

坚固体模型近地表形变场、应力场时空分布动态模拟研究

陈宇坤, 聂永安

(天津市地震局, 天津 300201)

摘要: 基于坚固体孕震模式, 参考板内地震孕育特征和华北地区的地质构造特征, 建立了 4 层地壳结构模型, 对近地表形变场和应力场的时空分布特征进行了动态模拟研究. 结果表明, 在地震孕育的中长期阶段, 坚固体近地表部位的形变相对稳定, 出现形变空区. 在孕震的中短期阶段, 坚固体近地表部位的形变出现快速增长的态势, 平均应力明显增强, 这是各种前兆异常出现有规律的迁移变化, 即从外围地区逐渐向强震震源区迁移、集中的内在机理.

关键词: 坚固体模式; 形变场; 应力场; 数值模拟; 三维模型

中图分类号: P315.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2001)02-0105-07

0 引言

强震发生前, 震源体在构造应力作用下发生一定的变形. 随着应力和能量的不断积累, 孕震体会产生许多微破裂, 从而使震源体的体积发生膨胀. 这种膨胀和变形作用会使近地表的应力应变状态发生改变, 进而引起地下水水位、水氡、重力和地电等异常. 另外, 这种作用还会传递到震源区及邻近地区的地表, 使这些地区的地形变发生变化. 因此, 近地表应力应变场是与孕震体应力积累和体积膨胀作用密切相关的具有重大前兆意义的物理量. 本文对近地表范围内(深度为 845 m)的垂直位移场和平均应力场分布和发展进程进行了模拟研究, 试图揭示强震前地形变等前兆场的动态变化规律及其形成机理.

1 计算模型

根据坚固体孕震模式^[1-3]和邢台地震孕育的概念模型^[4], 建立了 4 层地壳结构模型. 模型的长、宽和高分别为 100 km、64 km 和 40 km. 在模型中心即中地壳的上部距地表 8 km 处有一长、宽和高分别为 50 km、32 km 和 12 km 的坚固体. 坚固体下面(中地壳下部)为一长 50 km、宽 32 km、高 8 km 的软弱体(图 1). 模型下部偏右侧为一直立断层. 该断层宽 1 km, 前后贯穿了模型, 自下而上切割了下地壳. 软弱体和坚固体的大部分, 终止于坚固体上部^[5,6].

模型的边界条件及加载情况见图 2^[7-9]. 这种加载形式主要是基于以下几点考虑:

收稿日期: 2000-01-27

基金项目: 中国地震局“九五”科技攻关项目(95-04-03-01-03); 天津市地震局中青年基金项目(204016).

作者简介: 陈宇坤(1970-), 男(汉族), 甘肃环县人, 工程师, 主要从事地震预报机理研究和第四纪活动构造研究, 现在中国地震局地质研究所攻读博士学位.

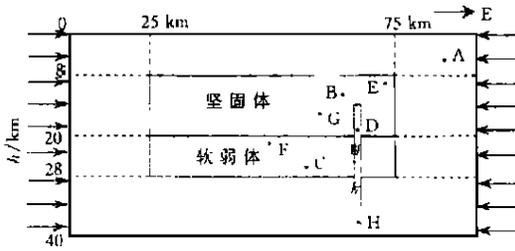


图 1 计算模型纵剖面图

Fig. 1 Profile of the model.

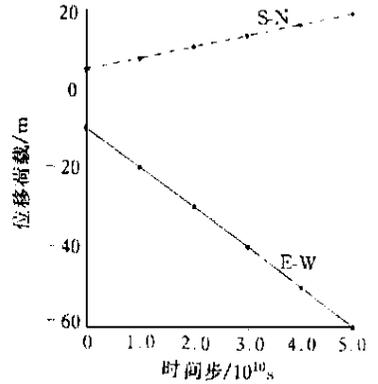


图 2 位移荷载曲线

Fig. 2 The graph of displacement load.

(1) 块体间存在的是固体边界的相互作用, 用均布的位移加载形式更为合适.

(2) 太平洋板块自东向西的挤压作用构成了华北地区主要的构造应力场格局. 在此背景下, 上地幔隆起使下地壳物质产生塑性蠕动并形成垂直上拱力和热应力. 在地震孕育后期垂直上拱力和热应力的加剧使该区受到 NS 向侧向拉张作用.

(3) 震源机制解表明, 华北地区震源体处于 NEE ~ SWW 方向挤压和 NNW ~ SSE 方向的拉张应力场中.

(4) 地球自转也使得 NS 方向的拉张作用增强.

(5) 根据预模拟计算, 单纯的上地幔隆起(即模型底部加载)产生的垂直力对模拟结果影响很小, 而且对 1 年尺度的中短期阶段来讲, 上地幔隆起所产生的位移很小, 因此在模拟中, 将模型底部沿垂直方向固定以代替上地幔隆起.

针对模型中各层的性质, 共选用了 7 种不同性质的材料^[5, 10-11], 见表 1.

表 1 模型材料参数一览表

材料编号	1	2	3	4	5	6	7
密度/[$\times 10^3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	2.50	2.70	2.80	3.00	2.80	2.70	2.60
泊松比(μ)	0.25	0.24	0.27	0.28	0.25	0.27	0.28
初始模量/ $\times 10^{10} \text{ Pa}$	5.50	8.50	11.00	14.00	11.00	8.00	6.00
初始应力/ $\times 10^8 \text{ Pa}$	0.66	1.19	2.31	3.36	2.20	1.28	0.78
变化模量 / $\times 10^{10} \text{ Pa}$	E_{T1}	5.00	8.00	10.00	13.00	10.50	5.60
	E_{T2}	4.50	7.50	9.50	12.00	9.60	5.00
	E_{T3}	4.00	7.00	8.50	11.00	8.80	4.30
	E_{T4}	3.00	6.50	7.50	10.00	7.80	3.50
	E_{T5}	2.50	5.50	6.50	9.00	6.60	2.80
	E_{T6}	2.00	4.50	5.50	6.00	5.20	2.30
相对于模型的部位	上地壳	中上地壳	中下地壳	下地壳	坚固体	软弱体	断层

3 模拟结果

在模拟计算中, 为了突出各构造单元对模拟结果的影响, 先用相同网格剖分的均匀分层模型, 将地壳分为 4 层, 即上地壳、中地壳上部、中地壳下部和下地壳. 不加入任何构造, 求出各层的应力应变结果, 并将其作为被减数, 用坚固体模型在相同边界荷载下的应力应变结果去减, 得到在坚固体及其它构造因素影响下的应力应变变化图像. 在前兆形变场和应力场演化模拟过程中, 用后一阶段的增量表示其变化, 突出了每步荷载对前兆场演化的影响. 经过模拟, 得出了近地表垂直位移场、平均应力场及其增量变化图像.

3.1 近地表垂直形变场

由图 3a(相对于均匀分层模型)可见, 垂直形变增量沿平行主压荷载方向在固体中部地表附近形成了较大的不均匀状的负向槽状拗陷. 拗陷中心对应于固体的位置相对出现局部隆起, 隆起的尺度与固体相当. 在隆起中心又有更次一级凹陷, 其位置相当于固体的中心. 由图 3b 可见, 在加载初期(相当于中长期阶段), 固体部位的垂直形变量较小. 这些现象说明, 由于固体模型介质的不均一, 使得模型近地表在挤压过程中形成了不均匀拗陷. 由于在地震孕育的中长期阶段, 固体在一定程度上能够抵抗变形, 因此固体部位的形变量比周围小.

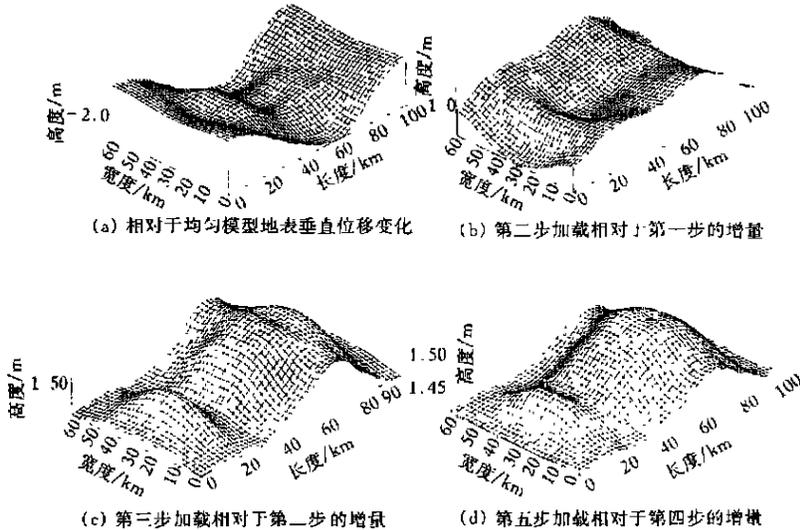


图 3 固体模型近地表垂直位移随荷载变化的增量

Fig. 3 Vertical deformation increment near surface of the hard-inclusion earthquake preparation model by increase of load.

周硕愚等^[12]研究发现, 唐山地震前 5 年, 在震源周围地区形变明显, 而在震源区中央部分(零等值线圈定部分)是一个相对稳定区, 称之为“形变空区”. 它恰好与 $M_S \geq 3.0$ 地震构成的地震围空区相吻合, 并认为形变和地震空区的形成可能是震源区介质强度高于周围地区所致. 这与本文模拟的结果是一致的.

图 3b(第二步—第一步)表明, 在第二步荷载作用下模型整体隆起, 相对于下地壳隐伏断层的位置隆起最大, 形成脊状隆起. 说明在外荷载作用下, 直立断层的存在对近地表垂直形变有较大的影响. 在固体的位置由于隆起量较小, 形成了相对凹陷区. 随着荷载的进一步增大, 到第三步加载阶段(图 3c, 第三步—第二步), 模型整体绝对上隆量增大, 平均在 1.5 m 左右, 断层的上方可达到 1.65 m 以上. 这一阶段的显著特点是, 固体位置的上隆量开始显著增加, 比周围区域高出 0.1 m 以上, 形成与固体形状大致对应的块状隆起(需要指出的是, 这里 1 m 以上的变形发生在近地表 845 m 深度上, 地表对应的形变幅度会大大减小). 到第五步加载阶段(图 3d, 第五步—第四步), 固体及其上方的垂直形变量明显增大, 在固体与直立断层的交汇位置更明显. 固体的边缘部位垂直形变增量亦比较大. 以上过程说明, 在孕震的初期阶段, 震源体上方地表附近没有产生较大的垂直形变, 而在其周围区域则形成了较大的变形, 在整体隆升背景下, 使得震源区似乎发生了相对沉降. 但当加载进入短期阶段, 即孕震过程的后期, 震源体附近地表垂直形变量增大, 加速上隆, 而相邻地区由于形变变小而显示相对沉

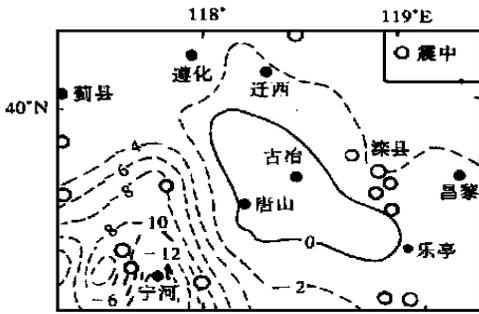
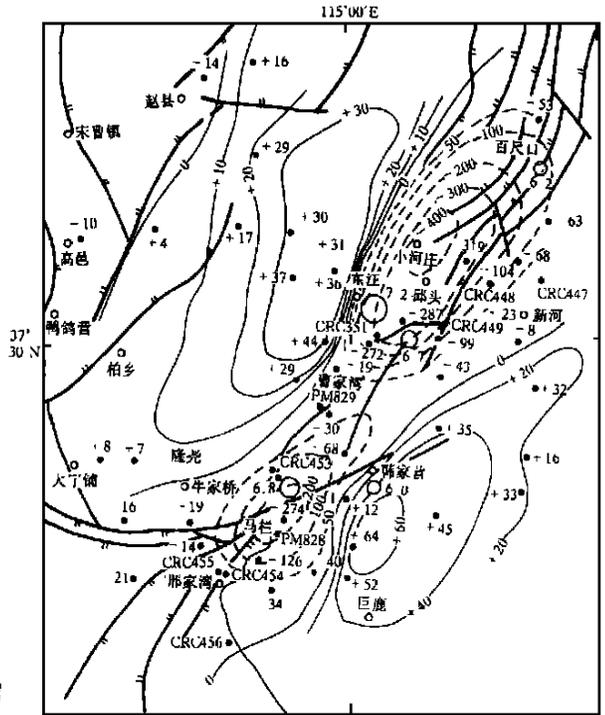


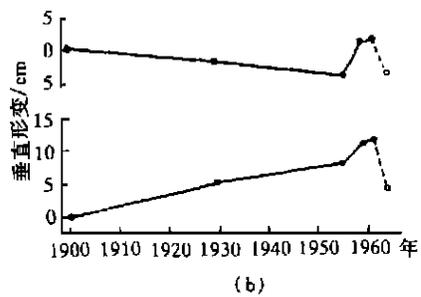
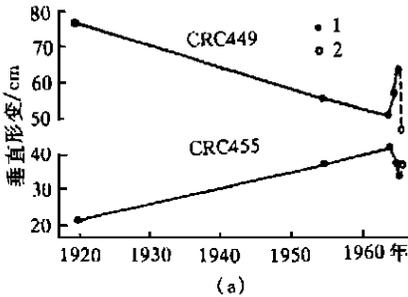
图 4 唐山地震前形变空区与 $M_S \geq 3.0$ 地震围空区 (1971~1975)^[12]

Fig. 4 The deformation gap and $M_S \geq 3.0$ earthquake gap before the Tangshan earthquake from 1971 to 1975^[12].



1 同震垂直位移等值线(1965~1966年,单位:mm);
2 水准点; 3 活动断裂; 4 地震震中及震级; 5 居民点

图 5 邢台地震前后地壳垂直形变^[13]
Fig. 5 Crustal vertical deformation during the Xingtai earthquake.



(a) 邢台地震前 CRC449 和 CRC455 水准点的垂直形变;

(b) 日本新泻地震有代表性的水准点的垂直形变; 1 震前测值; 2 震后测值

图 6 邢台地震与日本新泻地震前地壳垂直形变^[13]

Fig. 6 Crustal vertical deformation before the Xingtai earthquake of China and the Niigata earthquake of Japan.

陷.

以上模拟结果与邢台地震和日本新泻地震时震源区及其附近区域的垂直形变发展过程吻合较好.由图 5 和图 6 可见,在邢台地震震源区附近位于束鹿断陷内的 CRC449 水准点附近地表于 1965 年迅速隆起,幅度达 50 mm,到 1966 年 7.2 级主震发生之前又突然上升了 60 mm.距离震源区相对较远的 CRC455 水准点附近地表

在主震发生前却转为下降.同时,还发现位于隆尧隆起上的李宁 5(东南汪)、宁邢 1(小马庄)、宁邢 2(白里庄)和宁邢 4(徐家河)等水准点的垂直形变在 1958~1965 年显示缓慢上升变化,从 1965 年到 1966 年 3 月 22 日 7.2 级主震前明显加速,其速率为 1965 年以前的 6~10 倍^[13].

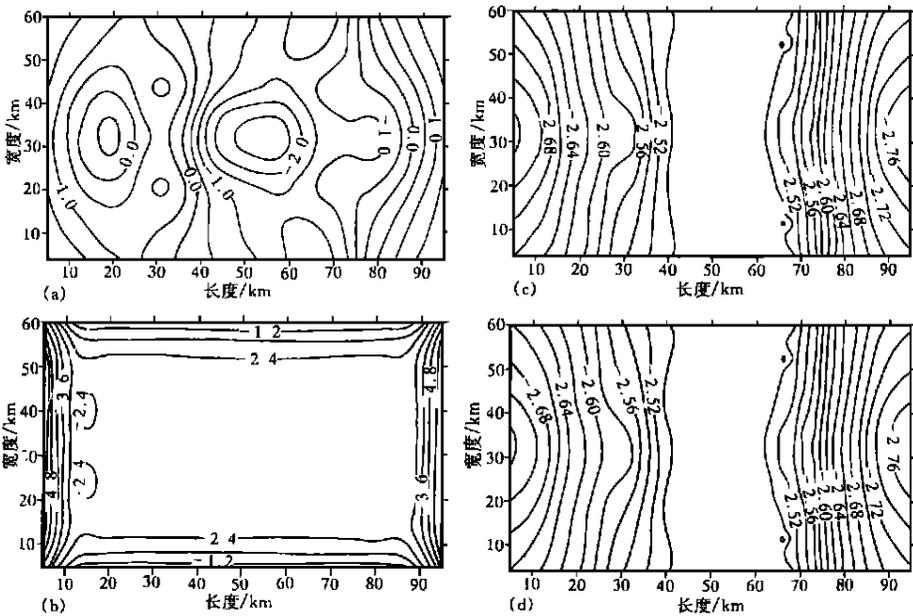
日本新泻地震前的水准异常也显示了类似的突跳现象(图 6b). 据梅世蓉的研究^[14, 15], 这种长期稳态变化背景上的垂直形变加速或反向变化可能与地震前震源区内岩石膨胀过程有关.

3.2 近地表平均应力场

近地表的平均应力控制了震中区及邻近地区近地表的体积应变, 而体应变与地下水位升降、氦气含量等前兆异常关系密切, 因此研究近地表平均应力的时空分布对探讨前兆机理具有重要意义. 平均应力^[19]

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)}{3} \quad (1)$$

均匀分层模型近地表平均应力为压应力, 呈负值, 对应于边界荷载呈均匀条带状分布. 随荷载的增加, 在坚固体的东西二侧和中心部位以及隐伏直立断层上方出现了压应力高值异常区, 相对于均匀分层模型, 异常幅度高达 1.5~3.0 MPa(图 7a, 相对于分层模型).



(a) 相对均匀模型近地表平均应力变化; (b) 第二步加载相对于第一步的增量;
(c) 第四步加载相对于第三步的增量; (d) 第五步加载相对于第四步的增量

图 7 坚固体模型近地表平均应力随荷载变化的增量

Fig. 7 Isograms of average stress increment near surface of the hard-inclusion earthquake preparation model by increase of load

平均应力随荷载的变化增量有如下特点: 第二步荷载相对第一步荷载(图 7b), 平均压应力增量只在模型的边界部位出现较大变化, 模型左右二侧(挤压方向)压应力增加较大, 向内部迅速递减; 南北二侧(拉张方向)压应力增加了 1.0 MPa 左右, 向内部递增为 2.4 MPa. 说明在加载初期, 坚固体及其它相关构造对模型近地表平均应力场的影响不大. 模型中心平均压应力增加幅度稳定在一定水平上. 随边界荷载增大(图 7c, 第四步—第三步), 在模型左右二侧受压方向对应坚固体所在的位置平均应力增量出现最大值. 增幅较快部位由模型二侧向内扩散, 边界的增量相对减小, 接近中心部位的增量逐渐增大. 到第五步加载阶段(时间为 5×10^7 s, 图 7d, 第五步—第四步), 坚固体和断层的位置比较明显地表现出来, 二者所在部位平均应力增幅变大, 说明在加载后期坚固体承受较大的应力并传递到地表附近, 使近地表的应力水平迅速提

高. 另一方面, 在强震孕育后期, 随外荷载的增大, 坚固体中心和二侧部位以及沿断层方向均存在压应力高值异常区, 应力场高值积累区逐渐向震源区收缩, 使坚固体和断层的影响更明显地表现出来.

1976 年唐山地震前, 地下水位、水氡、重力、地电等前兆异常现象多出现在唐山地区及周边的外围地区, 并出现各种复杂的迁移和变化, 但总体趋势是逐渐向唐山震中区收缩. 在临震时, 周边地区出现异常平静, 而唐山地区则出现了大范围的各种前兆异常^[14, 15]. 前兆异常的这种迁移变化的一个主要原因可能就是近地表平均应力向震源区逐渐的迁移.

4 讨论与结论

通过对坚固体模型近地表形变场和平均应力场的动态模拟, 可以得到以下几点认识:

(1) 由于坚固体模型材料的不均匀、坚固体的高密度和抵抗变形的作用等使模型产生了不同级次的构造型式. 坚固体所在部位在孕震的中长期阶段形变速率低, 形成了“形变空区”.

(2) 直立断层对近地表垂直形变有较大的影响. 当进入孕震的中短期阶段以后, 近地表垂直形变速率最大值逐渐向震源体部位迁移, 即在坚固体及直立断层部位形成明显的形变异常.

(3) 坚固体模型距地表 845 m 深度切面上, 对应坚固体的上方和直立断层上方均形成了平均压应力的较大值. 其中以坚固体上部的平均压应力最大. 在断层对应的位置——坚固体左侧靠近边缘的部位应力水平相对较低.

(4) 在应力场演化过程中, 随荷载的加强, 坚固体部位的应力增长较快, 并由模型二侧向中部扩散. 说明地震孕育后期, 坚固体部位的平均应力明显加强了. 由此引起的地形变、地下水位、水氡、重力和地电等各种前兆异常出现有规律的迁移变化, 即从外围地区逐渐向强震震中区迁移、集中. 因此对近地表平均应力场的模拟研究能够对强震前地下水位和地形变等异常的迁移变化规律从机理上进行解释.

作者感谢梅世蓉教授对本项研究的指导与帮助.

[参考文献]

- [1] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一): 坚固体孕震模式的由来与证据[J]. 地震学报, 1995, 17(3): 273—282.
- [2] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(二): 强震孕育时应力、应变场的演化与地震活动、地震前兆的关系[J]. 地震学报, 1996, 18(1): 1—10.
- [3] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(三): 强震孕育时地震活动与地壳形变异常及机制[J]. 地震学报, 1996, 18(2): 170—178.
- [4] 梅世蓉. 邢台地震孕育发生模型及其前兆机理探讨[J]. 地震, 1999, 19(1): 1—10.
- [5] 陈宇坤, 聂永安. 成层非均匀地壳中应变能密度场时空分布的动态模拟研究[J]. 地震学报, 2000, 22(6): 1—9.
- [6] 尹京苑, 梅世蓉, 薛艳. 邢台地震区地壳速度结构特征与强震孕育发生关系的探索[J]. 地球物理学报, 1999, 42(5): 629—638.
- [7] 徐菊生, 袁金荣, 高士钧, 等. 利用 GPS 观测结果研究华北地区现今构造应力场[J]. 地壳形变与地震, 1999, 19(2): 81—89.
- [8] 尹京苑, 梅世蓉. 地壳应力状态及其在三维模拟计算中的意义[J]. 地震, 1998, 18(3): 226—232.
- [9] 梅世蓉, 薛艳, 尹京苑. 唐山、邢台地震序列特征与三维速度结构的关系——兼论强震群型地震的预测问题[J]. 地震学报, 1999, 21(2): 159—165.
- [10] 别茹霍夫 Н.И. 弹性与塑性理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1958. 114—124.
- [11] 严宗达. 塑性力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988. 28—41.

- [12] 周硕愚, 施顺英, 帅平. 唐山地震前后地壳变形场的时空分布、演化特征与机理研究[J]. 地震学报, 1997, 19(6): 559—565.
- [13] 河北省地震局. 一九六六年邢台地震[M]. 北京: 地震出版社, 1986. 158—171.
- [14] 梅世蓉. 梅世蓉地震科学研究论文选集[C]. 北京: 地震出版社, 1993. 202—227.
- [15] 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组. 一九七六年唐山地震[M]. 北京: 地震出版社, 1982. 139—149.
- [16] 徐芝伦. 弹性力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979. 348—376.

DYNAMIC SIMULATION ON SPACE-TIME DISTRIBUTION OF DEFORMATION AND STRESS FIELDS NEAR SURFACE IN HARD-INCLUSION EARTHQUAKE PREPARATION MODEL

CHEN Yu-kun, NIE Yong-an

(*Seismological Bureau of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China*)

Abstract: On the basis of the hard-inclusion earthquake preparation model (HEPM for short) and referring intraplate earthquake preparation characteristics and geologic structure feature of North China, model of crustal structure of four layers with a hard-inclusion, a soft-inclusion and a vertical fault is constructed. Dynamic simulation on the space-time distribution of deformation and stress fields near surface for the model is carried out. The results show that at beginning of earthquake preparation, deformation near surface of the hard-inclusion in the model is relatively stable, a deformation gap is showed. During the medium-short term period before earthquake, the deformation increased swiftly. Meanwhile, the average stress in the region strengthened obviously, which is the inner mechanism for migration of precursory anomalies with regularity from outer area to epicenter area of strong earthquake.

Key words: Hard-inclusion earthquake preparation model; Deformation field; Stress field; Numerical simulation; Three-dimensional model

关于加入“万方数据——数字化期刊群”的声明

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化, 推进科技信息交流的网络化进程, 本刊现已入网“万方数据——数字化期刊群”, 所以, 向本刊投稿并录用的稿件将一律由编辑部统一纳入“万方数据——数字化期刊群”, 进入因特网提供信息服务. 凡有不同意见者, 请另投它刊. 本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬, 不再另付.

“万方数据——数字化期刊群”是国家“九五”重点科技攻关项目. 本刊全文内容按照统一格式制作, 读者可上网查询浏览本刊内容.

网址为: <http://www.wanfangdata.com.cn>

<http://www.periodicals.com.cn> 或 <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical>

《西北地震学报》编辑部

2001年4月