

川西构造应力场现今变化特征与地震活动

周存忠

(四川省地震局)

高福晖

(中国科学院成都分院)

摘 要

本文从电阻式地应力—应变观测系统扩大试验所取得的资料,分析了川西现代构造应力场的变化特征及其与地震活动的关系,指出:川西现代构造应力场有明显的时空变化特点,其积累、加强与释放、回复的反复变化是这一地区强震孕育和接连发生的直接原因。1981年1月24日道孚6.9级地震前,区域构造应力场的主压应力方向曾发生过近 90° 的转折,持续36天,震前9天恢复为正常方向。本文最后指出:1982年6月16日甘孜6.0级地震后,川西构造应力场较稳定,而川南则加强,因此,川西地震较少,而滇西、滇东北以及元江、红河断裂地震较为活跃,曾于1982年至1983年接连发生中强地震。

一、引 言

地壳应力状态及其构造应力场的变化,是人们对地震成因和地震预报研究中广为关注的问题。目前研究这类问题的方法、途径颇多,除了一些理论模拟方法而外,多数则借助于实地观测资料进行分析计算。最常用的主要有三种方法:(1)根据测震资料,由震源机制求解构造应力场参数^[1];(2)实地应力测量;(3)由地形变观测资料推算。

用上述方法,要连续定量求解出各地区构造应力场方向等参数的变化情形,往往还有一定困难,常常受到台站密度及观测精度的限制。根据实地应力测量求解比较直观,但现有的电感法测量技术环节尚不稳定,加之建站要求基岩完整,装备耗资高,难于扩展。为了探索解决这一实际问题的途径,我们于1976年开始研究了电阻式地应力观测系统¹⁾,1979年由单台扩大为三台(大邑、泸定、马边),在川西较大范围内试验,获得了1981年1月24日道

1) 中国科学院光电技术研究所,测量土层应力预报地震研究,光学工程,1978.

乎6.9级地震前兆以及四川西部鲜水河、龙门山等断裂的应力—应变特征及与强震发生可能有关的一些信息〔2〕。

二、观测方法

我们研究的观测方法可适用于在地表浅层各种介质中, 可用于观测水平应力—应变状态及其变化。

1. 观测仪器与原理

根据非电量电测原理设计研究的电阻式地应力观测系统, 主要由接受地下应力应变信息的探头、电阻应变仪(即二次仪表)和记录器等三部分组成, 安装在特制的应力测试坑(井)中。构成探头的传感元件是一种把地壳变形位移量转换成电量变化的装置。采用电阻丝应变片作为敏感元件。为提高电桥灵敏度, 我们选择了能得到最大输出的组桥方案。按此原理研制的电阻式地应力探头经密封防潮措施后, 其传感元件加载、卸载的应力—应变变化线性关系较好, 此方法测量误差为3.5%, 测试系统分辨率达 $0.5\mu\epsilon$, 即相应的可测出0.05微米的微小位移变量。这种探头按要求安装后, 工作性能稳定可靠。目前其平均寿命已超过三年。

2. 数据处理

现以四方位(元件夹角为 45°)电阻式地应力探头为例说明。埋设时, 其中一个元件对准正北方向, 此元件测值为 ϵ_0 。设测到的主应力为 σ_1 、 σ_2 , 主应变为 ϵ_1 、 ϵ_2 , 各元件测量的实际应变分别为 ϵ_0 、 ϵ_{45} 、 ϵ_{90} 和 ϵ_{135} , α 为主压应力(σ_1)方向与元件 ϵ_0 的夹角, τ_{max} 为最大剪应力。根据弹性力学理论可推导出下列计算公式:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{(1+\mu)(\epsilon_{x1} + \epsilon_{x3})}{2} + \frac{(1-\mu)}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_{x1} - \epsilon_{x2})^2 + (\epsilon_{x2} - \epsilon_{x3})^2} \right]$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} \left[\frac{(1+\mu)(\epsilon_{x1} + \epsilon_{x3})}{2} - \frac{(1-\mu)}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_{x1} - \epsilon_{x2})^2 + (\epsilon_{x2} - \epsilon_{x3})^2} \right]$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\epsilon_{x2} - \epsilon_{x1} - \epsilon_{x3}}{\epsilon_{x1} - \epsilon_{x3}}$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)$$

式中 ϵ_{x1} 、 ϵ_{x2} 和 ϵ_{x3} 分别是实测值 ϵ_0 、 ϵ_{45} 和 ϵ_{60} 的半值(因考虑传感器按单点半桥设计), μ 、 E 分别为元件材料的泊松比、弹性模量, 实测计算中 μ 取0.12, E 取折算值1300兆帕。

3. 方法检验及误差

我们在万能精密试验机上, 对电阻式地应力测试系统进行模拟加载实验。结果列于表1中。

由表1可以看出:

(1) 计算的主压应力方向与实际加力方向的偏差最大不超过9度。偏差 ≤ 1.0 度的占校验总数的87%。

(2) 偏差随加力的大小而变化。压力较小时, 误差小; 随着压力的增加, 误差增大。这与传感器线性范围有关。

表1

序号	探头编号	实际加载方向 α (度)	加载荷重 ($P=6$ 公斤)	测量数据($\times 10^{-6}$)			理论计算 方向 α (度)	相对误差 (度)	平均误差 (度)	备注
				$\epsilon_{\alpha 1}$	$\epsilon_{\alpha 2}$	$\epsilon_{\alpha 3}$				
1	DY 813H 023°	0	1P	66	-8	-77	-1.0	-1.0	3.5	
			2P	130	-5	-156	1.6	1.6		
			8P	190	12	-237	4.7	4.7		
			4P	241	50	-317	8.8	8.8		
			ΔP_{cp}	59	12	-79	0.8	0.8		
2	DY 811H 020°	0	1P	128	2	-117	-0.8	-0.8	0.5	
			2P	256	9	-247	0	0		
			8P	406	15	-370	-0.2	-0.2		
			4P	560	11	-504	-0.9	-0.9		
			ΔP_{cp}	140	8	-126	-0.9	-0.9		
3	DY 811H 020°	90	1P	-135	-2	126	89.5	-0.5	0	
			2P	-262	-4	249	89.7	-0.3		
			8P	-376	-5	369	90.1	0.1		
			4P	-428	-5	488	90.5	0.5		
			ΔP_{cp}	-121	-1	122	90.4	0.4		
4	DY 811H 020°	45	1P	-6	161	4	45.9	0.9	.09	
			2P	-15	324	8	45.6	0.6		
			8P	-23	487	12	46.0	1.0		
			4P	-35	647	16	46.0	1.0		
			ΔP_{cp}	-9	162	4	46.1	1.1		
5	DY 813H 023°	135	1P	8	-292	-13	136.0	1.0	0	
			2P	9	-497	-22	135.9	0.9		
			8P	10	-608	-33	136.0	1.0		
			4P	12	-747	-41	136.0	1.0		
			ΔP_{cp}	8	-196	-10	135.9	0.9		
6	DY 811H 009°	135	1P ₁	-4	73	-6	135.4	0.4	0.3	
			2P ₁	-7	145	-10	135.3	0.3		
			3P ₁	-15	212	-16	135.1	0.1		
			ΔP_{cp}	5	71	-5.3	135.1	0.1		

(3) 从测试原理上分析, 用这种方法来求构造应力场的数值及方向是可行的。模拟实验证明, 其精度可以满足要求。当然, 室内单一模拟实验与复杂的实际测量会有一定差别。对此, 目前只有在资料分析时, 采用与其它测量结果对比的办法, 以提高其可信度。

三、观测资料及结果

大邑、泸定、马边等观测台站已有三年以上的连续观测资料，1982年我们又在西昌附近的昔格达(01x)地层中，进行了绝对应力测量实验。对观测资料按前述方法计算，即可求出构造应力场主压应力 σ_1 、主张应力 σ_2 、最大剪切应力 τ_{max} 以及主压应力方向 α_p 等的变化曲线。

1. 泸定台

泸定台位于北西向展布的鲜水河主干断裂南端、北东向龙门山断裂与南北向安宁河断裂的交汇部位，是观测台站中离道孚和甘孜震中最近(分别为160和310公里)的，1980年6月正式投入观测。图1是由泸定台的观测资料求出的构造应力场参数变化曲线。由图1可见：

(1)地震前构造应力场出现了“阶跃”式的积累， σ_1 积累达0.16~0.20兆帕，而 σ_2 积累为-0.05兆帕量级，仅相当于 σ_1 的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{5}$ 。

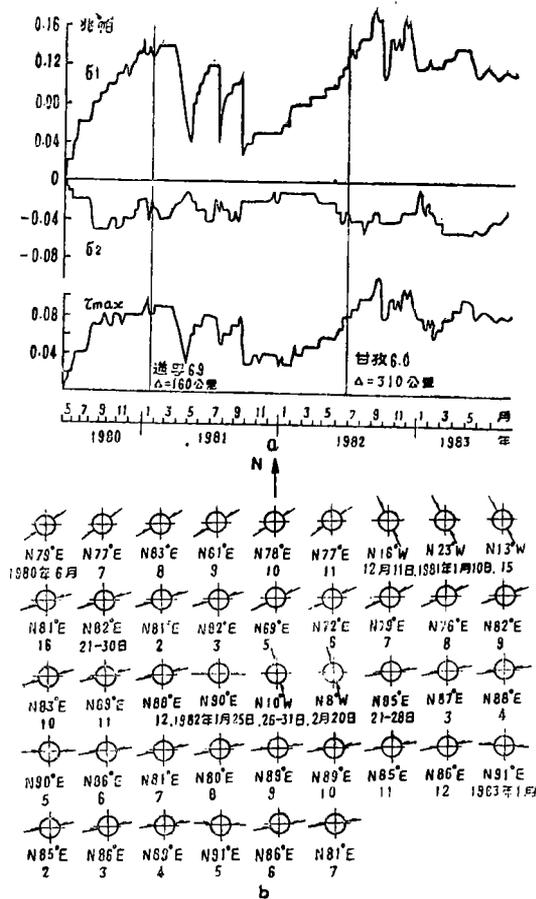


图1 泸定台观测的构造应力场参数变化特征

a. σ_1 、 σ_2 、 τ_{max} 曲线 b. α_p 变化图

Fig. 1 Characteristics of change of tectonic stress field observed in Luding station.

磁、测震、地应力等多手段地震前兆观测实验。所得资料证明，这是一个观测地震前兆的“敏感点”。该台的地应力—应变观测从1980年5月开始。观测期间测点附近发生有道孚6.9级 ($\Delta = 220\text{km}$)，汶川、茂汶4.7级 ($\Delta = 120\text{km}$)和甘孜6.0级地震 ($\Delta = 360\text{km}$)。图2为由大邑台观测资料求出的构造应力场参数变化曲线。由图可见：

(1) 大邑台观测到的构造应力场主压应力方向一般为 $N45^\circ W$ 。1981年初道孚地震后近四个月，逐渐转为 $N40^\circ \sim 50^\circ E$ 。在观测期间未发现震前突然转折现象。

(2) 三次地震的发生与构造应力 σ_1 、 σ_2 及 τ_{max} 的变化显著相关 (见图2中A、B、C三段)。每次构造应力场的加强都有中强地震发生。震中距为220公里的道孚地震发生在 σ_1 、 σ_2 、 τ_{max} 积累段的高点过后，而震中距大于300公里的地震则发生在构造应力积累曲线的高点之前。由图1(a)也可以看出，震中距为160公里的道孚地震发生在曲线的高点以后，而震中距为310公里的甘孜地震则发生在应力曲线高点之前。这可能是由于震源在孕育过程中，作为一种力源向观测点扩散、传播需要一定的时间所致。

(3) 构造应力场加强引起的地震，其震级大小主要与张应力 σ_2 和最大剪应力积累的数值有关。在震中距大体相同的条件下， σ_2 、 τ_{max} 的绝对值愈高则发生的地震的震级愈大。

3. 马边台

马边台位于川南一种特殊的活动构造部位上。这一地区1970年前后曾发生过强烈的震群

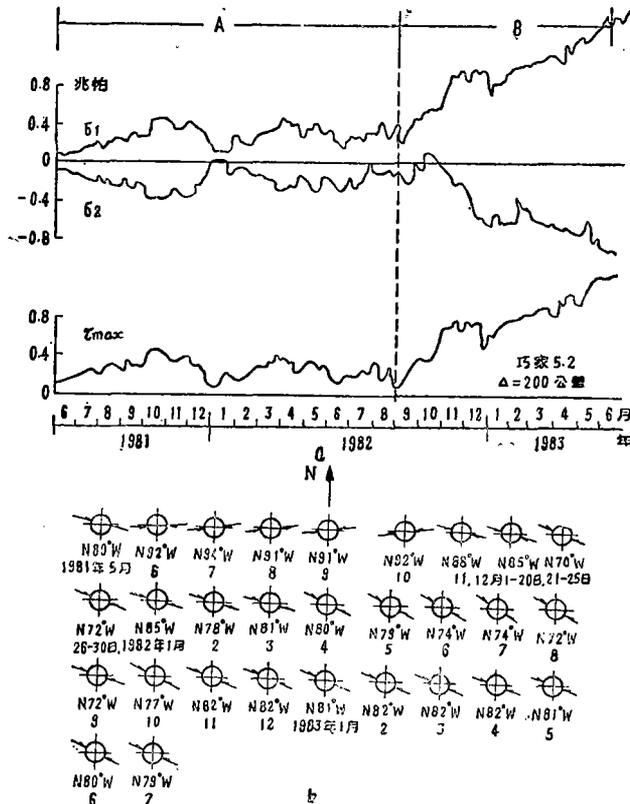


图3 马边台观测的构造应力场参数变化特征
a. σ_1 、 σ_2 、 τ_{max} 曲线 b. α_p 变化图

Fig. 3 Characteristics of change of tectonic stress field observed in Mabian station.

活动,近年来比较平静。该台于1981年5月正式投入观测。图3a为由马边台观测资料求出的 σ_1 、 σ_2 、 τ_{max} 变化曲线,图3b为主压应力方向变化图。由图3可见:

(1)从1981年6月到1982年8月,应力积累并不明显。从1982年9月开始出现了应力场加强。据此我们曾试报了川西南1983年6月以后的强震活动²⁾。显然,1983年6月4日巧家5.2级地震以及后来的莫边府7级大震等,都是这一地区构造应力加强的结果。

(2)马边台观测到的这一地区构造应力场主压应力方向大致为北 70° — 80° 西,在观测时间内其方向虽不断变化,但未见有明显的转折现象。

4. 西昌地应力绝对值测量

解除试验场地选择在沿则木河断裂分布较广的第四系昔格达地层内。解除点距川滇公路数百米,至邛海边300米左右。解除结果表明:此区构造应力场主压应力方向为北 50° — 58° 西,构造应力值大体在1兆帕量级。其计算结果列于表2。

西昌电阻地应力解除实验结果

表2

序号	孔位 计算量	1位			2位			8位		
		1孔	2孔	3孔	1孔	2孔	3孔	1孔	2孔	3孔
1	σ_1 (兆帕)	1.0	3.2	-0.16	1.3	1.8	1.4	1.4	1.3	3.4
2	σ_2 (兆帕)	-0.16	-0.27	-0.60	-0.70	-0.12	-0.19	-0.10	-0.70	-0.28
3	τ_{max} (兆帕)	0.6	3.0	0.22	1.0	1.0	0.8	0.8	1.0	1.90
4	α_p (度)	43	27	76	-9	53	62	58	69	-11
5	α_p 孔位平均 (度)	50			53			58		

四、结论及讨论

综合前人的工作^[3,4,5],根据我们的观测结果,可得出如下的结论:

1.川西现代构造应力场有明显的时、空变化特征。现将已测得的应力场参数变化范围列于表3。

构造应力场参数变化表

表3

序号	观测台站	观测深度 (米)	观测时段	应力值变化范围 (兆帕)			α_p 变化范围 (度)	备注
				σ_1	σ_2	τ_{max}		
1	泸定台	3.5	连续3年	0.04~0.16	-0.01~-0.06	0.02~0.10	正常场 N 70° ~ 90° E 近 $\pi/2$,转折三次	
2	大邑台	6.0	连续3年	0.1~0.8	-0.1~-0.6	0.05~0.50	N 72° ~ 88° W ——N 70° E	
3	马边台	6.5	连续2.5年	0.2~1.6	0~-1.0	0.20~1.2	N 70° ~ 90° W	
4	西昌	8—12	每孔位三天	1.8 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.6 ± 0.2	N 50° ~ 58° W	解除

2) 四川省地震局分析中心六室,一九八三年六月四日巧家5.2级地震分析预报总结。

表中所列水平应力值是在近地表浅层用电阻式地应力观测系统所得资料求出的，基本量级在1兆帕左右，随着观测深度增加则有增大的趋势。由于目前在第四纪沉积层中测得水平应力的资料不多，无法与其它方法对比。图4是我们求得的 α_P 与电感法地应力解除³⁾、地形变观测⁴⁾以及震源机制解等结果⁶⁾的比较。由图4可见，用电阻式地应力观测资料求得的泸定、大邑、马边和西昌地区的主压应力方向与用其它几种方法求出的基本相同。

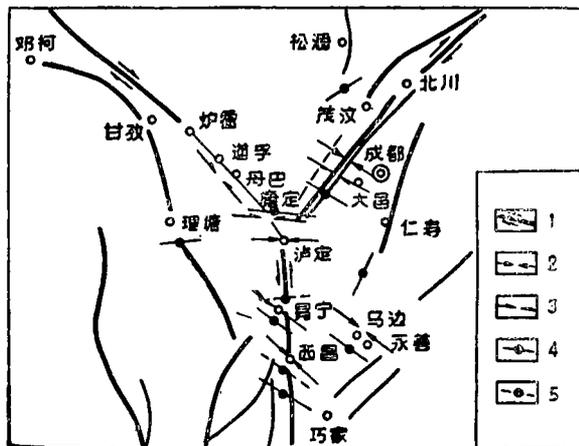


图4 用几种方法求得的川西构造应力场主压应力方向对比图

1. 断裂两盘滑动方向 2. 电阻式地应力求得的正常应力场主压应力方向 3. 电感地应力解除求得的主压应力方向 4. 震源机制解P轴方向 5. 按地形资料求出的主压应力方向

Fig. 4 Directions of principal compressional stress of tectonic stress field in Chuankxi area by a few method.

我们认为地壳中的构造应力场是地球物理场之一，是一种时空变化场。从大的空间域和时间域上讲，它有比较稳定的特征。但从局部看，它又随着时空变化而在不断地变化着。

2. 川西构造应力场的积累、加强与释放、恢复的反复变化是这一地区强震接连发生的直接原因。

现将川西近三年的地震活动与构造应力场的变化过程列于表4。由表4可知，在观测期间，共发生中强以上地震6次，其中除一次（盐源5.2级）地震前，马边台尚处于调试中未获得资料外，其余地震活动都与应力场的变化有关。

3. 1981年1月24日道孚6.9级地震前，距震中最近的泸定台观测资料表明，其构造应力场主压应力方向有近90°的转折。

对强震前构造应力场主压应力方向是否有转折的问题颇有争论^[7,8,9]。在观测中也只发现道孚地震和天全地震前有这种现象。看来，一些强震前，很可能只有那些典型的剪切错动型地震前才会出现构造应力场的主压应力方向发生转折。

4. 1982年6月甘孜地震后，川西构造应力场表现为相对平稳，而川南则显著加强，这是导致目前川西缺震，而滇西、滇东北及元江、红河断裂中强震接连发生的原因。

3) 川西地应力测量，四川地震，№2，1983。

4) 四川省地震局地震测量队，四川西部地壳形变和断层位移活动，1979。

川西构造应力场变化特征与近三年
(1980年7月—1983年6月)川西中强地震活动表

表4

号 序	构造应力场参数变化情况				地震活动情况					距最近电阻 式地应力观测 台的距离 Δ (公里)	备 注
	σ_1	σ_2	τ_{max}	α_p	发震日期	震级 (ML)	震源深度 (公里)	地点	所属断裂 带		
1	泸定, 大邑 积累达半年, 明显加强	泸定、大邑 明显有积累, 大邑有波动	明显积累达 半年多	临震前40天 泸定台出现近 90°转折	1981年 1月24日	6.9	12	道孚	鲜水河	泸定 $\Delta=160$ 大邑 $\Delta=220$ 其余 >300	对照图1 (a)、(b) 及图2 (a)、(b)
2					1981年 5月22日	MS 5.1	12	盐源 宁浪间		马边 $\Delta=300$ 其余 >300	马边台此 试验处于 调试阶段
3	积累6个月, 数值达0.4兆 帕	积累6个月, 数值小于道孚 震前	积累6个月, 数值低于道孚 震前	未见转折属 正常场方向	1981年 11月7日	MS 4.8		汶川、 茂汶间	龙门山	大邑 $\Delta=120$ 泸定 $\Delta=230$ 其余 >300	对照图2 (a)B段 及图2 (b)
4	积累在甘孜 地震进程之中	积累在甘孜 地震震前异常 之中	与甘孜地震 异常叠加在 一起	震前出现近 90°转折(泸定 台)维持45天	1982年 8月2日	MS 4.6		天全 北西	龙门山	泸定 $\Delta=50$ 大邑 $\Delta=100$ 其余 >300	对照图1 (a)、(b)
5	积累8个 月, 数值达到 0.8兆帕	积累8个月 达0.5兆帕左 右	积累8个 月, 数值达0.6 兆帕	未见转折现 象, 震后缓慢 变化	1982年 6月16日	6.0	17 \pm 5	甘孜	鲜水河	泸定 $\Delta=310$ 大邑 $\Delta=360$ 其余 >360	对照图1、 图2中的 异常阶段 划分
6	1982年9月 开始马边台显 著加强, 达正 常值的3倍	1982年9月 积累速率显著 增加、为正常 值的3—4倍	1982年9月 开始出现异 常, 数值达1.2 —1.6兆帕	未见有转折 等特征	1983年 6月4日	5.2		川浪边 界巧家	小江	马边 $\Delta=210$ 其余 >300	比较图8 (a)中的 A(正常) B(异常) 段

参加本文研究工作的还有袁兴志、曹毓娟、王强、李佑芬、张碧群、张叔麟等同志、
参加西昌解除实验的还有西昌地震中心站许崇熔等同志, 一并致谢。

(本文1985年4月22日收到)

参 考 文 献

- [1] 陈颢, 与地震有关的岩石力学进展, 地震科学进展, 1981.
- [2] 周存忠、高福晖, 道孚6.9级地震与泸定台电阻应变仪的变化, 地震研究, Vol. 5, No. 3, 1983.
- [3] 郭增建等, 从水平力和垂直力的相互作用讨论我国境内地震的孕育和发生, 地球物理学报, Vol. 17, No. 3, 1977.
- [4] 阙荣举等, 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动的探讨, 地球物理学报, Vol. 17, No. 2, 1977.
- [5] 陈宗基, 关于中国板块动力学及其在国民经济中的一些应用, 大自然探索, 1982.
- [6] 国家地震局西南烈度队, 西南地区地震地质及烈度区划探讨, 地震出版社, 1977.
- [7] B. T. Brady, Theory of earthquake, II, Inclusion theory of crustal earthquake, Pure. and Appl. Geophys., Vol. 113, 1975.
- [8] 许忠淮等, 京、津、唐、张地区地震应力场的方向特征, 地震学报, Vol. 1, No. 2, 1979.

[9] 成尔林等, 1976年四川省松潘—平武7.2级地震前后主压应力轴的方向特征, 地震学报, Vol. 4, №2, 1982.

THE SEISMICITY AND CHARACTERISTICS OF STRUCTURE STRESS FIELD IN WESTERN SICHUAN, CHINA

Zhou Cunzhong

(*Seismological Bureau of Sichuan Province*)

Gao Fuhui

(*Chengdu Branch, Academia Sinica*)

Abstract

The investigation for the change of structure stressfield of the crust is one of the important approaches to earthquake prediction. The data analysis on the enlarged tests of a stress—strain observation system of resistance type has shown that in western Sichuan the change in this structure stress field always takes place with time and space.

The repeated alteration of the following factors are the immediate reason why the strong earthquakes prepare and occur one by one in this area. They are: accumulation intensification, release and reversion. Luding seismic station had found that before Daofu earthquake of $M=6.9$ on January 24th, 1981, the direction of the compressive principal stress in the structure stress field had a deflection, near to 90° which lasted 36 days. Stress direction returned to normal 9 days before the earthquake. It has been observed that in western Sichuan, the structure stress field has been in a relatively steady state since Ganzi earthquake of $M=6.0$ on June 16th, 1982 but in the south it is in an increasing activity, As a result, this new kind of property leads the west of Sichuan to a calm part, but as for the western and northeastern parts of Yunnan and fracture zones in Yuanjiang and Honghe are more active and were once hit by strong and moderate earthquakes from 1982 to 1983.