长 (一般为 1 个月)，较难提取更小范围和短临异常；受资料时段限制，统计样本有限，其结论还需进一步佐证。

参考文献:

郭良迁, 谢觉民. 2001. 张北 6.2 级地震的断层形变速率异常 [J]. 地壳变形与地震, 21(1): 79—84.  
国家地震局《1976 年唐山地震》编辑组. 1982. 1976 年唐山地震 [M]. 北京: 地震出版社.  
黄雍, 张建国, 乔森, 等. 2002. 2001 年云南施甸中强震群研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 240—242.  
江在森, 丁平, 王双绪, 等. 2001. 中国西部大地形变监测与地震预测 [M]. 北京: 地震出版社, 5—6.  
里兹尼钦科. 1982. 地震物理研究 [M]. 韩大宇, 傅征祥 译. 北京: 地震出版社.  
力武常次. 1978. 地震预报 [M]. 冯锐, 周新华 译. 北京: 地震出版社.  
刘强, 石绍先. 2005. 云南地区断层形变群体异常与成组强震 [J]. 地震研究, 28(3): 219—225.

- 刘强, 王世芹, 王永安. 2003. 云南地区断层形变速率异常及强震预测指标[J]. 四川地震 (4): 28—33.
- 刘强, 余庆坤. 2004. 2003 年大姚 6.2 和 6.1 级地震的断层形变异常特征[J]. 地震研究, 27(4): 301—307.
- 刘祖荫, 苏有锦, 秦嘉政, 等. 2002. 20 世纪云南地震活动[M]. 北京: 地震出版社.

- 张国民, 傅征祥, 桂燮泰, 等. 2001. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社.
- Ritsma A R. 1984. The generation of intra-plate earthquakes in a collection of papers of international symposium on continental seismicity and earthquake prediction[M]. edited by the Organizing Committee of ISCER. Seismological Press Beijing China 694—707.

## Anomaly of Fault Deformation and Characteristics of Strong Earthquakes in Yunnan Region

LIU Qiang<sup>1,2</sup>, CHEN Yan<sup>2</sup>, WANG Yong-an<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences University of Science and Technology of China Hefei 230026 Anhui China)

(2. Earthquake Administration of Yunnan Province Kunming 650224 Yunnan China)

### Abstract

The deformation precursor characteristics of 7 earthquakes (Lancang M7.6 Gengma M7.2 Menglian M7.3 Wuding M6.5 Lijiang M7.0 Yao-an M6.5 North Myanmar M7.0) in 3 groups for  $M \geq 6.5$  in the corresponding period were studied by using the crossfault deformation data from 1983 to 2009 in Yunnan region and the relation between the anomalies and strong earthquakes in Yunnan region was analyzed quantitatively by taking the ratio of deformation rate to datum value as the anomaly parameter R value and strong earthquake prediction indexes were brought up. The results show that  $M \geq 6.5$  earthquakes in the interior or  $M \geq 7.0$  earthquakes in outside area for ranging 400 km of Sichuan-Yunnan Rhombic Block occur in 0.5 ~ 16 months after the anomaly parameters R value which displays distinguishing features Anomaly parameter R appears earlier and longer for the time of duration outside than interior earthquakes of Sichuan-Yunnan Rhombic Block and appears positive anomaly before outside strong earthquakes and negative anomaly before interior earthquakes This paper is valuable for  $M \geq 6.5$  strong earthquake prediction in Yunnan region

Key words: fault deformation anomaly parameter R strong earthquake prediction index Yunnan region