

# 唐山大地震孕育过程的数值模拟研究<sup>\*</sup>

牛志仁 陈党民 李炳乾

(中国西安 710068 陕西省地震研究所)

**摘要** 根据 1976 年唐山 7.8 级地震的前兆资料, 结合岩石破裂物理、震源物理、构造物理、地震前兆、地震力源、地壳结构等方面的研究结果, 采用含有菱形硬包体的饱和水孔隙介质模型, 数值模拟了唐山大地震的孕育过程。首先导出了考虑岩石非弹性体积膨胀和应变软化、孔隙水渗透的固-液两相介质的孕震动力学方程组, 提出了用增量形式求解该方程组的有限差分法, 然后计算模拟了硬包体内含有断层软弱带时的唐山大震的孕育过程, 及其时空变化特征。数值模拟结果表明, 唐山大地震的孕育主要经历了弹性积累、早期非弹性体积膨胀、断层第 1 次加速软化(加速破坏和蠕滑)、天津-宁河一带第 2 次非弹性膨胀、断层第 2 次加速软化(临震加速破坏和蠕滑)和发震等过程。这里, 与断层的加速破坏相对应, 孕震介质的某些部分出现了非弹性膨胀的弹性恢复和二次非弹性膨胀, 与前兆观测资料比较分析可以发现, 上述模拟结果可以比较好地解释实际观测资料的变化特征。同时, 数值模拟还进一步揭示了唐山地震孕育场的时空变化规律和复杂图象, 为地震前兆场变化的物理机制的研究奠定了基础。

**主题词** 唐山地震 孕育过程 数值模拟 动力学方程组

## 引言

20 多年来, 国内外对地震预报问题进行了广泛的探索, 取得了不少震例和丰富的前兆资料。70 年代, 美、苏、中等国家的学者在岩石破裂物理实验与理论研究的基础上, 分别提出了 DD 模式(Sholz *et al.*, 1973)、IPE 模式(Mjachkin *et al.*, 1975)、DC 模式(牛志仁, 1978)等前兆理论模式。不过, 这些大都仅涉及震源孕育过程的理论模型, 而很少具体模拟地震前兆的空间分布特征和前兆场的演变。近年来, 国内外地震学者逐步认识到地震前兆, 特别是板块内地震前兆的复杂性, 并发现了地震前兆的某些空间分布特征及其分阶段变化特点(国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组, 1982; 马宗晋等, 1982; 梅世蓉等, 1989; 张国民等, 1994)。因此, 深入研究地震前兆时空变化的复杂性及其规律, 揭示地震前兆空间分布的物理机制, 探讨源、场关系, 对于地震预报研究具有重要意义。

地震前兆场是变化着的各种地球物理场、地球化学场中与地震孕育过程中有关的部分, 这些变化是与震源孕育过程联系在一起的。地震前兆场的变化是震源孕育、孕震介质(横向、纵向)非均一, 断层滑动, 水平、垂直力源共同作用的结果。非弹性膨胀、断层滑动和地下水活动是地震前兆变化的几个经常起作用的基本因素。

\* 国家“八五”科技攻关重点项目。

1996-02-16 收到初稿, 1997-04-08 收到修改稿并决定采用。

孕震过程的非线性和复杂性、孕震介质的非均一性和非弹性, 以及地震前兆场的大尺度等特点, 使得使用实验室试验和理论解析方法进行研究遇到了困难, 然而数值模拟和数值分析方法是研究各种非线性、非均一现象和过程的有力工具。

本研究根据 1976 年唐山 7.8 级地震的实际观测资料, 结合岩石破裂物理、地震前兆、震源物理、构造物理、地震力源、地壳结构的研究结果, 采用有限差分方法, 对该地震的孕育过程的基本特征进行数值模拟和分析, 研究其时空分布特征的物理机制。我们相信, 这种典型研究对于其它地震的前兆场研究也有重要的参考意义。

## 1 孕震动力学方程组

前苏联和美国一些超深井的钻探结果表明 (Kuccinu, 1982), 在地下 5~9 km 处岩石的孔隙率仍可达 5% 以上, 个别的可达到 12.6%。一般在地下 11~17 km 深处, 水可以液态形式存在 (郭增建, 秦保燕, 1979)。地震前兆的观测研究表明, 很多地震前兆都会出现地下水的变化。所以, 我们考虑的孕震介质为含有水的孔隙介质。

实验研究表明, 岩石破裂前的非线性体积膨胀几乎是所有结晶岩石的普遍特点, 地壳内岩石发生膨胀的可能性是存在的, 其深度或许可达 20 km (梅世蓉, 梁北援, 1986)。在此, 为了数值模拟地震孕育过程和地震前兆异常, 我们将考虑固体骨架的非线性体积膨胀性质。

### 1.1 孕震介质本构方程

关于这种由固相骨架与充满其孔隙的水组成的孕震介质, 我们假设 (牛志仁等, 1991): ① 固-液孔隙介质是宏观连续的; ② 孔隙水为理想液体; ③ 固相骨架为对于压力敏感的膨胀材料。其本构关系为 (Rice, 1979)

$$\dot{\epsilon}_{\alpha\beta} = \frac{1}{2G}\dot{\sigma}'_{\alpha\beta} + \frac{1}{9K}\delta_{\alpha\beta}[\dot{\sigma}_{\gamma\gamma} + 3\xi\dot{p}] + \frac{1}{h}\left(\frac{\sigma'_{\alpha\beta}}{2\tau} + \frac{\beta}{3}\delta_{\alpha\beta}\right)\left(\frac{\sigma'_{kl}}{2\tau} + \frac{\mu}{3}\delta_{kl}\right)(\dot{\sigma}_{kl} + \dot{p}\delta_{kl}) \quad (1)$$

其中

$$\sigma'_{\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta} - \frac{1}{3}\delta_{\alpha\beta}\sigma_{\gamma\gamma} \quad (2)$$

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{2}\sigma'_{\alpha\beta}\sigma'_{\alpha\beta}} \quad \epsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_a}{\partial x_\beta} + \frac{\partial u_\beta}{\partial x_a}\right) \quad (3)$$

式中,  $\epsilon_{\alpha\beta}$  为固相应变张量,  $\sigma_{\alpha\beta}$  为固相应力张量,  $\delta_{\alpha\beta}$  为 Kronecker 函数,  $u_a$  为固相位移分量,  $G$  为固相剪切模量。 $h$  为非弹性剪切应变模量,  $h > 0$  时, 应变硬化,  $h < 0$  时, 应变软化。 $\beta$  为膨胀因子,  $\mu$  为固相内摩擦系数,  $K$  为孔隙压力恒定时孔隙介质的体积模量,  $p$  为孔隙压力,  $\xi$  为无量纲材料常数,  $0 < \xi < 1$ ; ④ 忽略流体流动毛细管力。根据假设②有

$$dp = K_f \frac{d\rho^w}{\rho^w} \quad (4)$$

其中,  $\rho^w$  为孔隙水密度,  $K_f$  为孔隙水的体积压缩模量。方程(1)和(4)便构成了饱含孔隙水的多孔介质的本构方程。

### 1.2 物质守恒方程

对于饱水多孔介质, 固相及液相物质守恒方程分别为

$$\frac{\partial[(1-f)\rho^s]}{\partial t} + \frac{\partial[(1-f)\rho^w\dot{u}_a]}{\partial x_a} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(f\rho^\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(f\rho^\omega \dot{u}_a^\omega)}{\partial x_a} = 0 \quad (6)$$

这里,  $\rho^s$  为固相密度. 由于颗粒的可压缩性, 一般远小于骨架的压缩性. 可以认为, 固相密度不随时间变化. 略去高阶小量, 并考虑式(4)、(5)和(6)可分别化为

$$-\frac{1}{1-f} \cdot \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial \dot{u}_a}{\partial x_a} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{f} \cdot \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{k_f} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \dot{u}_a^\omega}{\partial x_a} = 0 \quad (8)$$

### 1.3 运动方程

忽略惯性力, 平衡方程为

$$\frac{\partial \sigma_{\alpha\beta}}{\partial x_\alpha} = 0 \quad (9)$$

另外, Darcy 定律为

$$\dot{u}_a^\omega - \dot{u}_a = -\frac{k}{f} \frac{\partial p}{\partial x_a} \quad (10)$$

其中,  $k$  为孔隙水的有效渗透率.

### 1.4 孕震的动力学方程组

将方程(2)、(3)代入式(1), 可化为

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \dot{u}_a}{\partial x_\beta} + \frac{\partial \dot{u}_\beta}{\partial x_a} \right) &= \frac{1}{2G} (\sigma_{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} \sigma_{\gamma\gamma}) + \frac{1}{9K} \delta_{\alpha\beta} (\dot{\sigma}_{\gamma\gamma} - 3\dot{\xi}p) + \\ \frac{1}{h} \left( \frac{\beta}{3} \delta_{\alpha\beta} + \frac{\sigma_{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} \sigma_{\gamma\gamma}}{\sqrt{2(\sigma_{\alpha\beta} \sigma_{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \sigma_{\gamma\gamma} \sigma_{\gamma\gamma})}} \right) \left[ \frac{\sigma_{kl} - \frac{1}{3} \delta_{kl} \sigma_{\gamma\gamma}}{\sqrt{2(\sigma_{\alpha\beta} \sigma_{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \sigma_{\gamma\gamma} \sigma_{\gamma\gamma})}} + \frac{\mu}{3} \delta_{kl} \right] &\cdot (\dot{\sigma}_{kl} - \dot{p} \delta_{kl}) \quad (11) \end{aligned}$$

将式(10)代入式(8)略掉高阶小量, 并利用式(7)得

$$\frac{1}{f(1-f)} \cdot \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{k_f} \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{k}{f} \frac{\partial^2 p}{\partial x_a^2} = 0 \quad (12)$$

这样, 饱水多孔介质的孕震动力学方程组便为由方程(7)、(9)、(11)和(12)组成的非线性偏微分方程组.

## 2 唐山地震孕育过程的数值模拟

对于 1976 年唐山 7.8 级地震, 前人已经做了大量工作, 对于地质构造背景、地震力源等都有了一定的认识, 并对其地震前的各种前兆资料及异常特征有了比较系统的总结(国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组, 1982; 马宗晋等, 1982). 为了研究和认识地震孕育过程及前兆变化的物理机制, 我们以唐山地震作为特例, 通过数值模拟方法, 研究地震前兆的时、空分布特征及地震孕育过程, 并揭示地震前兆的物理机制.

### 2.1 介质模型

唐山震区四周有 4 条大断裂包围, 形成唐山菱形断块, 在断块内震前不存在大断裂带, 只有规模不大的唐山断层. 根据华北地区强震震源机制解, 其边界受北东东、南西西向主压应力作用(图 1 a).

为了减小计算的工作量, 我们将不考虑垂直力源的作用, 只研究水平方向的二维平面应力问题。计算取唐山周围  $300 \text{ km} \times 175 \text{ km}$  的矩形区域, 该区域包括唐山菱形块体、外围区域及孕震断层。断层包括中部的唐山断层及发震时的扩展部分, 模型示于图 1 b 中。假定孕震介质是连续的。同时, 梅世蓉等(1993)近年来应用 CT 技术, 根据京津唐渤海地区地壳分层介质特性、速度结构的研究结果, 分析区内 6 级以上地震的深部孕震环境, 发现强震分布在高速体内以及高速体与低速体的交接区, 从而提出了孕震的硬包体模型。唐山菱形块体为一硬包体区。另外, 唐山断层及其扩展部分作为孕震断层是一个软弱带, 它具有

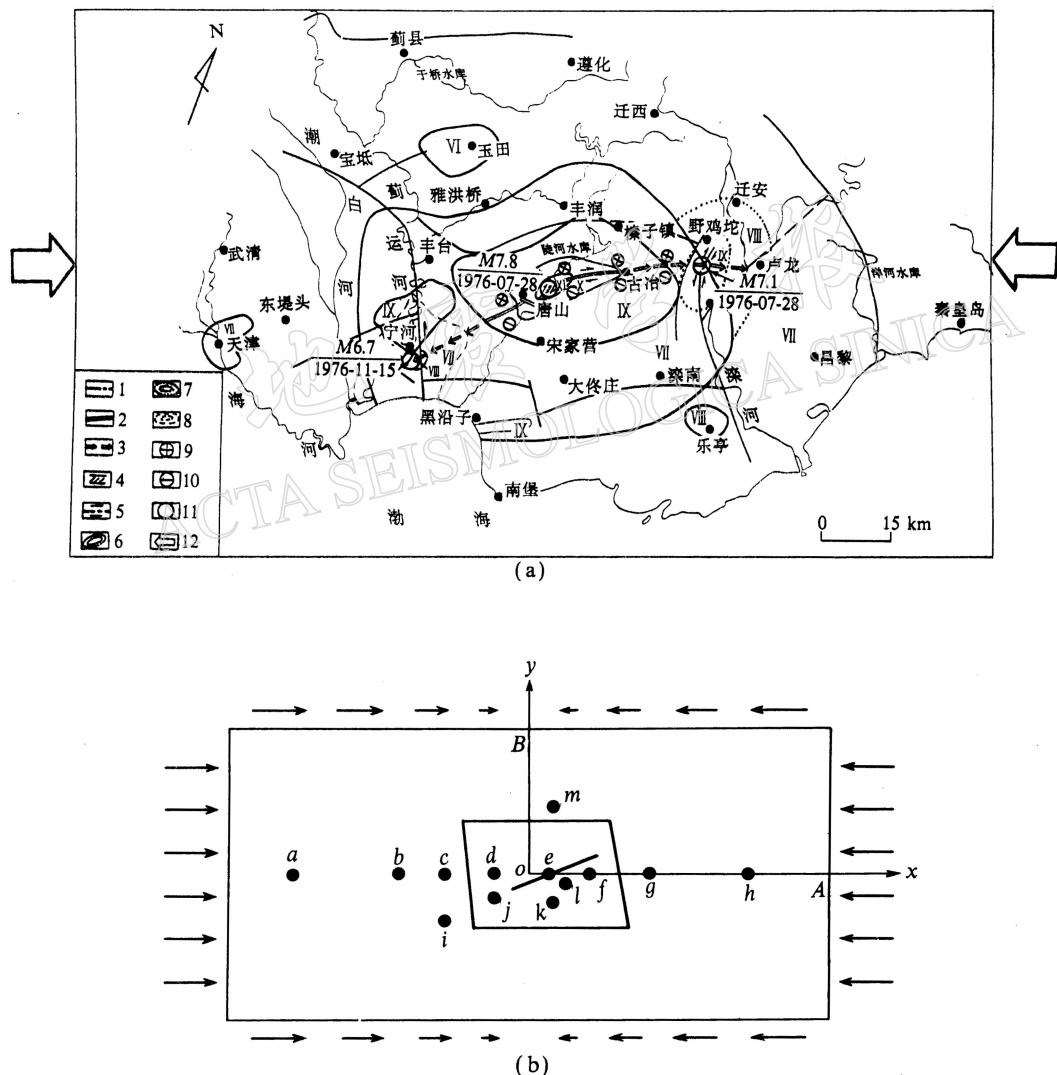


图 1 唐山地震计算模型. (a) 模拟区域; (b) 计算模型

1. 与发震构造有关的断裂; 2. 发震断裂; 3. 推测 7.8 级地震发生时的破裂发展方向;
4. 地裂缝剪切带; 5. 平移断层; 6.  $M=7.8$  地震烈度线; 7.  $M=7.1$  地震烈度线;
8.  $M=6.9$  地震烈度线(据天津地震局资料); 9. 地震时地面上升区;
10. 地震时地面下沉区; 11. 地震震中; 12. 区域应力场中主压应力方向.

$a \sim m$  为计算点位; A, B 分别为计算区域边界的横、纵坐标

不同的破裂强度. 根据岩石实验结果, 取差应力达到岩石破裂强度的  $2/3$  时, 岩石发生非弹性应变( $h>0$ ), 即非线性体积膨胀. 当差应力达到岩石破裂强度时, 该处介质发生破坏, 并表现为应变软化(或断层蠕动) ( $h<0$ ) (Rice, 1979). 在计算中还考虑了循环加载效应, 即当介质发生塑性变形后, 如果发生应变恢复的卸载, 则介质将以弹性方式卸载和加载, 直至介质再发生非弹性变形. 当断层上所有点都发生了破坏, 即都处于峰值强度后的状态时, 认为地震失稳发生.

## 2.2 边界条件及初始条件

如图 1 b 所示, 计算区域左右两侧由水平匀速位移加载, 垂直方向位移为零, 即

$$u(x, y, t) |_{x=A} = -\dot{U}t \quad -B \leq y \leq B \quad (13)$$

$$u(x, y, t) |_{x=-A} = \dot{U}t \quad -B \leq y \leq B \quad (14)$$

$$v(x, y, t) |_{x=\pm A} = 0 \quad -B \leq y \leq B \quad (15)$$

其中,  $U$  为常数. 上下两侧边界的正应力为零, 并在  $x$  轴方向以水平位移进行加载, 即

$$\sigma_y(x, y, t) |_{y=\pm B} = 0 \quad -A \leq x \leq A \quad (16)$$

$$u(x, y, t) |_{y=\pm B} = -\frac{\dot{U}tx}{A} \quad -A \leq x \leq A \quad (17)$$

孔隙压在边界为常数  $p_0$ . 初始条件为

$$\begin{cases} u(x, y, 0) = 0 & v(x, y, 0) = 0 \\ p(x, y, 0) = p_0 & f(x, y, 0) = f_0 \\ -A \leq x \leq A & -B \leq y \leq B \end{cases} \quad (18)$$

唐山地震孕震过程及前兆场的模拟便归结为由方程(7)、(9)、(11)和(12)及边值、初值条件式(13)~(18)决定的非线性方程组的求解问题.

## 2.3 计算方法及参数选取

由于考虑了孕震过程中的介质膨胀、流体扩散、应变软化、断层蠕动、构造应力与孔隙压力的耦合作用以及介质的非均匀性, 这时孕震动力学方程组为非线性偏微分方程组, 我们把它化为增量形式进行求解. 方程(7)、(9)、(11)和(12)化为

$$-\frac{df}{1-f} + \frac{\partial du_a}{\partial x_a} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial d\sigma_{\alpha\beta}}{\partial x_a} = 0 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial du_a}{\partial x_\beta} + \frac{\partial du_\beta}{\partial x_a} \right) &= \frac{1}{2G} (d\sigma_{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} d\sigma_{\gamma\gamma}) + \frac{1}{9K} \delta_{\alpha\beta} (d\sigma_{\gamma\gamma} - 3\xi dp) + \\ \frac{1}{h} \left( \frac{\beta}{3} \delta_{\alpha\beta} + \frac{\sigma_{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} \sigma_{\gamma\gamma}}{\sqrt{2(\sigma_{\alpha\beta} \sigma_{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \sigma_{\gamma\gamma} \sigma_{\gamma\gamma})}} \right) \left( \frac{\sigma_{kl} - \frac{1}{3} \delta_{kl} \sigma_{\gamma\gamma}}{\sqrt{2(\sigma_{\alpha\beta} \sigma_{\alpha\beta} - \frac{1}{3} \sigma_{\gamma\gamma} \sigma_{\gamma\gamma})}} + \frac{\mu}{3} \delta_{kl} \right) \cdot (d\sigma_{kl} - dp \delta_{kl}) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{1}{f(1-f)} \cdot df + \frac{1}{k_f} dp - \frac{k}{f} \frac{\partial^2 p}{\partial x_a^2} \cdot dt = 0 \quad (22)$$

求出增量后, 然后积分求出全量.

为了叙述上的方便, 记硬包体外围区域的弹性模量为  $E_0$ , 破裂强度为  $S_0$ ; 硬包体的弹

性模量为  $E_i$ , 破裂强度为  $S_i$ ; 唐山断层的破裂强度为  $S_f$ , 弹性模量为  $E_f$ ; 唐山地震时的扩展断层的破裂强度为  $S_h$ , 弹性模量为  $E_h$ ; 介质非弹性膨胀时的非弹性剪切应变模量为  $h_d$ , 发生非弹性应变软化(或断层蠕动)时为  $h_f$ .

我们将在如下的无量纲参数变换下数值积分(19)~(20):

$$\begin{aligned} B'' &= \frac{B}{A} & x'' &= \frac{x}{A} & y'' &= \frac{y}{A} & E'' &= \frac{E}{S_0} & p'' &= \frac{p}{S_0} & t'' &= \frac{t}{T} & \sigma''_{\varphi\varphi} &= \frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{S_0} \\ u'' &= \frac{u}{A} & v'' &= \frac{v}{A} & k''_f &= \frac{k_f}{S_0} & h'' &= \frac{h}{S_0} & k'' &= \frac{kTS_0}{A^2} & \dot{U}'' &= \frac{\dot{U}T}{A} \end{aligned}$$

无量纲的孕震动力学方程组和式(19)~(22)的形式完全相同, 在此不再重复写出公式了.

边界条件及初始条件变为(为方便起见, 一律略去上标“'”)

$$\begin{aligned} u(x, y, t) |_{x=1} &= -\dot{U}t & -B \leq y \leq B \\ u(x, y, t) |_{x=-1} &= \dot{U}t & -B \leq y \leq B \\ v(x, y, t) |_{x=\pm 1} &= 0 & -B \leq y \leq B \\ \sigma_y(x, y, t) |_{y=\pm B} &= 0 & -1 \leq x \leq 1 \\ u(x, y, t) |_{y=\pm B} &= -\dot{U}xt & -1 \leq x \leq 1 \\ u(x, y, 0) &= 0, v(x, y, 0) = 0, p(x, y, 0) = p_0 & \\ f(x, y, 0) &= f_0 & -1 \leq x \leq 1 & -B \leq y \leq B \end{aligned}$$

将场分为两部分: ① 孔隙压力  $p_0$  决定的稳态场; ② 边界加载决定的非稳定场. 我们只需计算第 2 部分场, 即具体计算满足以下边界和初始条件的无量纲非线性方程组(19)~(22)的解:

$$\begin{aligned} u(x, y, t) |_{x=1} &= -\dot{U}t & -B \leq y \leq B \\ u(x, y, t) |_{x=-1} &= \dot{U}t & -B \leq y \leq B \\ v(x, y, t) |_{x=\pm 1} &= 0 & -B \leq y \leq B \\ \sigma_y(x, y, t) |_{y=\pm B} &= 0 & -1 \leq x \leq 1 \\ u(x, y, t) |_{y=\pm B} &= -\dot{U}xt & -1 \leq x \leq 1 \\ u(x, y, 0) &= 0, v(x, y, 0) = 0, p(x, y, 0) = 0 & \\ f(x, y, 0) &= f_0 & -1 \leq x \leq 1 & -B \leq y \leq B \end{aligned}$$

采用有限差分法对问题进行数值求解. 把区域按  $\Delta x = 0.04, \Delta y = 0.0233$  划分为  $50 \times 50$  个单元, 2601 个节点, 建立 9 点对称差分格式. 我们用 Fortran 语言编制了计算程序. 由于节点及涉及的变量多, 使得形成的系数矩阵非常庞大, 以致在内存不是很大的计算机上难以直接运行. 但由于系数矩阵的稀疏性及块三对角性, 我们应用了紧缩存储并发展了一种求解块三对角矩阵的追赶法, 使之得以实现.

计算参数取值为

$$\begin{aligned} E_0 &= 5.83 \times 10^4 & E_i &= 1.2 & E_0 &= 7 \times 10^4 & S_i &= 1.2 \\ E_f &= 0.5 & E_0 &= 2.915 \times 10^4 & S_f &= 0.25 & E_h &= E_0 = 5.83 \times 10^4 \\ S_h &= 0.6 & h_d &= 1.167 \times 10^4 & h_f &= -1.167 \times 10^4 & k_f &= 1.467 \times 10^3 \\ k &= 2.1 \times 10^{-4} & \mu &= 0.6 & \beta &= 0.3 & \xi &= 0.96 & f_0 &= 0.01 & U &= 6.67 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

### 3 计算结果及分析

从数值模拟结果分析, 唐山大地震经历了复杂的时空变化过程. 从图 2a~d 可见, 该

地震首先经历了弹性积累阶段, 此时除过唐山断层区出现了很局限的一些非弹性膨胀外, 整个地震孕育场处于弹性变化阶段。之后, 地震的孕育进入到非弹性膨胀期。在此期间, 菱形硬包体外围的天津-宁河一带最先出现了非弹性膨胀, 随后这个非弹性膨胀区逐渐向外扩大(图 3 a~d)。与此同时, 在硬包体的断层附近也出现了非弹性膨胀, 不过硬包体内的

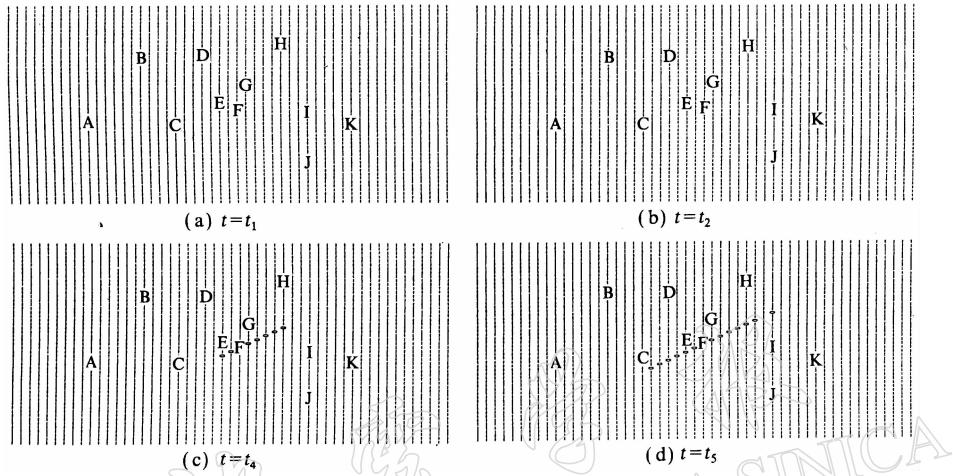


图 2 孕震区各节点变形状态图

图 2~图 4 中: —表示弹性变形, 0 表示非弹性膨胀, \* 表示应变软化, 1 表示弹性恢复; A 为天津, B 为宝坻, C 为宁河, D 为玉田, E 为丰南, F 为唐山, G 为丰润, H 为迁西, I 为滦县, J 为乐亭, K 为昌黎

非弹性膨胀区发展比较缓慢。值得注意的是, 这个非弹性膨胀区的发展过程是和唐山断层的应变软化过程相伴随的。事实上, 在菱形硬包体外围大面积出现非弹性膨胀区的同时( $t=t_7$ ), 唐山断层上的一个局部出现了应变软化(图 3 a)。与应变软化的发展相适应, 这个非弹性膨胀区在不断扩大(图 3 b~d)。另外, 这个应变软化区的发展速率并不是均匀的, 从  $t_7 \sim t_{10}$  应变软化逐渐加速(图 5 a)。与此相对应, 位于菱形硬包体外围东部的非弹性膨胀区突然向滦河-昌黎一带扩张(图 3 b~c), 直至( $t=t_{11}$ )硬包体内的断层以北区域基本上全部发生非弹性膨胀(图 3 d)。随后( $t=t_{12}$ ), 唐山地震孕育场出现了非弹性膨胀的弹性恢复现象。这时, 在硬包体外围的西南方出现了一个大面积弹性恢复区(“1”区)(图 4 a), 它们对应着保留塑性变形的裂缝的弹性闭合。随着地震的孕育, 这些弹性恢复区在逐渐变小(图 4 b~c), 对应着弹性恢复区的第 2 次非弹性膨胀的发生。另外,  $t > t_{13}$  后唐山断裂及其发震扩展段上出现了一个应变软化的加速阶段(图 6 a)。宁河-天津一带全部发生了第 2 次非弹性膨胀( $t=t_{14}$ , 图 4 c), 直至断层全部破坏( $t=t_{15}$ , 图 4 d), 这对应于唐山大地震的发生。

由以上分析可见, 唐山大地震前经历了弹性积累-早期非弹性膨胀-断层第 1 次加速软化-天津-宁河一带第 2 次非弹性膨胀-断层第 2 次加速软化-发震等过程。这些过程在地震前兆资料的分析中已经发现(牛志仁, 1985)。事实上, 将这里的模拟结果与前兆观测资料对照是有趣的。前兆观测表明, 在 1968~1969 年唐山地震震中区附近的唐山-宁河一带出现了异常隆起(国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组, 1982)(参见国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组(1982)的图 4.11), 这可以归结为该区域出现了非弹性体积膨胀。这与计算模拟的在天津-宁河一带首先出现了一个非弹性膨胀区的结果是一致的。观

测资料表明, 1970~1973 年唐山断层上出现了明显的断层蠕滑(表 1)(国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组, 1982). 这与我们计算结果中  $t_7 \sim t_{10}$  的唐山断层应变软化速率的加速相对应. 当然, 这时地震孕育区仍然存在着大面积的非弹性膨胀区. 特别是发生显著软

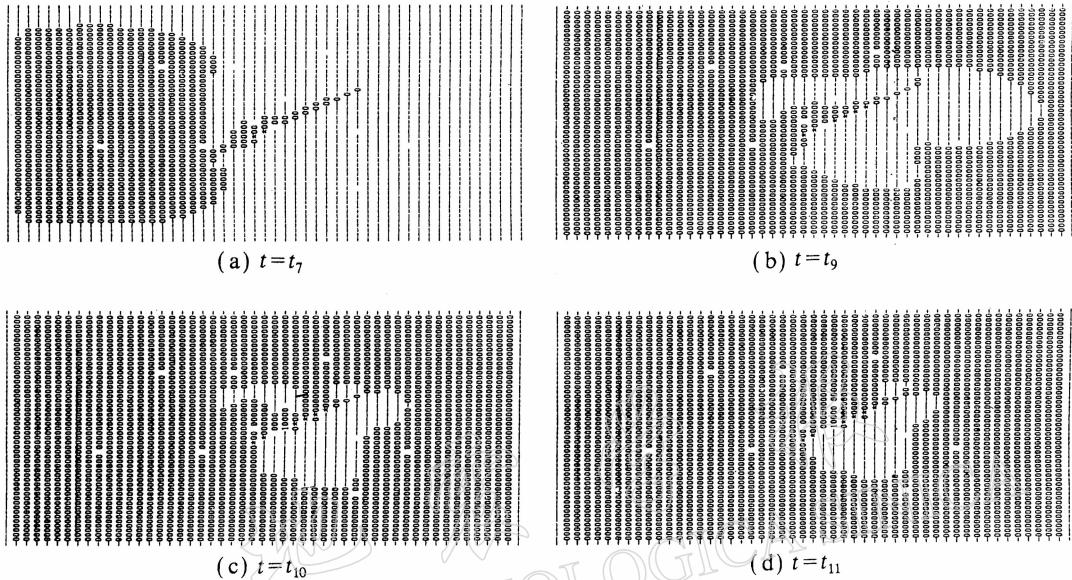


图 3 孕震区各节点变形状态图

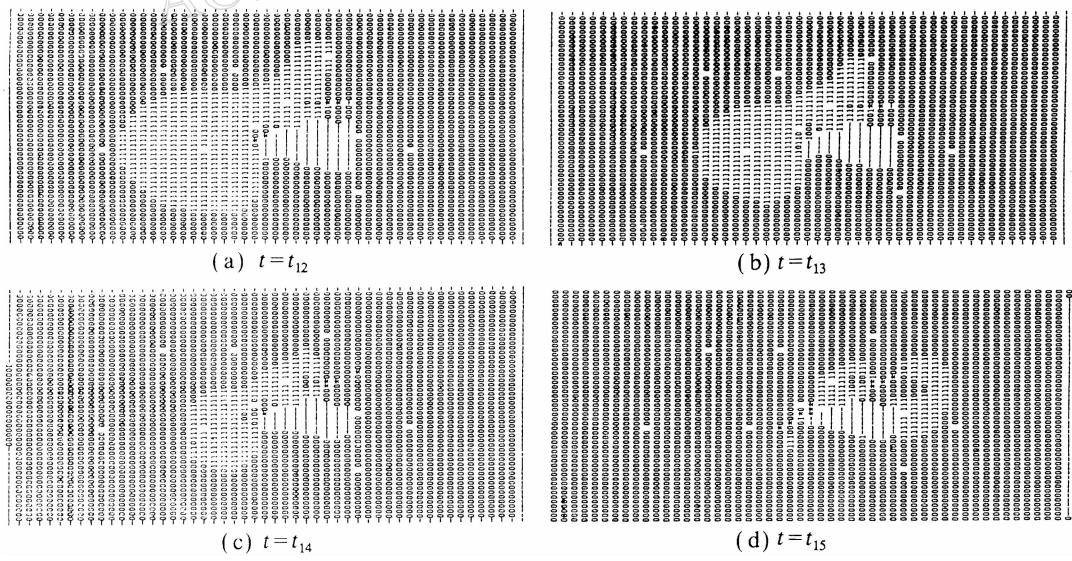


图 4 孕震区各节点变形状态图

化后, 非弹性膨胀区有一个明显扩大, 这与唐山断裂北侧宝坻一带发生的小震群低波速异常(参见国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组(1982)的图 5.14, 图 5.15)是一致的. 1973 年底以后, 唐山地震震中区附近出现了明显的前兆异常(牛志仁, 1985; 牛志仁等,

1979, 图 9), 此时唐山-天津-滦县一带出现了低波速异常区, 表明该区域发生了明显的非弹性膨胀, 这与我们模拟结果中  $t_{12}$  以后在天津-宁河一带出现的第 2 次膨胀区是对应的. 在此期间, 唐山台、昌黎台、宝坻台电阻率出现了明显的趋势性下降. 同时, 在宁河、汉沽、唐山一带出现了明显水位降落区(参见国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组(1982)的图 9.4), 也与第 2 次膨胀区的出现相应. 1975 年下半年起地震波速异常恢复到正常值, 香河台、宁河台短水准出现明显异常(参见国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组(1982)的图 4.30), 这可归因于模拟计算结果中的震前加速软化.

表 1 唐山断层滑动和应变积累速率

时间/a	走滑速率/cm·a <sup>-1</sup>	倾滑速率/cm·a <sup>-1</sup>	应变积累速率/10 <sup>-7</sup> a
1969~1971	20.8	1.6	0.5
1971~1972	22.2	1.7	1
1972~1973	22.9	1.8	3
1973~1975	8.6	0.6	-1

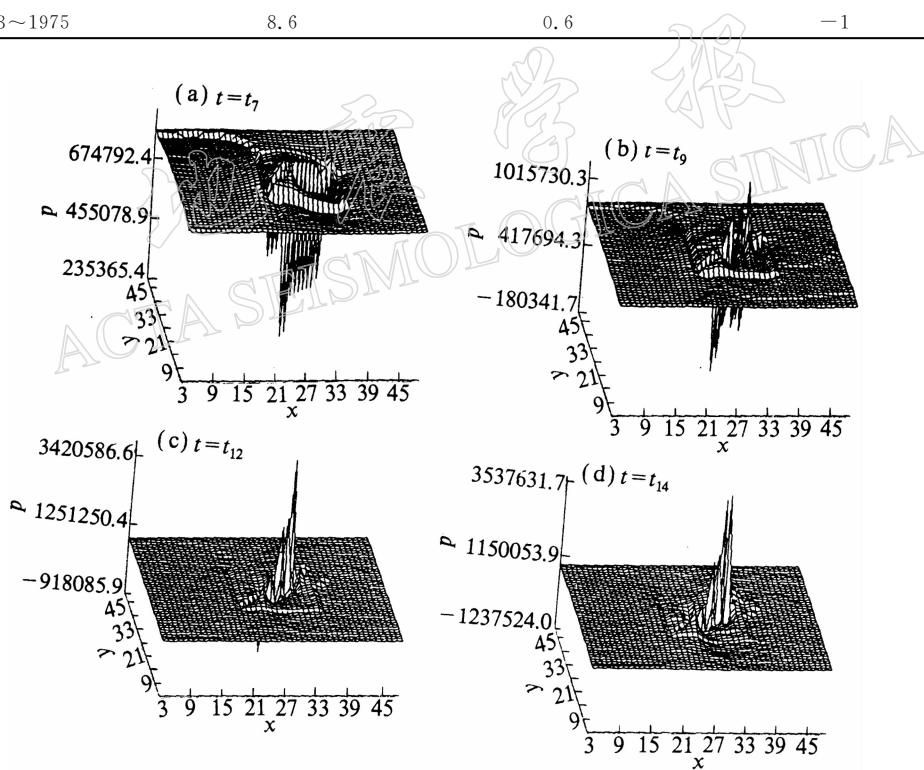


图 5 孔隙压空间分布图

表 2 给出了数值模拟得出的表征唐山地震孕育过程不同阶段的各个特征时间及地震孕育场的主要特征. 为了对比, 表 2 中还列出了实际观测资料给出的孕震过程的阶段特点和主要异常. 由此可见, 本工作对唐山 7.8 级地震孕育过程的主要特征进行了比较成功的模拟.

为了显示非弹性膨胀的时空演变, 给出了孔隙压的空间分布图. 图 5 a 是  $t=t_7$  时的孔隙压分布. 图 5 b 是唐山断层出现明显软化时的孔隙压分布( $t=t_9$ ), 我们可以看到, 在硬包体外围的东北方有一个孔隙压较高的地区, 表明那里仍然保留着一个弹性区. 同时, 断层上的孔隙压出现了非常不均匀的变化. 图 5 c 是  $t=t_{12}$  时的孔隙压分布图. 由图可见, 硬

包体的南方相当于宁河-天津一带的非弹性膨胀区出现弹性恢复. 图 5 d 是唐山断层及其发震时的扩展段临近全部破坏时( $t=t_{14}$ )的孔隙压分布图. 这时断面上的孔隙压分布出现了两个高区, 有助于地震的发生.

表 2 唐山地震孕育过程的阶段划分

孕育时间		$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$	$t_{12}$	$t_{13}$	$t_{14}$	$t_{15}$
		0.40 0.80 1.20 1.60 2.00 2.40 2.48 2.56 2.64 2.72 2.80 2.88 3.08 3.28 3.48														
震中区及硬包体外出现非弹性膨胀	模拟结果	1.28(相当于 1969 年 7 月开始)												震		
唐山断层第 1 次加速软化	观测资料	1968~1969 年震中区异常隆起、小震频度增高、波速比异常														
硬包体外出现第 2 次非弹性膨胀	模拟结果	0.8(相当于 1972 年 3 月开始)												后		
	观测资料	1970 年起震中区隆起恢复、小震频度下降、丰南发生 4.2 级地震、唐山断层蠕滑														
唐山断层震前加速软化	模拟结果	0.48(相当于 1973 年底开始)												后		
	观测资料	1973 年下半年起地震向唐山丛集、b 值下降、波速比异常、水位下降、电阻率下降、水氯上升等														

注: 括号内的时间以无量纲时间 0.1 代表 6.5 个月推算; \*: 1975 年下半年波速异常恢复, 香河台、宁河短水准异常、地下水位下降速率变缓.

图 6 a 是断层平均应力变化图. 由图可以清楚地看出地震孕育的阶段性特征. 诚然, 在  $t \leq t_6$  时平均应力场在近乎匀速地增加, 表明了一种弹性积累过程; 当  $t$  从  $t_7 \sim t_{10}$  变化时, 断层平均应力下降, 这对应着断层的第 1 次加速软化过程; 当  $t_{10} \sim t_{11}$  断层平均应力有一个快速回升, 这与硬包体内唐山断层以北地区的弹性变化区几乎突然全部发生非弹性体积膨胀相对应. 当联系到断层上的孔隙压变化(图 6 b), 可以认为, 这个应力上升是由于水流出产生的膨胀硬化结果.  $t_{11}$  以后到  $t_{13}$  的这段时间内, 断层平均应力基本不变. 此时, 硬包体外围的宁河-天津一带出现了大面积弹性恢复区, 随后又发生了第 2 次非弹性膨胀.  $t_{13}$  以后断层平均应力加速下降直至发震, 它与断层临震前的加速软化相对应.

模拟结果表明, 虽然我们采用了一个不复杂的断层、介质和加载模型, 但是地震的孕育过程和前兆变化却表现出复杂变化的特点. 正如上面讨论的, 地震的孕育在时间和空间方面都表现出了复杂性.

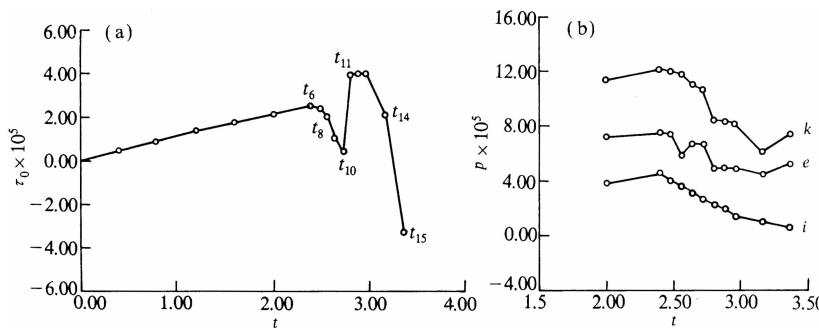


图 6 断层平均应力及孔隙压变化图. (a) 断层平均应力变化; (b) 孔隙压变化

图中曲线为原始数据减去各自的趋势变化部分后绘制的; 点 *e* 处的变化曲线

上移了  $5 \times 10^5$ ; 点 *k* 处的变化曲线上移了  $7 \times 10^5$ ; *k*, *e*, *i* 的位置见图 1 b

从时间上看, 地震孕育不是一个简单的非弹性体积膨胀—进水—发震(DD 模式)、或者裂缝发育和贯通—剪切带形成—发震(IPE 模式), 也不是一个简单的非弹性体积膨胀—断层蠕滑—发震过程(DC 模式). 在一个强震孕育过程中, 可能出现非弹性体积膨胀的恢复和第 2 次膨胀, 也可能出现经过间歇的断层的第 2 次加速蠕滑.

从空间上看, 非弹性膨胀区的空间分布也是复杂的. 它不仅可以在空间的不同部位分别出现, 而且这些非弹性膨胀区可以扩大、恢复、迁移. 一般而言, 非弹性膨胀在硬包体内的断层附近地区出现较早, 然后便在硬包体以外的区域出现, 最后才在硬包体的广大区域出现. 上述这些复杂性将会在一次大地震孕育中引起波速异常区在不同的时刻, 分别在不同的地方出现、扩大、缩小、消失; 也会引起与孔隙压、体积应变、应力等有关的, 诸如水位、水氡、地电阻率等前兆的复杂的空间分布.

## 4 结论

本研究根据 1976 年唐山 7.8 级地震的前兆资料, 结合岩石物理、震源物理、构造物理、地震前兆、地震力源、地壳结构等方面的研究结果, 采用含有菱形硬包体的饱和水孔隙介质模型, 数值模拟了唐山大地震的孕育过程.

本工作首先导出了固相骨架满足本构律(1), 流体渗透的饱水孔隙介质的孕震动力学方程组(7)、(9)、(11)和(12), 并对无量纲化的这个方程组采用有限差分法, 发展了一种求解块三对角矩阵的广义追赶法并应用紧缩存储、自编程序、计算模拟了硬包体内含有断层软弱带时的唐山大震的孕育过程, 以及体应变、孔隙压、断层应力、最大剪应力、剪应变等物理量的变化. 根据计算结果进而讨论了地震孕育的时空变化特征和震源孕育过程.

将数值模拟结果与实际观测资料比较分析可以发现, 本工作比较好地模拟了唐山大地震的孕育过程, 同时还进一步揭示了唐山地震孕育场的时空变化规律和复杂图象. 数值模拟结果表明:

(1) 唐山大地震的孕育主要经历了弹性积累、早期非弹性体积膨胀、断层第 1 次加速软化(加速破坏和蠕滑)、天津-宁河一带第 2 次非弹性膨胀、断层第 2 次加速软化(临震加

速破坏和蠕滑)和发震等过程. 这里, 与断层的加速破坏对应, 孕震介质的某些部分出现了非弹性膨胀的弹性恢复和第 2 次非弹性膨胀.

(2) 唐山大地震的孕育场具有复杂的变化图象. 首先, 在硬包体外围的宁河-天津一带出现非弹性膨胀区, 此膨胀区随后不断地向硬包体的周围扩大. 当断层发生第 1 次加速软化时, 在菱形硬包体外围的东部, 非弹性膨胀区突然向接近硬包体的昌黎-滦县一带扩展. 随后在硬包体西部的宁河-天津一带出现了一个弹性恢复区, 它对应着裂缝的弹性闭合. 接着, 该区域出现了第 2 次非弹性膨胀. 当断层出现第 2 次加速软化时, 原来的弹性恢复区基本上又重新全部发生了非弹性膨胀, 直至断层全部软化, 地震发生.

(3) 实际观测到的唐山地震的主要前兆异常, 可以用本文的模拟结果进行解释(表 2). 事实上, 1968~1969 年唐山-宁河一带出现的异常隆起区可以用模拟结果给出. 首先在宁河-天津一带出现, 尔后逐渐扩展的非弹性膨胀区来解释. 随后, 1970 年以来唐山断层上观测到的断层明显蠕滑等异常, 与模拟结果中的断层第 1 次加速软化相对应. 此时, 计算结果显示, 断层北侧的宝坻一带仍处于非弹性膨胀状态. 实际资料表明, 宝坻一带出现了一个低波速异常区. 另外, 1973 年下半年起出现的  $b$  值下降、波速下降等异常; 宁河、汉沽一带出现了一个明显的水位降落区; 唐山台、昌黎台电阻率出现了明显的趋势性下降, 都可以用宁河-天津一带出现的第 2 次非弹性膨胀得到解释. 1975 年下半年起地震波速异常恢复到正常值, 香河台、宁河台短水准显著异常, 这恰好与计算结果中断层在地震发生前的第 2 次加速软化相对应.

感谢梅世蓉、张国民、朱传镇、冯德益几位教授的支持和帮助.

## 参 考 文 献

- 国家地震局《一九七六年唐山地震》编写组, 1982. 一九七六年唐山地震. 北京: 地震出版社. 377~404
- 郭增建, 秦保燕, 1979. 震源物理. 北京: 地震出版社. 6
- 马宗晋, 1982. 1966~1976 中国九大地震. 北京: 地震出版社. 139~157
- 梅世蓉, 梁北援, 1986. 岩石膨胀与地震前兆机制(一). 地震, (1): 1~8
- 梅世蓉, 梁北援, 朱岳清, 1989. 唐山地震前兆机制的数值模拟. 中国地震, 5(2): 27~34
- 梅世蓉, 赵燕来, 孙若昧, 1993. 渤海及其邻区三维速度结构与地震活动性的关系. 地震科学研究论文选集. 北京: 地震出版社. 391~411
- 牛志仁, 1978. 构造地震的前兆理论. 地球物理学报, 21(3): 199~212
- 牛志仁, 1985. 震源过程的膨胀-蠕滑模式和唐山地震(英文稿). 西北地震学报, 7(1): 102~121
- 牛志仁, 李炳乾, 陈党民, 1991. 地震综合预报的物理方法. 见: 国家地震局科技监测司(编), 地震预报方法实用化研究文集(综合预报专辑). 北京: 地震出版社. 307~316
- 牛志仁, 张逸, 麻水岐, 1979. 唐山 7.8 级地震前兆异常的物理解释. 西北地震学报, 1(2): 9~16
- 张国民, 张永仙, 石耀霖, 1994. 地震前兆复杂性的数值模拟研究, 地震, (1): 2~11
- Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A, et al, 1975. Two models for earthquake forerunners. *Pure Appl Geophys*, 113: 1~2
- Sholz C H, Sykes L R, Aggrawal Y P, et al, 1973. Earthquake prediction: a physical basis. *Science*, 181 (4102): 803~809
- Rice J R, 1979. *The Mechanics of Earthquake rupture*. Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", Italian Physical Society, Course LXXVIII on Physics of the Earth's Interior. 91~93
- Киссин И Г, 1982. Землетрясения и лод земные воды. Наука. Москва