用四维反演方法研究地震活动的深部环境

刘天铭,苏 瑞,张伯宏

(中国地震局第二地形变监测中心,陕西西安 710054)

摘要: 导出了用重力和水准重复测量资料反演地壳界面密度和垂直形变随时间变化 的四维反演公式,并对甘肃河西地区(包括祁连山地区)和滇西北地区的重力和水准 重复测量资料进行了计算.根据计算结果,分析了2个地区莫霍面密度变化速率和垂 直形变速率与地震的关系.结果表明,甘肃河西地区和滇西北地区莫霍面密度大规模 减小和莫霍面大范围隆起可作为1年尺度的地震预报的深部判据.地震往往发生在 莫霍面隆起区与沉降区、密度减小区与增长区的过渡地带. 关键词:四维反演: 重力反演; 莫霍面; 界面密度: 垂直变化; 地震活动; 深部构造

中图分类号: P542.5: P315.72 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2001)03-0217-07

0 引言

在用重力资料研究地壳深部结构方面,由于受测量仪器的限制(相对测量精度较低,为1 µm/s²),一般采用三维反演方法.三维方法所研究的仅是地壳厚度与上地幔密度的静态分 布^[1~4].随着重力测量仪器的改进和测量精度的提高(目前相对测量精度已达到 0.07~0.1 µm/s²),用四维重力反演方法研究地壳深部结构的动态变化已成为可能.通过反演地壳下界 面介质密度和垂直形状随时间的变化,可以了解上地幔物质的活动情况,而上地幔物质活动是 板内地震发生的主要原因之一.因此,用重力和水准重复测量资料反演地壳下界面的密度和垂 直形状随时间的变化,对于探索与地震孕育相联系的前兆信息,进而实现地震预报具有重要的 理论和实际意义.

本文在三维反演模型的基础上,导出了利用四维模型反演地壳界面的介质密度和垂直形 状随时间变化的公式,并用甘肃河西地区和滇西北地区的重力和水准重复测量资料,计算了这 2个地区莫霍面密度变化速率和垂直形变速率,绘制了莫霍面(以下简称 M 面)的介质密度变 化速率和垂直形变速率等值线图,结合地震和地质构造资料对这 2 个地区中强地震活动的深 部环境进行了探讨.

1 计算公式推导

1.1 计算界面密度变化速率的公式

由重力重复测量可得出测网中各点的重力变化速率,它是由界面结构变化和测点地面的 垂直形变所引的.因此,假定界面形状不变,界面结构随时间变化所产生的重力变化只是由界

收稿日期: 2000-09-19

作者简介:刘天铭(1942-),男(汉族),四川眉山人,高级工程师,主要从事科技信息、大地测量及地震预报研究工作.

面介质密度改变所引起,这样,就可以由地面点的重力速率值和 垂直形变速率值反演界面密度随时间的变化.

在图 1 所示的坐标系中,假定地面点为 P(x, y, z(t)),质 点为 Q(x', y', z'(t)),密度为 P(x', y', t),界面为f(x, y, t), 由三维重力反演理论^[1] 可知, *t* 时刻的地面重力效应的纯量表 示式为:

$$g_t = G \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x', y', t) \circ \left[\frac{1}{R_{z(t)}} - \frac{1}{R_{z'(t)}} \right] \mathrm{d}x' \mathrm{d}y' \quad (1)$$



当日 「二本主方次次の 坐标系 示意图 Fig.1 A sketch of the coordinate

system for four-dimensional gravity inversion.

式中: G为引力常数, $R_z(t)$ 和 $R_z'(t)$ 分别为:

$$R_{z(t)} = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$$
(2)

$$R_{z'(t)} = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + [z(t) - z'(t)]^2}$$
(3)

t₀时刻的重力效应

$$g_{t_0} = G \int_{-\infty}^{\infty} \rho(x', y', t_0) \circ \left[\frac{1}{R_{z(t_0)}} - \frac{1}{R_{z'(t_0)}} \right] dx' dy'$$
(4)

由整理式(1)~(4),可得:

$$g_{t} - g_{t_{0}} = G \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\rho(x', y', t)}{R_{z(t)}} - \frac{\rho(x', y', t_{0})}{R_{z(t_{0})}} \right] dx' dy' + G \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\rho(x', y', t_{0})}{R_{z'(t_{0})}} - \frac{\rho(x', y', t)}{R_{z'(t)}} \right] dx' dy'$$
(5)

对式(5)二边同除以 $(t - t_0)$, 当 $t \rightarrow t_0$ 时, 求其极限:

$$\lim_{t \to t_0} \frac{g_t - g_{t_0}}{t - t_0} = G \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{t \to t_0} \left\{ \left[\frac{\rho(x', y', t)}{R_{z(t)}} - \frac{\rho(x', y', t_0)}{R_{z(t_0)}} \right] \left(t - t_0 \right) \right\} dx' dy' + G \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{t \to t_0} \left\{ \left[\frac{\rho(x', y', t_0)}{R_{z'(t_0)}} - \frac{\rho(x', y', t)}{R_{z'(t_0)}} \right] \left(t - t_0 \right) \right\} dx' dy'$$
(6)

式(6)左端为地面重力效应速率, 记为 λ_g ; 对于右端应用罗比塔法则, 并假定初始时刻地面速 度 $\frac{\partial_z(t_0)}{\partial t} = 0$, 界面变形速率 $\frac{\partial f(x, y, t)}{\partial t} = 0$, $\frac{\partial_z(t)}{\partial t} = -\lambda_H(\lambda_H)$ 为地面点的垂直形变速率, 负 号是由于 z 轴向下), $z(t) = z(t_0) - \lambda_H \circ \Delta t$, 这样, 式(6)演变为:

考虑
$$z(t_0) - f(x', y', t_0) \gg \lambda_H \circ \Delta t$$
, 对式(7)积分,得:
 $\lambda_g = G \circ \lambda_{\rho(x', y', t)} \circ (K_1 - K_2) + G \circ \lambda_H \circ \rho(x', y', t) \circ$
 $\operatorname{arctg}\left\{ (x - x')(y - y') / [z(t_0) - f(x', y', t_0)] \circ \int_{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + [z(t_0) - f(x', y', t_0)]^2}} \right\}$
(8)

式中:

$$K_{1} = (x - x') \cdot \ln \left[(y - y') + \sqrt{(x - x')^{2} + (y - y')^{2}} \right] -$$

$$\begin{split} 4(y-y') &\circ \arctan\left\{ \arctan\left\{ \frac{(x-x')}{(y-y')} \right\} \sqrt{\left\{ 1 - \left[2 \arctan\left\{ \arctan\left\{ \frac{(x-x')}{(y-y')} \right\} \right]^2 \right\} - \left[(y-y') \circ \ln\left\{ \left[1 + 2 \arctan\left\{ \arctan\left\{ \frac{(x-x')}{(y-y')} \right] \right] \right\} \left[1 - 2 \arctan\left\{ \arctan\left\{ \frac{(x-x')}{(y-y')} \right\} \right] \right\} \right\} \\ K_2 &= (x-x') \circ \ln\left\{ (y-y') + \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + [z(t) - z'(t)]^2} \right\} - 2 \sqrt{(y-y')^2 + [z(t) - z'(t)]^2} \sqrt{\left[(y-y') + \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} \right]^2} \\ 2 \arctan\left\{ \arctan\left\{ \arctan\left\{ x - x' \right\} \right\} \sqrt{(y-y')^2 + [z(t) - z'(t)]^2} \right\} \sqrt{\left[1 - \left[2 \arctan\left\{ \arctan\left\{ \frac{(x-x')}{(y-y')^2 + [z(t) - z'(t)]^2} \right\} \right] \right]^2 \right\} + 1 \\ \ln\left\{ \left[1 + 2 \operatorname{arctg} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{(x-x')}{(y-y')} \right] \right] \right\} \left[1 - 2 \operatorname{arctg} \left[\operatorname{arctg} (x-x') \right] \right] \right\} \\ \sqrt{(y-y')^2 + [z(t) - z'(t)]^2} \right] \\ &\sqrt{(y-y')^2 + [z(t) - z'(t)]^2} \\ \end{bmatrix} \end{split}$$
将式(8)表达成 习惯的数学式, 得:

$$\lambda_{g} = A \circ \lambda_{\rho(x', y', t)} + B \circ \rho(x', y', t_{0}) \circ \lambda_{H}$$
(9)

$$\mathbb{E} (\Psi) : A = G \circ (K_1 - K_2)$$

$$B = G \circ \operatorname{arctg} \left\{ (x - x')(y - y') / [z(t_0) - f(x', y', t_0)]^2 \right\}$$

$$f(x', y', t_0) \circ \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + [z(t_0) - f(x', y', t_0)]^2}$$

众所周知,对于一个厚度为 Z = H(通常表示为 $\Delta H(t)$),面积为无穷大的水平薄板,其 t时刻的重力效应公式为:

$$\Delta g(t) = 2\pi G \circ \Delta H(t) \tag{10}$$

对式(10)的时间 t 求导:

$$\Delta g(t) = 2\pi G \circ \Delta H(t) \tag{11}$$

这样,式(9)可简化为:

$$\lambda_{\rm g} = 2\pi G \circ \lambda_{\rho(x', y', t)} + 2\pi G \lambda_{\rm H}$$
⁽¹²⁾

在 $\lambda_{\varphi(x', y', t)} = 0$ 时,式(12)的第二项和式(11)相同,即面积为无穷大的水平薄板是四维模型的一个特例.

由于测区面积有限,测点只有若干个,故式(9)可改写为

$$\lambda_{g} = \sum A \circ \lambda_{P(x', y', t)} + \sum B \circ P(x', y', t_{0}) \circ \lambda_{H}$$
(13)

根据式(13)即可反演界面密度随时间的变化.

1.2 计算界面形状的变化速率公式

假设界面上的密度不随时间变化,界面的垂直形状随时间变化.例如,假定 M 面密度不变 (即 M 面上下层的物质密度不变), M 面隆起和地幔物质侵入所引起的地面重力效应是由其垂 直形状随时间的变化所引起,这时,

$$\frac{\partial \rho(x, y, t)}{\partial t} = 0, \qquad \frac{\partial f(x, y, t)}{\partial t} \neq 0$$

类似推导界面密度时变公式的方法很容易得到.

$$\lambda_{g} = \sum C \circ \mathcal{P}(x', y', t) \circ (\lambda_{H} + \lambda_{h})$$
(14)

式中:

$$C = G \circ \operatorname{arctg} \left\{ (x - x')(y - y') \setminus [z(t) - z'(t)] \circ \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + [z(t) - z'(t)]^2} \right\}$$

 λ_n 为界面垂直形变速率, $\mathfrak{P}(x',y',t)$ 为地壳介质平均密度.式(14)即为反演界面形状变化速率的公式.

对于一个厚度为 Z - H, 面积无穷大的水平薄板而言, 式(14)可简化为:

$$\lambda_{g} = 2\pi G \circ (\lambda_{H} + \lambda_{h}) \tag{15}$$

研究表明,对应于同一外部重力场,无论用何种反演方法,得到的场源密度函数都可以表示或分解成调和部分与零外部位密度之和.其中调和部分是唯一的,而不同的约束实质上是对零外部位密度的任意性进行了限制,因此对应于同一外部重力场的各种场源分布之间的差别, 实际上是由零外部位密度所决定的^[5].由于式(12)与式(11)的第二项相同,而式(15)与式 (11)完全相同,所以无论何种反演公式,都可看作是一个厚度为 *Z* – *H*,面积无穷大的水平薄 板的引力位和一个局部扰动位之和.

2 M 面密度和垂直形状变化特征与地震的关系

甘肃河西地区及滇西北地区均布设有重力网和水准网,而且中强地震活跃,因此本文选取 这 2 个地区进行研究.

2.1 资料情况

甘肃河西地区的重力网建于 1988 年, 从 1989 年开始用 LCR 相对重力仪观测. 1990 年、 1991 年、1992 年、1994 年、1995 年和 1996 年均进行了观测, 观测精度约为 0.07~0.1 μ m/s². 对观测资料采用中国地震局地震研究所的高精度重力平差软件进行处理⁴.该区水准网建于 1970 年, 从 1972 年开始用 Ni004 水准仪观测, 1979 年进行了复测. 1983 年、1989 年、1995 年 用 Ni002 水准仪观测, 测量精度均达到 I 等水准测量精度要求. 对观测资料采用分段速率平差 软件处理.

滇西北重力网于 1984 年改建,从 1985 年起使用 LCR 相对重力仪观测,每年观测 2~3 次,至 1996 年共测量 28 次,测量精度约为 0.07~0.1 µm/s².观测资料由中国地震局地震研究 所处理.由于该区只有 1985 年、1992 年 2 期水准测量资料,加上重力资料难以收集,因此仅计算 1985~1992 年一个时段.地震资料从国家地震局分析预报中心编制的《中国地震目录》中选取.

2.2 计算结果

对式(13)和式(14)用最小二乘法编程求解. 对式中的 P(x', y', t) 取 2. 71 g/ cm³; $f(x', y', t_0)$ 函数依据文献[7] 中莫霍面等深线图与重力点、水准点对应位置量取; λ_g 分别采用河西 地区 1989~1996 年, 滇西地区 1985~1992 年的重力平差值; λ_H 则用相应时段的水准测量平 差值. 分别计算出各时段 M 面的密度和垂直形状变化速率, 然后用 DPP 绘图软件分别绘制 M 面密度和垂直形状变化速率等值线图, 见图 2~图 5.

2.3 M 面密度和垂直形状变化特征与地震的关系

2.3.1 甘肃河西地区

甘肃河西地区历史上曾发生7级以上地震13次,最近几年发生5级以上地震7次,从图2 和图3可以看出:

(1) 地震发生在 M 面密度减小区与增大区的过渡地带. 绝大多数地震发生在密度速率零 值线的附近. 如: 1991 年1 月祁连 5.1 级地震、1991 年 10 月门源 5.2 级地震、1992 年1 月嘉峪 关 5.4 级地震(图 2a)、1992 年 6 月野牛沟 5.0 级地震(图 2b)、1995 年 7 月永登 5.8 级地震 (图 2c)和 1996 年 5 月天祝 5.4 级地震(图 2d, 2e).



图 2 1989~1996 年河西地区 M 面密度变 化速率等值线(单位: g/[cm³。a⁻¹]) Fig. 2 Contour map of change rate of density at the Moho surface of Hexi region from 1989 to 1996 (measured in g/[cm³。a⁻¹]).

(2) 地震往往发生在 M 面沉降区与隆起区的过渡地带.如:1991年1月祁连 5.1 级地震、1991年10月门源 5.2 级地震、1992年1月嘉峪关 5.4 级地震、1992年6月野牛沟 5.0 级地震
(图 3a)、1995年7月永登 5.8 级地震和 1996年5月天祝 5.4 级地震(图 3d).

(3) 中强地震发生在 M 面出现大范围隆起后的 1~2 年内. 1989~1990 年, M 面出现大范 围的隆起, 之后相继发生了 1990 年景泰 6.2 级地震、1991 年 1 月祁连 5.1 级地震、1991 年 10 月门源 5.2 级地震、1992 年 1 月嘉峪关 5.4 级地震和 1992 年 6 月野牛沟 5.0 级地震(图 3a). 1994~1995 年该区 M 面又出现大范围隆起, 之后相继发生了 1995 年 7 月永登 5.8 级地震和 1996 年 5 月天祝 5.4 级地震(图 3c). 事实表明 M 面出现大范围的隆起可能是地震活动性增 强的前兆. 由于 M 面的这 2 次隆起的速率(100 mm/a, 300 mm/a)比唐山地震前 M 面隆起速 率(2 m/a)要小得多^{8]}, 所以所发生的地震的震级也小.

(4) M 面密度变化的速率等值线高梯度带呈 NW 向分布(图 2b~e),与主要断裂的走向一致,大多数地震发生在这些断裂附近^[9],表明该地区地壳深处可能存在断裂,上地幔物质沿 深断裂侵入到下、中地壳内.因此,该地区中强地震活动不仅与上地幔物质活动有关,而且还与 地质构造有关.

2.3.2 滇西北地区

滇西北地区位于南北地震带南端. 该地区地震强度大、频度高, 自公元 886 年到 1980 年共 发生 5 级以上地震 50 余次, 其中 6 级以上地震 20 余次, 大于 7 级地震 2 次. 近年来该区中强



图 3 1989~1996 年河西地区 M 面垂直形变速率等值线(单位:mm/a) Fig. 3 Contour map of vertical deformation rate at the Moho surface of Hexi region from 1989 to 1996 (measured in mm/a).

地震一直十分活跃. 从图 4 和图 5 中可以看出, 该地区地震与 M 面密度和垂直形状变化之间 的关系与河西地区相同, 地震也是发生在密度变化速率零值线附近和 M 面隆起区的边缘地 带. 但是该区 M 面密度变化速率等值线的高梯度带与断裂走向不一致, 地震也未沿断层线分 布, 而是分布在 130 km² 的区域内. 地震时也很少形成明显的地震断层. 这可能与该区走滑断 裂活动形成较大范围的拉分构造, 滇西北属于伸展变形区,

3 讨论与结论

从上述分析可以看出,在甘肃河西地区和滇西北地区, 地震一般发生在 M 面密度减小区与增大区和沉降区与隆起 区的过渡地带.当 M 面出现大范围隆起后,未来 1~2 年内 在上述地区可能发生中强地震.

上地幔物质侵入岩石圈,引起 M 面的上隆和密度变化. ²⁵ 一方面,在 M 面隆起的部位地壳逐渐被拉薄,迫使地壳中的 物质不断向四周推移.当这种推移遇到断层或复杂构造阻挡 时,便在这里引起形变和应力积累.一旦应力积累达到岩石 ^图 4 的极限强度,就会发生地震;另一方面,由于 M 面上隆,在其 周围地区的地壳中产生了附加张应力,降低了断层面的抗剪 _{Fi} 强度,就会使地壳积聚的能量突然释放.另外,由于 M 面隆 起区的上地幔物质上涌和运移,使隆起区温度较其周围地区 高,从而形成附加热应力场.当温度升高时,在变化区内每一



 【 1985~1992 年滇西 北地 区 M 面密度变 化速率等 值线(单位:g/[cm³°a⁻¹])
 Fig. 4 Contour map of change rate of density at the Moho surface of the northwestem Yunnan from 1985 to 1992 (measured in g/[cm³°a⁻¹]).

点的径向应力为压应力,而周向应力则为拉应 力,在和径向应力、周向应力成45°角方向的水 平剪应力最大,换而言之,温度变化区边缘地带 是应力高值地带^{10]}.总之,在变化区边缘应力 最大,所以甘肃河西地区和滇西北地区的地震 都发生在 M 面降起区与沉降区的过渡地带,或 者说 M 面密度变化速率等值线的零值线附近.

综上所述,可以认为:

(1) 上述 2 个地区的中强地震绝大多数发 牛在 M 而出现大范围降起后的 $1 \sim 2$ 年内,据 此可以对地震发生的时间作出预报.

(2) M 面降起区的边缘地带及 M 面密度 减小区与增大区的过渡地带(即零值线附近), 特别是有活动断层穿过的部位,很可能是未来 地震发生的地点.

本文给出的四维反演方法具有明确的物理 意义,利用编制的程序综合解算重力和水准重 Fig.5 Contour map of vertical deformation rate at the 复测量资料 使地形变计算工作由一种资料向 多种资料讨渡,从而提高了计算结果及前兆信



1985~1992 年滇西北地区 M 面垂 图 5 直形变速率等值线(单位·mm/a)

Moho surface of the northwest of Yunnan province from 1985 to 1992 (measured in mm/a).

息的可靠性.无疑.四维反演方法将在地震的中期预报中发挥重要作用.

作者向在甘肃河西地区和滇西北地区从事重力测量、水准测量的野外工作人员表示衷心 的感谢.

[参考文献]

- 冯锐. 中国地壳厚度及上地幔密度分布(三维重力反演结果)[J]. 地震学报, 1985, 7(2): 143-157. [1]
- [2] Garcia-Abdeslem J. Gravitational attraction of a rectangular prism with depth-dependend density [J]. Geophysics, 1992, 57 (3).470-473.
- Guspi F. Three-dimensional Fourier gravity inversion with arbitrary density constrast[J]. Geophysics, 1992, 57(1): 131-[3] 135.
- [4] Hammer P T C, Hildebrand J A, Parker R L. Gravity inversion using seminorm minimization; density modeling of jasper seamount[J] . Geophysics, 1991, 56(1): 68-69.
- 李裴. 重力反演问题中零外部位密度的研究[]]. 地球物理学报, 1996, 9(4): 512-521. [5]
- [6] 朱思林,徐菊生,刘绍府,等.高精度重力测量资料处理软件包 ACGN 系统及其计算结果[J].地壳形变与地震,1989,9 (1).78-91.
- 国家地震局深部物探成果编写组.中国地壳上地幔地球物理探测成果[C].北京:地震出版社,1986.127. [7]
- 朱岳清,吴兵,邢如英.1976年唐山地震前后的重力变化和震区莫霍面的变形[]].地震学报,1985,7(1):57-73. [8]
- 陈志泰. 祁连山河西地区的断层活动与地震[A]. 见: 石特临, 汤泉, 李清河, 等编. 河西祁连山中段地震危险基础研究 [9] [C].北京:地震出版社,1994.129-147.
- 张秋文. 长江三峡及邻区板内中强地震的孕震动力学分析[J]. 地壳形变与地震, 1994, 14(4): 56-64. [10]

(下转237页)

237

STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN MAGNITUDE AND FOCAL SIZE, SEISMOGENIC PERIOD BY USING THE SEISMIC SOURCE MODEL OF CRACK CONTAINING HYPERPESSURE GAS

WANG Zhi-pei

(Exploring Designing Institute of Water Conservancy, Power and Building of Mianyang City, Sichuan Province, Mianyang 621000, China)

Abstract: By using the seismic source model of crack containing hyperpressure gas, the course of radioactive heat energy in the earth to accumulate in the focal area and cause for earthquake are studied. The mechanical models are given. The quantitative analyses on transformation of elastic and displacement potential energies of the rock and heat energy of the gas in source area into seismic energy are made. The formulas between magnitude and focal size, deformation, seismic moments and seismogenic period are derived. The formulas tally with that of other men of learning and real earthquakes. The seismic source model of crack containing hyperpressure gas is verified further by energy.

Key words: Crack containing hyperpressure gas; Seismic source model; Magnitude; Source size; Seismogenic period

(上接223页)

STUDY ON DEEP TECTONIC BACKGROUND OF EARTHQUAKE ACTIVITY BY USING THE 4D INVERSIONAL METHOD

LIU Tian-ming, SU Rui, ZHANG Bo-hong

(No.2 Crustal Deformation Monitoring Center, CSB, Xi' an 710054, China)

Abstract: The 4D model is used to invert dynamic variation for crustal density and vertical deformation from the data of gravity measurement and leveling survey. The inverse formulae are derived. Using the formulae, data of gravity measurement and leveling survey in the Hexi region of Gansu province and northwestern Yunnan province are computed, for study on variations of the lower crustal interface density and vertical deformation of Moho surface with time. Relationship between the variations and moderate-strong earthquakes in the two regions is analysed. The results show that density of lower crustal interface reduced on a large scale and upheaval of a wide range of Moho surface in the two regions may be a geophysical criterion in crustal depth for earthquake prediction in one year. Strong earthquakes often occur in regions that are located between upheaval and subsidence of the Moho surface or density reduction and density increase of the interface.

Key words: 4D inversion; Gravity inversion; Moho surface; Density of interface; Vertical deformation; Seismicity; Deep structure