

坚固体孕震模式下地下流体异常 时空演化的数值模拟^{*}

张 慧 梁子彬

(中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所)

摘要 利用固液二相介质平面应变问题的有限元方法, 研究了倾滑型地震地下流体场兆、源兆特征及时空演变过程。结果表明: 孕震的早期阶段, 即弹性积累和非线性阶段, 地下流体缓慢变化, 异常不明显; 中期阶段, 即硬化及局部膨胀阶段, 震源区出现膨胀, 地下流体异常主要集中在震源区, 源兆出现得早, 场兆出现得晚; 进入中短期阶段, 即大范围膨胀阶段, 震源区异常继续发展, 异常区不断扩大, 在震源区以外出现新的异常值较大的地区。

关键词 地下流体 场兆 源兆 机理 数值模拟

引言

倾滑是断层活动及发震的一种方式, 这种类型在西北地区较为典型。特别是青藏块体东北缘, 受印度板块与青藏块体碰撞的影响和作用, 成为一个强烈的挤压区。现今构造活动中仍存在着许多以逆冲挤压方式活动的断层。例如, 1990年青海共和 6.9 级地震就是一次以倾滑为主的代表性地震, 也是西北地区近年来发生的震级最大、破坏性最强烈的一次地震。李旭和陈运泰(1996)利用长周期地震体波波形资料反演的结果表明, 这次地震主震的破裂过程较为复杂, 至少是由时间相隔约 35 s 的两次事件构成。但是两次事件和余震的震源机制都是一致的, 都是以逆冲为主的左旋-逆断层滑动。

为了研究地下流体场兆、源兆特征及其时空演化过程, 本文以逆冲型地震为例, 根据坚固体孕震模式(梅世蓉, 1995)建立模型, 利用固-液二相介质平面应变问题的有限元方法(梁子彬等, 1997), 研究地震孕育过程中地下介质物理参量的变化。重点讨论了与流体密切相关的孔隙度、孔隙压的时空演化过程以及与地下流体异常时空演化的关系, 为场兆、源兆判别指标提供理论依据。

1 孕震介质理论模型

我们选取的孕震介质为饱水的固液二相孔隙介质。它满足下面的方程(Rudnicki, Rice, 1975):

* 中国地震局“九五”重点项目(9504010107)资助。中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC1999072。
1999-04-23 收到初稿, 1999-12-10 收到修改稿并决定采用。

(1) 介质本构关系

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_\alpha}{\partial X_\beta} + \frac{\partial \dot{u}_\beta}{\partial X_\alpha} \right) = \frac{1}{2G} (\dot{\sigma}_{\alpha\beta} - \delta_{\alpha\beta} \dot{\sigma}_0) + \frac{1}{3K} \delta_{\alpha\beta} (\dot{\sigma}_0 - \xi \dot{P}) + \frac{1}{h} \left[\frac{\sigma_{\alpha\beta} - \delta_{\alpha\beta} \sigma_0}{2\tau} + \frac{\beta}{3} \delta_{\alpha\beta} \right] \left[\frac{\sigma_{\gamma\delta} - \delta_{\gamma\delta} \sigma_0}{2\tau} + \frac{\mu}{3} \delta_{\gamma\delta} \right] (\dot{\sigma}_{\gamma\delta} - \dot{P} \delta_{\gamma\delta}) \quad (1)$$

这里, 下角标满足爱因斯坦求和约定. 其中

$$\tau = \sqrt{(\sigma_{\alpha\beta} - \delta_{\alpha\beta} \sigma_0)(\sigma_{\alpha\beta} - \delta_{\alpha\beta} \sigma_0)/2}$$

式(1)中, G , K , h , β , μ 分别为固体介质的剪切模型、体积模量、硬化模量、膨胀因子和摩擦系数, ξ 为介质常数.

(2) 介质连续性条件

$$\frac{1}{1-f} \dot{f} - \frac{\partial \dot{u}_\alpha}{\partial X_\alpha} = 0 \quad (2)$$

式中, f 为固体框架的孔隙度.

(3) 运动平衡方程

$$\frac{\partial \sigma_{\alpha\beta}}{\partial X_\alpha} = 0 \quad (3)$$

(4) 由达西定律可得

$$\frac{1}{f(1-f)} \dot{f} + \frac{1}{K_f} \dot{P} - \frac{\eta}{f} \frac{\partial^2 \dot{P}}{\partial X_\alpha^2} = 0 \quad (4)$$

其中, η 为水的粘滞系数, K_f 为水的压缩模量.

根据以上方程推导, 得出平面应变问题应力应变关系的矩阵表达式

$$\mathbf{S}\dot{\boldsymbol{\epsilon}} = \mathbf{T}\dot{\boldsymbol{\sigma}} \quad (5)$$

将式(5)写成 $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{Q}\dot{\boldsymbol{\epsilon}}$. 依虚位移原理, 得单元刚度矩阵

$$\mathbf{K} = \mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{B} \Delta S \quad (6)$$

其中, $\mathbf{Q} = \mathbf{T}^T \mathbf{S}$, \mathbf{B} 为单元应变矩阵, ΔS 为单元面积, 总刚度方程可写为

$$[\mathbf{K}] \dot{\boldsymbol{\delta}} = \dot{\mathbf{R}} \quad (7)$$

若取时间间隔 Δt , 则

$$[\mathbf{K}] \Delta \boldsymbol{\delta} = \Delta \mathbf{R} \quad (8)$$

其中, $\Delta \boldsymbol{\delta}$ 为结点位移变化向量, $\Delta \mathbf{R}$ 为边界条件变化向量. 解上面的线性刚度方程组, 可依次求得 $\Delta \boldsymbol{\delta}$, $\Delta \boldsymbol{\epsilon}$, $\Delta \boldsymbol{\sigma}$ 及 Δf , 由 Δf 利用式(4)可求得 ΔP .

2 计算模型、介质参数及边界条件的选取

逆冲型地震以挤压为主, 为此选取通过震源的剖面作为研究区域, 不考虑与剖面垂直的方向上的变化. 这是一个平面应变问题. 图 1 为计算模型示意图.

由图可见, 整个研究区域由 3 部分组成: 未来震源区 A, 依据坚固体模式, 这个区域为一硬包体区; 周围介质区 B 和断裂破碎区 C. 图 1 中, 1~4 号点为源兆区代表点

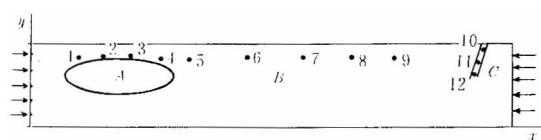


图 1 计算模型示意图

位; 5~9号点为场兆区代表点位; 10~12号点为断裂区代表点位。

研究区长375 km, 宽度为60 km。硬包体A为一长轴70 km、短轴30 km的椭圆。断裂区长25 km, 宽3 km。介质参数见表1。边界条件的取值见表2。

表1 计算模型介质参数

介质种类	剪切模量 G $/10^5 \text{ MPa}$	体积模量 K $/10^5 \text{ MPa}$	水的弹性 模型 K_S $/10^5 \text{ MPa}$	水的粘滞 系数 η $/\text{Pa} \cdot \text{s}$	初始硬化 模量 h $/10^5 \text{ MPa}$	膨胀因子 β	摩擦系数 μ	孔隙度
硬包体	0.69	1.15	0.02	0.028 4	0.012 4	0.3	0.6	1%
上地壳	0.30	0.90	0.02	0.284	0.005 4	0.3	0.6	1%
中、下地壳	0.55	1.00	0.02	0.028 4	0.009 9	0.3	0.6	1%
断层	0.27	0.60	0.02	0.284	0.004 9	0.3	0.6	1%
资料来源	(1)	(1)	(1)	(2) (3)	(4)	(4)	(4)	

注: (1) 梁子彬等(1997), (2) 版田修一等(1979), (3) 中国科学院地球化学研究所(1998), (4) Rudnicki 和 Rice(1975)。

表2 边界条件类型和取值

边界类别	x 方向		y 方向	
	边界条件类型	取值/ $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 或 N	边界条件类型	取值/ $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 或 N
左边界	位移	10	力	0
右边界	位移	-10	力	0
下边界	力	0	位移	0

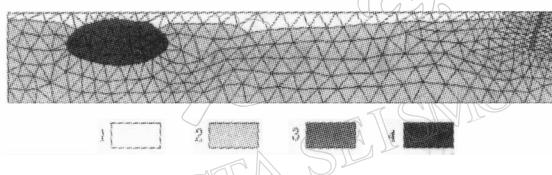


图2 研究区单元剖分图

1. 上地壳; 2. 中下地壳; 3. 断层; 4. 硬包体

以后各时刻重力的变化量 $\Delta G=0$ 。

研究区单元剖分见图2, 共划分为632个单元, 361个节点。

3 计算结果及分析

3.1 岩石的变形过程

图3给出了几个有代表意义时刻各个单元的力学状态。从图中可见, $t_1 \sim t_3$ 时段为弹性积累阶段; $t_4 \sim t_{16}$ 时段为非线性及局部硬化阶段; $t_{17} \sim t_{24}$ 时段为硬化及局部膨胀阶段; $t_{25} \sim t_{27}$ 时段为膨胀阶段; t_{28} 为破裂阶段。破裂的识别根据 Coulomb-Mohr 破裂准则, 内聚力的取值根据 Marone 等(1992)的实验结果。识别结果表明, 破裂首先发生在硬包体边缘, 之后在硬包体内进一步扩展。

3.2 孕震过程岩石孔隙度、孔隙压时空变化特征

我们所研究的孕震介质是由固体骨架和孔隙流体组成的饱水二相介质。在区域构造应力的作用下, 如前所述, 介质将发生一系列的变形, 岩石的物理参数也随之改变。其中孔隙度和孔隙压是与地下流体及其化学组分赋存、释放、流动特性有关的物理量。

模型的左右两侧分别以 10 cm/a 的位移速率相对挤压。每一时段 Δt 代表1年, 整个孕震模拟过程分为30个时段, 从 $t_1 \sim t_{30}$ 。上界面为自由面, 下界面 y 方向固定。根据方程(8), ΔR 为边界条件力或位移的变化向量, 所以在初始条件下各单元加上重力的作用,

3.2.1 孔隙度

孔隙度是一个与氡的释放量密切相关的物理量。岩石孔隙度变大，使岩石表面积增大，氡的射气系数提高，岩石孔隙流体中氡的含量也随之升高。但当孔隙度增大到一定值后，氡的生成和释放达到平衡，孔隙水中氡的含量趋于稳定，不再随孔隙度的增大而增大。

图4a, b, c分别为硬包体区、周围介质区的近地表单元和断裂区各个代表点位的孔隙度随时间的变化曲线。由图可见，硬包体区(源兆区)在 $t_1 \sim t_{16}$ 时段，孔隙度下降，最小值为0.99984； $t_{17} \sim t_{24}$ 时段即硬化和局部膨胀阶段，孔隙度增大； $t_{25} \sim t_{27}$ 时段即大面积膨胀阶段，孔隙度继续增大，最大值达0.99992。周围介质区(场兆区)在 $t_1 \sim t_{16}$ 时段孔隙度下降， $t_{17} \sim t_{24}$ 时段孔隙度继续下降，最小值为0.99979， $t_{25} \sim t_{27}$ 时段孔隙度上升，最大值为0.99984。自膨胀开始硬包体区孔隙度的变化量为0.00008，周围介质区孔隙度的变化量为0.00005。因此，在孕震的中期和中短期阶段，水氡异常以趋势性上升为主，且在震源区先出现水氡的上升变化，水氡异常源兆出现得早，场兆出现得晚。在断裂区，孔隙度一直在

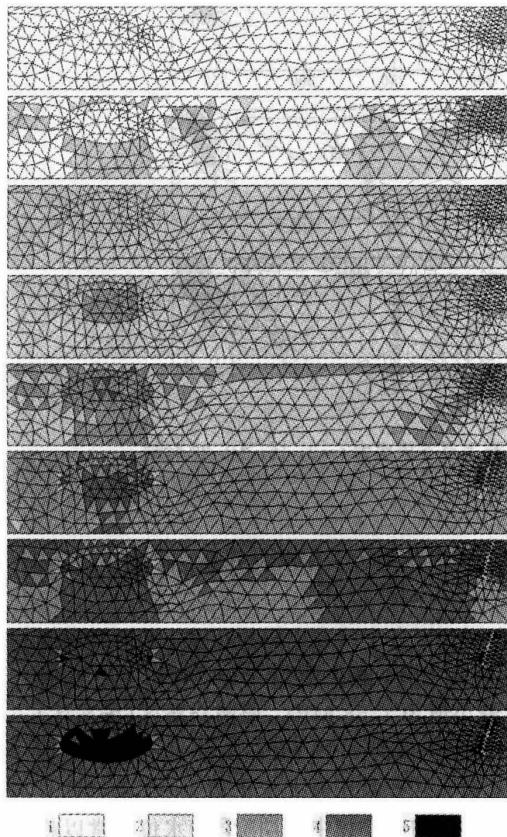


图3 典型时刻单元力学状态图。自上至下依次为 $t=1, 4, 8, 12, 17, 20, 25, 27, 28$ 时刻

1. 线性；2. 非线性；3. 硬化；4. 膨胀；5. 破裂

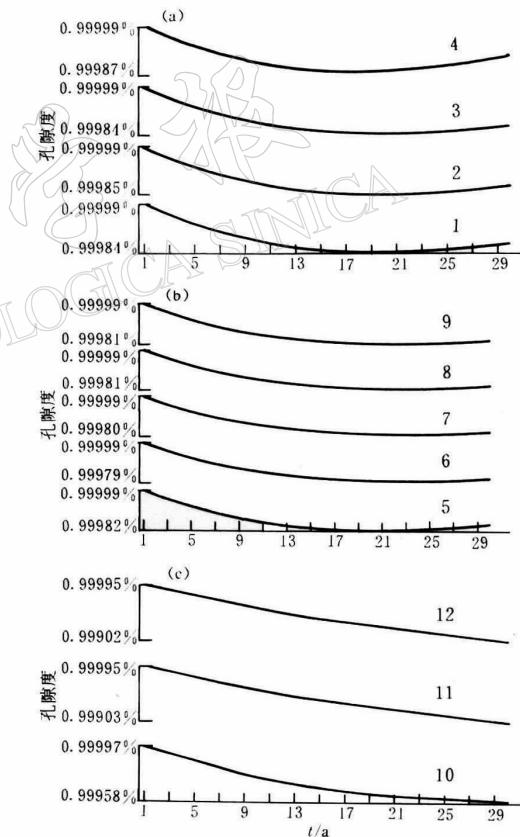


图4 不同区各个代表点位孔隙度
随时间的变化曲线

(a) 硬包体区；(b) 周围介质区；(c) 断裂区

线性减少，近地表单元孔隙度最小值为 0.999 58.

图 5 为典型时刻孔隙度的等值线分布图。图中可见， $t_1 \sim t_3$ 时段，硬包体下部为孔隙度高值区，在硬包体两端出现了两个孔隙度低值区； $t_4 \sim t_{16}$ 时段，孔隙度的高值区向硬包体内及地表方向扩展，最大值在硬包体中心部位； $t_{17} \sim t_{24}$ 时段，形成了以硬包体为中心的孔隙度高值区，周围介质区孔隙度减小； $t_{25} \sim t_{27}$ 时段即破裂以前，孔隙度高值区不变，只是孔隙度的值不断增大，周围介质区孔隙度增大。因此，在孕震中期阶段，水氡异常主要集中在震源区，到了中短期阶段，场兆大量出现。

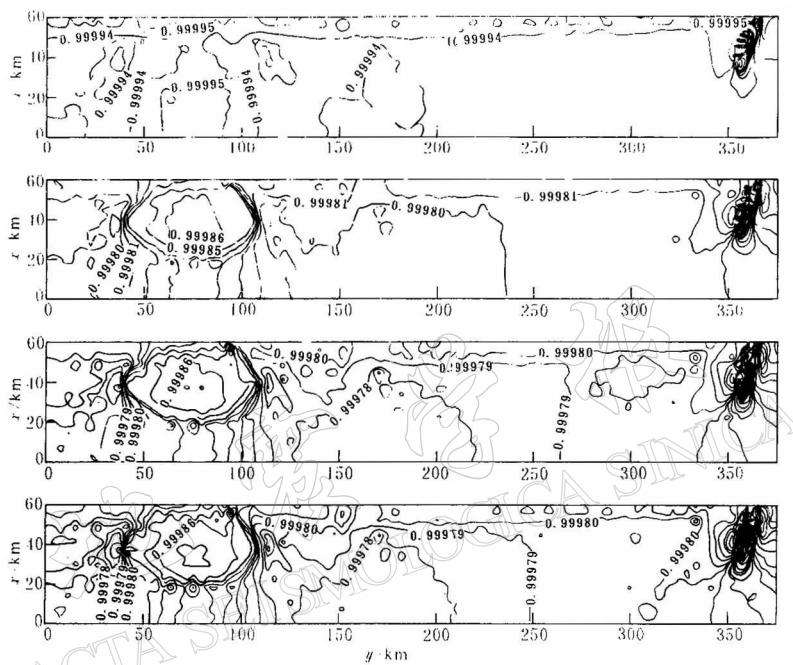


图 5 不同时刻孔隙度(%)等值线分布图。自上至下依次为 $t=3, 16, 24, 27$ 时刻

3.2.2 孔隙压

孔隙压是一个与井水位密切相关的物理量。孔隙压增大，井水位升高；孔隙压减小，井水位下降。

图 6 a, b, c 分别为硬包体区、周围介质区和断裂区各个代表点位的孔隙压随时间的变化曲线。由图可见，硬包体区在 $t_1 \sim t_{16}$ 时段，孔隙压上升，最大值为 3.30 MPa； $t_{17} \sim t_{24}$ 时段，孔隙压下降； $t_{25} \sim t_{26}$ 时段孔隙压继续下降，最小值为 1.58 MPa。周围介质区（场兆区）在 $t_1 \sim t_{16}$ 和 $t_{17} \sim t_{24}$ 时段，孔隙压都在上升，最大孔隙压值为 4.10 MPa； $t_{25} \sim t_{26}$ 时段孔隙压下降，孔隙压最小值为 3.09 MPa。自膨胀开始，源兆区孔隙压最大变化量为 -1.42 MPa，周围介质区孔隙压最大变化量为 -1.01 MPa。在孕震的中期和中短期阶段，水位异常以趋势性下降为主，且在源兆区首先出现。

在破裂带，孔隙压的变化随时间趋势性升高，最大值可达 20.0 MPa，比周围介质孔隙压高一个数量级。靠近地表的点位，孔隙压值较小，最大为 8.40 MPa，比硬包体区和周围介质区高一倍。

图7为典型时刻孔隙压的等值线分布图。由图可见, $t_1 \sim t_3$ 时段在硬包体下部为孔隙压的低值区, 硬包体两端出现两个孔隙压高值区; $t_4 \sim t_{16}$ 时段孔隙压低值区向硬包体内及地表方向扩展; $t_{17} \sim t_{24}$ 时段形成了以硬包体为中心的孔隙压低值区; $t_{25} \sim t_{27}$ 时段(破裂以前), 也就是孕震中短期阶段, 周围介质区孔隙压下降, 且这些低值区的范围不断扩大。

因此, 井水位的异常首先在震源区出现, 到了孕震后期, 中短期阶段, 异常范围不断扩大, 而震源区异常发展相对稳定。

4 讨论与结论

(1) 模拟结果表明, 整个地震孕育过程经历了以下几个主要阶段:

1) 弹性积累阶段($t_1 \sim t_3$)。整个研究区岩石表现为线弹性变形, 岩石被压密, 孔隙度减小, 孔隙压增大;

2) 非线性及局部硬化阶段($t_4 \sim t_{16}$)。周围介质发生非线性变形, 硬包体硬化, 孔隙压增大, 孔隙度变小;

3) 硬化及局部膨胀阶段($t_{17} \sim t_{24}$)。周围介质区发生硬化变形, 孔隙度继续变小, 孔隙压继续增大。而在此阶段, 硬包体区开始膨胀, 孔隙度开始增大, 孔隙压开始减小;

4) 大范围膨胀阶段($t_{25} \sim t_{27}$)。整个研究区出现大范围非线性膨胀, 孔隙度增大, 孔隙压减小, 硬包体边缘开始出现破裂;

5) 破裂阶段(t_{28})。硬包体大面积破裂。

(2) 水氡变化与孔隙度密切相关, 孔隙度增大, 氡的释放量增多, 水氡含量升高。水氡异常的典型形态为稳定—趋势上升—发震。水氡趋势性异常, 特别是中短期异常主要表现为趋势性升高。

地下水位与孔隙压的关系是: 孔隙压增大, 地下水位上升。地下水位异常的典型形态为平稳上升—趋势下降—发震。中短期异常以趋势性下降为主。

(3) 非线性膨胀首先发生在硬包体及硬包体之上的源兆区, 因此, 地下流体异常首先在震源区出现, 源兆出现得早, 场兆出现得晚。

在孕震中期和中短期阶段, 震源区既是孔隙度的高值异常区, 又是孔隙压的低值异常

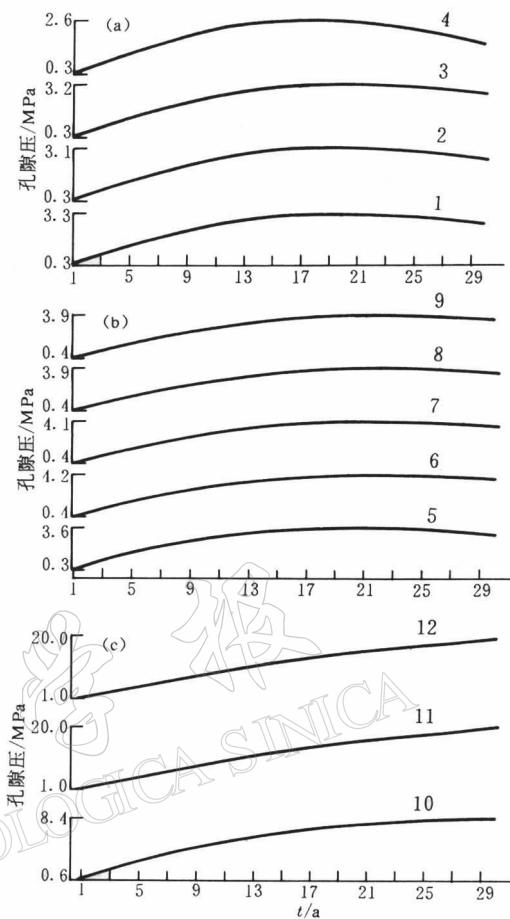


图6 不同区各代表点位孔隙压
随时间变化曲线

(a) 硬包体区; (b) 周围介质区; (c) 断裂区

区, 因此, 地下流体异常多集中在震源区。进入中短期孕震阶段, 异常区扩展, 场兆大量出现, 而震源区异常的发展相对稳定。

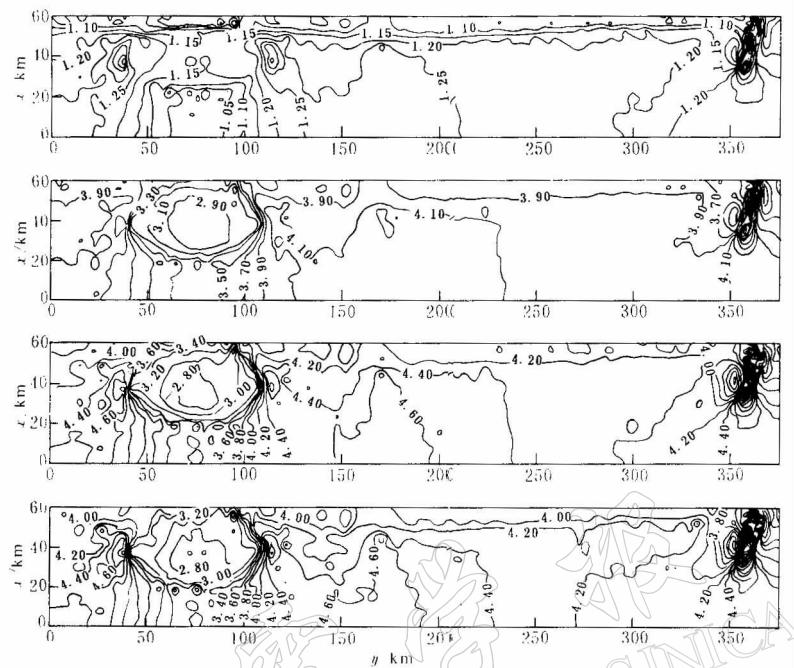


图 7 不同时刻孔隙压(MPa)等值线分布图. 自上至下依次为 $t=3, 16, 24, 27$ 时刻

参 考 文 献

- 版田修一, 大野和郎, 神前熙, 等著. 1969. 张质贤译. 1979. 物理学常用数表. 北京: 科学出版社, 80
- 李旭, 陈运泰. 1996. 用长周期地震体波波形资料反演 1990 年青海共和地震的震源过程. 地震学报, **18**(3): 279~286
- 梁子彬, 钱家栋, 夏玉胜, 等. 1997. 用二相介质有限元对共和 7.0 级地震前兆的数值模拟. 西北地震学报, **19**(3): 69~73
- 梅世蓉. 1995. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一)——坚固体模式的由来与证据. 地震学报, **17**(3): 273~282
- 中国科学院地球化学研究所. 1998. 高等地球化学. 北京: 科学出版社, 113
- Marone C, Hobbs B E, Ord A. 1992. Coulomb constitutive laws for friction: contrasts in frictional behavior for distributed and localized shear. *Pure Appl Geophys*, **139**(2): 195~213
- Rudnicki J W, Rice J R. 1975. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials. *Mech Phys Solids*, **23**: 371~394