

文章编号: 0253-3782(2001)01-0017-07

# 滇西南地区现代构造应力场分析<sup>\*</sup>

谢富仁 苏 刚 崔效锋 舒赛兵 赵建涛

(中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所)

**摘要** 利用断层滑动资料反演构造应力张量的方法, 获得滇西南地区 20 个构造应力张量数据, 并通过与由震源机制解资料求解该地区平均应力场结果的对比, 获得了研究区现代构造应力场特征: 镇源—营盘山断裂以西至龙陵断裂带以南地区, 最大主压应力方向为北北东, 应力结构以走滑型为主; 龙陵断裂带及其以北的局部地区, 最大主压应力方向为近南北或北北西, 应力结构为走滑型.

**关键词** 滇西南 现代构造应力场 活动断层擦痕 震源机制解

中图分类号: P315.72<sup>+7</sup> 文献标识码: A

## 引言

滇西南地区地处青藏高原东南边缘, 东与川滇菱形块体相接, 西北与印度板块的东北触角相邻, 是我国大陆构造活动强烈且强震频发地区之一. 研究该区现代构造应力场特征, 对揭示青藏高原的演化机制, 认识该地区断裂活动与强震孕育环境关系具有重要意义. 由于研究区所处构造环境复杂, 地震类型多样, 加之台网监控能力和记录资料有限, 对这一地区的现代构造应力场特征迄今仍没有清晰的认识. 本研究在野外断层活动性调查与断层滑动擦痕系统测量的基础上, 利用由断层滑动资料反演构造应力张量的方法, 计算获得了一批反映该区现代构造应力场特征的数据; 并由震源机制解资料求解获得了该地区的平均应力场. 将两种结果进行对比, 获得了研究区现代构造应力场的主要特征.

## 1 研究区地质构造概况

滇西南地区主要分布着北西向、北东向和南北向 3 组活动断裂带(图 1). 中新世开始, 伴随喜马拉雅运动高潮的到来, 滇西南地区地壳发生强烈上升. 断裂活动多数为老断裂的新活动, 断裂活动的力学性质也由压扭性向张扭性转化, 断裂控制着该地区一系列断陷盆地的发展和变形(国家地震局地质研究所, 云南省地震局, 1990).

在上述 3 组方向的断裂带中, 北西向断裂以红河断裂为代表, 主要分布于研究区的东北部, 呈近于平行产状, 断裂性质早期以逆冲兼右旋走滑为主. 新构造时期, 断裂性质开始向张扭性方向转化, 沿断裂发育一系列北西向长条形的新、老第三纪断陷盆地, 使断裂

\* 地震科学联合基金(9507424)资助; 中国地震局地壳应力研究所论著 2001A0001.  
2000-08-09 收到初稿, 2000-11-22 收到修改稿, 2000-12-01 决定采用.

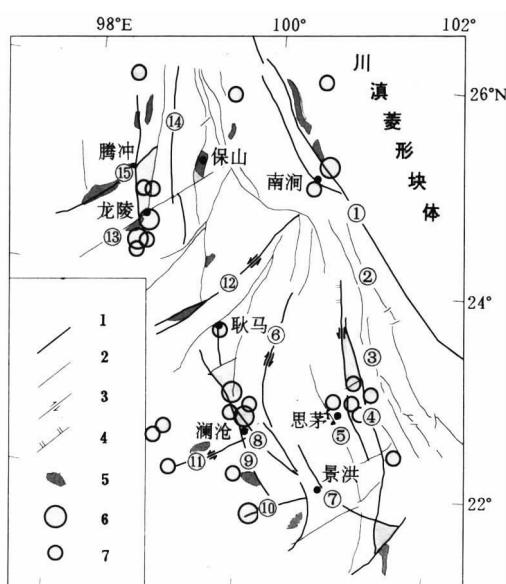


图 1 研究区活动构造图

1. 晚更新世以来活动断裂；2. 第四纪断裂；3. 走滑断裂；
4. 逆断裂；5. 第四纪盆地；6.  $M_S = 7.0 \sim 7.9$ ；
7.  $M_S = 6.0 \sim 6.9$ ；① 红河断裂；② 阿墨江断裂；
- ③ 把边江断裂；④ 镇源—营盘山断裂；⑤ 普文断裂；
- ⑥ 澜沧江断裂；⑦ 勐养河断裂；⑧ 木嘎—景洪断裂；
- ⑨ 澜沧—勐遮断裂；⑩ 打洛断裂；⑪ 孟连断裂；
- 12 南町河断裂；13 瑞丽—潞西断裂；
- 14 怒江断裂；15 龙陵断裂

活动达到高潮。进入第四纪以来，北西向断裂的活动逐渐减弱，沿该组断裂有史以来仅发生过中等强度的地震。

北东向断裂主要位于澜沧江断裂以西地区，其断裂规模相对较小，基本上受澜沧江断裂的阻挡而未能向北东方向继续延伸。该组断裂大体以等间距平行展布，断裂性质以左旋走滑为主，断裂活动导致了一系列新第三纪、第四纪断陷盆地的形成，并沿断裂带呈串珠状分布。第四纪以来该组断裂的活动性开始加强，断裂运动以左旋走滑兼具张性为主，错断了不同的地质体和地貌单元。有史以来沿北东向断裂的地震活动十分强烈，区内多次 7 级以上的地震都与该组断裂的新活动有关。

南北向断裂以怒江断裂带为代表，分布于研究区北部。它们是巨大的南北向断裂系的南端，其规模大、活动强，控制了腾冲以北盆地的形成，以及晚新生代以来的火山活动和近代地震活动，第四纪以来以张性活动为主，晚更新世以来兼有走滑性质。

## 2 利用断层滑动资料反演的构造应力场

利用断层滑动资料反演构造应力张量的方法是根据一组含有断层运动特征的断层观测数据来确定这些断层所在区域的构造应力状态(Angelier, 1979; Etchecopar *et al.*, 1981)。该方法的实质是用计算出的断面上的剪应力方向拟合断面上的滑动方向，最终给出应力张量的 4 个特征参量，它们是 3 个主应力方向与 1 个反映主应力相对量值比关系的应力形因子  $\varphi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  (Angelier, 1984; 谢富仁, 1994; 谢富仁等, 1993, 1994)。

研究区内保存的大量活断层形迹包含了反映区域构造应力作用的丰富信息。本文通过野外追踪，调查了区内近 20 条断裂的活动性，并系统地测量了断层的滑动擦痕，获得了大量具有区域控制意义的活动断层的擦痕数据。所测擦痕大多为第四纪晚期以来的活动断层的产物，其中一些为历史地震或古地震断层。例如，在研究区西南的打洛断裂带上，擦痕数据测自由断错冲沟、断塞塘和断层陡坎组成的地震形变带上。

研究区内共选择了 27 个测点，其中的 3 个测点由于数据量较少，计算结果离散度较大而被舍去；另有 4 个测点的观测样本可能为较早期的构造形迹，其计算结果与区域现代构造应力场明显不一致，暂不在此讨论；其余 20 个测点的计算结果均较好地反映了研究区现代构造应力场特征(图 2, 表 1)，其计算结果的断面剪应力与滑动方向拟合平均偏差角在 2°

~13°之间(表 1)。

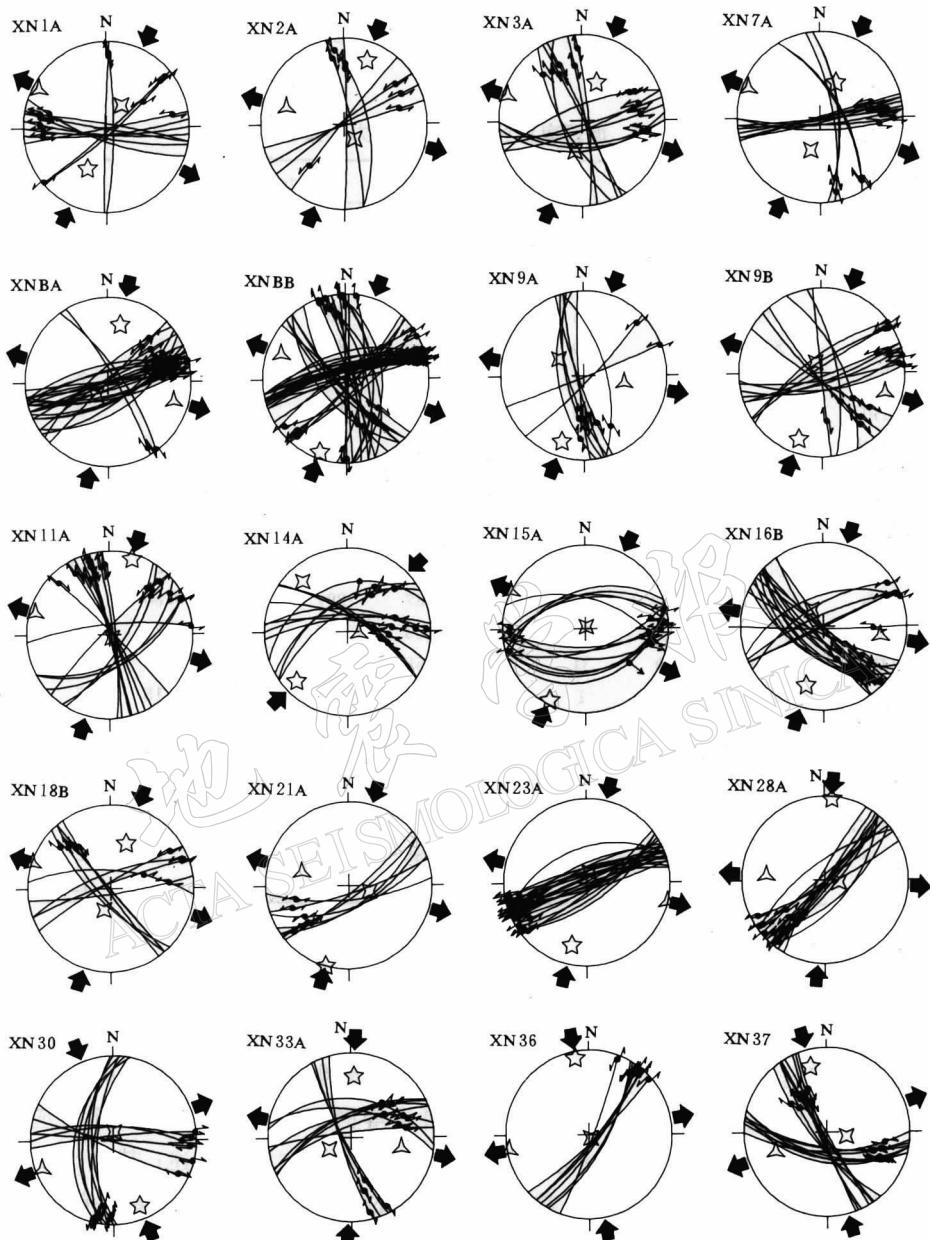


图 2 研究区现代构造应力张量的乌尔夫网投影(下半球)

大箭头为主压(向内)或主张(向外)应力方向；圆弧上小箭头为擦痕指向；三角、四角、五角形分别为  $\sigma_3$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_1$ ；左上角为测点代码

从计算结果可以看出，镇源—营盘山断裂以西至龙陵断裂带以南的滇西南大部分地区的现代构造应力场以北北东挤压、南东东拉张为主要特征(图 2, 表 1)。其最大主应力( $\sigma_1$ )方向为 N20°E 左右，平均倾角 14°；最小主应力( $\sigma_3$ )方向 110°左右，平均倾角 14°；中间主应力( $\sigma_2$ )近直立，应力结构以走滑型为主。个别测点的最大主应力( $\sigma_1$ )方向为 N40°E

左右, 应力结构为逆断型。在研究区西北, 也即龙陵断裂带及其以北的 4 个测点结果显示, 该局部地区现代构造应力场的主压应力( $\sigma_1$ )方向与滇西南大范围地区有所不同, 其最大主压应力( $\sigma_1$ )方向为近 SN 或 NNW(图 2, 表 1)。这可能反映了区域构造应力场的非均匀和复杂性特征。

表 1 滇西南地区现代构造应力张量特征

No.	测区(点)位置		$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$		$\varphi$	$\tau \wedge S^*$ /(°)	应力 结构**
	参考地名	测点代码	方位 /(°)	倾角 /(°)	方位 /(°)	倾角 /(°)	方位 /(°)	倾角 /(°)			
1	磨墨镇	XN1	206	34	36	55	299	5	0.90	10	SF
2	大开河北	XN2	21	14	146	66	286	19	0.28	8	SF
3	大开河	XN3	21	40	194	50	288	4	0.57	7	SF
4	曼卡	XN7	26	43	197	47	292	5	0.68	8	SF
5	白花山南	XN8A	14	13	293	72	107	13	0.66	8	SF
6	白花山	XN8B	201	5	95	74	292	16	0.10	6	SF
7	斑岳北	XN9A	201	11	331	73	108	13	0.82	5	SF
8	斑岳	XN9B	198	12	304	52	100	36	0.47	6	SF
9	农场南	XN11A	16	11	169	78	285	5	0.52	6	SF
10	那勒	XN14A	226	9	319	12	100	74	0.35	13	TF
11	糯角	XN15A	207	3	28	87	297	0	0.80	11	SF
12	幕乃	XN16B	197	17	324	63	100	20	0.73	9	SF
13	耿马南	XN18B	19	31	198	59	289	1	0.61	4	SF
14	孟定南	XN21A	18	1	110	61	288	29	0.15	7	SF
15	姑老河	XN23A	194	14	16	76	104	0	0.62	6	SF
16	菜园坝	XN28A	5	2	100	71	275	19	0.64	8	SF
17	道街东	XN30	158	10	5	79	249	5	0.26	8	SF
18	葫芦口	XN33	3	18	243	57	102	27	0.70	11	SF
19	新桥	XN36	350	5	155	85	260	1	0.58	2	SF
20	龙陵北	XN37	346	13	102	63	250	23	0.35	12	SF

注: \* 计算剪应力与滑动方向拟合平均偏差角; \*\* SF 为走滑断裂型, TF 为逆断型。

### 3 由震源机制解求得的平均应力场

简单地利用震源机制解中的  $P$ ,  $B$ ,  $T$  轴分析, 很难准确描述某一地区的构造应力场特征。这主要是因为震源机制解中的  $P$ ,  $B$ ,  $T$  轴并不等同于构造应力场的 3 个主应力  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$ (Yamakawa, 1971), 它只能对构造应力场进行大致的方向性描述; 其次, 对于构造复杂地区, 单个震源机制解反映的只是某一构造事件的特性, 而众多构造事件的应力特性往往又存在一定程度上的差异, 从而导致了对区域主体应力作用特征的模糊。采用滑动矢量拟合法求解平均应力场(许忠淮, 1985; 崔效锋, 谢富仁, 1999)可以有效地描述一个地区主体构造应力场, 并给出具有实际物理意义的  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$ 。

利用震源机制解资料求解平均应力场的方法(崔效锋, 谢富仁, 1999), 对研究区内 57 次地震的震源机制解资料进行了反演分析, 其中有 40 个震源机制解参与了反演计算、17 个矛盾数据, 震源机制解资料的应用率达 70%。反演得出的平均应力张量 3 个主应力  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  的方向和应力形因子  $\varphi$  的大小、剪应力方向与滑动矢量间的夹角  $\alpha$  以及剪应力  $\tau$  相对断面应力  $f$  之比的平均结果列于表 2。图 3a 给出对应震源机制解两个节面的上半球乌尔

夫网投影.

表 2 由震源机制解资料确定的区域平均应力场

震级 ( $M_s$ )	$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$		$\varphi$ /(°)	$\alpha$ 平均 /(°)	$\tau/f$ (平均)	M	N	$M/(M+N)$
	$A_z/(^{\circ})$	$I_h/(^{\circ})$	$A_z/(^{\circ})$	$I_h/(^{\circ})$	$A_z/(^{\circ})$	$I_h/(^{\circ})$						
$\geq 6.0$	206	1	102	88	295	2	0.52	5.5	0.89	19	3	86%
3.2~5.9	199	5	335	84	109	4	0.59	9.2	0.89	21	14	60%
$\geq 3.2$	200	4	338	84	110	4	0.58	8.6	0.89	40	17	70%

注:  $A_z$  为应力轴的方位角,  $I_h$  为应力轴与水平面的夹角,  $M$  为参与反演的震源机制解个数,  $N$  为矛盾数据个数,  $M/(M+N)$  为震源机制解的应用率.

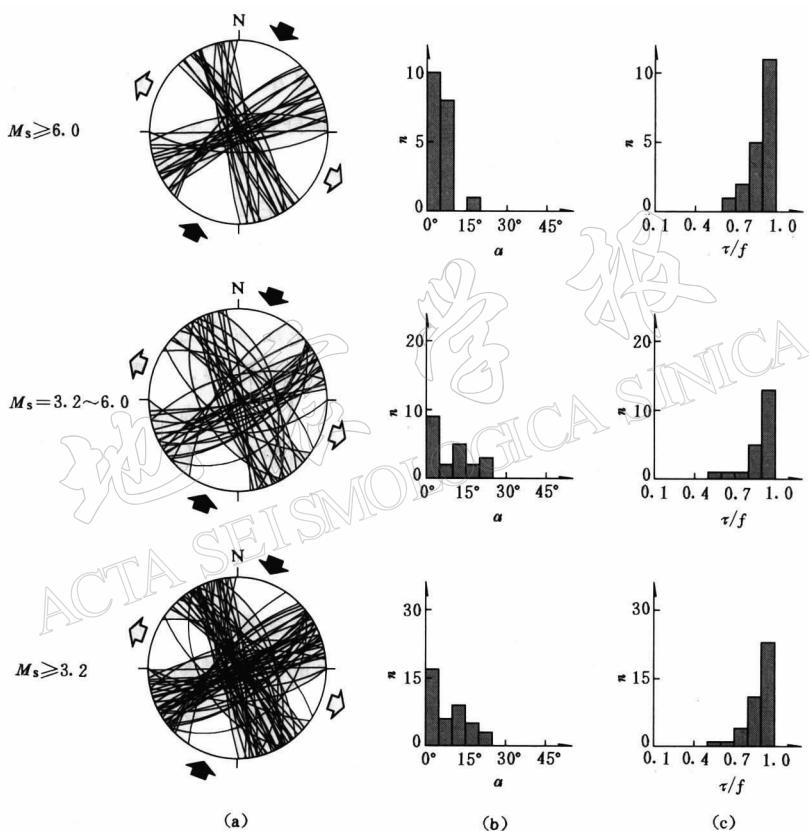


图 3 地震震源机制解拟合平均应力场结果

(a) 震源机制解两个节面乌尔夫网投影(上半球); (b) 断层面上剪应力方向与滑动矢量间夹角  $\alpha$  的分布直方图; (c) 断层面上剪应力相对大小( $\tau/f$ )的分布直方图

在具体反演分析过程中, 分别对两个震级档次的地震震源机制解运用滑动方向拟合法进行了反演计算: 一个是  $M_s \geq 6.0$  (震源机制解资料的应用率达 86%); 另一个是  $M_s = 3.2 \sim 5.9$  (震源机制解资料的应用率为 60%). 表 2 中列出了两个震级档次的地震震源机制解的反演结果. 可以看出, 不同震级档次的地震震源机制解反演出的平均应力张量和应力形因子  $\varphi$  较为一致, 这说明震源机制解的震级对反演平均构造应力场参数的影响不大, 只是强震 ( $M_s \geq 6.0$ ) 震源机制解资料的应用率明显高于中小地震 ( $M_s = 3.2 \sim 5.9$ ). 图 3 分别给出

了  $M_s \geq 6.0$ 、 $M_s = 3.2 \sim 5.9$  和  $M_s \geq 3.2$  震源机制解拟合平均应力场的  $\alpha$  角及  $\tau/f$  角结果。

由表 2 可以看出, 研究区平均应力的中等主应力  $\sigma_2$  近于垂直, 与水平面最大的夹角为  $84^\circ$ ; 最大主应力  $\sigma_1$  和最小主应力  $\sigma_3$  则基本上是水平的, 其中  $\sigma_1$  的方位为  $200^\circ$  ( $N20^\circ E$ ),

$\sigma_1$  与水平面的夹角为  $4^\circ$ . 图 4 给出了参加拟合的 40 个震源机制解的分布以及  $\sigma_1$  的方位 ( $M_s \geq 3.2$ ).

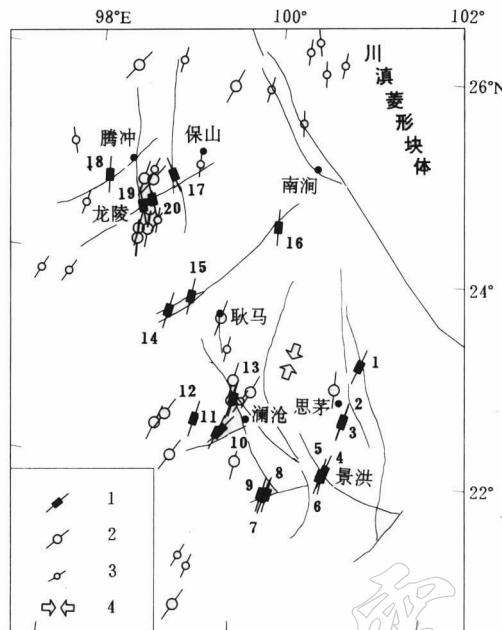


图 4 研究区构造应力场

图中黑体数字为测点编号; 1. 由断层滑动资料确定的主要应力方位; 2. 震源机制解  $P$  轴方位 ( $M_s \geq 6.0$ ); 3. 震源机制解  $P$  轴方位 ( $M_s = 3.2 \sim 5.9$ ); 4. 震源机制解确定的平均主要应力方位

地壳浅部与深部应力状态的相一致。地壳深、浅部应力状态的一致性亦反映了研究区以走滑断裂活动为主的特征。

滇西南地区现代构造应力场特征与其相邻地区有着明显的不同。与其东邻的川滇块体地区现代构造应力场的主体主应力方向为北北西, 而其西侧的掸邦块体地区现代构造应力场的主应力方向为北东东(陈彭年, 高莉青, 1994)。这种构造应力场特征在空间分布上的较大变化, 说明了研究区所处构造部位遭受的动力作用过程较为复杂。从较大区域范围来看, 滇西南地区遭受着来自印度板块侧压、川滇块体楔入和东南亚板块向北的联合作用(谢富仁等, 1993, 1999)。

## 4 讨论与结论

利用断层滑动资料反演的构造应力张量与由震源机制解资料求解的平均应力场结果, 显示了滇西南地区现代构造应力场的基本特征(图 4): 镇源—营盘山断裂以西至龙陵断裂带以南地区, 现代构造应力场的最大主压应力方向为北北东, 应力结构以走滑型为主; 龙陵断裂带及其以北的局部地区, 由断层滑动资料反演结果表现为最大主压应力方向近南北或北北西, 应力结构为走滑型, 而震源机制结果仍以北北东为主, 个别为近南北, 反映了区域构造应力场的复杂性特征。

利用震源机制解资料求解了该地区平均应力场结果, 与利用断层滑动资料反演的构造应力张量有较好一致性(图 4)。这种一致性表明了该区现代构造应力场在一个较长的地质时期存在着一致的稳定性,

## 参 考 文 献

- 陈彭年, 高莉青. 1994. 中国及邻区构造应力场[A]. 见: 胡凤珍, 陈彭年, 高莉青编译. 中国及邻区构造应力场[C]. 北京: 地震出版社, 3~18.
- 崔效锋, 谢富仁. 1999. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J]. 地震学报, 21(5): 513~522.
- 国家地震局地质研究所, 云南省地震局. 1990. 滇西北地区活动断裂[M]. 北京: 地震出版社, 7~13.

- 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 等. 1993. 我国西南地区现代构造应力场基本特征[J]. 地震学报, **15**(4): 407~417
- 谢富仁. 1994. 利用断层滑动资料确定构造应力主方向的方法[A]. 见:《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究(3) [C]. 北京: 地震出版社, 191~201
- 谢富仁, 刘光勋, 梁海庆. 1994. 滇西北及邻区现代构造应力场[J]. 地震地质, **16**(4): 329~338
- 谢富仁, 张世民, 窦素芹, 等. 1999. 青藏高原北、东边缘第四纪构造应力场演化特征[J]. 地震学报, **21**(5): 501~512
- 许忠淮. 1985. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场[J]. 地震学报, **7**(4): 349~361
- Angelier J. 1979. Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population[J]. *Tectonophysics*, **56**: 17~26
- Angelier J. 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets[J]. *J Geophys Res*, **89**: 5 835~5 848
- Etchecopar A, Vasseur G, Daignieres M. 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis[J]. *J Struct Geol*, **3**: 51~55
- Yamakawa N. 1971. Stress field in focal regions[J]. *J Phys Earth*, **19**: 347~353

## MODERN TECTONIC STRESS FIELD IN SOUTHWESTERN YUNNAN, CHINA

Xie Furen Su Gang Cui Xiaofeng Shu Saibing Zhao Jiantao

(Institute of Crustal Dynamics, China Seismological Bureau, Beijing 100085, China)

**Abstract:** By means of inversion of fault-slip data, the parameters of 20 tectonic stress tensors in southwestern Yunnan region are determined. Compared with the average stress field of the region obtained from focal mechanism solutions, the following characteristics of modern tectonic stress field in this region are obtained. From the west of Zhenyuan-Yingpanshan fault to the south of Longling fault zone, the maximum compressional stress is in NNE direction, and the stress regime is mainly of strike-slip type. In Longling fault zone and the area north to it, the direction of maximum compressional stress is near-NS or NNW, the stress regime is of strike-slip type.

**Key words:** southwest Yunnan; modern tectonic stress field; slickenside on active fault; focal mechanism solution