

自动识别多期断层擦痕的一种应力反演算法

单业华^{1 2)} 李志安²⁾ 林 舸²⁾

(1)青岛海洋大学海洋地质系,山东 青岛,266003 (2)中国科学院长沙大地构造研究所,湖南 长沙,410013)

摘要 由于地质历史上构造应力场的演变,多期断层擦痕数据的存在是应力反演所面临的普遍性问题。以往提出处理多期断层擦痕的应力反演算法都基于硬划分,忽视了数据自身的不确定性,并且一些只是传统的、处理一期断层擦痕的算法的简单延拓。在 Fry(1999)的 σ 空间里,同期断层擦痕向量具有统一的线性分布趋势,多期断层擦痕向量具有不同的线性分布趋势。在此基础上,本文提出利用模糊线性聚类法来识别多期断层擦痕向量的线性结构。这种算法不仅可以弥补以往算法的上述缺陷,还具有自动、直接、有效,且计算量也较小的优点。

关键词 多期断层擦痕 应力反演 模糊聚类 算法

A Stress Inversion Procedure for Automatic Recognition of Polyphase Fault/Slip Data Sets

SHAN Yehua^{1 2)} LI Zhian²⁾ LIN Ge²⁾

(1)Department of Marine Geology, Qingdao University of Oceanography, Qingdao, Shandong 266003;
2)Changsha Institute of Geotectonics, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410013)

Abstract The presence of polyphase fault/slip data caused by the variability of tectonic stress fields in the geological history is a general problem in stress inversion. Algorithms previously presented for separation of polyphase fault/slip data sets are based on hard subdivision and underestimate the intrinsic nondeterminacy of data. In some of these algorithms, the classic algorithm for one-phase fault/slip data is embedded. In Fry's (1999) σ space, the vectors of one-phase fault/slip data must have a linear tendency whereas the vectors of polyphase data have multiple linear tendencies. The authors herein apply modern fuzzy clustering analysis to detecting the linear structures of fault/slip data. The algorithm used here considers the nondeterminacy of data and hence can overcome the shortcomings of existing algorithms. It is automatic, direct and effective and needs less running time.

Key words polyphase fault/slip data sets stress inversion fuzzy clustering analysis algorithm

1 引言

断层擦痕分析是近二、三十年来发展起来的,在脆性构造域中反演古应力的一种重要方法。该方法的基本假设是:在均匀分布的区域应力场作用下,新生或继承性断层活动相互无关,由此形成的擦痕垂直于构造应力在断层面上产生拖曳力的零分量,或者平行于断层面上最大剪应力的方向,即对于一条断层,有以下表达式(Angelier,1979;Etchecopar等,1981;Hardcastle等,1991;Nemcok等,1995;Fry,1999):

$$b \cdot \sigma \cdot n^T = 0 \quad (1)$$

式中, b 是断层面的法方向; n 是断层面上与擦痕垂直的方向; σ 是待求的均匀分布的古应力张量; T 是表示矩阵转置的上角标。这就是利用断层擦痕产状反演古应力的理论根据。显然,对于任意实数 R ,若 σ 是(1)式的解, I 是单位矩阵,则 $R(I + \sigma)$ 也是该式的解,所以不能够由此式求得的应力张量的绝对值,只能是相对值。在实际应用中,当研究的地质对象能够接近或满足上述的基本假设时,就可以利用这种方法进行古应力反演,估测古应力的方向和相对大小。

在地质历史上一个地区的构造应力场受各种复杂过程的影响,并经常发生改变,体现在断层活动的

多期性和复杂性。然而,上述应力反演模型要求所考虑的断层擦痕必须是在同期构造应力场下新生或继承断层活动的产物。这种限制并不意味着该方法仅适用于同期断层活动的特殊情形,能否对模型稍加修改使其适用于多期断层活动下的一般情形,将对古应力反演具有特别重要的理论意义。

实际上,当存在着多期断层擦痕时,所有数据中由传统算法求出的应力解已经变得难以解释,甚至毫无意义(Nemcok等,1995)。虽然进一步还可以通过该解确定出异常的数据,然后删掉它们,再对剩余的数据进行计算,但是,这样得到的结果尽管在求解精度上会有所改善,仍旧可能是多期数据叠加的综合反映。其根本原因在于模型自身不具有线状构造的识别能力。

最早,Hardcastle等(1991)采用网格搜索法来处理多期断层擦痕数据。这一方法需要事先给出最大的主应力增量的大小、待求应力张量所包容断层的百分比等多项参数,进行全局搜索,找出可接受的一系列应力解,然后从中选出一些最佳解,分别代表不同期的断层活动。该方法的计算量非常大,并且在原理上没有克服传统方法的缺陷,所获得的应力解仍然可能包含了多期断层擦痕数据。

在上述全局搜索的基础上,Nemcok等(1995)根据每个数据能否被某网格代表的应力张量兼容,赋予它们1或0值,然后采用聚类分析方法来找出各期断层擦痕数据,分别由传统算法反演古应力。这种处理方案十分巧妙地回避了Hardcastle等(1991)算法存在的缺点,因而尽管计算量较大,仍不失为目前处理多期断层擦痕的一种好算法。

以上的方法都是在硬划分下进行的,也就是说每个数据的归属都是确定的,只属于某个子集,不存在属于2个或多个子集的可能性。事实上,数据的不确定性普遍存在,断层擦痕数据也不例外。断层和擦痕的产状本身就存在着测量误差,尤其是擦痕的测量误差往往还会更大些,并且不同期的断层活动完全还可能产生在可接受的一定角度范围内产状近似一致的擦痕,所以势必导致断层擦痕数据的不确定性。就此而言,基于硬划分的上述方法对于处理多期断层擦痕是不完善的。而基于软划分(模糊线性聚类)的算法正好弥补了这点不足,从而使处理多期断层擦痕的原理更加完善。

2 软划分(模糊线性聚类)算法原理

为了方便(1)式的展开,令

$$b = [b_1 \quad b_2 \quad b_3]$$

$$n = [n_1 \quad n_2 \quad n_3]$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}$$

式中, $b_i (i=1, 2, 3)$ 是断层面法线的方向余弦; $n_i (i=1, 2, 3)$ 是断层面上拖曳力零分量的方向余弦; $\sigma_{ij} (i, j=1, 2, 3)$ 是待求的应力分量, $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ 。于是(1)式可以写成:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_i n_j \sigma_{ij} = 0 \quad (2)$$

记

$$t = [b_1 n_1 \quad b_2 n_2 \quad b_3 n_3 \quad b_1 n_2 \quad b_1 n_3 \quad b_2 n_3 \quad b_3 n_1 \quad b_3 n_2]$$

$$\sigma_m = [\sigma_{m1} \quad \sigma_{m2} \quad \sigma_{m3} \quad \sigma_{m4} \quad \sigma_{m5} \quad \sigma_{m6} \quad \sigma_{m7} \quad \sigma_{m8} \quad \sigma_{m9}]$$

$$= [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{33} \quad \sigma_{12} \quad \sigma_{13} \quad \sigma_{21} \quad \sigma_{23} \quad \sigma_{31} \quad \sigma_{32}]$$

代入上式,有

$$t \cdot \sigma_m^T = 0 \quad (3)$$

式中, t 是数据向量; σ_m 是待求的应力向量。显然,待求的应力向量 σ_m 与数据向量 t 垂直,也就是说待求应力向量是由数据向量 t 组成的超平面的法方向,这是一个八维的应力解超平面。实际上,应力张量矩阵具有对称性,因而待求的应力的分量只有6个,这样超平面由八维降到五维。相应地,应力向量 σ_m 和数据向量 t 的维数也要调整成六维。为方便起见,以下仍沿用 σ_m 和 t 分别代表调整后的应力向量和数据向量。Fry(1999)称这样的六维空间为sigma空间。至此,满足(3)式的应力解还有无限多,其中一些解如零向量是毫无意义的,因此为了获得有意义的解,需要对应应力解超平面进行如下约束(Fry, 1999):

$$\sum_{i=1}^3 \sigma_{ii} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (1 + \delta_{ij}) \sigma_{ij}^2 = 1 \quad (5)$$

式中, δ_{ij} 是Kronecker函数,当 i 等于 j 时, δ_{ij} 为1;否则, δ_{ij} 为零。这些约束使得应力解超平面与通过原点的超平面(如(4)式)相交,且与单位超球面相交(如(5)式),从而进一步导致应力解超平面得到无畸变降维。

假设现有 $m (\geq 4)$ 个观测数据 $t_j (j=1, 2, 3, \dots, m)$,由断层擦痕数据 n_i 和 b_i 组合成,且归一化。不妨认为它们具有多个、未知超平面的分布趋势。如同线性回归分析那样,在进行拟合应力解超平面之前,必须选择某种优化准则或目标函数,例如

常用的因变量残差平方和最小。虽然选取不同准则,所得到的拟合结果不尽相同,但是所反映的客观事实应该是一致的。这里采用的优化准则是使数据 t 到应力解 σ_m 超平面的加权欧氏距离 $D(\sigma_m, t_j)$ 平方和达到最小,即:

$$\min \cdot \sum_{j=1}^m w_j^k D(\sigma_m, t_j)^2$$

式中 w_j 是数据 t_j 的权重; k 是权重指数。假设数据 t 被分为 c 个分期或划分,分别对应着 c 个待求的应力解超平面,法向量为 $\sigma_{mi} (i=1, 2, \dots, c)$ 。每个数据 t_j 属于第 i 个超平面的隶属度记为 u_{ij} 。在模糊划分中,各隶属度已不再是硬划分下 0 或 1 的简单取值,而介于 0 与 1 之间。隶属度越大,意味着该数据越是接近某个超平面。将上式权重换为隶属度,目标函数记为 J ,于是有:

$$\min \cdot J = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^c u_{ij}^k D(\sigma_{mi}, t_j)^2$$

这实质上是 Bezdek 在提出模糊线性聚类时所定义优化条件的一个特例,详尽论述可参考有关文献 (Bezdek, 1974, 1981; 郭桂蓉等, 1993)。上式中的隶属度 u_{ij} 和超平面向量 σ_{mi} 都是待求的,可以通过对目标函数 J 分别求偏导,从偏导数为零的方程组中求解出在已知超平面或隶属度下隶属度或超平面法向量的最佳值。限于篇幅,在此省略掉了中间的推导过程。在已知超平面法向量 σ_{mi} 的情形下,最佳的隶属度 u_{ij}^* 为

$$u_{ij}^* = \left[\sum_{t=1}^c \left(\frac{D(\sigma_{mi}, t_j)}{D(\sigma_{mt}, t_j)} \right)^{\frac{2}{k-1}} \right]^{-1} \quad (7)$$

在已知隶属度 u_{ij} 下,超平面法向量的最佳估计 σ_{mi}^* 没有显示,而是在 (4)(5) 式约束下目标函数 J 的最优化解。该优化问题化简后等价于以下最优化问题 (Shan 等, 2003):

$$\begin{aligned} \min \quad & XAX^T \\ \text{s.t.} \quad & tXX^T = 1 \end{aligned}$$

式中 A 是由观察数据组成的对称矩阵; X 是变量矩阵。可以证明,与 A 最小特征值对应的特征向量将使该目标函数达到最小。

实际计算时 (6) 式目标函数的极小值是通过相互迭代来逐步逼近的,具体步骤如下:

(1) 给定 k, c 值、超平面法向量的初值 $\sigma_m^{(0)}$ 和求解精度。 k 一般取为 2, $h=0, \sigma_m^{(0)}$ 可随机设置。

(2) 在已知 $\sigma_m^{(h)}$ 下,由 (6) 式计算出 $u_{ij}^{(h)} (h)$ 。

(3) 在已知 $u_{ij}^{(h)}$ 下,求解 (4)(5) 式约束下 (6)

式的最优化解数据¹。

(4) 当 $\|u_{ij}^{(h)} - u_{ij}^{(h+1)}\|$ 和 $\|\sigma_m^{(h)} - \sigma_m^{(h+1)}\|$ 同时小于求解精度时,结束计算;否则, $h = h + 1$, 回到步骤 2。

在给出不同的划分数目 c (一般不超过 4) 后,就可以由上述方法获得不同划分。这里引入划分系数 F 概念来评价每个划分的相对好坏程度:

$$F = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^c u_{ij}^{*2}}{m}$$

F 值介于 $1/c$ 和 1 之间。一般地,该值越大,划分效果就越好;反之,越差。从一系列计算出来的划分中找出划分系数最大的划分,由此代表着最佳的划分,对应的多期应力解就是所要求的解。

3 实例分析

3.1 实例 1

该实例取自 Fry (1999) 文章中的一个简单例子 (表 1), 对其分别采用动量法和本文方法得到的结果见表 2。如划分数目 (或分期) 为 1, 各数据的隶属度等于 1, 本文方法退化成传统的方法, 与 Fry (1999) 方法基本相同。这两种方法的计算结果基本上一致, 彼此的主应变产状和应变比相差都很小, 反映出本文方法的可靠性。尽管如此, 二者在结果上仍存在着一定的差异, 归因于各自所设定的求解精度的不同。

如划分数目为 2, 得到的 2 个应力解中有一个 (第二期) 与划分数目为 1 得到的应力解相近; 另一个 (第 1 期) 明显地与其不同 (表 2)。基于动量法结果的图解分析, Fry (1999) 认为, 该例属于典型的同期断层擦痕数据, 它们在超平面上呈均匀分布, 不存在由多期断层擦痕带来的非均质性。但是, 表 2 中不同分期里具有较大隶属度的数据的百分比却大体

表 1 例 1 中的断层擦痕数据 (据 Fry, 1999)
Table 1 Fault/slip data in example 1 (after Fry, 1999)

样号	断层产状		擦痕产状	
	倾向(°)	倾角(°)	倾伏向(°)	倾伏角(°)
1	283	86	12	18
2	110	35	20	6
3	89	32	9	7
4	147	36	200	15
5	45	47	328	13
6	360	90	270	8
7	50	66	325	12

表 2 应用模糊线性聚类算法对例 1 的计算结果及与 Fry (1999) 结果的比较

Table 2 Results of the application of our method and of the moment method (Fry, 1999) to example 1

方 案	σ_1 产状(°)		σ_2 产状(°)		σ_3 产状(°)		ϕ	W/%		
	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角				
动量法的结果	359.0	2.0	263.0	73.0	90.0	17.0	4.0	100.0		
本 文 方 法	1 组	1.0	1.1	267.0	74.7	91.3	15.3	3.8	100.0	
	2 组	1 期	133.5	37.0	231.8	10.9	355.4	50.8	0.7	42.9
		2 期	181.0	0.2	271.8	56.6	90.9	33.4	5.8	57.1

注:应力比 ϕ 等于 $(\sigma_1 - \sigma_2)(\sigma_2 - \sigma_3)$, 反映出应力二次曲面的形态;某分期(划分)的 W 值表示该组隶属度为较大(在划分数目等于 2 下)或最大(在划分数目大于 2 下)时的 W 所有数据占总数据的百分比;注应力的方位和倾角分别代表着其倾伏向和倾伏角。在划分数目为 2 下,属于第 1 期的样有 2、4 和 5 号样,而 1、3、6 和 7 号样属于第 2 期。

上相等,说明明显存在着 2 期数据。这种矛盾反映出仅适用于均匀分布数据的动量法在解释非均匀分布的数据的局限性。属于第 1 期的只有 3 个样,即表 1 的 2 号、4 号和 5 号样,少于一般应力反演所需的最小样数(4),意味着第 1 期的计算结果可能没有多少意义。但考虑到划分数目为 1 和 2 下都获得相近的应力解,可以认为该例数据总体上具有较好的均匀分布。

3.2 实例 2

为了检验本文方法对多期断层擦痕数据的识别能力,由 Monte Carlo 随机取样法在给定的应力张量

下生成“人工”断层擦痕数据,然后选取不同的划分数目,采用该方法对它们进行计算,对比理论值和计算值。在生成断层擦痕数据时,还有一些限制条件:①只考虑倾角分布介于 45°和 85°之间、倾角为 0°~60°的断层,即在此范围内均匀地随机取样;②不考虑断层的内聚力和摩擦力对断层滑动的影响,也就是只要断层上拖曳力不为零,就会导致断层活动,形成擦痕。给出的 3 期主应力产状和应力比见表 3,在已知的不同应力张量下按照前述的要求分别生成 20 对断层和擦痕数据(图 1)。

由于 3 期断层擦痕数据的叠加,在等面积投影

表 3 应用模糊线性聚类算法对例 2 的计算结果

Table 3 Results of the application of our method to example 2

方 案	σ_1 产状(°)		σ_2 产状(°)		σ_3 产状(°)		ϕ	F	W/%	
	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角				
理 论	1 期	180.0	10.0	89.0	5.7	329.9	78.5	2.0	—	33.33
	2 期	140.0	5.0	235.0	44.9	45.0	44.7	2.0	—	33.33
	3 期	100.0	1.0	195.0	78.7	9.8	11.3	2.0	—	33.33
1 组	1 期	165.5	3.9	257.5	27.3	67.9	62.4	2.0	—	100.00
2 组	1 期	182.6	10.5	91.0	8.8	321.8	76.3	2.3	0.89	58.33
	2 期	314.1	10.2	221.9	11.7	84.2	74.3	21.5	0.89	41.66
3 组	1 期	180.0	10.0	89.0	5.7	329.9	78.5	2.0	1.00	33.33
	2 期	140.0	5.0	235.0	44.9	45.0	44.7	2.0	1.00	33.33
	3 期	100.0	1.0	195.0	78.7	9.8	11.3	2.0	1.00	33.33
4 组	1 期	303.7	0.0	213.7	0.0	0.0	90.0	13.2	1.00	1.66
	2 期	180.0	10.0	89.0	5.7	329.9	78.5	2.0	1.00	33.33
	3 期	140.0	5.0	235.0	44.9	45.0	44.7	2.0	1.00	31.66
	4 期	100.0	1.0	195.0	78.7	9.8	11.3	2.0	1.00	33.33

注:说明现有数据

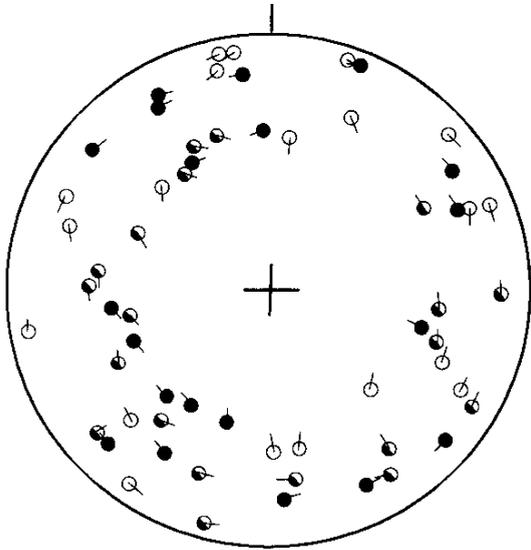


图 1 例 2 中生成的 60 个断层擦痕数据的下半球等面积投影
空心圆、半实圆和实圆分别代表第 1、2 和 3 期
断层的法线,一端处于圆心的线段代表擦痕倾伏向

Fig. 1 Lower-hemisphere, equal-area projection of simulated fault/slip data in example 2. Unfilled, half-filled and fully-filled circles represent the normal to fault planes in the category of prescribed subset 1, 2 and 3 respectively. Short lines with an end in the circle center represent the plunges of fault striations

图上呈现出围绕直立轴的环带分布(图 1),从而导致数据在超空间上的非均匀分布。在不同的划分数

目 c 下,由本文方法可以获得这些数据的不同划分或分期(表 3)。表 3 中,划分数目为 1 和 2 的计算结果与理论值相差很大,无法解释。这也表明传统方法对于多期数据难于奏效。随着划分数目的增加,划分系数增大。当划分数目为 3 时,划分系数几乎等于 1,主应力产状和应力比的计算值与理论值非常接近。这种划分仍然出现在划分数目为 4 的划分中,虽然划分数目增大,但是划分系数的增大却不明显,并且新增的划分只兼容很少的几个数据。因此可以认为,划分数目为 3 的划分是最佳划分,可最好地反映真实情况。以上分析说明,该方法能够很好地识别多期断层擦痕数据。

3.3 实例 3

该实例取自阿尔金断裂带中段,具体情况请参考有关的文献(谢富仁等,1989)。谢富仁等(1989)实测了该断裂带中段不同区段的断层擦痕,采用“Etchcopar”程序进行数据处理。他们的计算结果表明,在不同区段得到的最大主应力普遍具有小的倾伏角,且集中在 NS 和 EW 两个方向,进而依据观测样本的时代归属,认为反映出区内在新构造期经历了两期主要的构造作用。应该注意到,“Etchcopar”程序(Etchcopar 等,1981)是采用传统算法(见前述)编写的,其本身无法处理多期断层擦痕数据。

表 4 是应用本文方法对所有区段实测的 198 个断层擦痕数据的计算结果。表中无论划分数目多

表 4 应用模糊线性聚类算法对例 3 的计算结果

Table 4 Results of the application of our method to example 3

方案		σ_1 产状(°)		σ_2 产状(°)		σ_3 产状(°)		ϕ	F	W/%
		方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角			
1 组	1 期	53.4	9.3	144.4	5.7	265.6	79.1	2.11	—	100.0
2 组	1 期	166.7	0.7	256.9	16.1	74.5	73.9	1.51	0.82	50.00
	2 期	72.2	4.2	230.7	85.5	342.0	1.7	110.93	0.82	50.00
3 组	1 期	351.1	2.9	260.6	11.2	95.5	78.4	2.46	0.78	29.29
	2 期	73.4	5.8	175.3	64.0	340.6	25.3	12.27	0.78	37.87
	3 期	59.4	3.4	149.8	7.1	304.0	82.1	0.52	0.78	32.82
4 组	1 期	78.7	12.0	199.3	67.4	344.5	12.8	12.78	0.74	30.30
	2 期	339.0	2.3	248.0	23.1	74.4	66.8	0.59	0.74	29.29
	3 期	227.0	3.6	136.7	6.0	347.9	83.0	1.27	0.74	19.69
	4 期	52.8	28.5	148.1	9.7	255.0	59.6	1.03	0.74	20.70

注:说明现有数据

少,计算出的最大主应力都具有很小的倾伏角,这与谢富仁等(1989)计算结果非常一致。当划分数目为2时,划分系数最大,而随后划分数目增大,划分系数缓慢减小,因此可以认为划分数目为2时的计算结果最好。在划分数目为2下得到的两个最大主应力倾伏向分别为 $166^{\circ}71'$ 和 $72^{\circ}15'$,也近似地代表着NS和EW两方向的构造作用。虽然同处于区域挤压环境,但是这两期的应力状态不同,第1期属于挤压状态(最小主应力近直立),第2期属于走滑状态(最小主应力近水平),并且第1期的应力比远小于第2期的应力比。限于篇幅,这里的分析只是针对全区的,没有对各区段分别计算。

4 结论

多期断层擦痕是自然中普遍存在的地质现象。以往处理此问题的算法都基于硬划分,忽视了数据自身固有的不确定性,而本文提出的模糊线性聚类算法正好弥补了这一点。该类算法不仅具有深刻的理论基础、易于编程和计算量小的优点,而且还可以针对具体问题,构造出更为精细的最优化准则,可望解决由地质取样带来的数据正交性。实例应用也验证该方法的可靠性和有效性。

致谢 计算工作是在中国科学院长沙大地构造研究所“大地构造变形与动力学数值模拟实验室”完成的,在此致以谢意。

参 考 文 献

郭桂蓉,庄钊文. 1993. 信息处理中的模糊技术. 长沙:国防科技大学

出版社 416.

谢富仁,刘光勋. 1989. 阿尔金断裂带中段区域新构造应力场分析. 中国地震, *3*(3):26~36.

References

Angelier J. 1979. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, *56*:17~26.

Bezdek J C. 1974. Cluster validity with the fuzzy sets. *J. Cybernetics*, *3*(3):58~73.

Bezdek J C. 1981. Detection and characterization of clustering algorithms. II, *J. Appl. Math.*, *40*(1):21~33.

Etchecopar A, Vasseur G, Daignieres M. 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *J. Struct. Geol.*, *3*:51~65.

Fry N. 1999. Striated faults: visual appreciation of their constraint on possible paleostress tensors. *J. Struct. Geol.*, *21*(1):7~22.

Guo Guirong, Zhuang Zhaowen. 1993. Fuzzy techniques in the information processing. Press of National Defense University of Science and Technology 416 (in Chinese).

Hardcastle K C, Hills L S. 1991. Brute3 and Select: Quickbasic 4 programs for determination of stress tensor configurations and separation of heterogeneous. *Computer & Geosciences*, *17*(1):23~43.

Nemcok M, Lisle R D. 1995. A stress inversion procedure for polyphase fault/slip data sets. *J. Struct. Geol.*, *17*(1):1445~1453.

Shan Y, Suen H, Lin G. 2003. Separation of polyphase fault/slip data: an objective-function algorithm based on hard division (Available on the line). *J. Struct. Geol.*, *25*(6):829~840.

Xie Furen, Liu Guangxun. 1989. Analysis of neotectonic stress field in area of the central segment of Altun fault zone, China, *Earthquake Research in China*, *3*(3):26~36 (in Chinese).