

甘肃附加应力场预测地震研究*

李步云

(中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 根据弹性力学的物理方程导出了由附加主应力比判别附加应变状态的关系式, 分析了附加应力场与断层活动的关系. 通过对甘肃省1983~1995年主要电感应力台站附加主应力比的计算, 研究了附加主应力比与观测期间发生中强地震的关系, 进一步探讨了发震机制, 并取得了一些有意义的研究结果.

主题词 地震预报 应力场 甘肃 附加主应力比

中国图书分类号 P315; P315.1

0 引言

甘肃省电感应力台站分布在南北地震带的北端, 其中刘家峡、静宁台位于祁连山褶皱带的东端, 天水、武山台位于西秦岭北缘断裂带, 而武山、文县台则位于松潘-甘孜褶皱系的北部(图1). 各台站地理位置、台基岩性见表1. 由于台站监测区位于青藏高原与阿拉善地块和鄂尔斯地块交汇的部位, 在印度板块向北漂移并与欧亚板块相撞的作用下, 使得该区断裂活动强烈, 地震比较活跃, 从而成为比较理想的研究场所.

1 由附加主应力比确定附加应变状态

一般来说, 电感应力台站建在坚硬的基岩上. 设该基岩为线弹性体, 那么微元体将受到空间应力场的作用. 由弹性力学的物理方程易知:

表1 甘肃省电感应力台站基本情况

序号	站名	台区号	钻孔号	东经	北纬	高程(m)	孔深(m)	台基岩性	仪器型号
1	文县	35002	CK811	104°41′	32°57′	900	41.92	板岩	4103
2	武都	35008	CK801	104°49′	33°26′	1 100	75.95	灰岩	4103
3	天水	35015	CK811	105°55′	34°34′	1 100	72.98	片岩	4103
4	武山	35017	CK821	105°03′	34°39′	1 950	53.35	花岗岩	4103
5	静宁	35024	CK811	105°45′	35°31′	1 680	57.04	沉积岩	4103
6	刘家峡	35028	CK812	103°19′	35°48′	1 630	57.20	变质岩	4103

收稿日期: 1998-03-26

* 中国地震局兰州地震研究所青年地震科学基金资助课题

作者简介: 李步云, 男, 1968年8月生, 助理研究员, 主要从事地球动力学及地震地质研究工作.

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\Delta \sigma_1 - \nu (\Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3)] \\ \Delta \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\Delta \sigma_2 - \nu (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_3)] \\ \Delta \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\Delta \sigma_3 - \nu (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2)] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $\Delta \varepsilon_1, \Delta \varepsilon_2, \Delta \varepsilon_3$ 为附加主应变, E 为弹性模量, $\Delta \sigma_1, \Delta \sigma_2, \Delta \sigma_3$ 为附加主应力, ν 为泊松比.

在平面应力状态下, 即 $\Delta \sigma_3 = 0$ 的情况下,

$$\left. \begin{aligned} \Delta \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} (\Delta \sigma_1 - \nu \Delta \sigma_2) \\ \Delta \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} (\Delta \sigma_2 - \nu \Delta \sigma_1) \\ \Delta \varepsilon_3 &= -\frac{\nu}{E} (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

设拉应力为正, 压应力为负 ($\Delta \sigma_1 > \Delta \sigma_2 > \Delta \sigma_3$), 拉伸应变为正, 压缩应变为负. 由于在计算过程中未发现 $\Delta \sigma_1 = 0$ 的情况, 故设 $k_\sigma = \frac{\Delta \sigma_2}{\Delta \sigma_1}$, 称 k_σ 为附加主应力比. 下面将按照 $\Delta \sigma_1 > 0$ 和 $\Delta \sigma_1 < 0$ 两种情况讨论.

(1) 当 $\Delta \sigma_1 > 0$ 时, 对(2)式解不等式得

$$\left. \begin{aligned} \text{如果 } \Delta \varepsilon_1 \geq 0, \text{ 则 } k_\sigma \leq \frac{1}{\nu} \\ \text{如果 } \Delta \varepsilon_1 \leq 0, \text{ 则 } k_\sigma \geq \frac{1}{\nu} \\ \text{如果 } \Delta \varepsilon_2 \geq 0, \text{ 则 } k_\sigma \geq \nu \\ \text{如果 } \Delta \varepsilon_2 \leq 0, \text{ 则 } k_\sigma \leq \nu \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

利用 k_σ 可将(3)式分为两种情况

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } \frac{1}{\nu} \geq k_\sigma \geq \nu \text{ 时, } \Delta \varepsilon_1 \geq 0, \Delta \varepsilon_2 \geq 0 \\ \text{当 } k_\sigma \leq \nu \text{ 时, } \Delta \varepsilon_1 \geq 0, \Delta \varepsilon_2 \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由于 $\Delta \sigma_1 > \Delta \sigma_2$, 故不会出现 $k_\sigma > \frac{1}{\nu}$ 的情况.

(2) 当 $\Delta \sigma_1 < 0$ 时, 对(2)式分别解 $\Delta \varepsilon_1 \geq 0, \Delta \varepsilon_1 \leq 0, \Delta \varepsilon_2 \geq 0, \Delta \varepsilon_2 \leq 0$ 情况下的不等式, 并利用 k_σ 可将其分为以下两种情况

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } k_\sigma \geq \frac{1}{\nu} \text{ 时, } \Delta \varepsilon_1 \geq 0, \Delta \varepsilon_2 \leq 0 \\ \text{当 } \frac{1}{\nu} \geq k_\sigma \geq \nu \text{ 时, } \Delta \varepsilon_1 \leq 0, \Delta \varepsilon_2 \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在这种条件下不会出现 $k_\sigma < \nu$ 的情况.

$\Delta \sigma_{1,2}$ 和附加主应力 $\Delta \sigma_1$ 的方位角 $\Delta \theta$ 可利用下式求解:

$$\Delta \sigma_{1,2} = -\frac{3}{4} \{ (S_1 + S_3) \mp \sqrt{\frac{1}{2} [(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2]} \} \quad (6)$$

$$\Delta\theta = \begin{cases} \theta_0 + \frac{1}{2}\arctan[(S_1 + S_3 - 2S_2)/(S_1 - S_3)] & S_1 - S_3 < 0 \\ \theta_0 - 90^\circ + \frac{1}{2}\arctan[(S_1 + S_3 - 2S_2)/(S_1 - S_3)] & S_1 - S_3 > 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中 $S_i = (l_i - L_i)/k_i (i = 1, 2, 3)$, l_i 为 3 个元件观测的电感值, L_i 为电感元件的基值, k_i 为电感元件的灵敏度, S_i 为折算位移, θ_0 为 1 号元件与 SN 向的夹角.

2 附加应力场对不同类型断层活动的影响

自然界中的断层主要有 3 种类型,即正断层、逆断层和走滑断层.其后期活动主要受构造应力场的控制,而构造应力场是由基本构造应力场和附加构造应力场叠加而成的.在相对较短的地质时期内,基本构造应力场是相对稳定的,因此构造应力场的变化主要体现在附加应力场的变化上^[1].这说明,断层在形成以后,仍然受到不断变化的附加应力场的作用,进一步影响到断层面上正应力 σ_n 和剪应力 τ_n 的变化,从而影响断层的活动,也就是说,附加应力场对断层的后期活动起主要作用.

下面我们利用 Sibson(1993)根据库伦-纳维尔准则提出的载荷强化和弱化的概念^[2],在不考虑空隙压的情况下,研究断层类型、载荷强化和弱化区域与应力场状态的摩尔圆关系(图 2).设主应力为 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$,压应力为正.由图 2 可看出附加应力场状态对摩尔圆移动的影响.

对于正断层(N),垂直主应力 σ_v 相当于 σ_1 ,在水平面内,其活动主要受 σ_3 的影响.当附加应力场在 σ_3 方向产生的附加应力 $\Delta\sigma_3 > 0$ 时,附加了一个压应力,载荷强化($\frac{\partial\sigma_n}{\partial\tau_n} > 0$)^[2],摩尔圆右移,正断层活动减弱,反之,则

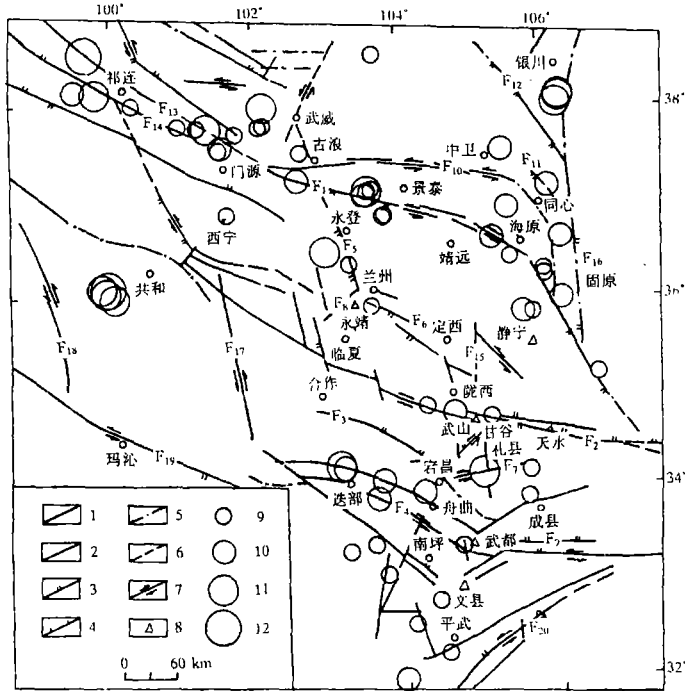


图 1 甘肃省电感应应力台站监测区地震地质图 (1983~1995)

Fig. 1 Seismogeological map of the regions around ground stress monitoring stations in Gansu Province (1983~1995).

- 1 现代主要活动断裂; 2 现代一般活动断裂; 3 逆断层及倾角;
- 4 正断层及倾角; 5 隐伏及推测活断层; 6 卫星照片解译断层;
- 7 走滑断层及错动方向; 8 观测台站; 9 $M_L < 3.9$;
- 10 $3.9 \leq M_L < 4.9$; 11 $4.9 \leq M_L < 6.0$; 12 $M_L \geq 6.0$;
- F₁ 毛毛山-海原活动断裂带; F₂ 西秦岭北缘断裂带; F₃ 临潭-宕昌断裂带;
- F₄ 迭部-舟曲断裂带; F₅ 庄浪河断裂带; F₆ 马衔山-兴隆山断裂带;
- F₇ 礼县-罗家堡断裂带; F₈ 盐锅峡-关家川断层; F₉ 武都-康县断层;
- F₁₀ 香山-天景山断裂带; F₁₁ 烟筒山断裂带;
- F₁₂ 营盘山-牛首山北西向断裂带; F₁₃ 肃南-冷龙岭断裂带;
- F₁₄ 陶勒山断裂带; F₁₅ 通渭-武都南北向断裂带;
- F₁₆ 鄂尔多斯西缘南北向断裂带; F₁₇ 贵德-河南南北向断裂带;
- F₁₈ 乌兰-温泉南北向断裂带; F₁₉ 花石峡-玛曲北西向断裂带;
- F₂₀ 龙门山北东向断裂带

增强.

对于逆断层(R),垂直主应力 σ_v 相当于 σ_3 ,在水平面内,其活动主要受 σ_1 的影响.当附加应力场在 σ_1 方向产生的附加应力 $\Delta\sigma_1 > 0$ 时,附加了一个挤压应力,使得载荷强化($\frac{\partial\sigma_n}{\partial\tau_n} > 0$),摩尔圆右移,逆冲作用增强,逆断层活动加强,反之,则减弱.

对于走滑断层(S),垂直主应力 σ_v 相当于 σ_2 ,断裂活动主要受 σ_1 和 σ_3 的影响.设附加应力场在 σ_1 和 σ_3 两方向上产生的附加应力为 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_3$.当 $\Delta\sigma_1 < 0$ 和 $\Delta\sigma_3 < 0$ 时,附加了两个引张应力,载荷弱化, σ_1 和 σ_3 均左移,正走滑断层的活动增强;当 $\Delta\sigma_1 > 0$ 和 $\Delta\sigma_3 > 0$ 时,附加了两个挤压应力,载荷强化, σ_1 和 σ_3 均右移,摩尔圆右移,逆走滑断层的活动增强;当 $\Delta\sigma_1 < 0$ 和 $\Delta\sigma_3 > 0$ 时,对走滑断层的活动均有所减弱.当 $\Delta\sigma_1 > 0$ 和 $\Delta\sigma_3 < 0$ 时,对走滑断层的活动影响最大,最有利于走滑断层的活动,因为这种情况对摩尔圆半径的影响最大^[1].

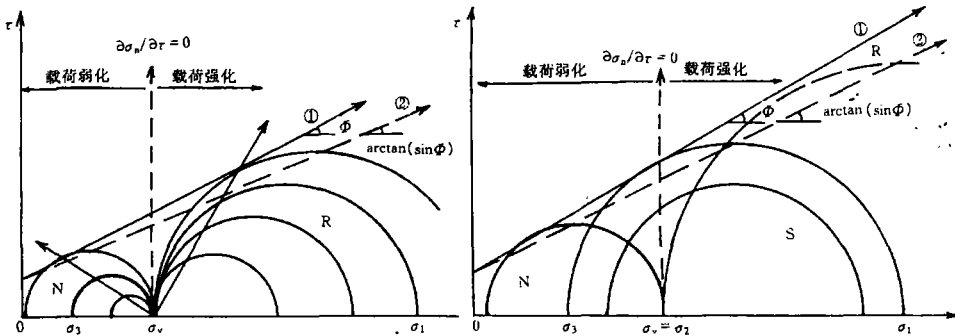


图2 附加应力场对不同断层的影响

Fig.2 Influence of additional stress field on different faults.

N 正断层; R 逆断层; S 走滑断层; ① $|\tau| = C + \sigma_n \tan\varphi$; ② $|\tau| = C \cos\varphi + \sigma_n \sin\varphi$

对于走滑断层,笔者利用(6)和(7)式计算得到附加应力场的 $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$ 和 $\Delta\theta$, 结合下式(设 $\Delta\sigma_1$ 与 σ_1 之间的夹角为 θ (图3))

$$\left. \begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2}{2} + \frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2}{2} \cos 2\theta \\ \Delta\sigma_3 &= \frac{\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2}{2} - \frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2}{2} \cos 2\theta \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

就很容易计算出 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_3$.

根据 $\Delta\sigma_1$ 和 $\Delta\sigma_3$ 的状态可以定性地探讨断层的活动.

另外,需说明的一点是:由于断层间往往具有断层泥,更易使得断层弱化,从而促进了断层的活动.对于这样的断层面,Hobbs(1990)提出了相应的准则 $|\tau| = C \cos\varphi + \sigma_n \sin\varphi$, 其中 C 为粘结强度, φ 为内摩擦角, τ 为抗剪应力, σ_n 为正应力.由此可见,摩尔圆的移动易对断层的活动产生影响.

3 甘肃省中强地震前兆的附加应力场分析

本文处理了除武都电应力台站以外的5个台站的资料,结合深大断裂控制构造块体的概念,绘出了附加主应力比与甘肃省东部及南部中强地震($M_S \geq 4.7$)的关系图(图4).其中只有文县台的曲线是 σ_1/σ_2 随时间变化曲线,其余各台的曲线均为 σ_2/σ_1 随时间变化曲线.

下面我们以刘家峡应力台为例说明附加应力场在分析地震前兆中的应用.

1990 年 10 月 20 日甘肃景泰地区发生了 $M_S6.2$ 地震, 其发震断裂为海原-景泰断裂带, 此断裂带为走滑-逆冲断裂带. 该区的水平主压应力方向平均为 $N65^\circ E$ ^①, 地震发生时附加应力 $\Delta\sigma_1$ 的方位角为 $N64^\circ E$, 这与该区的主应力方向一致. 此时 $\Delta\sigma_1 < 0, \Delta\sigma_2 < 0$, 由应力场的叠加易知, 走滑断层附近附加应力 $\Delta\sigma'_1 > 0, \Delta\sigma'_3 > 0$, 附加了两个挤压应力, 载荷强化, 有利于增强逆走滑断层的活动. 这说明, 本次地震是海原-景泰断裂带活动增强引起的. 由于附加了一个挤压应力场, 故易于积累能量, 震级偏大.

1995 年 7 月 22 日甘肃永登发生了 $M_S5.8$ 地震, 其发震断裂可能是庄浪河断层、大通河断层和窑街-周家台断裂^[3]. 它们具有右旋走滑兼逆冲的运动特征. 其构造应力场主压应力方向大致为 $N60^\circ E$ ^[3], 发震时附加应力场的主方位角为 $N74^\circ E$. 此

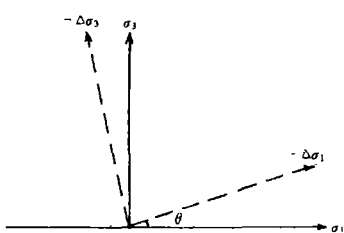


图 3 走滑断层附加应力场与基本应力场在坐标轴上的叠加关系

Fig. 3 The relation between additional stress field and basic stress field for strike-slip fault.

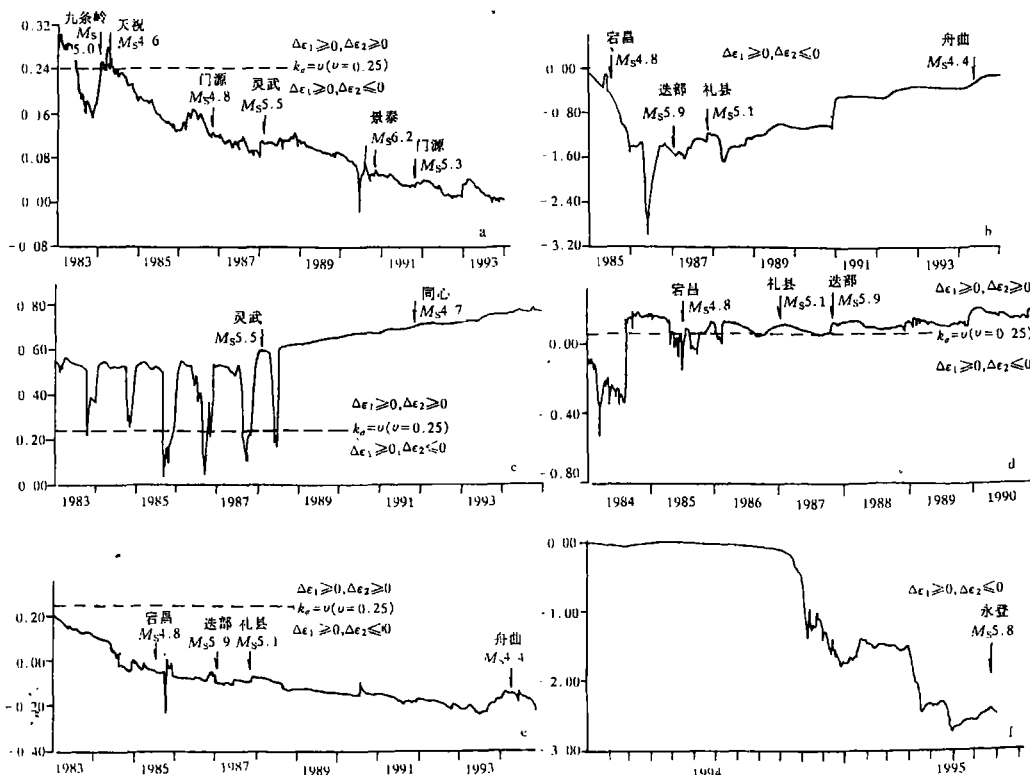


图 4 甘肃省电感应应力台站附加主应力比随时间变化曲线

Fig. 4 Variation curves of additional principal stress ratio with time for ground stress stations in Gansu Province.

a, f 刘家峡台; b 文县台; c 静宁台; d 武山台; e 天水台

时, $\Delta\sigma_1 > 0, \Delta\sigma_2 < 0$, 在 σ_1 和 σ_3 方向上的附加应力状态为 $\Delta\sigma'_1 < 0, \Delta\sigma'_3 > 0$. 这种附加应力状态对走滑断层的活动影响最大, 因而在 3 条断裂的迭加、复合部位发生失稳而产生地震. 对

① 李步云, 刘洪春, 张向红. 甘宁交界地区弧形断裂失稳理论的模拟研究. 第三届全国青年地震工作者优秀科技论文, 1995.

于其它中强地震的分析限于篇幅在此就不一一列举。

综上所述,甘肃省东部和南部地区中强地震具以下前兆特征:

(1) 附加主应力比的变化反映了附加应力场—应变场的变化(图4)。

(2) 在测点附近深大断裂带以外发生的中强地震与附加主应力比变化的对应关系不明显,这可能与深大断裂带的弱化作用有关(如共和 $M_S6.9$ 地震前刘家峡应力台附加主应力比变化不明显)。

(3) 中强地震前附加应力状态或附加应变状态(即拉、压状态)具有交替变化的特点(如1987年1月迭部 $M_S5.9$ 和1987年10月礼县 $M_S5.1$ 地震)(表2和图4)。

表2 甘肃省东部和南部地区中强地震前附加应力应变状态(1983-01~1995-07)

台站名	地震(M_S)	附加应力	附加应变	附加主应力比 k_σ	
	舟曲 4.9				
天水	礼县 5.1	$\Delta\sigma_1 > 0, \Delta\sigma_2 < 0$	$\Delta\epsilon_1 \geq 0, \Delta\epsilon_2 \leq 0$	$k_\sigma < 0$	
	迭部 5.9				
	宕昌 4.8				
静宁	灵武 5.5	$\Delta\sigma_1 > 0, \Delta\sigma_2 > 0$	$\Delta\epsilon_1 \geq 0, \Delta\epsilon_2 \geq 0$	$k_\sigma > 0$	
	同心 4.7				
武山	宕昌 4.8	$\Delta\sigma_1 > 0, \Delta\sigma_2 < 0$	$\Delta\epsilon_1 \geq 0, \Delta\epsilon_2 \geq 0$	$k_\sigma < 0$	
	迭部 5.9				
	礼县 5.1				
	迭部 5.9				
文县	礼县 5.1	$\Delta\sigma_1 > 0, \Delta\sigma_2 < 0$	$\Delta\epsilon_1 \geq 0, \Delta\epsilon_2 \leq 0$	$k_\sigma < 0$	
	舟曲 4.4				
刘家峡	九条岭 5.0	$\Delta\sigma_1 > 0, \Delta\sigma_2 > 0$	$\Delta\epsilon_1 \geq 0, \Delta\epsilon_2 \geq 0$	$k_\sigma > 0$	
	天祝 4.6				
	门源 4.8				
	景泰 6.2				$\Delta\epsilon_1 \geq 0, \Delta\epsilon_2 \leq 0$
	门源 5.3				
	永登 5.8				

(4) 中强地震大多发生在 $\Delta\epsilon_1 \geq 0$ 和 $\Delta\epsilon_2 \leq 0$ 的附加应变状态下,而在 $\Delta\epsilon_1 \geq 0$ 和 $\Delta\epsilon_2 \geq 0$ 的附加应变状态下发生的地震的震级相对较小。

4 结论

通过对甘肃东部和南部地区附加主应力比与地震关系的分析,得出以下初步结果:

(1) 在 $\Delta\epsilon_1 \geq 0, \Delta\epsilon_2 \geq 0$ 的附加应变状态下,由于附加应变场处于引张状态,在地壳中不易积累应变能,但有利于走滑断层或正断层的活动,一般易于在其枢纽部位发生小于6.0级的地震。

(2) 在 $\Delta\epsilon_1 \geq 0, \Delta\epsilon_2 \leq 0$ 的附加应变状态下,由于一个方向拉伸,另一个方向压缩,地壳中较易积累应变能,有利于走滑断层活动。若为逆走滑断层,则发生的地震震级偏大;若为正走滑断层,则其震级偏小。一般易于发生6.0级左右的中强地震。

(3) 在 $\Delta\epsilon_1 \leq 0, \Delta\epsilon_2 \leq 0$ 的附加应变状态下,由于附加应变场处于挤压状态,在地壳中最

易积累应变能,若引起逆断层或走滑断层活动,则发生的地震多为强震。

目前,该方法还处于探索阶段,许多地方不够成熟,在以后的研究工作中将不断加以补充和完善。

本文在完成过程中,得到苗天德教授的热情指导和张杰老师的大力帮助,张国英提供了部分观测资料.在此表示诚挚的谢意。

参考文献

- 1 李步云,杜学彬,陈志泰.青海祁连克克里 5.1 级地震的主应变比分析.地震,1996,16(4):409~416.
- 2 Sibson R H. Load-strengthening versus Load-weakening Faulting. Journal of structural Geology, 1993, 15(2):123~128.
- 3 邢成起,荣代潞,等.1995年7月22日永登 5.8 级地震发震构造和发震机制分析.西北地震学报,1996,18(3):6~7.

PREDICTING EARTHQUAKES BASED ON THE CHANGE OF THE ADDITIONAL STRESS FIELD IN GANSU

Li Buyun

(Lanzhou Institute Seismology, CSB, Lanzhou 730000)

Abstract

The relationship of inferring the state of additional strain by additional principal stress ratio was derived from physical formula of elastodynamics and the relation between additional stress field and fault activities was analyzed. Based on the calculation results of additional principal stress ratio for the ground stress stations in Gansu Province from 1983 to 1995, the correlation of additional principal stress ratio with moderate earthquakes was studied, the seismogenic mechanisms were further discussed and some preliminary results were got.

Key words Earthquake prediction, Stress field, Gansu, Additional principal stress ratio