

文章编号: 0253-3782(2005)03-0317-07

# 构造活动模式变化对 $b$ 值影响的实验研究<sup>\*</sup>

陈顺云 刘力强 马胜利 马 瑾

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室)

**摘要** 借助新型声发射观测系统, 对两种构造活动模式转变对  $b$  值的影响进行了初步实验研究. 第一个实验通过改变加载方向使构造活动模式从挤压型雁列变为拉张型雁列, 得出前一阶段  $b$  值比后一阶段要高; 第二个实验通过持续加载使拉张型雁列变为拐折断层, 与第一个实验类似, 前一阶段  $b$  值比后一阶段要高. 说明  $b$  值可能蕴含有构造活动模式的某些特征, 有可能成为分析区域构造活动模式的一种新手段.

**关键词** 声发射  $b$  值 构造活动模式 雁列断层 拐折断层

**中图分类号:** P315.3<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A

## 引言

Gutenberg-Richter 经验关系  $\lg N = a - bM$  (G-R 曲线) 中  $b$  值分析是地震预报的重要方法之一, 它常用来分析构造变形状态和区域应力场. 众多研究者从天然地震、实验模拟(声发射)以及理论探讨等诸多方面, 对  $b$  值进行了大量的研究(Mogi, 1962; Scholz, 1968; 李全林等, 1978; 马鸿庆, 1978; 陈颢, 1977; 耿乃光, 1986; 杜异军, 马瑾, 1986; 蔡戴恩等, 1987; 尹祥础等, 1987; 李红等, 1987; 马瑾等, 1990; 许昭永等, 1990; 曾正文, 1993; 刘力强等, 1999, 2001; 蒋海昆等, 2000; Lei *et al.*, 2000; 吴忠良, 2001; 陈培善等, 2003). 尤其, Mogi(1962)通过实验认为  $b$  值的变化与介质的不均匀性有关, 愈不均匀的介质, 其  $b$  值越高; 而 Scholz(1968)则认为  $b$  值与应力状态关系很大, 随着应力水平的增加  $b$  值亦降低. 两种观点曾争论不休. 事实上,  $b$  值的变化涉及两方面因素: ① 应力场的变化; ② 介质内部结构的变化. 而且应力场的变化对  $b$  值的影响需要通过介质结构变化来体现. 应力场和结构的相互影响产生复杂的动力学模型, 形成了不同的构造活动模式. 为此, 不同构造活动模式变化对  $b$  值活动的影响值得深入研究.

实验岩石变形过程中声发射  $b$  值的研究, 不仅有理论上的难度而还强烈依赖于实验技术. 以往的实验声发射资料观测系统存在较大缺陷, 主要表现在数据转移造成的“死时间”过长, 大量 AE 信号丢失; 动态范围太窄, 能量测不准两个方面. 近年来, 中国地震局地质研究所研制成一套新的声发射记录系统<sup>①</sup>, 其各项技术指标分别是:

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(40072067)和国家“十五”科技攻关项目(2004BA601B01)资助.

① 刘力强等, 2001. 卧式双向加载实验系统, 验收报告. 中国地震局地质研究所, 18~24  
2004-01-12 收到初稿, 2004-10-25 收到修改稿并决定采用.

1) 前置放大器: 增益 50 倍, 带宽 2 MHz, 输入阻抗  $10^{12} \Omega$ , 输出阻抗 50  $\Omega$ .

2) 16 个采样通道. 最高采样频率 40 MHz, A/D 转换分辨率为 12 bit, 系统噪声 5~6 个十进制数, 信噪比为 57 dB. 增益为 1~500 倍, 分档可调, 放大倍数、触发逻辑与门槛可编程控制. 每道采样长度可调, 最大缓存可达到 32 Kword. 由于采用了分布式并行控制方法, 缩短了数据转存时间, 每秒钟可以记录声发射事件波形 110 次左右, “死时间”约 9 ms.

这套系统在“死时间”与动态范围两个方面都取得了显著进展, 因此在一定程度上克服了以往的缺陷, 使观测结果得到改善. 本文借助上述新型声发射观测系统, 对两种构造活动模式变化对  $b$  值带来的影响进行了初步实验研究.

# 1 实验及数据处理方法

实验中, 通过改变加载条件而改变标本的构造活动模式. 标本有两种: 挤压型雁列断层和拉张型雁列断层, 均为山东产的辉长岩. 标本尺寸为 50 cm×50 cm×5 cm. 采用卧式双向加伺服加载机控制标本变形: ① 通过交换轴向力( $p_1$  和  $p_2$ )加载方式, 使挤压型雁列断层向拉张型雁列断层转变(右型左阶→左型左阶); ② 通过增加轴向力( $p_1$ ), 使标本内部产生新断层, 最终使拉张型雁列断层向拐折断层转变.

声发射  $b$  值分析的关键问题是事件能级的确定. 声发射能级的定义方法有多种, 一是利用全波能量进行定义(曾正文, 1993); 二是利用声发射信号波上各点的应变能增量进行定义(刘力强等, 1999a, b); 三是利用声发射尾波进行定义(王彬等, 1999); 四是利用声发射记录为加速度的特点依地震学强地面运动特征进行定义(蒋海昆等, 2000), 等等. 本文利用全波能量法, 定义传感器输出电压平方和的对数为 AE 能级. 由于观测系统灵敏度和动态范围所限, 计算时需要确定有效的  $b$  值能级区间. 可取累计频度-能级分布图上低能级段到线性段的转折点作为计算区间的下限, 取高能级段偏离线性的转折点作为计算区间上限(图 1). 本文是将全部的 AE 事件作能级分布图, 按上述方法去掉不合适的 AE 事件, 然后对剩下事件进行  $b$  值扫描. 还应该指出, 由于还没有标定解决声发射信号的绝对标定问题, 声发射能级反应的仅是事件的相对大小, 为此, 不同方法得出的结果很难作精确对比分析.

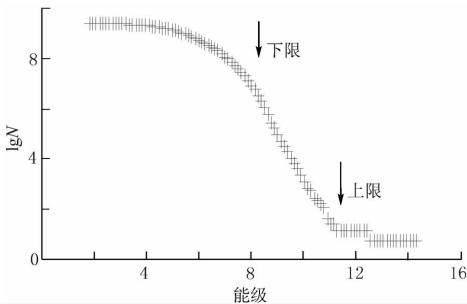


图 1  $b$  值扫描能级区间示意图

声发射波形记录中, 大事件常常出现“削顶”现象. 本实验中, 将同一声发射探头的信号同时接入两个不同增益的记录通道, 在高增益通道造成“削顶”的声发射波形, 在低增益通道则会大大降低“削顶”现象, 从而提高了能级观测动态范围.

$b$  值最常用的计算方法有两种: 最小二乘法和最大似然法. 最小二乘法相当于对小地震震级权重小, 更重视含有丰富信息的较大地震的作用; 最大似然法对所有地震的震级用同样的权重求平均, 相当于给数量众多的小地震信息加权. 考虑到声发射本身特点及与以往工作的衔接(刘力强等, 1999, 2001), 本文采用最小二乘法计算. 由于微分频度对震级分档较敏感, 故本文采用累计频度.

实验数据计算方法, 采用等事件数量窗对整个实验过程进行滑动  $b$  值扫描. 其窗宽为

100 个事件, 能级分档为 100, 窗口移动步长为 1 个事件, 每一个窗最后一个事件的产生时间为该窗  $b$  值的对应时间。

2 挤压型雁列向拉张型雁列构造活动模式转变

对于挤压型雁列标本, 共记录到约 25 000 个声发射事件. 考虑到研究目的, 本文选取 4 400~5 290 s 时间段为研究对象(图 2). 4 400~4 800 s,  $p_1$  方向上为载荷控制, 并保持在 15 t,  $p_2$  方向上均为位移控制; 4 800~5 290 s,  $p_1$  变为位移控制,  $p_2$  均为载荷控制, 并保持在 15 t. 整个过程, 位移控制的速率恒定, 为 20  $\mu\text{m/s}$ . 该段内, 两个驱动力方向  $p_1$  和  $p_2$  交换加载方式, 大小顺序发生变化, 相应的断层作用方式也从挤压型雁列活动模式变为拉张型雁列活动模式。

从图 2 中  $b$  值随时间变化过程可以看出, 其构造活动模式发生变化时  $b$  值有明显变化. 在  $p_1 > p_2$  时, 为挤压型雁列活动模式,  $b$  值在 1.1 上下波动(4 500 s 之前的变化曲线略去); 当  $p_1 < p_2$  时表现为拉张型雁列活动模式, 这时  $b$  值出现了一个陡降, 降为围绕 0.8 上下波动。

从图 2 中 G-R 曲线可以看出, 从挤压型雁列向拉张型雁列转变时, G-R 曲线变得更加平缓, 即  $b$  值明显减小, 从 1.18 降到 0.83( $b_1$ ), 这与时间过程中  $b$  值减少相对应。

据上述分析可得: 改变加载条件使构造活动模式从挤压型雁列变为拉张型雁列, 发现前一阶段  $b$  值比后一阶段要高。

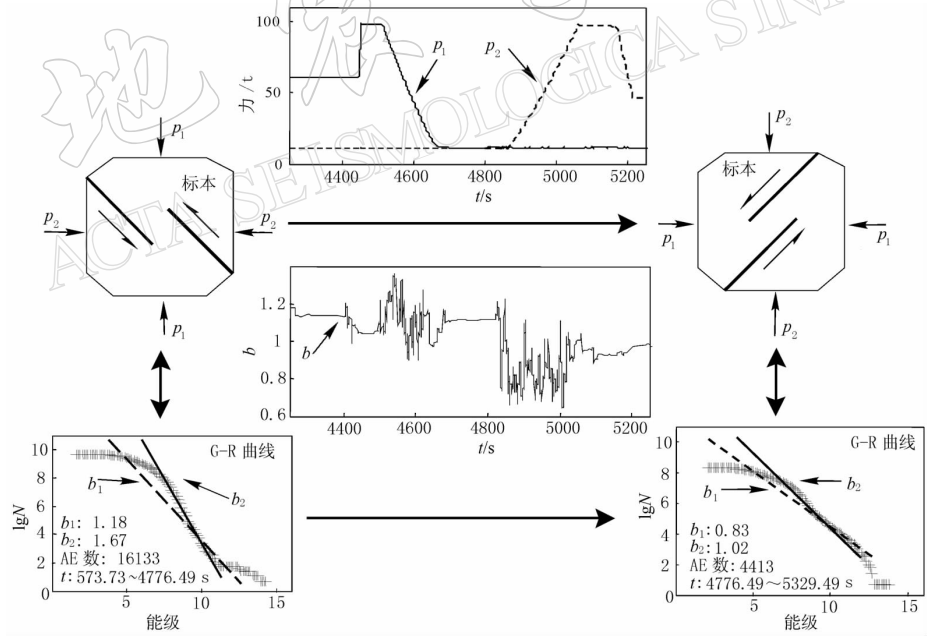


图 2 挤压型雁列向拉张型雁列构造活动模式转变时的载荷与  $b$  值变化特征

图 2 和图 3 的 G-R 曲线中部分图给出两个  $b$  值:  $b_1$  和  $b_2$ .  $b_1$  表示与时间扫描过程计算方式一样, 所得结果与时间扫描过程对应较好, 计算  $b_1$  声发射数为图中所示的声发射数;  $b_2$  为根据 G-R 曲线线性段计算所得结果. 对于未给出两个  $b$  值的图形, 意为  $b_1 = b_2 = b$ .

3 拉张型雁列向拐折断层活动模式转变

不仅改变轴向力的大小顺序能改变雁列断层的活动模式，即使轴向力大小顺序不变，整个加载过程中，断层的活动模式也会发生变化。本实验第二块标本(拉张型雁列构造)中，随着  $p_1$  增加，拉张雁列断层岩桥区连通，新断层与原来的雁列断层组成拐折断层(图 3)，形成新的构造活动模式。拉张型雁列向拐折构造活动模式转变时的载荷与  $b$  值特征见图 3。

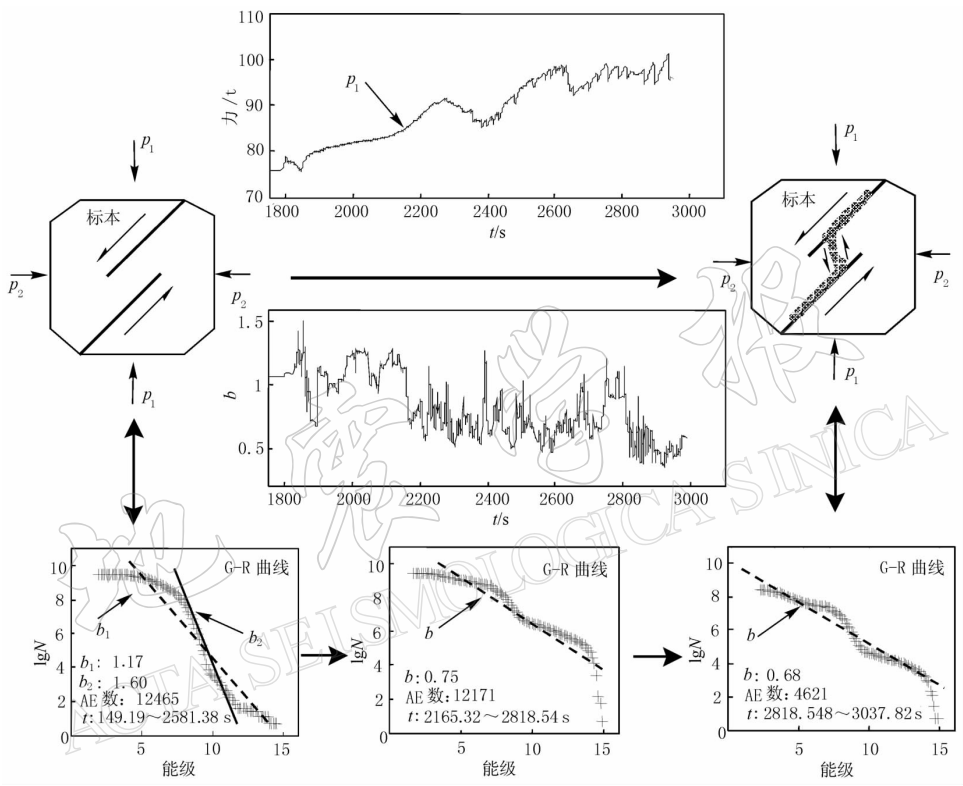


图 3 拉张型雁列向拐折构造活动模式转变时的载荷与  $b$  值变化特征( $p_2=11\text{ t}$ )

本次实验共记录到约 30 000 个声发射事件。根据本文研究目的，此处选取 1 800~3 017 s 进行研究。该段内， $p_1$  为位移控制，位移控制的速率恒定，也为  $20\text{ }\mu\text{m/s}$ ； $p_2$  为载荷控制，保持为 11 t。 $p_1$  增加可分为 3 个阶段，第一阶段持续增加，并没有出现粘滑现象，这个阶段与拉张型雁列断层组合相对应。第二阶段， $p_1$  还基本上处于准静态变化中，但已出现相对较小的粘滑事件，该阶段可看成一个过渡性阶段。第三阶段，表现为纯粹的粘滑作用，与拐折构造活动模式相对应。

从  $b$  值的时间过程看，这 3 个阶段  $b$  值区分明显。第一阶段在 1.1 上下波动(1 800 s 前的情况略去)；第二阶段降至围绕 0.7 上下波动，在本阶段的末期  $b$  值逐渐抬升至 0.9，然后突然下降至 0.5；第三阶段， $b$  值在 0.5 上下波动，直到实验结束。

从 G-R 曲线上看，从拉张型雁列向拐折断层变动时，G-R 曲线明显变得平缓，预示着  $b$  值减小，从 1.17( $b_1$ )降到 0.75，最后为 0.68。其中 0.68 与时间过程的 0.5 有偏差，其原

因是在时间过程中,该阶段  $b$  值是先上升再下降,而 G-R 曲线给出的  $b$  值实际为综合结果,所以二者会有些偏差.第二、第三阶段的 G-R 曲线形状相似,说明这两个阶段主要由同一种机制——粘滑——控制,破裂机制处于次要地位.实际上,裂纹扩展往往属于局部特征,所产生的声发射事件一般较小;粘滑事件则预示着断层出现错动,属于断层整体活动,对标本有明显的控制作用,发生的声发射事件较大.

据上分析可得:通过持续加载使拉张型雁列变为拐折断层,与第一个实验类似,前一阶段  $b$  值比后一阶段要高.

## 4 讨论和结论

1) 改变加载条件可使构造活动模式发生变化.本实验中,通过改变加载方向使挤压型雁列活动模式向拉张型雁列活动模式转变;通过轴向力的不断加载使岩桥区连通,导致拉张型雁列向拐折构造活动模式转变.据上文所述,声发射  $b$  值特征受构造活动模式影响较为明显,构造活动模式发生变化, $b$  值将随之发生变化.第一个实验通过改变加载条件使构造活动模式从挤压型雁列变为拉张型雁列;第二个实验通过持续加载使拉张型雁列变为拐折断层.发现两个实验均是前一阶段  $b$  值比后一阶段要高.说明  $b$  值可能蕴含有构造活动模式的某些特征.

2) 如前所述,进行  $b$  值时间扫描之前,曾对能级区间进行限定,但具体到某一窗口时,这种限定存在一定偏差.当窗过小时,局部起伏较大,整体特征受到淹没;窗过大则局部特征又会被平滑掉.本文对事件数为 50, 80, 100, 300, 500, 800 等多个事件窗反复计算结果表明:构造组合型式变化, $b$  值随之变化的趋势并不随着窗大小的改变而改变,只是  $b$  值大小不尽相同(图 4),能级分档对  $b$  值影响不明显.实际上,能级定义方法不同,所得  $b$  值的大小也不同,且不同方法所得结果难以直接比较.本文更关心  $b$  值的变化规律, $b$  值的绝对值对本文分析不会造成过多影响.

3) 通过本实验的研究可以初步看到:如果应力变化不足以造成结构变化时, $b$  值随应力变化有一种相同的特征;反之当介质的结构变化形成新的构造活动模式时,则  $b$  值会出现一个明显的突变(陡降或突升).这带来一个启示:是否可以利用  $b$  值来推测断层的活动,或者说反演断层的活动规律? 对于一个特定断层而言,周围环境是可以探知的.断层活动往往是受区域应力场等因素的激发,如果通过其它手段调查清楚引起断层活动的因素,并结合  $b$  值活动情况,可进一步反演断层的活动规律.这可能成为  $b$  值应用的一个新方向.

总之,本文对两种构造活动模式转换对  $b$  值的影响进行了初步实验研究,取得了一些

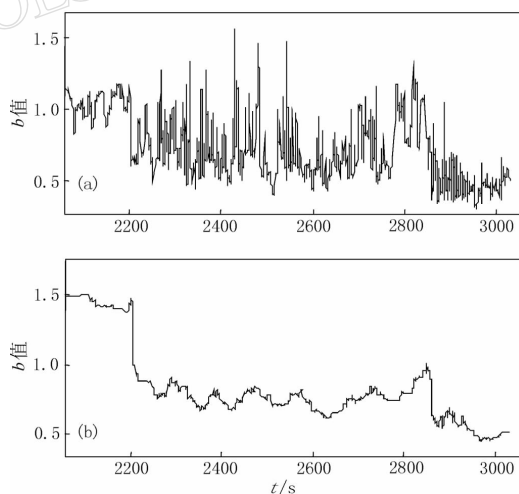


图 4 典型窗对  $b$  值的影响

(a) 窗为 50; (b) 窗为 500. 标本为拉张雁列断层; 能级分档均为 20

有意义的结果。然而,由于没有进行声发射定位,因而无法判定所有事件都发生在雁列区,边缘效应及其它不期望发生的事件都可能被一并统计。根据以往研究结果,只含雁列构造的岩石声发射实验,声发射大多数发生在雁列区。边缘效应主要发生在实验初期,本文只选取实验中后期的一段进行分析,边缘效应一般不明显。特别是,由于无重复性实验,故其结果有待于更多的实验证实。

本文数据来自中国地震局构造物理开放实验室郝锦绮等进行的实验,实验参加人员包括:吴秀泉、刘天昌、王凯英、巴金、郝锦绮、钱书清、郭子祺、周建国、龙海丽等;资料的分析过程中,云南省地震局的许昭永研究员曾提出许多有益建议。在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 蔡戴恩,方亚如,隋旺华,等. 1987. 岩石破裂全过程的声发射  $b$  值[J]. 地震学报, **9**(增刊): 401~406
- 陈培善,白彤霞,李保昆. 2003.  $b$  值和地震复发周期[J]. 地球物理学报, **46**(4): 510~519
- 陈颢. 1977. 声发射技术在岩石力学研究中的应用[J]. 地球物理学报, **20**(4): 312~322
- 杜异军,马瑾. 1986. “入”字式断层声发射  $b$  值及震级-频度关系的意义[J]. 地震地质, **8**(2): 1~10
- 耿乃光. 1986.  $b$  值模拟实验的进展和我国  $b$  值模拟实验的开端[J]. 地震学报, **8**(3): 330~332
- 蒋海昆,张流,周永胜. 2000. 不同围压条件下花岗岩变形破坏过程中的声发射时序特征[J]. 地球物理学报, **43**(6): 812~825
- 李红,尹祥础,李世恩. 1987. 单轴压下单预制裂纹岩石试件声发射  $b$  值的实验研究[J]. 地震学报, **9**(增刊): 393~400
- 李全林,陈锦标,于淦,等. 1978.  $b$  值时空扫描——监视破坏性地震孕育过程的一种手段[J]. 地球物理学报, **21**(2): 101~125
- 刘力强,马胜利,马瑾,等. 2001. 不同结构岩石标本声发射  $b$  值和频谱的时间扫描及其物理意义[J]. 地震地质, **23**(4): 481~492
- 刘力强,马胜利,马瑾,等. 1999. 岩石构造对声发射统计特征的影响[J]. 地震地质, **21**(4): 377~386
- 马鸿庆. 1978. 华北地区几次大地震前的  $b$  值异常变化[J]. 地球物理学报, **21**(2): 126~141
- 马瑾,雷兴林,焦文捷,等. 1990. 京津唐地区震级频度关系的空间扫描[J]. 地震地质, **12**(3): 227~235
- 吴忠良. 2001. 关于  $b$  值应用于地震趋势预测的讨论[J]. 地震学报, **23**(5): 548~551
- 王彬,许昭永,赵晋明,等. 1999. 含固体试样破裂孕育过程中声发射的强度特征及其地震学意义[J]. 地震地质, **21**(4): 411~416
- 许昭永,耿乃光,梅世蓉. 1990. 岩石破裂声发射  $m$  值和岩石力学性质[J]. 地震研究, **13**(3): 291~297
- 尹祥础,李世恩,李红,等. 1987. 从断裂力学观点探讨  $b$  值的物理实质[J]. 地震学报, **9**(4): 364~374
- 曾正文. 1993. 典型不连续岩体变形与滑动过程的声发射实验研究[D]: [学位论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 10~20
- Lei X L, Nishizawa O, Kusunose K, *et al.* 2000. Compressive failure of mudstone samples containing quartz veins using rapid AE monitoring: the role of asperities[J]. *Tectonophysics*, **328**(3/4): 329~340
- Mogi K. 1962. Study of the elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena[J]. *Bull Earth Res Inst, Univ Tokyo*, **40**: 125~173
- Scholz C H. 1968. The frequency-magnitude relation of micro fracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **58**: 399~415

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON VARIATION OF $b$ VALUE DURING DEFORMATION OF ROCK SAMPLES WITH DIFFERENT STRUCTURAL MODELS

Chen Shunyun Liu Liqiang Ma Shengli Ma Jin

(State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China  
Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A preliminary study of  $b$  value of rocks with two kinds of structural models has been made on the base of a new acoustic emission recording system. It shows that  $b$  value of the sample decreases obviously when the sample with compressive *en echelon* faults changes into a tensile one after interchange occurs between stress axis  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$ . A similar example is observed when the sample with tensile *en echelon* faults changes into that with a bend fault after two segments of the *en echelon* fault linking up. These facts indicate that the variation of  $b$  value may contain the information of the regional dominant structural model. Therefore,  $b$ -value analyses could be a new method for studying regional dominant structural models.

**Key words:**  $b$  value of acoustic emission; structural model; *en echelon* fault; bend fault