

# 郯庐断裂带构造演化的数值分析

武红岭 陈柏林 王小凤 王薇

(中国地质科学院地质力学研究所)

**摘要** 本文用粘性牛顿流体有限元数值方法模拟郯庐断裂带主要构造演化阶段的应力场、形变场和运动速率,探讨各构造期的动力来源、边界力的作用方式及岩石物性的影响作用。旨在进一步说明郯庐断裂带多期、多次和性质各异的构造活动与华北陆块、下扬子陆块、西太平洋板块、菲律宾板块等构造单元的运动密切相关。除了东亚大陆周边板块运动造成的推力,与此相伴的地热异常也是构成郯庐断裂带各期应力场,特别是拉张期应力场特征的重要动力条件之一。

**关键词** 郯庐断裂带 牛顿流体 应力场 构造演化 动力机制

## 0 引言

郯庐断裂带的形成、发展和演化经历了多期、多次、性质多变的构造活动历史,是一条具悠久活动历史的复杂断裂带。尽管在局部及细节上仍存在着诸多争议,但总体上郯庐断裂在燕山早期曾发生过较大规模的左行平移运动;燕山中晚期到喜马拉雅期的构造面貌表现为拉张特征,经历过多次张压扭裂交替更迭的构造运动;挽近期的断裂活动表现为右旋扭动;这些特征已得到多数人的认可。本文根据构造带各历史时期的形变和运动特征,用有限元数值分析方法模拟该构造带主要演化阶段的应力场、形变场和位移速率,探讨断裂带形成演化的动力条件,边界受力方式及物性参数。

## 1 理论模型——牛顿流体

在随时间长期缓慢的受力和形变过程中,岩石圈,特别是中下地壳和上地幔岩石主要表现为塑性或粘性的永久形变。从郯庐断裂带构造形变来看,岩石的流变性也是相当显著的。为此,作者在数值模拟分析中,采用粘性流体——牛顿流为岩石材料模型。一般的常系数粘性牛顿流体遵从的基本方程是著名的 Navier-stokes 方程:

$$\rho d\vec{V}/dt = \vec{f} - \nabla p + \nabla(\lambda \nabla \cdot \vec{V}) + \nabla \cdot (2\mu \mathbf{E}) \quad (1)$$

式中: $\rho$  介质密度,假定为常数; $\mu, \lambda$  分别称为第一和第二粘性系数; $p$  为流体静压力。 $\vec{f}$  为体积力, $\mathbf{E}$  为应变率张量, $\vec{V}$  为运动速度矢量, $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k})$  是哈密尔顿微分算子。如果忽略由于加速度而引起的惯性力和随体导数中的平流项,方程(1)简化为平衡方程(2)。当粘滞性很大、流动很缓慢、介质接近固态时这一简化被认为是合理的。

$$\vec{f} - \nabla p + \nabla(\lambda \nabla \cdot \vec{V}) + \nabla \cdot (2\mu E) = 0 \quad (2)$$

已耦合在上述方程中的一个最重要的方程是应力张量和应变率张量之间所满足的广义牛顿公式:

$$P = (-p + \lambda \nabla \cdot \vec{V})I + 2\mu E \quad (3)$$

式中  $I$  是单位矩阵, 第一粘性系数  $\mu$  与剪切应变率有关, 第二粘性系数  $\lambda$  与体积应变率有关。若再做不可压缩假定, 即:  $\nabla \cdot \vec{V} = 0$  (4)

得到应力和应变率之间的简化关系式

$$P = -pI + 2\mu E \quad (5)$$

这就是不可压缩牛顿流体本构关系, 介质的物理力学性质由粘性参数  $\mu$  唯一确定。牛顿流模型能够模拟岩石在外力作用下变形随时间增长的过程, 介质的形变是不可恢复的永久形变, 而岩石圈介质的永久形变为揭示地球内部提供了丰富可靠的信息。

## 2 数值分析中的优化计算方法

用有限元数值模拟方法反演边界力、内部应力场和物性参数时, 为了拟合内部的实测数据, 往往需要反复调整各参数, 依据经验的调整过程仍然避免不了盲目性, 工作显得繁杂无章, 顾此失彼, 达不到满意效果。本文采用文献[10]的优化方法, 在线性粘性体(牛顿流)的前提下, 运用叠加原理, 通过最小二乘法反演边界力的大小和方向, 再作用于边界上, 求出郯庐断裂带的应变率、应力场和速度场。

方法简述如下: 将要反演的边界按需要分为数段, 每段的作用力被认为是均布的且分为  $F_x$  和  $F_y$  两个方向, 每个  $F_x$  (或  $F_y$ ) 又可看作是单位力乘以待定参数  $\alpha_i$ 。若用  $a_{ij}$  表示  $j$  点处 (有实测值的点) 由于在  $i$  段边界上施加单位力而得到的计算位移或应力值,  $b_j$  代表  $j$  点处的实际观测值, 则  $\alpha_i$  应满足方程

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} \alpha_i = b_j \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

$n$  为参数的个数或边界分段数的两倍。若有  $m$  个观测点, 可得到  $m$  个方程。当  $m=n$  即观测数待定参数个数相等时, 可直接求解方程组。若  $m > n$ , 用多元回归—最小二乘的优化方法解出待定参数  $\alpha_i$ 。从而确定各段均布边界力  $F_{xi}$  和  $F_{yi}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )。

以上方法主要用于郯庐断裂带挽近期构造应力场的反演分析。

## 3 郯庐断裂带构造演化数值分析

### 3.1 郯庐断裂带平移期的构造形变场、应力场的数值模拟

**3.1.1 计算模型、物性参数和边界条件** 根据地质研究结果, 郯庐断裂及邻区的一级构造单元可由 5 条边界断裂划分为 3 大地块 (图 1)。有限元计算模型的范围大致在东经  $110^\circ - 125^\circ$ , 北纬  $30^\circ - 42.5^\circ$  之间, 选取郯庐断裂带的 3 条主干断裂和重要分界线作为构造模型。考虑到断裂带和非断裂带, 活动带和稳定区的构造形变特征不同, 经过调整对比确定的横向不均匀物性参数列于表 1。

由郯庐断裂带的空间展布形态, 断裂两盘的构造形变和运动特征反推的一组可能的边界力作用方式 (大小和方向, 单位 MPa) 用图 1 中的箭头表示。模型南部边界东西两段施加了有

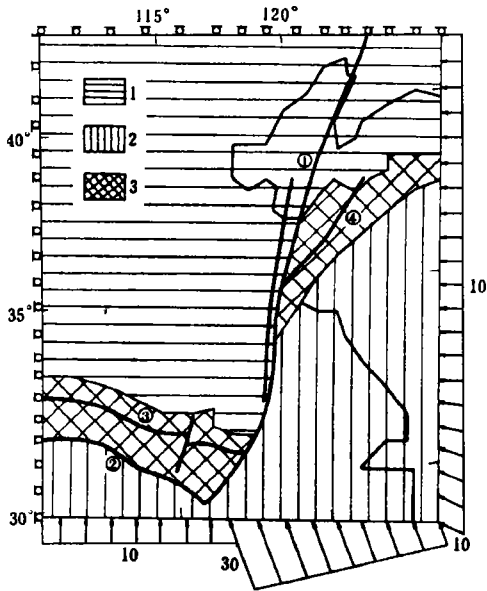


图1 郯庐断裂带平移期有限元计算模型图

Fig. 1 The tectonic model of Tanlu structural system in strike slip period for Finit Element calculation

1. 华北地块; 2. 扬子地块; 3. 胶南—大别地块  
 ① 郯庐断裂主带; ② 大别山南侧断裂;  
 ③ 北淮阳断裂; ④ 五莲—烟台断裂

差异的向北推挤力, 以此模拟华南地块与华北地块拼接时产生的挤压力, 以及太平洋板块向北漂移, 断裂带东西两盘相对错动引起的左行剪切平移。同时在东侧边界施加一定的向西压力, 使得郯庐断裂兼有走滑剪切和挤压性质。西侧和北部边界约束状况见图 1。

表 1 郯庐断裂带岩石物性参数表

Tabel. 1 Rock mechanical property of Tanlu structural system

编号	平 移 期		挽 近 期	
	构造单元	粘滞度 ( $10^{22} \text{Pa} \cdot \text{s}$ )	构造单元	粘滞度 ( $10^{22} \text{Pa} \cdot \text{s}$ )
1	华北地块	1.0	华北地块	1.0
2	扬子地块	0.5	扬子地块	6.0
3	胶南—大别地块	5.0	胶辽盆地	0.8
4	断裂及软弱带	0.1	渤海	5.0
5	刚性块	1.0	胶南—大别弧	5.0

### 3. 1. 2 结果分析

(1) 运动速率与形变率 从图 2a 可看出东盘相对于西盘的运动速率大, 说明东盘有相对向北的位移趋势, 由此推算出的相对年位移量在靠近断裂带两侧约为 5—10mm/a。略大于用地质方法推测的年平移量(5.17mm/a)。图 2b 显示: 在靠近现今郯庐断裂中南段两侧剪切的形变率量值大,

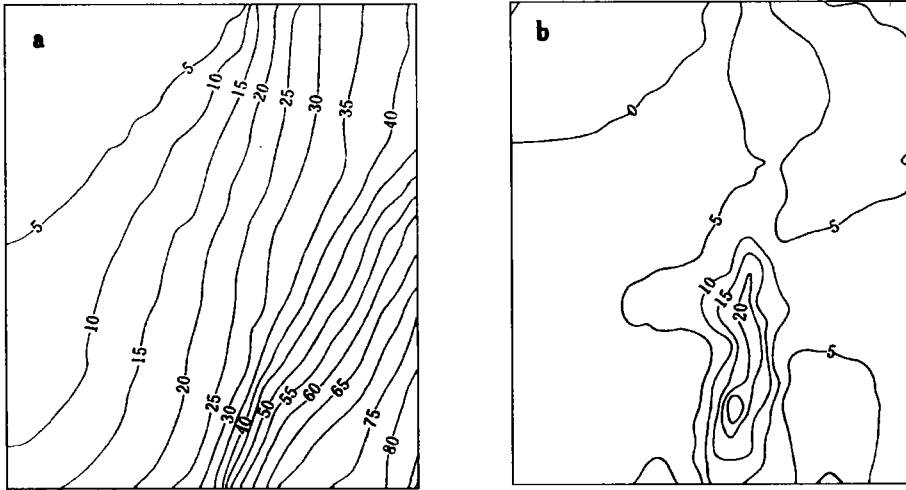


图 2 郯庐断裂带平移期形变率模拟图

Fig. 2 Strain rates map of Tanlu structural system in strike slip period

- a. 南北方向位移速率  $\dot{U}$ , 等值线( $1 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ); b. 剪切形变率  $\dot{\epsilon}_s$ , 等值线( $1 \times 10^{-15} / \text{s}$ )

也是形变梯度最大之处。剪切形变率随离开断层的距离增大而减小,数值模拟结果与实测数据  $0.89 \times 10^{-14} / \text{s}^{[5]}$  相当接近。

(2) 应力场 从图 3a 中可看出郟庐中南段平移期主应力方向以 NNW 为主,表明断裂带除沿走向剪切错移外,断层面上还有一定的压力。此外主应力方向受到断裂带物性参数的影响,东盘主应力方向在跨越郟庐断裂时发生偏转。计算表明南部边界东段大别弧和胶南附近区域受到较大的挤压力。可以解释为华北地块与华南地块拼接时,由于边界的非线性弧形构造的尖突部位最先受到华南地块的碰撞而引起较大的挤压力。图 3b 显示剪应力集中区位于大别山和胶南造山带,剪应力状况对郟庐断裂带的形成非常有利。

通过郟庐断裂带平移期应力场的数值模拟,可以获得如下认识:郟庐断裂带形成初期最有可能的动力来源之一是扬子陆块与华北陆块在晚三叠世开始拼接时产生 SN 向的挤压力。由于陆块弧形边缘的不规则性,造成差异性挤压力,加之太平洋板块的向北漂移,使郟庐断裂带东西两盘产生差异性左行平移运动。根据构造形变特征反演的趋动力来自东南方向,与西太平洋板块运动方向 NNW 吻合,导致郟庐断裂兼有压和剪的性质。在边界力量级为 10MPa,选取的粘性参数在  $10^{22} \text{Pa} \cdot \text{s}$  量级范围内,断裂带年位移量和形变率的计算值与实测数据一致。

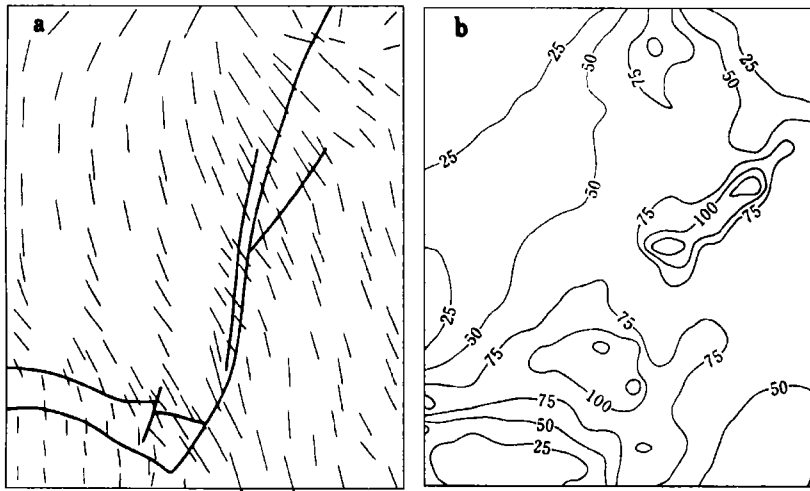


图 3 郟庐断裂带平移期构造应力场模拟图

Fig. 3 Tectonic stress map of Tanlu structural system in strike slip period

a. 最大主压应力方向; b. 最大剪应力  $(\sigma_1 - \sigma_2) / 2$  等值线 (MPa)

### 3.2 郟庐断裂带晚近构造期应力场、形变场数值模拟

3.2.1 应力场的动力机制 有关郟庐断裂带现今运动方式和应力场的研究表明:晚第三纪以来,太平洋板块向欧亚大陆的俯冲方式由原来的 NNW 转向 NEE,借助地幔流的西向侧压作用于中国的东北部。与此同时,印度洋板块与欧亚板块相互作用,强烈的 SN 向挤压造成青藏高原的迅速隆升。这两种区域构造力联合作用,使中国东部水平应力场发生根本性变化。由中生代 NW—SE 向挤压转化为晚新生代 NE—SW 向水平挤压作用为主的应力场。导致郟庐断裂带中、北段的活动性质和强度也随之发生变化,由中生代的左旋扭动为主,转化为新生代晚期的右旋逆推边界;其南段同时受到来自东南方向的菲律宾板块的推挤作用。处于 3 方构造力作用的复杂过渡带上。

3.2.2 计算模型和物性参数 计算模型见图 4。计算范围同平移期。除前期已有的主干断裂

外,根据挽近郯庐断裂构造特征增加了几条分支断裂,并依据断裂带活动特征调整了不同地块岩石粘性参数,列于表 1。

**3.2.3 实测数据的选取和边界力的反演** 郯庐断裂带挽近运动特征表现在断裂带内的地壳变形和断裂两侧相对位移速率上,包括垂直和水平位移速率。考虑到模拟计算是平面模型,从实测数据中主要选择水平位移速率作为拟合值,用优化方法进行边界力的反演计算。由于在消减方式上平面模型不能模拟逆冲超覆和垂向抬升,为此选取实测数据做反演时打了折扣。沿断裂带选取 7 个比较协调的实测数据点,使用时有 2、3 个点的值由线性插值得到。大致从潍坊到临沂之间的 4 个点约以 4mm/a 的速率右行错移;宿迁和嘉山附近分别以 4mm/a 和 1.3mm/a 的速率左行错移,中间点 SN 向错移量取零值。

根据实测数据,用最小二乘优化方法反演出的边界力作用方式(单位:MPa)用箭头示于图 4。在区域北部和西部边界分别为 SN 向和 EW 向滑动约束的情况下,南部和东部边界被分为 5 段,作用着不同方向和大小的外力。反演结果与东部来自太平洋板块和菲律宾板块的动力方向相当吻合,可以认为该动力模型是合理的,为正演计算应力场和形变场提供了相对可信的动力边界条件。

### 3.2.4 结果分析

(1)应力场 图 5 显示了由前述模型和边界受力状态计算出的郯庐断裂带构造应力场的特征,表明主应力沿郯庐断裂带有分段不同的特点。北段主压应力方向与断裂带斜交,呈 NEE 方向,断层性质右旋;东北段沈阳、辽东一带出现局部拉张应力,与那里的盆地地形相符合;中段主应力方向由 NEE 向 EW 过渡,断层轻微右旋;南段主压应力方向或与断层垂直或稍向 SWW 偏转,断层是左旋的。实际上南段应力状态十分复杂,断层既有左旋,又有右旋,很难确定以什么为主。各段应力计算值与实测数据以及推测值的对比详见表 2。

断裂带北段最大剪应力的剪切方向表明北段右旋,且有一剪应力梯度带(图 5c)位于东北部边界。南段轻微左旋,也有一剪应力梯度带,位于南边界中部。为此,南北两段的剪应力符号相反,中段受到的近乎是正压力,必然存在剪应力零值区。南北剪应力梯度带的应力量级相当,东北部应力集中程度略高,表明挽近构造活动在东北胶辽段相对活跃。

(2)形变速率 图 6a 中最大剪切形变速率等值线大多集中在郯庐断裂带东侧,受东部边界太平洋板块和菲律宾板块作用力的影响。断裂带两侧平均剪切形变速率差值可达  $1 \times 10^{-13}/s$ 。SN 向压缩形变速率(图 6b)的最大值集中在南部边界中段和东北部边界处,与剪切形变速率有同样的特点和数量级,表明该处的构造活动较强烈。

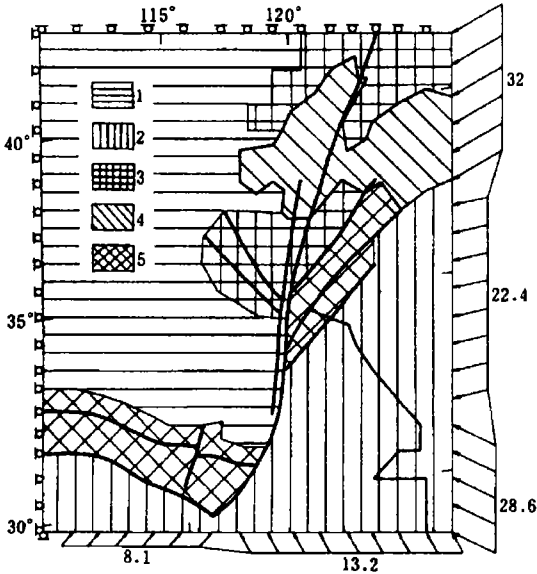


图 4 郯庐断裂带挽近构造期有限元计算模型图

Fig. 4 The tectonic model of Tanlu structural system in recent period for Finite Element calculation

1. 华北地块; 2. 扬子地块; 3. 胶辽盆地;
4. 渤海; 5. 胶南一大别地块

表 2 郟庐断裂带挽近期主压应力特征表

Table.2 Tectonic stress feature of TanLu structural belt in recent period

分段	地区	实验推测数据		模拟计算值	
		方向	大小	方向	大小
北段	潍坊以北	60°	50   70 MPa	82°	38.8
北中段	潍坊—沂水	80°		85°	40.7
中段	沂水—郟城	97°		88°	42.1
中南段	郟城—巢湖	105°		91°	57.0
南段	巢湖—广济	116°		97°	58.0

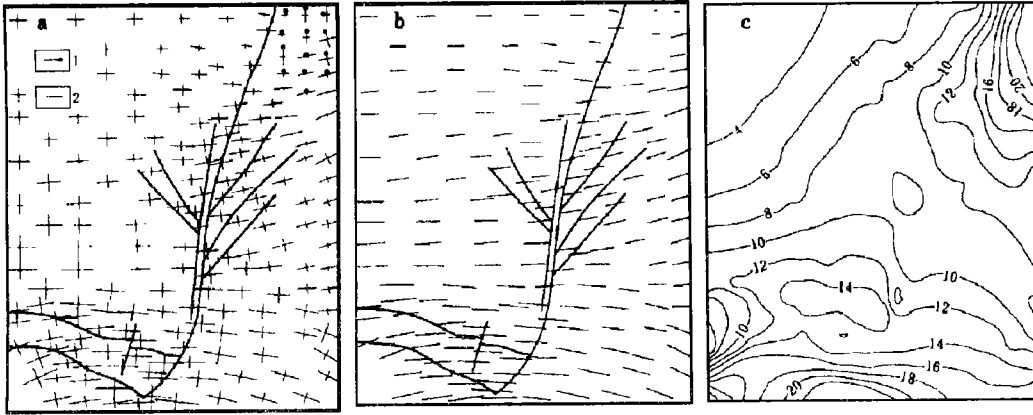


图 5 郟庐断裂带挽近构造期应力场模拟图

Fig. 5 Tectonic stress map of Tanlu structural system in recent period

a. 主应力方向; 1. 拉应力; 2. 压应力; b. 主压应力方向; c. 最大剪应力等值线(MPa)

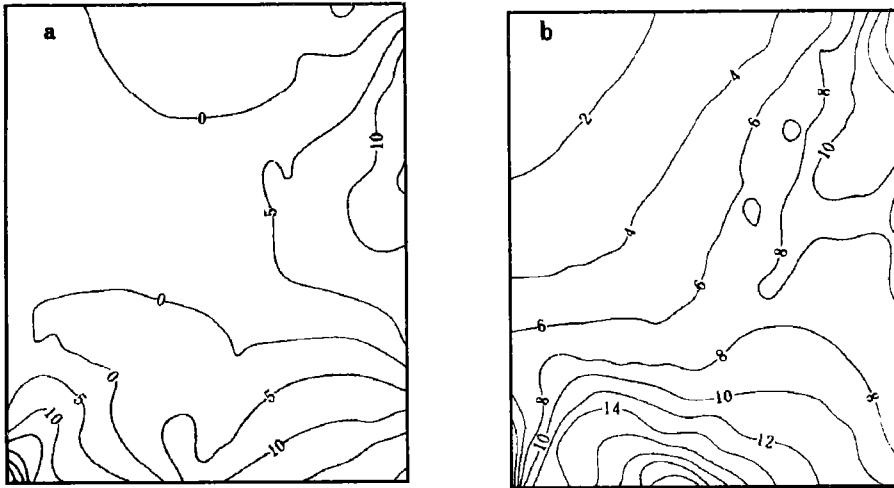


图 6 郟庐断裂带挽近构造期形变率模拟图

Fig. 6 Strain rates map of Tanlu structural system in recent period

a. 最大剪切形变率  $\dot{\epsilon}_{\max}$  等值线 ( $1 \times 10^{-15}/s$ ); b. SN 向形变率  $\dot{\epsilon}_{yy}$  等值线 ( $1 \times 10^{-15}/s$ )

### 3.3 郯庐断裂带拉张期构造应力场的数值模拟

**3.3.1 拉张构造形成机理** 中生代到早第三纪,郯庐断裂带主要受西太平洋板块运动的影响,成为西太平洋岛弧系弧后拉张盆地的断裂边界,表现为拉张、挤压、扭动交替出现的活动特点。经过热隆、拱张、断陷、沉降的演化过程,形成了一系列低地、拗陷、盆地,河谷、湖泊等反映垂向运动的地貌。从力学机理分析,西太平洋板块向欧亚板块的俯冲作用,使我国东部地壳处于板块下插引起的地热异常带的上部,强烈的地下构造热活动导致郯庐断裂带地幔上拱,上部地壳受拉变薄,冷却后发生断裂、断陷、沉降,形成了多种具拉张特征的构造系列。

#### 3.3.2 理论计算模型和数据选取

(1)计算模型 考虑到地壳厚度与横向几何尺寸差异的悬殊,以及计算区域的温度载荷主要来自地壳下部,同时由于地壳尤其是上地壳的岩石特性更接近于弹性,在模拟拉张期构造应力场时,决定采用弹性薄板小挠度弯曲理论。

由于有关郯庐断裂带白垩世一早第三纪的地貌、构造、地壳结构、古地温、形变、运动特征等可供参考的资料、数据很少,我们的模拟工作只能是示意性的。某些参数和结果均以无量纲形式给出,使结果更具实质性和代表性。

有限元计算模型的宽、长、厚比值为 38 : 44 : 1,范围和主要断裂构造及分界线基本上同前两期。由于介质的岩石力学参数不再是本期应力场模拟的侧重面,不必再详细区分,按均质体取为  $E=1 \times 10^5 \text{MPa}$ ,  $\mu=0.25$ 。地壳厚度值根据重力资料反演的莫霍面等深线资料推算<sup>[7]</sup>,又经取平均值确定(图 7a),计算时将厚度值处理为无量纲数。

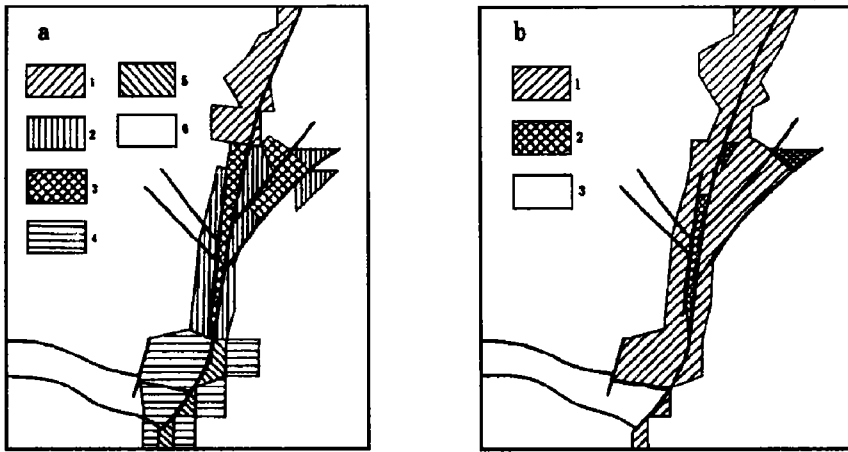


图 7 郯庐断裂带拉张期有限元计算模型图

Fig. 7 The model of Tanlu structural system in tensile period for Finit Element calculation

a. 地壳厚度(km):1. 38.0;2. 33.5;3. 33.0;4. 37.0;5. 31.5;6. 36.0;

b. 温度梯度边界条件(1°C/km):1. 2.0;2. 3.0;3. 0.0

(2)边界条件 边界约束状况的选取要适应板形变模型。西边界各点固定,不允许位移也不允许转动。东边界各点不允许铅直方向位移,其余位移分量自由,南北边界自由。

因缺少有关地热方面的资料数据,采用变通的间接办法给定断裂带地壳下部的热边界条件。根据断裂带中生代盆地和火山岩的分布位置以及零星热流值推算的早第三纪的热流密度

异常区,确定在计算区域下部施加不同力度的地温梯度值。图 7b 显示不同区域下边界的地温梯度值,示意性地分了 3 个级别,表示越靠近断裂带中央,温度变化越剧烈。均匀介质的热膨胀系数取为 0.00001。

**3.3.3 结果分析和讨论** 郯庐断裂带在来自地壳底部的地热梯度作用下,地表应力场图像见图 8。图 8a、b 表示郯庐断裂拉张期第一主应力( $\sigma_1$ )全部是拉应力,靠近断层的拉应力大于两侧。当岩石热胀系数取  $1 \times 10^{-5}$ ,铅直地热梯度增量以  $1^\circ\text{C}/\text{km}$  为单位,岩石弹性模量为  $1 \times 10^5 \text{MPa}$  的条件下,热应力量级为 100Pa 左右。断裂带中央最大拉应力达 400Pa。温差引起的应力变化幅度约 450Pa 左右。拉应力方向在断裂中段基本水平。为 EW 方向,东北段拉张力方向多数偏 NE,南段偏 SE。从图 8c 中同样可以看到最大剪应力( $\sigma_1 - \sigma_2$ )/2 梯度带与沂沭拗陷带具相关性。温度引起的剪应力变化量大约 200Pa 左右。

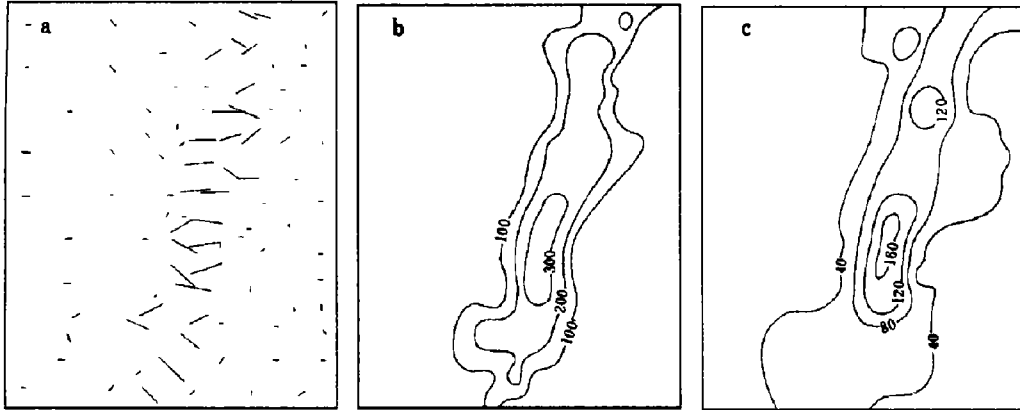


图 8 郯庐断裂带拉张期地表热应力模拟图

Fig. 8 Thermal stress field of Tanlu structural system in tensile period

a. 主应力  $\sigma_1$  方向; b.  $\sigma_1$  等值线(Pa); c. 最大剪应力  $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$  等值线(Pa)

上述模型的热应力计算表明,温度改变引起的应力变化量不大,似乎难以驱动规模宏大的构造运动。但是笔者认为,不同岩石热物理性质,比如热胀系数也许会有数量级的差别,而且岩石圈厚度数倍于地壳厚度;其次在构造活动期,地下温度的横向差异据有关研究能高达几百度,这种高温差有可能提高热应力水平;再次,由于一般岩石的抗拉强度低于抗压强度,在受拉状态下更容易破裂,这就给地下热物质上涌开辟了通道,使构造热活动更为强烈。还有一个不容忽视的因素是时间。热应力尽管不大,但由于温度的升高,使岩石流变性更突出,只要时间足够长,就可能造成可观的构造形变。

就郯庐断裂带来说,西太平洋板块的俯冲运动造成东亚大陆板块的翘曲以及局部剪切拉张是上部地壳拉伸构造的主要原因之一。这样的背景应力场与深部构造热活动引起的热应力相辅相成,形成了断裂带具拉伸构造特征的应力场。海洋板块向大陆下面的俯冲造成的横弯曲与地下热活动引起的纵弯曲联合作用,是郯庐断裂带中生代到早第三纪拉伸构造形成的主要动力机制。



## 参 考 文 献

- 1 国家地震局地质研究所, 郯庐断裂。北京:地震出版社,1987。
- 2 高锐、吴功建等, 中国东部及邻海地壳结构若干问题的研究。第 27 届国际地质会议学术交流论文集(2), 北京:地质出版社,1985,203—210。
- 3 徐学思, 郯庐断裂的平移。构造地质论丛(3)。北京:地质出版社,1984。
- 4 徐嘉炜、马国锋, 郯庐断裂带研究的十年回顾。地质论评,1992,38(4):316—324。
- 5 徐嘉炜、王萍等, 郯庐断裂带南段深层次的塑性变形特征及区域应变场。地震地质,1984,6(4)。
- 6 林传勇、史兰斌, 郯庐断裂带沿线幔源包体的特征及初步推论。地震地质,1992,14(4):289—304。
- 7 许志琴, 郯庐裂谷系概述。构造地质论丛(3), 北京:地质出版社,1984,39—46。
- 8 余钦范、马杏垣, 华北地区航磁图像处理结果和地震构造解释。地震地质,1989,11(4):5—13。
- 9 杨强生, 对流传热与传质。北京:高等教育出版社,1985。
- 10 王仁、梁海华, 用叠加法反演构造应力场——以东亚为例。地质科学论文集, 北京:北京大学出版社,1984,145—151。
- 11 王秉恩, 有限元法程序设计。北京:北京理工大学出版社,1991。
- 12 Zienkiewicz O C, The Finite Element Method, 3rd edition, McGraw-Hill Book Company(UK)Limited, 1977。

## A NUMERICAL ANALYSIS OF THE TECTONIC EVOLUTION OF THE TANLU FAULT ZONE

Wu Hongling Chen Bolin Wang Xiaofeng Wang Wei

(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

**Abstract** In this paper a numerical modeling of the stress and strain fields as well as the displacement rates of the Tanlu fault zone in the principal periods of its tectonic evolution is made using the Finit Element Method for a Newtonian liquid. The causative dynamic origin, the boundary forces and the effect of rock properties on the stress fields are discussed and analysed.

This is aimed at further explaining that the repeated tectonic activity of the zone in its evolution is closely related to the motion of the North China platform, Lower Yangtze massif, the Pasific plate and the Philippine plate. Meanwhile, the geothermal anomaly accompanying the tectonic movement may also constitute one of the important dynamic factors to form the respective stress field, especially the tensile one of the fault zone.

**Key words** Taulu fault zome, Newtonian flow, stress field, tectonic evolution

### 第一作者简介

武红岭,女,1948年生,副研究员,1977年毕业于北京大学力学系固体力学专业。1983年毕业于北京大学地质系地质力学专业,获理学硕士学位。现从事构造应力场数学模拟和地球动力学研究工作。通讯地址:北京市海淀区民族学院南路11号地质力学研究所。邮政编码:100081。