

# 不同力源作用下云南中西部构造运动和应力场特征

李群芳

(国家地震局地壳应力研究所)

## 摘 要

本文通过对红河断裂带附近水平残余应力应变场的分析和对该区用6种加力方向进行的平面有限元计算,并结合有关资料讨论了该区现今应力场及其地震危险性。结果表明:该区现今构造应力场较为复杂,且有明显的分区特点,但其最大主压应力的优势方位为近南北。永胜附近,剑川—洱源一带,大理、下关、宾川所围地区是该区未来地震的危险区。当主压应力轴偏向北西时,永平一带,普洱—思茅一带,峨山、石屏、通海一带也可能发展成为未来地震的危险区。

## 一、前 言

众所周知,我国西南地区云、贵、川一带构造复杂,本世纪以来发生6级以上的地震200多次。为探索该区地震成因和发震规律,近十几年以来我国地震工作者作了大量的工作。为了进一步探讨该区现今构造应力场和地震危险区,我们根据云南地区的红河断裂带水平残余应力测量结果,并结合有关资料的分析对该区进行了平面有限元计算的研究。本文介绍了研究方法和主要结果。在本文中还对用X射线测量残余应力的原理和方法作了简要介绍,关于残余应力的理论、测量原理及方法的详细论述可参阅文献〔1〕和有关资料<sup>1)</sup>。

## 二、构造应力场优势方位的分析

### 1. 残余应力场的优势方位

在分析残余应力场之前,我们对用X射线测量残余应力的原理和方法作一简要说明:古构造残余应力是古构造运动时的应力场残留至今的应力。它与地块在现今边界条件作用下产生的构造应力叠加在一起,并受岩石和矿物结构的约束。在挖孔槽时,岩石孔

1) 安耿,迁西地区残余应力场测量与应用。

槽表面附近垂直孔槽岩壁表面的残余应力大部分被释放，而平行岩壁表面的残余应力以横向应变的形式反映出来，即使岩壁发生了垂直壁面方向的横向变形。所以，在对钻孔法和挖槽法所用探头机械地预加应力进行解除或恢复，则所能测到的是现今应力和部分残余应力。

为了单独进行残余应力测量，须从地壳中采掘岩样，这样岩样内现今构造应力的作用便消除了，而只剩下残余应力。对岩样进行多向测量，可测到残余应力的三维状态。

造岩矿物的晶面间距发生变化和晶面间爬越势垒，是岩石弹性变形机制。晶面滑移、晶界滑移、晶界破碎和晶粒碎裂，是岩石塑性变形机制。用 X 射线可测晶面间距的变化，而测不到塑性变形机制，因之测的是弹性变形。又由于岩石是由造岩矿物所组成，造岩矿物是各向异性固体，于是在测到了残余弹性变形后，便可用各向异性弹性理论来计算残余应力和残余应变。

至于如何采样、测量和计算等在此不作介绍，但要提及的是，为了便于测量和更好地反映基岩中的实际残余应力状态，在采样中对岩石是有选择的，例如采未经风化的，含所测矿物晶粒较多，且岩石组构使所选测晶面单法线排列成优势的方向。另外，晶粒大小以  $10^{-3}$ — $10^{-1}$  毫米为宜， $3 \times 10^{-2}$  毫米最好。岩性以花岗岩、灰岩或沙岩较好等等。用 X 射线测量技术对红河断裂带附近残余应力应变测量的部分结果见图 1。测量精度为  $10^{-5}$ — $10^{-6}$ 。其中，

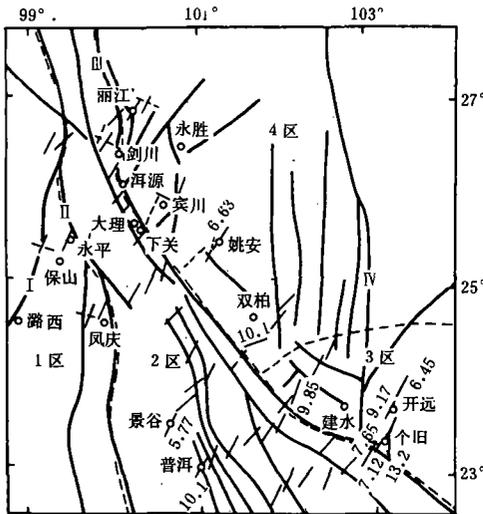


图 1 红河断裂带区域最大水平残余压应力方向(据高国宝等实测)

Fig. 1 Regional maximum horizontal remain compressive stress direction near Red River fault zone

实线表示压缩方向，虚线表示拉伸方向。另外，因大多数测点的残余应变在  $10^{-5}$ — $10^{-4}$  量级之间，为分析方便，我们只在图中标出其应变在  $5 \times 10^{-4}$  以上的总的应变系数。

从图 1 可见，大多数测点的最大主压应力方向为北北东到北东。但对于不同的小区其主压应力方向稍有不同，可以粗略地划分出 4 个小区，即怒江—澜沧江断裂带以西地区，其主压应力轴的优势方位为北北东向 ( $N15^\circ$ — $20^\circ E$ )；怒江、澜沧江断裂带以东，红河断裂带以西地区，其最大主压应力轴的优势方位为  $N20^\circ$ — $45^\circ E$ ；红河断裂带南段以北的曲江断裂带和小江断裂带南段，其最大主压应力的优势方位为  $N30^\circ E$  左右；红河断裂带北段以东地区，其最大主压应力轴方位变化范围较大，为  $N15^\circ$ — $65^\circ E$ ，还有个个别点呈北西向。

## 2. 现今应力场的优势方位

我们选取  $99^{\circ}$ — $104^{\circ}\text{E}$ ,  $23^{\circ}$ — $27^{\circ}\text{N}$  的范围进行平面有限元计算。在计算中,在地块模型的边界用了 6 种方向不同而载荷强度相同的双向加力方式。载荷强度分别为  $-5 \times 10^6 \text{N/m}^2$  和  $-3 \times 10^6 \text{N/m}^2$ 。根据实测资料和文献〔2—5〕,把断层外的岩体视为均匀弹性体,其弹性模量  $E$  取为  $8 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ,泊松比  $\nu=0.25$ ;断层内的岩石比较破碎,用较低的弹性模量来模拟,即  $E$  取为  $4 \times 10^9 \text{N/m}^2$ , $\nu=0.27$ ;由于小江断裂带破碎带较宽,而红河断裂带具有流变性,对这两条断裂带的模量就取得更低一些,即取  $E=2.6 \times 10^9 \text{N/m}^2$ , $\nu=0.29$ 。

将各种加力方向下得到的结果与实测结果进行比较,选择与实测结果一致性最好的一组作为该区主压应力的优势方向。

图 2 是最大主压应力方向分别为  $\text{N}10^{\circ}\text{E}$ 、 $\text{N}45^{\circ}\text{E}$ 、 $\text{EW}$ 、 $\text{SN}$ 、 $\text{N}45^{\circ}\text{W}$  和  $\text{N}10^{\circ}\text{W}$  的双向压缩加力条件下的最大主压应力轨迹线图。

由图 2 可以看出,研究区内最大主压应力优势方位因其受力方式不同而显示出各自不同的分区特点,但也具有共同特征。

该区最大主压应力轴方位具有明显的分区性,红河断裂带和小江断裂带是应力场分区的主要分界线;

在断裂交汇区、断裂端点及其拐弯处附近,其最大主压应力方向复杂多变;

无论哪种加力方式,该区的最大主压应力的优势方向都在北西到东北范围内变化;

以正南北向为轴,其外区主压应力方向对称时,小区划分基本相同,但小区内的主压应力优势方位不同。

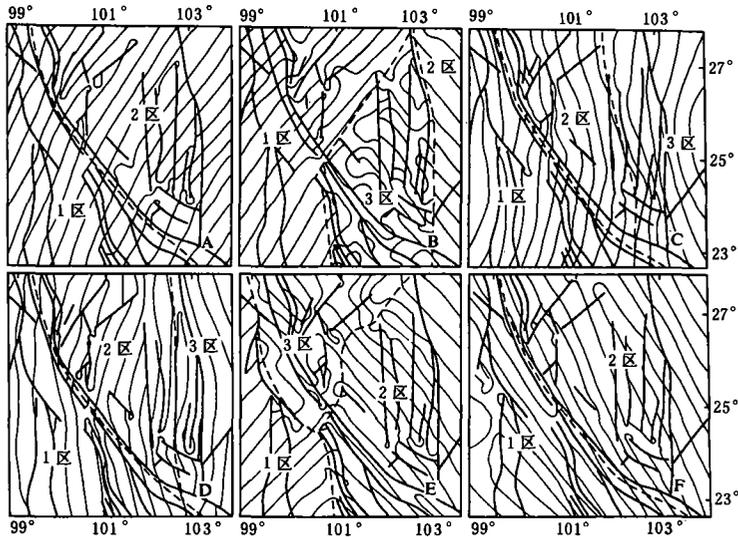


图 2 最大主压应力轨迹线图

Fig. 2 Locus lines of maximal principal compressive stress

根据本文的计算结果并参考文献〔2〕、〔6—8〕的研究结果,作者认为云南中西部地区的现今构造应力场主压应力的优势方位为近南北向。

### 三、地震危险区的讨论

根据计算结果，绘制了在6种加力方式下云南中西部地区最大剪应力高值区相对等值线图（图3）。

为分析简便，我们把各种受力方式下最大剪应力集中区的应力集中系数列于表1。表中的应力集中系数指最大剪应力相对等值线中的最大值。

从表1可以看到：（1）在6种加力方式下共有9个不同的最大剪应力相对集中区。多数中强地震也都发生在这些剪应力的高值区，如图4所示。这些高值区分别属于不同的地震区或地震带。I、II、III、V、VII区属于滇西地震带；IV区属于腾冲地震区；VI区属于普洱、思茅地震区；VIII区属于通海、石屏地震区；IX区属于小江地震带。由此可见，剪应力高值区有可能发展成为未来地震的危险区。（2）不同加力方式下应力集中区的个数和出现最大值的地点不同。东西向加力时，应力集中区最多，但应力集中系数不高；南北向加力时，出现的应力集中区最少；N45°E向加力时，应力集中系数最高。（3）III区在6种加力方式下均出现；II、IV区在5种加力方式下出现；I区、V区和VII区在4种加力方式下出现。与此同时，I、III区各在两种加力方式下，其应力集中达到最大值，IV、V和VII区各在一种加力方式下应力集中达到最大值。

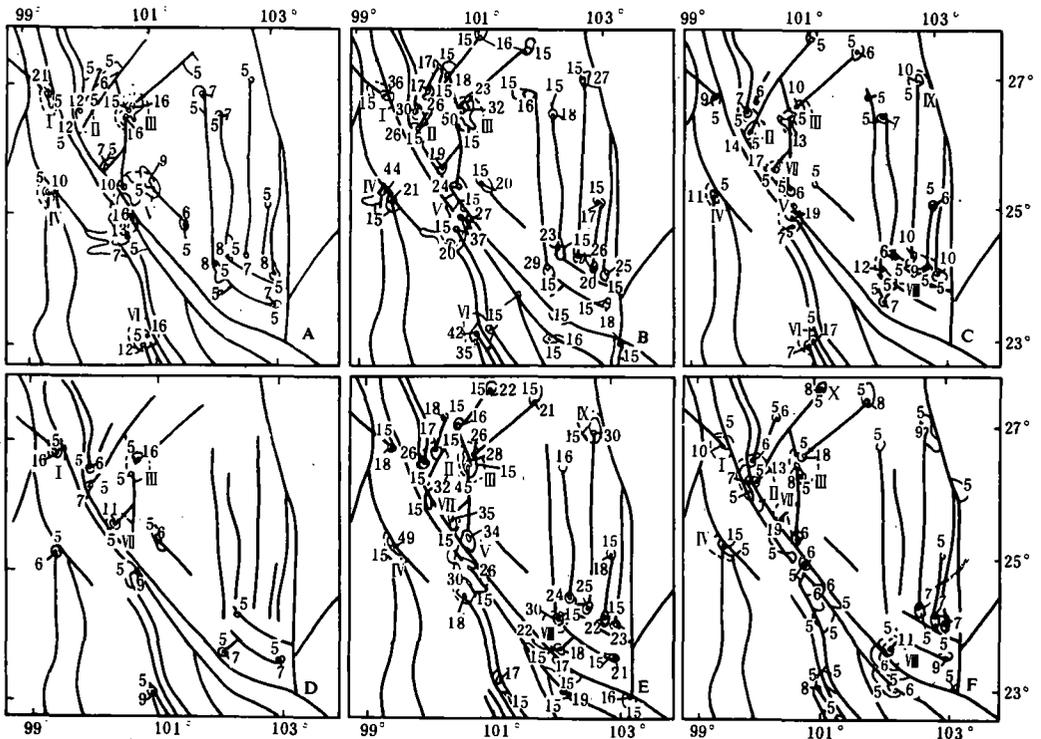


图3 最大剪应力高值区相对等值线图

Fig. 3 Relative isograms for high value region of maximal shear stress

前面曾指出,该区现今构造应力场的最大主压应力优势方向是近南北向,即可能在 $N10^{\circ}E$ 到 $N10^{\circ}W$ 之间。由剪应力的高值区来判断,则首先是Ⅲ、Ⅰ和Ⅴ区发生地震的危险性大,这与文献〔2〕、〔6〕、〔9〕提出的地区基本一致;其次是Ⅳ、Ⅵ、Ⅶ区。

由图1可见,残余应力方向变化较大的地区是滇西地震带,而残余应变量较高的有腾冲地震带、通海—石屏地震区和普洱—思茅地震区以及个旧—开远一带。残余应变量大就

表1 最大剪应力集中系数比较表

应力集中区	加力方向					
	$N10^{\circ}E$	$N45^{\circ}E$	EW	SN	$N45^{\circ}W$	$N10^{\circ}W$
Ⅰ区	21	36		16		10
Ⅱ区	12	30	14		32	13
Ⅲ区	16	50	13	16	45	18
Ⅳ区	10	44	11		49	15
Ⅴ区	16	37	19		34	
Ⅵ区	16	42	17			
Ⅶ区			17	11	35	19
Ⅷ区			12		30	11
Ⅸ区			10		30	
应力集中区的个数	6	6	8	3	7	6
应力集中系数的最大值	21	50	19	16	49	19
最大值所属的区	Ⅰ区	Ⅲ区	Ⅴ区	Ⅰ、Ⅲ区	Ⅳ区	Ⅶ区

说明这些地区现在还储存着较大的残余应变能。虽然,残余应力形成于古构造运动过程中,并残留在岩体内而保留了下来,一般情况释放得极其缓慢,但当岩体破裂和膨胀时便雪崩式地随之一起释放出来,其能量的回放可参加到现今的地震活动中。故地震能量应是现今构造应力场与古构造残余应力场所释放的弹性能量之和。因此,在预测震级时除了要观测现今构造应力场的变化外,还必须测量在短期内基本上不变化的古构造残余应力场,研究其能量在空间上的分布及其在地震的发生和震源过程中的作用。其次,残余应力可降低岩体破坏强度,从而导致低应力破坏,其所需能量主要由残余应力供给。为此,我们认为现今应力集中而古构造残余应力值又高或残余应力拉张和压缩变化剧烈的地区,在一定的触发因素下就很可能发生较大的地震。近代(近40年)所发生的5级以上的地震大多就发生在这些地区(图4)。虽然对残余应变只测了6个剖面,不能把该区所有的应变高值点标出,但这已经清楚地反映出它与大震的对应关系。由此可见,残余应变能对该区地震的活动性仍有一定的控制作用。

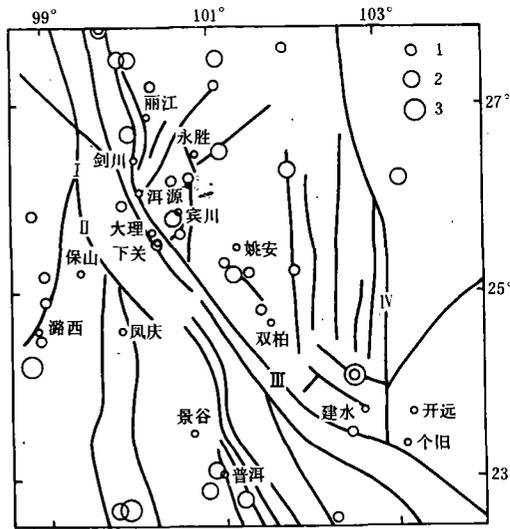


图4 1933—1976年5级以上地震分布图

I. 怒江断裂 II. 澜沧江断裂 III. 红河断裂

IV. 小江断裂

1.  $5 \leq M_L < 6$  2.  $6 \leq M_L < 7$  3.  $7 \leq M_L < 8$

Fig. 4 Distribution of earthquakes ( $M \geq 5$ ) from 1933 to 1976

综上所述, 作者认为, 云南中西部地区未来地震危险区可能是: (1) 永胜一带; (2) 剑川、洱源一带; (3) 大理、下关、宾川一带; (4) 永平以南附近; (5) 普洱、思茅一带; (6) 峨山、石屏、通海一带。在现今应力场作用下, 尤以 (1)、(2)、(3) 区更为危险。它们是否在未来会发生地震, 还要根据当地岩石的力学性质和其他监测手段综合研究来确定。

### 结束语

通过对云南中西部红河断裂带附近残余应力场和平面有限元计算的分析, 并参考前人的研究结果, 作者认为, 该区现今构造应力场复杂且具有分区特点, 但其主压应力轴的优势方位为近南北向。该地区的地震活动仍受残余应变能所控制。

(本文1990年6月20日收到)

### 参考文献

- [1] (日) 米谷茂, 残余应力的产生和对策, 朱荆璞、邵会孟译, 机械工业出版社, 1983.
- [2] 杨光宇, 云南地震与应力场的初步研究, 地震学报, Vol. 3, No. 3, 1981.
- [3] 耿乃光等, 中国五条断裂断层泥力学性质的初步研究, 中国地震, Vol. 1, No. 4, 1985.
- [4] J. E. 吉洛特, 岩石物理力学性质的研究 (摘引), 工程地质动态, No. 2, 1986.
- [5] (西德) G. 哥德赫, 有限元法在岩土力学中的应用, 张清、张弥译, 中国铁道出版社, 1983.
- [6] 阚荣举等, 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的讨论, 地球物理学报, Vol. 20, No. 2, 1977.
- [7] 刘光勋等, 我国滇西北地震活动区的活动构造与应力状态, 地震地质, Vol. 8, No. 1, 1986.
- [8] 向宏发等, 滇西北地区的现代构造应力场, 地震地质, Vol. 8, No. 1, 1986.
- [9] 杨光宇, 我国西南川滇地区强震活动与构造应力场的研究, 地震研究, Vol. 7, No. 3, 1985.

**A STUDY ON CURRENT STRESS FIELD AND SEISMIC DANGER AREAS  
IN THE CENTRAL—WESTERN YUNNAN PROVINCE**

Li Qunfang

*(Institute of Crustal Dynamics, SSB, Beijing, China)*

**Abstract**

In this paper, based on the analysing of horizontal remnant stress - strain fields near the Red River fault, the calculation of 2-D finite element method with six different tectonic stress directions, and other related data, the current stress field and the seismic danger areas are inferred. The results indicate that the current stress field in this area is very complex and shows regionalized features, but the dominant direction of principal compressive stress is nearly NS. The Yongsheng area, Jianchuan—Eryuan area, and the area surrounded by Dali, Xiaguan and Binchuan are coming seismic danger areas. When the principal compressive stress axis rotates toward northwest, the Yongping, Puer—Simo, Eshan, Shiping, and Tonghai are as will become seismic danger areas.

—————  
(上接63页)

**DATA PROCESSING OF WELL LU—03 IN PHASE LAG OF WATER  
LEVEL TO BAROMETRIC PRESSURE**

Zhang Zhaodong, Wang Lizhong

*(Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan, China)*

Wang Changwen, Zhang Zhugang

*(Computing Center of Shandong Province, Jinan, China)*

**Abstract**

In this paper, a new processing method of phase lag of response of water level to barometric pressure is given. The formulae for calculating the barometric coefficient and lag time of the well level in consideration of lag influence are given. Taking well Lu—03 as an example, by using the new method, it is obtained that the barometric coefficient is 6.41 mm/hPa and the lag time of the response of well level to barometric pressure is 1.52h. The standard deviation of the water level corrected by barometric pressure decreases obviously.