

刘泽民, 刘东旺, 李玲利, 倪红玉, 陈安国, 郑先进. 2011. 利用多个震源机制解求东大别地区平均应力场. 地震学报, 33(5): 605-613.

Liu Zemin, Liu Dongwang, Li Lingli, Ni Hongyu, Chen Anguo, Zheng Xianjin. 2011. Determination of mean stress field in eastern Dabie region from focal mechanism solution analysis. *Acta Seismologica Sinica*, 33(5): 605-613.

## 利用多个震源机制解求东大别地区平均应力场<sup>\*</sup>

刘泽民<sup>†</sup> 刘东旺 李玲利 倪红玉 陈安国 郑先进

(中国合肥 230031 安徽省地震局)

**摘要** 利用地震的震源机制解资料, 得到应力张量在地理坐标系下的表达式, 进而可计算平均应力张量. 通过求平均应力张量的本征向量, 即可得到其主轴方向, 并由此推断区域应力场方向. 利用东大别地区 219 次地震的震源机制解资料, 比较了不同相似程度和不同起算震级资料得到的主轴方向, 认为该方法计算结果非常稳定, 主轴方位角的误差小于  $5^\circ$ , 倾角的误差小于  $10^\circ$ . 计算结果表明, 东大别地区最大主压应力轴  $\sigma_1$  的方位角为  $267^\circ$ , 倾角为  $5^\circ$ ; 最小主压应力轴  $\sigma_3$  的方位角为  $358^\circ$ , 倾角为  $4^\circ$ . 表明该地区受东西向的水平挤压和南北向的水平拉张作用.

**关键词** 应力张量 震源机制解 应力场 东大别地区

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.05.005

中图分类号: P315.3<sup>+</sup>3

文献标识码: A

## Determination of mean stress field in eastern Dabie region from focal mechanism solution analysis

Liu Zemin<sup>†</sup> Liu Dongwang Li Lingli Ni Hongyu Chen Anguo Zheng Xianjin

(Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, China)

**Abstract:** By stacking focal mechanism parameters of a group of earthquakes we present an expression of mean stress tensor for a region in geographic coordinates. We calculated average stress tensor and its eigenvectors to get the directions of principal axes, which may represent the directions of regional principal stress axes. By analyzing focal mechanism parameters of 219 moderate and small earthquakes we have inferred mean principal stress directions for this region. Results of testing this method by sampling different data sets indicate that this method is simple in use and the results are stable. The error of azimuth of principal axes is estimated to be less than  $5^\circ$ , and that of plunge is less than  $10^\circ$ . The mean regional stress parameters we obtained are as follows: The azimuth of maximum principal (compressive) stress axis (compression axis),  $\sigma_1$ ,

<sup>\*</sup> 基金项目 中国地震局重点综合性合同制定向工作任务(2010010201)和安徽省地震局重点基金课题(200904003)共同资助.

收稿日期 2010-08-23 收到初稿, 2011-02-27 决定采用修改稿.

<sup>†</sup> 通讯作者 e-mail: liuzemin@163.com 网络出版时间: 2011-07-20 14:27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2021.P.20110720.1427.001.html>

is  $267^{\circ}$  and its plunge is  $5^{\circ}$ ; azimuth of minimum principal (compressive) stress axis (tension axis),  $\sigma_3$ , is  $358^{\circ}$  and its plunge is  $4^{\circ}$ . This indicates that the eastern Dabie region is horizontally compressed nearly in E-W direction, and its relative horizontal extension is nearly in N-S.

**Key words:** stress tensor; focal mechanism solution; stress field; eastern Dabie region

引言

在震害学研究中，震源机制解是研究区域构造应力场最基础的资料，单次地震震源机制解的  $P$ ,  $B$ ,  $T$  轴只与该地震的释放应力有联系，与驱动断层滑动的应力张量主轴有明显的差异 (McKenzie, 1969; Raleigh *et al*, 1972)，即单次地震的震源机制解不能当作地下实际作用的构造应力场方向 (许忠淮, 1985)。Boot (1959) 提出了利用地震断层面的滑动方

向数据推断断层所在地区驱动断层运动的平均构造应力张量，类似的研究还有许多 (Angelier, 1979; Angelier *et al*, 1982; Ellsworth, Xu, 1980)。钟继茂和程万正 (2006) 提出了应力张量平均法，利用多个震源机制解求平均应力张量来推断川滇地区的平均应力场，并与滑动方向拟合法在该地区计算的结果一致。该方法最重要的特点是，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发震断层面。

大别造山带是秦岭造山带的东延部分，它作为华北地台和扬子地台的碰撞造山带，在构造上分为 4 个单元 (图 1)，由北至南依次为：位于晓天—磨子潭断裂以北与梅山—龙河口断裂之间的北淮阳弧后复理石带，位于晓天—磨子潭断裂与五河—水吼断裂之间的北大别杂岩带，位于五河—水吼断裂与太湖—马庙断裂之间的南大别碰撞杂岩带，以及位于太湖—马庙断裂与襄樊—广济断裂之间的宿松变质杂岩带 (王椿镛等, 1999)。本文所述的东大别指的是大别造山带东部，东至郟庐断裂带，西至商城—麻城断裂，南至襄樊—广济断裂，北至寿县—一定远断裂。东大别在构造上相对独立，是一处构造复杂，自印支期造山运动以来又多期活动，并且全新世以来破坏性地

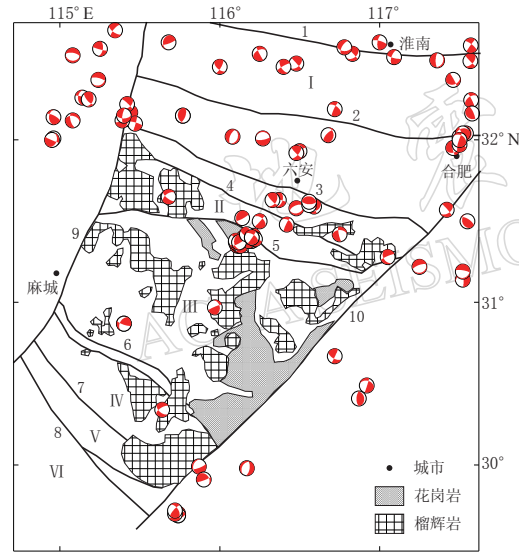


图 1 东大别地区地质构造略图 (据潘国强等 (1997) 和刘启元等 (2005) 的图修改)

1. 寿县—一定远断裂; 2. 肥中断裂; 3. 六安断裂; 4. 梅山—龙河口断裂; 5. 晓天—磨子潭断裂; 6. 五河—水吼断裂; 7. 太湖—马庙断裂; 8. 襄樊—广济断裂; 9. 商城—麻城断裂; 10. 郟庐断裂带。I. 中朝克拉通; II. 北淮阳; III. 北大别; IV. 南大别; V. 浠水地块; VI. 扬子克拉通

Fig. 1 Tectonic sketch map of eastern Dabie region  
1. Shouxian-Dingyuan fault; 2. Feizhong fault; 3. Luan fault; 4. Meishan-Longhekou fault; 5. Xiaotian-Mozitan fault; 6. Wuhe-Shuihou fault; 7. Taihu-Mamiao fault; 8. Xiangfan-Guangji fault; 9. Shangcheng-Macheng fault; 10. Tanlu fault zone. I. Sino-Korean Craton; II. Northern Huaiyang; III. Northern Dabie; IV. Southern Dabie; V. Xishui block; VI. Yangtze Craton

震频繁活动的区域. 东大别的磨子潭—晓天断裂为深断裂, 在磨子潭—晓天断裂下方 35 km 附近壳幔界面存在错距, 错距大约 4.5—8 km 不等(王椿镛等, 1997). 另外, 东大别还存在六安断裂、五河—水吼断裂、郟庐断裂带等多条深断裂. 据安徽地震台网定位的现代地震震源深度一般在 10 km 左右, 因此断层下界远远超出震源深度位置, 断层与地震活动应有相关性.

国内许多学者研究了华北地区的构造应力场特征(许忠淮等, 1983; 许忠淮, 2001; 周翠英等, 2005), 大致认为该地区受 NNE 向的近水平挤压作用. 夏瑞良(1985)利用综合节面解(李钦祖等, 1973)和震源机制解资料, 研究认为安徽自北而南应力轴方位角有转向的事实. 刘东旺等(2004)利用系统聚类法(刁桂苓等, 1992)研究了皖北块体的构造应力场特征. 上面有些研究范围比较大, 部分研究使用的是 1985 年以前的资料, 同时东大别地处安徽、湖北、河南和江西四省交界地区, 震源机制解资料非常分散, 因此对该地区的应力场的研究目前非常少. 本文利用东大别地区较长时间尺度范围内大量中小以上地震的震源机制解资料, 基于应力张量平均法, 计算该地区的平均应力张量的主轴方向, 推断该地区的构造应力场, 以进一步对华北地块南缘构造应力场进行精细研究.

## 1 求平均应力张量平均法原理

### 1.1 应力张量表示方法

对于地理坐标系( $o, x, y, z$ ), 坐标原点  $o$  为震源,  $x$  轴向北,  $y$  轴向东,  $z$  轴向下;  $e_x, e_y, e_z$  为基矢量. 按照双力偶点源模型, 每次地震的  $P, B, T$  轴方向分别有相互垂直的基矢量  $e_P, e_B, e_T$ , 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二阶张量, 可看成是与双力偶点源模型相应的虚拟应力张量. 求多次震源机制解的应力张量的平均应力张量可得多次地震的平均  $P, B, T$  轴方向, 当地震是离散分布在一个相对独立块体时, 由平均  $P, B, T$  轴方向可以推断地震所在区域构造应力场的主应力轴方向. 每个震源机制解(下半球投影)的  $P, B, T$  轴基矢量可以表示为

$$\begin{cases} e_T = T_1 e_x + T_2 e_y + T_3 e_z = \cos\gamma_T \cos\Psi_T e_x + \sin\gamma_T \cos\Psi_T e_y + \sin\Psi_T e_z \\ e_B = B_1 e_x + B_2 e_y + B_3 e_z = \cos\gamma_B \cos\Psi_B e_x + \sin\gamma_B \cos\Psi_B e_y + \sin\Psi_B e_z \\ e_P = P_1 e_x + P_2 e_y + P_3 e_z = \cos\gamma_P \cos\Psi_P e_x + \sin\gamma_P \cos\Psi_P e_y + \sin\Psi_P e_z \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\gamma_P, \Psi_P, \gamma_B, \Psi_B, \gamma_T, \Psi_T$  分别为震源机制解中  $P, B, T$  轴的方位角和倾角. 则单个震源机制解的应力张量可表示为

$$S = S_1 e_T e_T + S_2 e_B e_B + S_3 e_P e_P \quad (2)$$

式中,  $S_1, S_2, S_3$  为地震释放应力张量的主值.

若震源机制解以节面取向和滑动的形式给出,  $\varphi_s$  为节面走向,  $d$  为节面倾角,  $\lambda$  为滑动角, 则断层面的法向单位矢量为

$$v = v_1 e_x + v_2 e_y + v_3 e_z = -\sin d \sin j_s e_x + \sin d \cos j_s e_y - \cos d e_z \quad (3)$$

滑动方向单位矢量为(Aki, Richards 1980)

$$\begin{aligned} u = u_1 e_x + u_2 e_y + u_3 e_z = & (\cos\lambda \cos\varphi_s + \cos\delta \sin\lambda \sin\varphi_s) e_x + \\ & (\cos\lambda \sin\varphi_s - \cos\delta \sin\lambda \cos\varphi_s) e_y - \sin\delta \sin\lambda e_z \end{aligned} \quad (4)$$

单个震源机制解可任选其中一个节面的参数来计算  $P, B, T$  轴, 然后通过式(2)将其转化为地理坐标系下的应力张量.  $P, B, T$  力轴基矢量可用下式计算得到:

$$\begin{cases} \mathbf{e}_B = \mathbf{v} \times \mathbf{u} = B_1 \mathbf{e}_x + B_2 \mathbf{e}_y + B_3 \mathbf{e}_z \\ \mathbf{e}_T = (\mathbf{v} + \mathbf{u}) / \sqrt{2} = T_1 \mathbf{e}_x + T_2 \mathbf{e}_y + T_3 \mathbf{e}_z \\ \mathbf{e}_P = (\mathbf{v} - \mathbf{u}) / \sqrt{2} = P_1 \mathbf{e}_x + T_2 \mathbf{e}_y + T_3 \mathbf{e}_z \end{cases} \quad (5)$$

1.2 平均  $P, B, T$  轴的计算方法

在地理坐标系中求平均应力张量  $\sigma = \sigma_{ij}$ , 即求所有应力张量各分量的代数平均值为

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N S_{ij}^{(k)} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (6)$$

设  $\sigma'_{ii} = \sigma'_{ij} \delta_{ij}$  为主应力张量,  $\beta_{ji}$  为  $\sigma'_{ii}$  主轴(即平均  $P, B, T$  轴)对应的方向余弦,  $\sigma'_{ii}$  和  $\beta_{ji}$  满足下式:

$$\sigma_{ij} \beta_{ji} = \beta_{ji} (\sigma'_{ij} \delta_{ij}) \quad (7)$$

$\beta_{ji}$  为  $\sigma'_{ii}$  可以通过求  $\sigma$  的本征值和本征向量得到, 最后利用下半球投影, 即可将其转换为主应力轴的方位角和倾角, 并认为该主应力轴的方向即为该地区构造应力场主轴方向.

2 资料

东大别研究区地处安徽、湖北、河南和江西四省交界地区. 其中安徽省内 1970—2002 年的震源机制解资料采用刘东旺等(2004)的计算结果; 2005 年江西九江—瑞昌  $M_s 5.7$  和  $M_s 4.8$  地震的震源机制解采用吕坚等(2006)的结果; 本文作者利用垂直向  $P$  波、 $S$  波振幅比方法(梁尚鸿等, 1984)补充计算了东大别研究区内 2003—2009 年安徽省和 1970—2009 年湖北、河南、江西省的中小以上地震的震源机制解. 共计东大别研究区内有 219 次地震的震源机制解. 其中  $M_L \geq 2.3$  地震 104 次, 均匀分布在东大别地区的中北部及边界断裂附近, 而西南部由于地震数量较少, 因此只有少量的震源机制解资料(图 1). 东大别研究区内 219 次震源机制解资料的时间跨度为 1973—2009 年, 最大地震为 2005 年 11 月 26 日江西九江—瑞昌  $M_s 5.7$  地震, 最小地震为安徽霍山  $M_L 1.8$  地震. 首先统计东大别研究区内所有震源机制解的  $P, T$  轴方位角和倾角的优势方向. 其中  $P$  轴方位角主要集中在  $85^\circ$  或  $265^\circ$  左右, 倾角集中在  $20^\circ$  左右;  $T$  轴方位角主要集中在  $5^\circ$  或  $185^\circ$  左右, 倾角集中在  $25^\circ$  左右.

3 计算结果

应力张量平均法的基本特点是, 当许多地震的震源机制解近似相同时能给出合理的结果(钟继茂, 程万正, 2006). 而从震源机制解资料来看, 该地区  $P, T$  轴方位角和倾角有明显的优势方向, 因此东大别研究区内地震中当某个震源机制解的  $P, T$  轴与该地区  $P, T$  轴的优势方向夹角较小时, 则认为其相似, 然后用所有相似的震源机制解来求该地区的平均应力张量和主应力轴方向, 由此推测该地区的构造应力场方向.

为了研究该方法的稳定性, 分别选取与  $P, T$  轴优势方向夹角均小于  $50^\circ, 40^\circ, 30^\circ$  和

20°的不同相似程度的震源机制解来求平均应力张量, 计算结果如图 2 和表 1 所示. 其中, 最大主压应力轴  $\sigma_1$  方位角为  $268^\circ \pm 3^\circ$ , 倾角为  $7^\circ \pm 4^\circ$ ; 最小主压应力轴  $\sigma_3$  方位角为  $358^\circ \pm 3^\circ$ , 倾角为  $2^\circ \pm 3^\circ$ ; 中间主压应力轴  $\sigma_2$  方位角为  $97^\circ \pm 19^\circ$ , 倾角为  $82^\circ \pm 4^\circ$ . 从  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  的方位角可以得到东大别地区构造应力场为近东西向的挤压和近南北向的拉张作用;  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  的倾角均比较小, 显示该区受近水平向的挤压和拉张作用. 3 个轴的倾角计算结果非常稳定, 误差均  $\leq 4^\circ$ .  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  方位角误差也  $\leq 4^\circ$ , 只有  $\sigma_2$  的方位角误差较大, 主要是由于  $\sigma_2$  轴近似直立, 导致方位角不稳定. 比较了不同相似程度的震源机制解计算得到的主应力轴的结果, 除  $\sigma_2$  的方位角变化较大外, 其余参数的误差均非常小, 计算结果很稳定.

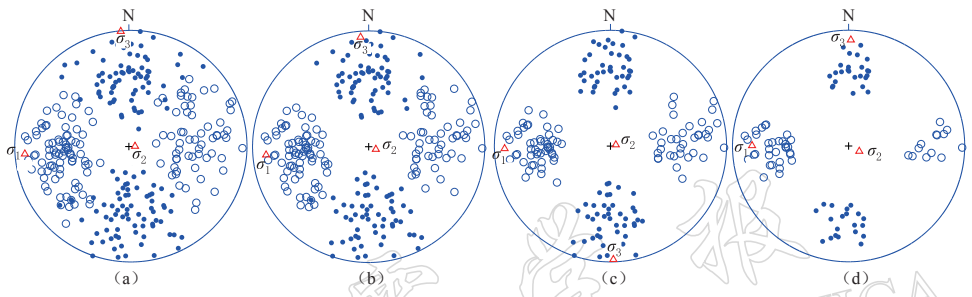


图 2 震源机制解  $P$ ,  $T$  轴和  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  在下半球吴尔夫网上的投影(使用地震震级未加限制)  
(a) 夹角  $\leq 50^\circ$ ; (b) 夹角  $\leq 40^\circ$ ; (c) 夹角  $\leq 30^\circ$ ; (d) 夹角  $\leq 20^\circ$

Fig. 2 Projection of  $P$ ,  $T$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  axes on Wulff net of lower hemisphere  
(by using all the magnitude range of the earthquake data)

(a) Divergence angle of selected  $P$  or  $T$  axes is less than  $50^\circ$ ; (b) The angle is less than  $40^\circ$ ;  
(c) The angle is less than  $30^\circ$ ; (d) The angle is less than  $20^\circ$

表 1 东大别地区平均应力张量平均法计算结果(使用地震震级未加限制)

Table 1 Result of mean stress tensor for eastern Dabie region(by using all the magnitude range of the earthquake data)

夹角/ $^\circ$	地震次数	$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$	
		方位角/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$
$\leq 50$	145	266	6	87	84	356	0
$\leq 40$	122	265	7	109	83	355	3
$\leq 30$	84	269	5	76	85	178	1
$\leq 20$	45	270	11	116	78	1	5

由于地震震级小时单次地震的震源机制解反演结果误差比较大, 因此在计算平均应力张量时, 选取了  $M_L \geq 2.3$  地震、不同相似程度的震源机制解来求平均应力张量(图 3、表 2). 其中,  $\sigma_1$  方位角为  $267^\circ \pm 2^\circ$ , 倾角为  $8^\circ \pm 5^\circ$ ;  $\sigma_3$  方位角为  $177^\circ \pm 4^\circ$ , 倾角为  $5^\circ \pm 7^\circ$ ;  $\sigma_2$  方位角为  $83^\circ \pm 49^\circ$ , 倾角为  $80^\circ \pm 8^\circ$ . 同样也可以看出, 除  $\sigma_2$  方位角变化幅度较大外, 其余参数计算结果均非常稳定. 综合两次计算结果, 除  $\sigma_2$  方位角误差较大外, 其余参数的误差均较小, 主应力轴方位角的误差  $\leq 5^\circ$ , 倾角的误差  $\leq 8^\circ$ , 均在合理的变化范围内. 因此认为该方法的计算结果对起算震级不敏感, 不同相似程度的震源机制解资料计算的结果也基本相同, 计算结果总体稳定可靠.

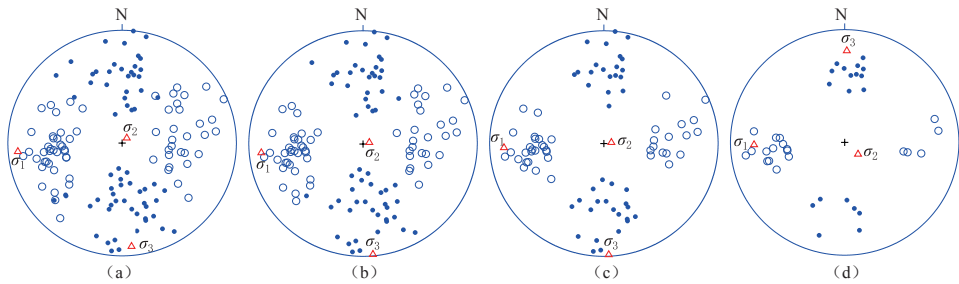


图 3 震源机制解  $P$ ,  $T$  轴和  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  在下半球吴尔夫网上的投影(选取  $M_L \geq 2.3$  地震的机制解)  
(a) 夹角  $\leq 50^\circ$ ; (b) 夹角  $\leq 40^\circ$ ; (c) 夹角  $\leq 30^\circ$ ; (d) 夹角  $\leq 20^\circ$

Fig. 3 Projection of  $P$ ,  $T$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  axes on Wulff net of lower hemisphere.  
(by only using  $M_L \geq 2.3$  earthquake data)  
(a) Divergence angle of selected  $P$  or  $T$  axes is less than  $50^\circ$ ; (b) The angle is less than  $40^\circ$ ; (c) The angle is less than  $30^\circ$ ; (d) The angle is less than  $20^\circ$

表 2 东大别地区平均应力张量平均法计算结果(选取  $M_L \geq 2.3$  地震的机制解)

Table 2 Result of mean stress tensor for eastern Dabie region (by only using  $M_L \geq 2.3$  earthquakes data)

夹角/ $^\circ$	地震次数	$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$	
		方位角/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$	倾角/ $^\circ$
$\leq 50$	67	265	5	42	83	175	5
$\leq 40$	59	265	6	76	84	175	1
$\leq 30$	41	268	8	82	82	178	1
$\leq 20$	19	269	13	132	72	1	12

此外为了研究破坏性地震前东大别地区构造应力场方向是否发生变化, 采用了 10 年的震源机制解资料累积, 1 年滑动的方式, 利用应力张量平均法得到了该地区  $\sigma_1$  方位角随时间的变化曲线(图 4). 2005 年江西九江—瑞昌间  $M_S 5.7$  地震前,  $\sigma_1$  方位角从 1995 年开始持续逆时针偏转, 偏转幅度为  $8^\circ-10^\circ$ . 根据上面稳定性分析, 该偏转幅度超过了误差范围, 因此该现象应该是客观存在的. 同时 1995 年苍山  $M_S 5.2$  地震前震区附近  $P$  轴方位角 1985 年以前基本维持在  $70^\circ$  左右, 1986 年开始  $P$  轴方位从  $70^\circ$  猛增到  $100^\circ$  左右, 直到发震(周翠英等, 1997). 从图 4 也可以看出, 1987—1995 年东大别地区  $\sigma_1$  方位角也是顺时针偏转的现象, 与苍山地震前的现象基本吻合.

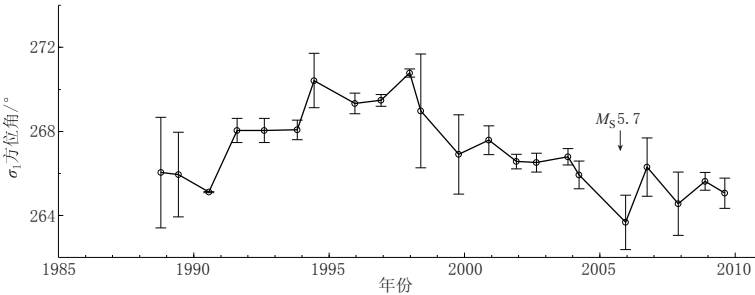


图 4 东大别地区最大主压应力轴  $\sigma_1$  方位角时间曲线

Fig. 4 Variation of maximum principal stress axis  $\sigma_1$  azimuth with time for eastern Dabie region

4 不同方法计算结果对比

格点尝试法是利用大量中小地震的震源机制解推断构造应力场的一个非常重要的方法(许忠淮等, 1983). 图 5 为基于东大别地区 219 次地震的震源机制解资料, 利用格点尝试法程序计算得到的极性矛盾比为 5% 内的平均解. 该平均解的  $P$  轴方位角为  $263^{\circ}$ , 倾角为  $1^{\circ}$ ;  $T$  轴方位角为  $353^{\circ}$ , 倾角为  $3^{\circ}$ ;  $B$  轴方位角为  $161^{\circ}$ , 倾角为  $87^{\circ}$ . 格点尝试法得到的平均解也显示出东大别地区受东西向的近水平挤压和南北向的近水平拉张作用. 对比格点尝试法得到的 3 个轴和应力张量平均法得到的 3 个主应力轴可以看出, 除中间主应力轴的方位角差别较大外, 其余参数的差异均很小. 系统聚类法(刁桂苓等, 1992)也是求构造应力场的一种重要的方法, 本文选择相同的资料, 即夹角分别小于  $50^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  和  $20^{\circ}$  的资料, 对比两种不同方法的计算结果(表 3). 其中应力张量平均法计算得到的  $\sigma_1$  方位角与系统聚类计算得到的  $P$  轴方位角差别  $\leq 3^{\circ}$ , 倾角的差别  $\leq 2^{\circ}$ ; 应力张量平均法计算得到的  $\sigma_3$  方位角与系统聚类计算得到的  $T$  轴方位角差别  $\leq 4^{\circ}$ , 倾角的差别  $\leq 2^{\circ}$ ; 应力张量平均法计算得到的  $\sigma_2$  方位角与系统聚类计算得到的  $B$  轴方位角差别  $\leq 7^{\circ}$ , 倾角的差别  $\leq 2^{\circ}$ . 可以看出除应力张量平均法计算得到的  $\sigma_2$  方位角与系统聚类计算得到的  $B$  轴方位角差别略大外, 其余参数的差别均非常小. 通过对比上述 3 种方法的计算结果, 总体差异不显著, 认为应力张量平均法得到的 3 个主应力轴可以代表构造应力场的方向.

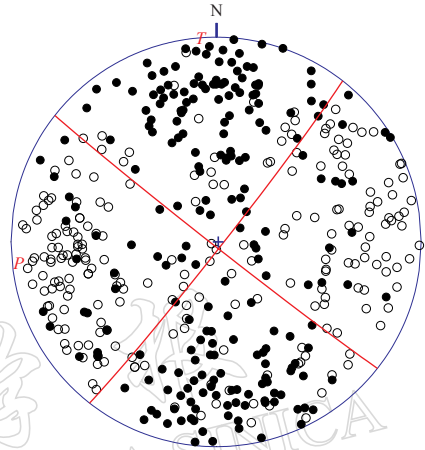


图 5 东大别地区格点尝试法计算结果  
Fig. 5 Mean stress axes result by using grid search analysis

表 3 应力张量平均法与系统聚类法计算结果对比

Table 3 Comparison between the results obtained from main stress tensor method and from system cluster analysis

夹角 / $^{\circ}$	地震 次数	应力张量平均法						系统聚类法					
		$\sigma_1$		$\sigma_2$		$\sigma_3$		$P$ 轴		$T$ 轴		$B$ 轴	
		方位角 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	方位角 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	方位角 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	方位角 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	方位角 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$	方位角 / $^{\circ}$	倾角 / $^{\circ}$
$\leq 50$	145	266	6	87	84	356	0	263	5	179	1	74	85
$\leq 40$	122	265	7	109	83	355	3	263	6	359	1	102	84
$\leq 30$	84	269	5	76	85	178	1	267	5	180	2	71	85
$\leq 20$	45	270	11	116	78	1	5	268	12	3	4	111	78

5 讨论与结论

选取有构造意义的块体内的大量震源机制解资料, 采用应力张量平均法(钟继茂, 程方正, 2006)推断区域构造应力场方向, 是利用大量震源机制解资料定量分析构造应力场



的方法. 该方法最重要的特点和优点是, 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. 本文将应力张量平均法推广到下半球吴尔夫坐标系下, 基于东大别地区 219 次地震的震源机制解资料, 利用不同相似程度、不同起算震级的震源机制解得到了该地区的平均应力张量和主轴方向. 结果显示该方法计算结果非常稳定. 同时该方法的计算结果与格点尝试法(许忠淮等, 1983)、系统聚类法(刁桂苓等, 1992)计算的结果也非常接近, 认为该方法可以用来计算构造应力场. 此外, 该方法计算结果的误差也受单个震源机制解的误差的影响. 当研究区震源机制解数量较多时, 计算结果非常稳定, 反之则与参与计算的震源机制解个数有关, 单个震源机制解的误差将显现, 计算结果稳定性较差. 因此计算研究区内大量可信的震源机制解是该项研究的前提和基础.

应力张量平均法计算得到东大别地区的  $\sigma_1$  方位角为  $267^\circ$ , 倾角为  $5^\circ$ ;  $\sigma_3$  方位角为  $358^\circ$ , 倾角为  $4^\circ$ . 显示了东大别地区受东西向的近水平挤压和南北向的近水平拉张作用. 国内许多研究均认为华东地区  $P$  轴和  $T$  轴基本水平, 因此与其它研究比较时主要讨论其方位角. 许忠淮等(1983)推断鲁西南地区  $P$  轴方位角为  $85^\circ$ ,  $T$  轴方位角为  $5^\circ$ , 中间主应力轴基本垂直, 因此认为  $P$  轴和  $T$  轴基本水平. 本文计算东大别地区的  $P$  轴和  $T$  轴方位角较鲁西南地区顺时针旋转  $2^\circ-7^\circ$ . 周翠英等(2005)推断的华东地区现今处在 ENE 向( $80^\circ$  左右)主压、NNW 向( $350^\circ$  左右)主张应力场的控制下, 主应力作用方式以水平和近水平为主. 东大别地区的  $P$  轴和  $T$  轴方位角较其顺时针偏转  $5^\circ-8^\circ$ . 刘东旺等(2004)利用系统聚类法(刁桂苓等, 1992)计算得到淮河变形带的  $P$  轴方位角和倾角分别为  $71^\circ$  和  $8^\circ$ ,  $T$  轴的方位角和倾角分别为  $171^\circ$  和  $6^\circ$ , 显示  $P$  轴和  $T$  轴基本水平. 本文得到的结果较淮河变形带主应力轴方位角顺时针偏转  $7^\circ-16^\circ$ . 夏瑞良(1985)认为安徽自北而南应力轴方位角有顺时针转向的事实. 本文计算结果也显示东大别地区较淮河变形带构造应力场主应力轴方位角略有顺时针偏转, 显示安徽地区构造应力场主应力轴方位角有自北向南顺时针偏转的事实. 利用应力张量平均法计算得到的东大别地区  $\sigma_1$  方位角的时间变化曲线显示, 2005 年江西九江—瑞昌  $M_s 5.7$  地震前,  $\sigma_1$  方位角从 1995 年开始持续逆时针偏转, 偏转幅度为  $8^\circ-10^\circ$ ; 1987—1995 年左右, 该地区  $\sigma_1$  方位角有顺时针偏转的现象, 与 1995 年苍山  $M_s 5.2$  地震前震区附近  $P$  轴方位顺时针偏转现象(周翠英等, 1997)基本吻合. 显示出 1995 年苍山  $M_s 5.2$  地震前构造应力场存在较大范围的同步变化.

衷心感谢许忠淮教授和审稿专家给予的悉心指导和帮助; 应力张量平均法的原理和计算程序与福建省地震局钟继茂, 四川省地震局阮祥、龙峰作了有益的交流和讨论; 在收集地震图纸资料的过程中得到了湖北、河南、江西省地震局的大力支持. 作者在此一并表示感谢.

## 参 考 文 献

- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1992. 震源机制解的系统聚类分析: 以海城地震序列为例[J]. 中国地震, 8(3): 86-92.  
李钦祖, 王泽皋, 贾云年, 靳雅敏. 1973. 由单台小地震资料所得两个区域的应力场[J]. 地球物理学报, 5(3): 268-279.



- 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛镛, 朱碁定. 1984. 利用区域地震台网 Pg, Sg 波振幅比资料测定小震震源参数[J]. 地球物理学报, **27**(3): 249-257.
- 刘东旺, 刘泽民, 沈小七, 夏瑞良, 李敏莉, 闫素萍, 凌学书. 2004. 安徽淮河构造变形带及邻近块体现代构造应力场特征[J]. 中国地震, **20**(4): 364-371.
- 刘启元, Rainer Kind, 陈九辉, Yuan Xiaohui, 李顺成, 郭颀, Kurt Wylegalla, 赖院根. 2005. 大别造山带壳幔界面的断错结构和壳内低速体[J]. 中国科学: D 辑, **35**(4): 304-313.
- 吕坚, 郑勇, 倪四道, 高建华. 2008. 2005 年 11 月 26 日九江—瑞昌 Ms5.7、Ms4.8 地震的震源机制解与发震构造研究[J]. 地球物理学报, **51**(1): 158-164.
- 潘国强, 赵连泽, 夏木林. 1997. 大别山碰撞造山带的构造模型及其地质演化[J]. 中国区域地质, **16**(1): 43-50.
- 王椿镛, 张先康, 陈步云. 1997. 大别造山带的地壳结构研究[J]. 中国科学: D 辑, **27**(3): 221-226.
- 王椿镛, 楼海, 王飞. 1999. 大别山超高压变质带地壳结构及其构造意义[J]. 地震学报, **21**(5): 533-544.
- 夏瑞良. 1985. 安徽区域地震应力场的分布特征[J]. 地震地质, **7**(3): 13-21.
- 许忠淮, 阎明, 赵忠和. 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. 地震学报, **5**(3): 268-279.
- 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. 2001. 东亚地区现今构造应力场的编制[J]. 地震学报, **23**(5): 492-501.
- 钟继茂, 程万正. 2006. 由多个地震震源机制解求川滇地区平均应力场方向[J]. 地震学报, **28**(4): 337-346.
- 周翠英, 华爱军, 王梅, 张来荣, 马玉香. 1997. 1995 年苍山 5.2 级地震前应力场的动态变化[J]. 地震地质, **19**(2): 135-140.
- 周翠英, 王铮铮, 蒋海昆, 李永红, 吴延河. 2005. 华东地区现代地壳应力场及地震断层错动性质[J]. 地震地质, **27**(2): 273-288.
- Aki K, Richards P G. 1980. *Quantitative Seismology: Theory and Methods Vol.1*[M]. San Francisco: Freeman and Company: 114.
- Angelier J. 1979. Determination of the mean principal direction of stresses for given fault population [J]. *Tectonophysics*, **56**(3-4): 17-26.
- Angelier J, Tarantola A, Valette B, Manoussis S. 1982. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress-1. Single phase fault populations: A new method of computing the stress tensor[J]. *J Geophys Res*, **69**(3): 607-621.
- Boot M H P. 1959. The mechanics of oblique slip faulting[J]. *Geol Mag*, **96**(2): 109-117.
- Ellsworth W L, Xu Z H. 1980. Determination of the stress tensor from focal mechanism data[J]. *Eos Trans AGU*, **61**: 1117.
- McKenzie D P. 1969. The relation between fault plane solution for earthquakes and the directions of the principal stress [J]. *Computer & Geosciences*, **16**(7): 953-989.
- Raleigh C B, Healy J H, Bredehoeft J D. 1972. Faulting and crustal stress at Rangely, Colorado[G]// Heard H C, Borg I Y, Carter N L, Raleigh C B eds. *American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, **16**: *Flow and Fracture of Rocks*. Washington D C: AGU: 275-284.