

由多个地震震源机制解求川滇地区平均应力场方向^{*}

钟继茂^{1),*} 程万正²⁾

1) 中国福州 350003 福建省地震局

2) 中国成都 610041 四川省地震局

摘要 基于震源断层面解的空间取向和断层滑动方向, 写出相应力轴张量在地理坐标系中的表达式, 进而给出计算平均力轴张量及主值的方法, 即通过求解相应的本征方程得到. 对使用多个震源机制解的 T , B , P 轴参数计算平均应力场的方法, 以用滑动方向拟合法反演富蕴、唐山地区平均应力场数据进行验证, 二者结果一致. 选择具有地震构造意义的地块或地震带内大量地震的震源机制解研究区域平均应力场. 根据川滇 13 个地震带(区)的 256 次中强地震的震源机制解, 给出了各带(区)应力张量的定量分析结果. 该方法算法简便, 使由大量地震震源机制解资料分析构造应力场的方法走向量化.

关键词 力轴张量 震源机制 平均应力场 川滇地区

中图分类号: P315.3⁺3

文献标识码: A

引言

根据双力偶点源模型可得到单次地震的震源机制解的 T , B , P 轴方位和两个地震节面参数. 由地震矩张量也可给出“最佳双力偶模型”的震源机制解, 如 Harvard CMT 给出的震源机制解数据(http://www.seismology.harvard.edu/CMT_search.html). 单次地震得出 T , B , P 轴方向只与该地震的释放应力有联系, 而不能当作地下实际作用的构造应力方向(许忠淮, 1985). 或者说, 双力偶点源模型的 T , B , P 轴不等于构造应力场的 3 个主应力轴. 当一个区域或地块, 取得系列单次地震震源机制解后, 如何获得区域应力场的整体特征, 至今仍然是一个重要的研究问题.

若地震是岩层中的新破裂引起, 由岩石力学实验可知, 由破裂面解求得的 P 轴和 T 轴只是反映地震前后震源区应力状态的变化, 它们和构造应力的主轴方向都有一个偏角. 尽管如此, 由于存在两个可能的、共轭的破裂面, 在每一个共轭面发生破裂的概率是相同的, 因而有可能对一个地区许多地震的 P 轴方向作统计平均获得该地区构造应力方向^①.

许忠淮和戈澍漠(1984)以及许忠淮(1985)在国内率先采用滑动方向拟合法, 反演富蕴、唐山等地震区的应力场. Gephart 和 Forsyth (1984)曾提出联合求解应力场的方法, 它的基本假设是在每个断层面的错动方向与应力场作用在该面上的最大剪切应力方向一

* 国家重点基础研究发展计划课题(2004CB418404)和地震科学联合基金(105004)资助.

① 陈运泰, 顾浩鼎. 1990. 震源理论. 中国科学院研究生院教材, 23~24.

2005-07-11 收到初稿, 2006-03-13 决定采用修改稿.

✦ 通讯作者. E-mail: zjm85403@yahoo.com.cn

致. 若一个地区有多个不同的震源机制解, 每一个解给激发断层运动的应力场的应力张量一个限制, 通过若干个解的逼近则可以取得作用在该地区的应力场的联合解. 另外, Ellsworth 和 Xu (1980) 也研究过从震源机制解确定应力张量的方法. 崔效锋和谢富仁 (1999) 将滑动方向拟合法引入应力场分区, 逐次收敛给出西南 5 个区域应力场的研究结果.

滑动方向拟合法是通过拟合计算, 使断层面上的剪切力方向与观测的断层面的滑动方向夹角最小. 本文不采用拟合算法, 而试图由多个震源机制解求得的力轴张量来推断该区域构造应力主轴方向, 这个方法可称为力轴张量算法. 该方法的基本点是, 许多地震的震源机制解近似相同时能给出合理的结果, 同时不必考虑震源机制解两个节面中哪个是实际断层面. 本文计算平均应力场的做法是, 首先对一定区域内多个震源机制解写出每个解的双力偶点源力轴张量在地理坐标系中的表达式, 计算多次地震的平均力轴张量各分量及主值, 即通过求解相应的本征方程得到. 然后根据大量震源机制解计算川滇各构造区应力场.

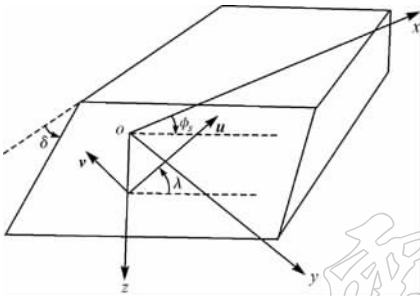


图 1 地理坐标系中震源断层面的空间取向和滑动方向(引自 Aki, Richards, 1980)

正, 顺时针量为负.

断层面的法向单位矢量

$$\mathbf{v} = v_1 \mathbf{e}_x + v_2 \mathbf{e}_y + v_3 \mathbf{e}_z = -\sin\delta \sin\phi_s \mathbf{e}_x + \sin\delta \cos\phi_s \mathbf{e}_y - \cos\delta \mathbf{e}_z \quad (1)$$

滑动方向单位矢量

$$\mathbf{u} = u_1 \mathbf{e}_x + u_2 \mathbf{e}_y + u_3 \mathbf{e}_z = (\cos\lambda \cos\phi_s + \cos\delta \sin\lambda \sin\phi_s) \mathbf{e}_x + (\cos\lambda \sin\phi_s - \cos\delta \sin\lambda \cos\phi_s) \mathbf{e}_y - \sin\delta \sin\lambda \mathbf{e}_z \quad (2)$$

按照双力偶点源模型, 每次地震的 T , B , P 轴方向分别有相互垂直的基矢量 \mathbf{e}_T , \mathbf{e}_B 和 \mathbf{e}_P , 由这 3 个基矢量在地理坐标系中的 9 个方向余弦可构成一个张量, 可称为(双力偶点源模型)力轴张量. 求多次地震的力轴张量的平均张量可得多次地震的平均 T , B , P 轴方向. 当地震是离散分布时, 由此平均 T , B , P 轴方向可推断地震所在区域的构造应力场的主应力轴方向. 为此, 建立与每个震源机制解相应的力轴坐标系, 且 \mathbf{e}_T , \mathbf{e}_B 和 \mathbf{e}_P 分别为沿 T 轴, B 轴和 P 轴的基矢量, 则

$$\mathbf{e}_T = T_1 \mathbf{e}_x + T_2 \mathbf{e}_y + T_3 \mathbf{e}_z = \cos\gamma_T \cos\phi_T \mathbf{e}_x + \sin\gamma_T \cos\phi_T \mathbf{e}_y - \sin\phi_T \mathbf{e}_z \quad (3)$$

$$\mathbf{e}_B = B_1 \mathbf{e}_x + B_2 \mathbf{e}_y + B_3 \mathbf{e}_z = \cos\gamma_B \cos\phi_B \mathbf{e}_x + \sin\gamma_B \cos\phi_B \mathbf{e}_y - \sin\phi_B \mathbf{e}_z \quad (4)$$

$$\mathbf{e}_P = P_1 \mathbf{e}_x + P_2 \mathbf{e}_y + P_3 \mathbf{e}_z = \cos\gamma_P \cos\phi_P \mathbf{e}_x + \sin\gamma_P \cos\phi_P \mathbf{e}_y - \sin\phi_P \mathbf{e}_z \quad (5)$$

在式(3)、(4)、(5)中, γ_T , ϕ_T , γ_B , ϕ_B , γ_P , ϕ_P 分别为震源机制解中 T , B , P 轴的方位角

和仰角. 则每个震源机制解的力轴张量可表示为

$$\mathbf{S} = S_1 \mathbf{e}_T \mathbf{e}_T + S_2 \mathbf{e}_B \mathbf{e}_B + S_3 \mathbf{e}_P \mathbf{e}_P \tag{6}$$

式中, S_1, S_2, S_3 为地震释放应力张量主值; $\mathbf{e}_T \mathbf{e}_T, \mathbf{e}_B \mathbf{e}_B, \mathbf{e}_P \mathbf{e}_P$ 为并矢基. 把式(3)、(4)、(5)代入式(6), 得该力轴张量在地理坐标系中的表达式.

$$\begin{aligned} \mathbf{S} = & (S_1 T_1^2 + S_2 B_1^2 + S_3 P_1^2) \mathbf{e}_x \mathbf{e}_x + (S_1 T_1 T_2 + S_2 B_1 B_2 + S_3 P_1 P_2) \mathbf{e}_x \mathbf{e}_y + \\ & (S_1 T_1 T_3 + S_2 B_1 B_3 + S_3 P_1 P_3) \mathbf{e}_x \mathbf{e}_z + (S_1 T_2 T_1 + S_2 B_2 B_1 + S_3 P_2 P_1) \mathbf{e}_y \mathbf{e}_x + \\ & (S_1 T_2^2 + S_2 B_2^2 + S_3 P_2^2) \mathbf{e}_y \mathbf{e}_y + (S_1 T_2 T_3 + S_2 B_2 B_3 + S_3 P_2 P_3) \mathbf{e}_y \mathbf{e}_z + \\ & (S_1 T_3 T_1 + S_2 B_3 B_1 + S_3 P_3 P_1) \mathbf{e}_z \mathbf{e}_x + (S_1 T_3 T_2 + S_2 B_3 B_2 + S_3 P_3 P_2) \mathbf{e}_z \mathbf{e}_y + \\ & (S_1 T_3^2 + S_2 B_3^2 + S_3 P_3^2) \mathbf{e}_z \mathbf{e}_z = S_{11} \mathbf{e}_x \mathbf{e}_x + S_{12} \mathbf{e}_x \mathbf{e}_y + S_{13} \mathbf{e}_x \mathbf{e}_z + \\ & S_{21} \mathbf{e}_y \mathbf{e}_x + S_{22} \mathbf{e}_y \mathbf{e}_y + S_{23} \mathbf{e}_y \mathbf{e}_z + S_{31} \mathbf{e}_z \mathbf{e}_x + S_{32} \mathbf{e}_z \mathbf{e}_y + S_{33} \mathbf{e}_z \mathbf{e}_z \end{aligned} \tag{7}$$

显然, $S_{12} = S_{21}, S_{13} = S_{31}, S_{23} = S_{32}$. 求多个 \mathbf{S} 的平均张量可推断一个地区构造应力张量的主应力轴方向. 若仅考虑力轴张量的偏张量部分, 对纯双力偶震源机制解有

$$S_1 = -S_3 = S \quad S_2 = 0 \tag{8}$$

在地理坐标系中该张量各分量为

$$\begin{cases} S_{11} = S(T_1^2 - P_1^2) \\ S_{22} = S(T_2^2 - P_2^2) \\ S_{33} = S(T_3^2 - P_3^2) \\ S_{12} = S_{21} = S(T_1 T_2 - P_1 P_2) \\ S_{13} = S_{31} = S(T_1 T_3 - P_1 P_3) \\ S_{23} = S_{32} = S(T_2 T_3 - P_2 P_3) \end{cases} \tag{9}$$

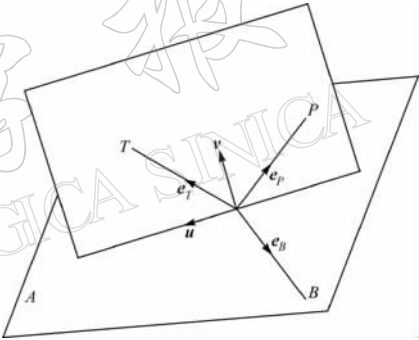


图2 力轴坐标系的基矢量与节面A的法向、滑动方向的关系

若震源机制解以节面取向和滑动方向的形式给出, 如 Harvard CMT 给出的震源机制解的参数格式, 则可以任选其中一个节面的参数来计算. 其相应的力轴坐标系基矢量为

$$\mathbf{e}_B = \mathbf{v} \times \mathbf{u} = B_1 \mathbf{e}_x + B_2 \mathbf{e}_y + B_3 \mathbf{e}_z \tag{10}$$

$$\mathbf{e}_T = \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{v} + \mathbf{u}) = T_1 \mathbf{e}_x + T_2 \mathbf{e}_y + T_3 \mathbf{e}_z \tag{11}$$

$$\mathbf{e}_P = \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{v} - \mathbf{u}) = P_1 \mathbf{e}_x + P_2 \mathbf{e}_y + P_3 \mathbf{e}_z \tag{12}$$

式(10)、(11)、(12)中节面法向单位矢量 \mathbf{v} 和滑动方向单位矢量 \mathbf{u} 见图2所示, 表达式见式(1)和式(2).

2 平均 T, B, P 轴的计算

在地理坐标系中求平均力轴张量 σ , 即所有力轴张量各分量的代数平均值.

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{ij}^{(k)} \quad (i, j = 1, 2, 3) \tag{13}$$

式中, $k = 1, 2, \dots, N$. N 为震源机制解总数, $S_{ij}^{(k)}$ 由式(7) 确定. σ_{ij} 为平均力轴张量 σ 的 9 个分量, 实际只含 6 个独立分量. 其主值和主轴方向可通过该张量的本征值分别求出. 例如可求解

$$\sigma^3 - G_1\sigma^2 + G_2\sigma - G_3 = 0 \tag{14}$$

式中

$$\begin{aligned} G_1 &= \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \\ G_2 &= \begin{vmatrix} \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{13} \\ \sigma_{13} & \sigma_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{vmatrix} \\ G_3 &= \begin{vmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{vmatrix} \end{aligned}$$

按经典 3 次方程根的解法, 可直接应用卡尔丹方程求根公式写出(数学手册编写组, 2002).

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{G_1}{3} + 2^{\frac{1}{3}}\sqrt{r}\cos\theta \\ \sigma_2 = \frac{G_1}{3} + 2^{\frac{1}{3}}\sqrt{r}\cos(\theta + 120^\circ) \\ \sigma_3 = \frac{G_1}{3} + 2^{\frac{1}{3}}\sqrt{r}\cos(\theta + 240^\circ) \end{cases} \tag{15}$$

式中

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\left(-\frac{p}{3}\right)^3} & \theta &= \frac{1}{3}\arccos\left(-\frac{q}{2r}\right) \\ p &= G_2 - \frac{1}{3}G_1^2 & q &= \frac{G_1G_2}{3} - \frac{2}{27}G_1^3 - G_3 \end{aligned}$$

为求出 3 个主轴方向, 将 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 代入矩阵方程

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} = \sigma_i \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{pmatrix} \quad (i = 1, 2, 3) \tag{16}$$

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为主轴的 3 个方向余弦.

$$\beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2 = 1 \tag{17}$$

由式(16)可以求解出 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 的比值 $k_1 = \beta_1/\beta_3, k_2 = \beta_2/\beta_3$, 然后由式(17)可求得

$$\beta_3 = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + k_1^2 + k_2^2}} \tag{18}$$

取上半球投影, 有

$$\beta_1 = -\frac{k_1}{\sqrt{1 + k_1^2 + k_2^2}} \quad \beta_2 = -\frac{k_2}{\sqrt{1 + k_1^2 + k_2^2}} \quad \beta_3 = -\frac{1}{\sqrt{1 + k_1^2 + k_2^2}} \tag{19}$$

由主应力轴的方向余弦就可进一步算出各轴的方位角和仰角.

若对所有满足式(9)的力轴张量求平均, 所得平均力轴张量的 G_1 为

$$G_1 = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{11}^{(k)} + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{22}^{(k)} + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{33}^{(k)} =$$
$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (S_{11} + S_{22} + S_{33})^{(k)} = 0$$

说明该平均力轴张量也是偏应力张量，式(14)和式(15)可进一步简化.

3 应用分析

3.1 算例

以 1931 年新疆富蕴地震断层测量数据(许忠淮, 戈澍漠, 1984)和 1976 年河北唐山余震区震源机制解数据(许忠淮, 1985)为例, 运用力轴张量算法进行了试算, 计算结果见表 1、表 2. 为了对比, 表 1 和表 2 中同时给出了滑动方向拟合法的反演计算结果. 可以看出, 两者计算结果几乎相同. 说明运用力轴张量算法求解应力场的主应力方向是可行的. 而且本方法给出了平均力轴张量各主值 σ_i 与 S 之比. S 是纯双力偶震源模型下的力轴张量主值, 且与主张力轴相对应, 见式(8).

表 1 对新疆富蕴地震断裂带各区段平均应力张量的计算结果

区段	σ_1				σ_2				σ_3			
	σ_1/S	$Az/(^{\circ})$	$i_h/(^{\circ})$	$\phi/(^{\circ})$	σ_2/S	$Az/(^{\circ})$	$i_h/(^{\circ})$	$\phi/(^{\circ})$	σ_3/S	$Az/(^{\circ})$	$i_h/(^{\circ})$	$\phi/(^{\circ})$
1	-0.905	16(15)	61(62)	29	-0.054	231(231)	34(34)	56	0.959	116(115)	73(72)	17
2	-0.967	14(15)	65(65)	25	-0.015	235(238)	32(32)	58	0.952	113(114)	72(71)	18
3	-0.889	16(15)	71(71)	19	-0.005	240(243)	26(27)	64	0.894	112(112)	73(71)	17
4	-0.875	30(29)	90(89)	0	-0.010	297(292)	8(8)	82	0.884	120(119)	82(83)	8

注: 区段划分、数据以及括号内计算结果均引自许忠淮和戈澍漠(1984)文章. Az 表示方位角; i_h 表示力轴与向上垂轴所夹锐角; ϕ 表示力轴的倾角.

表 2 对河北唐山余震区平均应力张量的计算结果

区段	σ_1			σ_2			σ_3		
	σ_1/S	$Az/(^{\circ})$	$i_h/(^{\circ})$	σ_2/S	$Az/(^{\circ})$	$i_h/(^{\circ})$	σ_3/S	$Az/(^{\circ})$	$i_h/(^{\circ})$
西区	-0.773	99(103)	84(73)	0.037	290(304)	6(18)	0.737	189(195)	89(84)
中区	-0.705	268(96)	90(86)	0.187	359(347)	13(11)	0.517	178(187)	77(79)
东区	-0.651	84(76)	88(89)	0.091	333(342)	5(18)	0.560	174(166)	86(73)

注: 区段划分、数据以及括号内计算结果均引自许忠淮(1985)文章.

3.2 对川滇地区平均应力张量的计算结果

选择川滇地区 8 个地震带和 5 个地块(区)的中强地震的震源机制解, 其震级区间分布见图 3. 所选川滇地区中强地震的震源机制解的 P 轴分布见图 4.

分区(带)根据多个地震震源机制的 T , B , P 轴资料联合计算的平均应力张量是偏应力张量, 见表 3. 根据计算结果, 鲜水河带、松潘迭溪带、金沙江带、理塘带 4 个地

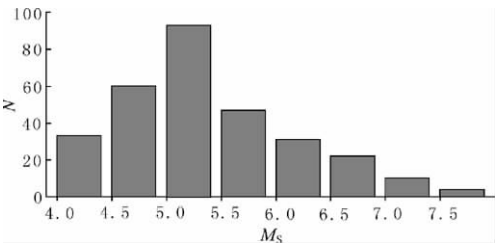


图 3 选择川滇地区 300 次地震的震源机制解的震级区间

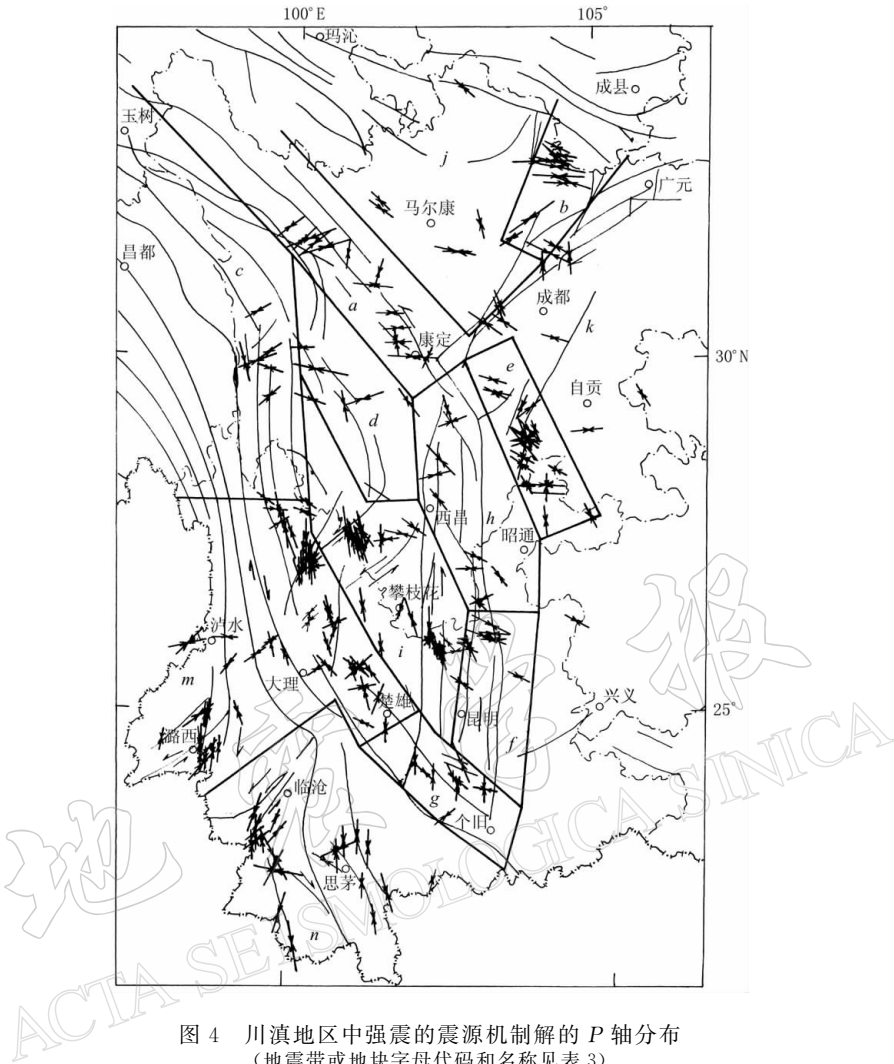


图 4 川滇地区中强震的震源机制解的 P 轴分布
(地震带或地块字母代码和名称见表 3)

表 3 对川滇地区平均应力张量的计算结果

地震带或地块 代码和名称	N	σ_1			σ_2			σ_3		
		σ_1/S	$Az/(^{\circ})$	$\phi/(^{\circ})$	σ_2/S	$Az/(^{\circ})$	$\phi/(^{\circ})$	σ_3/S	$Az/(^{\circ})$	$\phi/(^{\circ})$
a: 鲜水河带	17	-0.263	80	35	-0.004	276	53	0.267	175	8
b: 松潘迭溪带	17	-0.566	98	9	0.054	350	63	0.512	192	25
c: 金沙江带	14	-0.329	267	16	-0.027	77	73	0.356	176	3
d: 理塘带	6	-0.576	95	16	0.029	200	44	0.547	350	42
e: 马边大关带	26	-0.465	305	7	-0.025	48	62	0.490	212	27
f: 小江带	37	-0.667	314	11	0.065	84	74	0.603	222	12
g: 通海曲江带	4	-0.586	153	12	-0.103	36	65	0.689	248	21
h: 安宁河—则木河带	10	-0.430	127	23	-0.005	18	38	0.435	241	44
i: 滇中地块	78	-0.511	163	7	-0.070	302	81	0.580	72	6
j: 川北地块	6	-0.793	299	1	0.047	208	64	0.746	29	26
k: 川中地块	12	-0.524	298	1	0.003	30	73	0.521	208	17
m: 滇西地块	7	-0.349	25	4	0.160	243	85	0.190	115	3
n: 滇西南地块	30	-0.384	16	7	-0.033	137	77	0.416	285	11

注: N 列为选用震源机制解的地震次数, 其选用原则是, 单次地震震源机制解的 T, B, P 轴互相垂直。

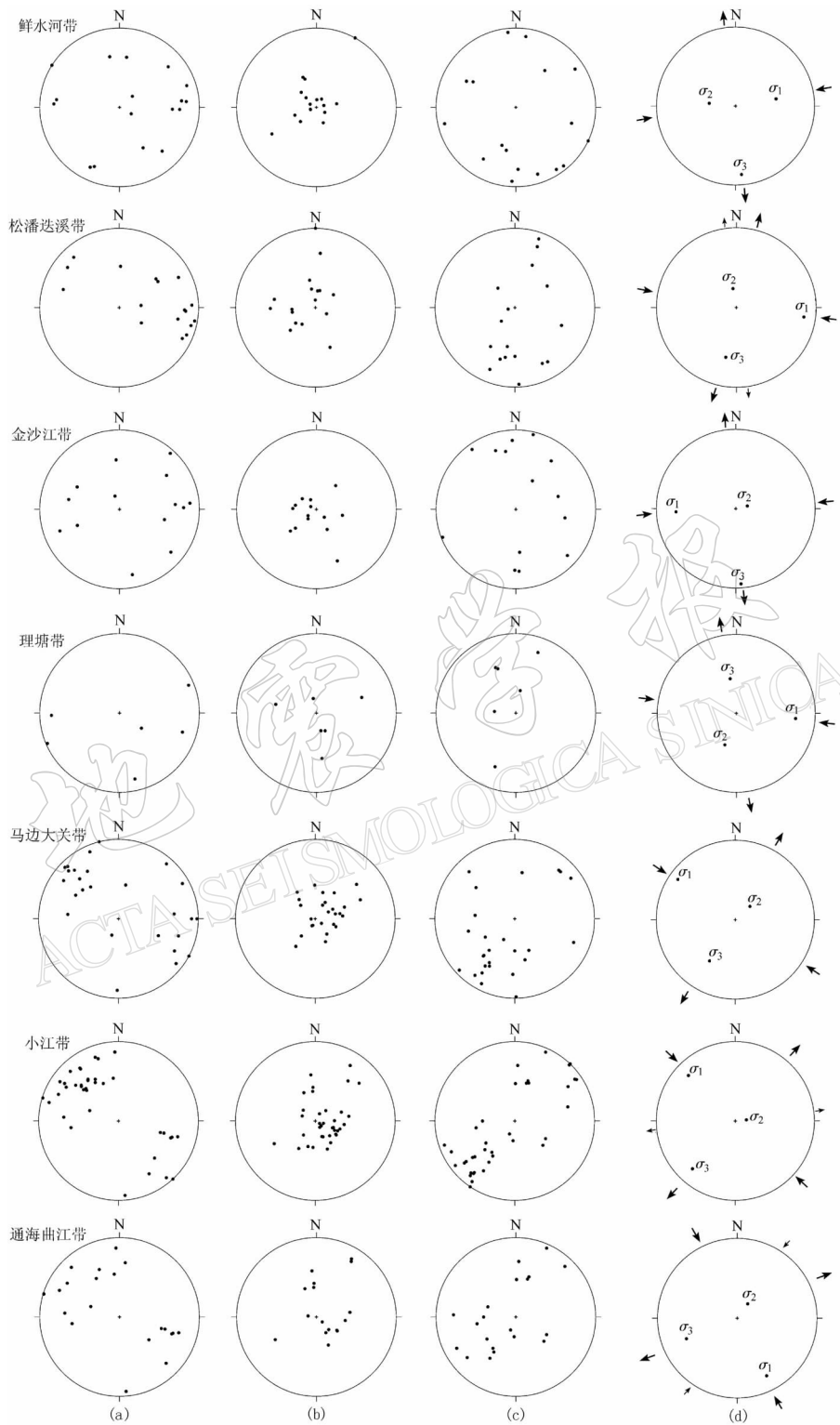


图 5a 川滇地区 7 个地震带(区)震源机制解的 P , B , T 轴和由力轴张量算法得到的 σ_1 , σ_2 , σ_3 轴在上半球乌尔夫网上的投影
(a) P 轴投影; (b) B 轴投影; (c) T 轴投影; (d) σ_1 , σ_2 , σ_3 轴的投影和主应力方向

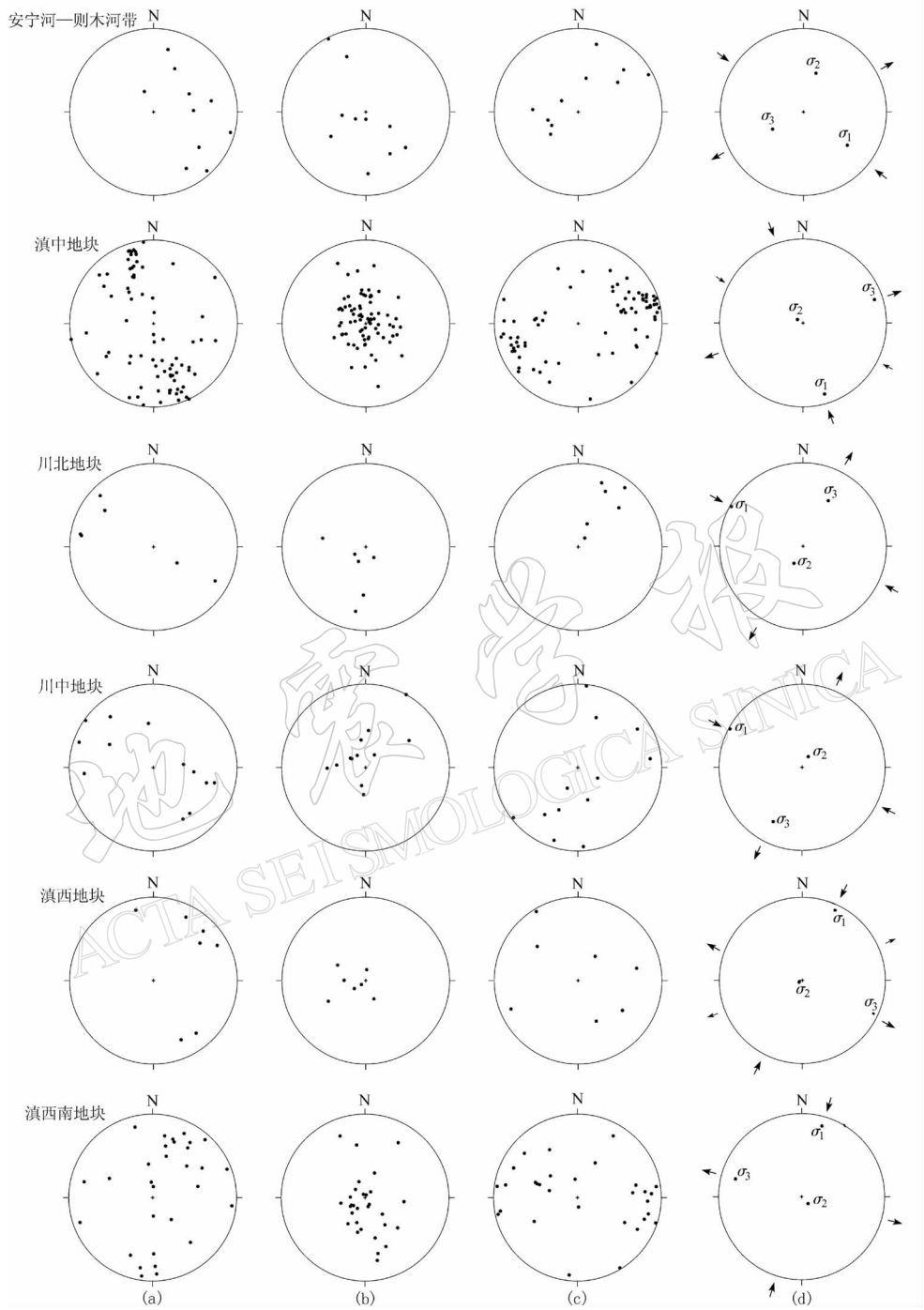


图 5b 川滇地区 6 个地震带(区)震源机制解的 P , B , T 轴和由力轴张量算法得到的 σ_1 , σ_2 , σ_3 轴在上半球乌尔夫网上的投影

(a) P 轴投影; (b) B 轴投影; (c) T 轴投影; (d) σ_1 , σ_2 , σ_3 轴的投影和主应力方向

震带主压应力方位分别为 80° , 98° , 267° 和 95° , 呈近 E-W 向; 马边大关带、安宁河—则木河带、小江带 3 个带主压应力方位分别为 125° , 127° 和 134° , 呈近 N-W 向; 通海曲江带、滇

中地块两个带(区)主压应力方位分别为 153° 和 163° , 呈 NNW 向; 川北地块与川中地块主压应力方位分别为 299° 和 298° , 呈 WNW 向; 滇西地块与滇西南地块分别为 25° 和 16° , 则呈 NNE 向. σ_1 和 σ_3 轴向仰角小, 显示为近水平力作用.

图 5(a, b)给出了各构造带(区)的震源机制解的 P , B , T 轴的投影和由力轴张量计算法得到的 σ_1 , σ_2 , σ_3 轴在上半球乌尔夫网上的投影.

4 讨论和结论

选择有地震构造意义的块体或地震带内大量地震的震源机制解, 可以是 P 波初动解或矩张量解的结果, 采用力轴张量计算法推断研究区构造应力场方向, 使由大量地震震源机制解资料分析构造应力场定量化. 特别是目前根据数字地震记录求解中小地震震源机制解将逐渐成为常规工作, 则根据一定地震构造或蕴震构造意义的区域内的大量震源机制解资料, 由联合求取应力张量的方法可以探索区域应力场的整体动态变化.

对使用多个震源机制解中 T , B , P 轴参数计算应力张量的正确性进行分析. 本文介绍的力轴张量计算法计算的结果, 与许忠淮等利用滑动方向拟合法反演的新疆富蕴地震断裂带应力场和唐山余震区平均应力场(许忠淮, 戈澍漠, 1984; 许忠淮, 1985)结果几乎相同. 由于力轴张量计算法建立在大量震源机制解 T , B , P 轴方向统计平均的基础上, 而且与其它方法所得结果相近, 说明用该方法去推断研究区平均应力场方向是可能的, 验证的结果也是正确的.

对于联合求取应力张量的误差, 主要是源于单次地震震源机制解的测定误差, 也与参与的震源机制解的多少有关. 对单次地震震源机制解, 其 T , B , P 轴互相垂直的本文才选用. 除去震源机制解样本数量不足的因素外, 不同的算法也有误差, 本文采用力轴张量计算方法, 而非拟合的方法, 因而免去了由于拟合引起的误差.

本文是在研究川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式一文(程万正等, 2003)所提供的资料的基础上, 进一步将川滇地区划分为 13 个地震带(区)计算应力场给出定量结果. 这些结果与区域应力场的宏观统计特征(阚荣举等, 1977; 阚荣举, 1980; 许忠淮等, 1987)是一致的, 而且更为细致.

衷心感谢中国地震局地球物理研究所许忠淮研究员、四川省地震局陈天长研究员对本文所作的学术交流和帮助.

参 考 文 献

- 程万正, 刁桂苓, 吕弋培, 等. 2003. 川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式[J]. 地震地质, 25(1): 71~87
- 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
- 阚荣举. 1980. 西南地区现代构造应力场与板内强震活动[J]. 地震研究, 3(3): 45~59
- 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐, 等. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, 20(2): 96~107
- 数学手册编写组. 2002. 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 88~89
- 许忠淮, 戈澍漠. 1984. 用滑动方向拟合法反演富蕴地震断裂带应力场[J]. 地震学报, 6(4): 395~404
- 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
- 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 1987. 由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征[J]. 地球物理学报, 30

(5): 476~486

Aki K, Richards P G. 1980. *Quantitative Seismology. Theory and Methods Vol. 1*[M]. San Francisco: Freeman and Company, 114

Ellsworth W L, Xu Z H. 1980. Determination of the stress tensor from focal mechanism data[J]. *EOS Trans, AGU*, **61**: 1 117

Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernand earthquake sequence[J]. *J Geophys Res*, **89**: 9 305~9 320

DETERMINATION OF DIRECTIONS OF THE MEAN STRESS FIELD IN SICHUAN-YUNNAN REGION FROM A NUMBER OF FOCAL MECHANISM SOLUTIONS

Zhong Jimao¹⁾ Cheng Wanzheng²⁾

1) Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China

2) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

Abstract: Based on the spatial orientation and slip direction of the fault plane solutions, we present the expression of corresponding mechanical axis tensor in geographic coordinate system, and then put forward a method for calculating average mechanical axis tensor and its eigenvalues, which involves solving the corresponding eigenequation. The method for deducing mean stress field from T , B , and P axes parameters of a number of focal mechanism solutions has been verified by inverting data of mean stress fields in Fuyun region and in Tangshan region with fitting method of slip direction and both results are consistent. To study regional average stress field, we need to choose a population of focal mechanism solutions of earthquakes in the massifs where there are significant tectonic structures. According to the focal mechanism solutions of 256 moderate-strong earthquakes occurred in 13 seismic zones of Sichuan-Yunnan region, the quantitative analysis results of stress tensor in each seismic zone have been given. The algorithm of such method is simple and convenient, which makes the method for analyzing tectonic stress field with large amount of focal mechanism solution data become quantified.

Key words: mechanical axis tensor; focal mechanism; mean stress field; Sichuan-Yunnan region