丽江 7.0 级地震过程的重力变化与小波分析*

张永志,梁伟锋,祝意青

(中国地震局第二地形变监测中心,陕西西安 710054)

摘要:利用小波分析方法对云南西部地区的多期重力观测资料进行了计算,并将 计算前后的重力结果进行了对比分析,同时讨论了不同阶的小波分解结果的物理意 义及其与地震之间的对应关系.由对应于地壳浅层物质状态变化的一阶小波分解所 得结果显示,在地震前的1992~1993、1993~1994、1994~1995 年等多期重力变化中 震源附近都有一定的异常,特别是1995~1996 年的同震变化更加明显.而反映地球 深层物质状态变化的重力二、三阶小波的分解结果虽然对地震过程有一定的响应,但 不是特别明显,这与丽江7.0 级地震发生在浅层(深约10 km)是一致的.

主题词:云南;重力变化;小波分析;丽江7.0级地震 中**图分类号:**P315; P223; P315.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-084(1999)02-0149-07

0 引言

小波分析是 80 年代中期发展起来的新兴应用数学理论和方法.它的理论^[1]重要性及应用 的广泛性引起了科学界的高度重视.它在数字信号处理^[2],数字图象处理^[3]以及在地震资料 处理中^[4]都得到了广泛应用,并取得了良好的结果.重力观测数据中包括地球深部、浅部及其 外部空间所有物质源的密度变化及观测点的位移等的综合影响,由于各种变化物质源距观测 点的位置不同,因此,它对观测点的影响表现为空间尺度上的不均匀性.由浅入深的物质变化 与地质构造活动表现为重力场由高频到低频的变化,为研究重力变化与地质构造和地震活动 之间的关系,本文采用小波分析这项新兴数学技术来对云南西部地区丽江 *M*_S7.0 地震前的重 力变化作了尝试性的分解.

1 重力变化与密度和深度的关系

设重力 g 是在平面 z = 0 上进行观测的,则上边界为 $S_t = 0$,下边界为 $S_b = h$ 的无限延 伸物质层在地表产生的重力可表示为

$$g(x, y) = -\iint_{\infty}^{\infty} \gamma \mu (\frac{1}{R_t} - \frac{1}{R_s}) \mathrm{d}\xi \mathrm{d}\eta$$
 (1)

式中 $R_s^t = \sqrt{[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (S_b^t)^2]}, \gamma$ 为引力常数, μ 为密度函数, ξ, η 为物质点坐 标, x, y 为观测点坐标^[5]. 显然, 平面 z = 0 上得到的重力变化不但与测点和物质点的相对位

收稿日期:1998-03-10

^{*} 地震科学联合基金资助课题

第一作者简介:张永志, 男, 1961年1月生, 高级工程师, 从事重力、地形变、GPS等研究工作.



置及物质点的密度函数变化有关,而且与物质层下边界深 度有关。

2 小波分析理论及方法

定义1: 设 $\Psi(x) \in L^2$,若

为了对重力观测值中的不同空间波进行分解,我们先 讨论小波分析理论及方法^[6].



$$C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(W)|^2}{|W|} \mathrm{d}W < \infty$$
 (2)

则称

$$\Psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi(\frac{x-b}{a})$$
(3)

为连续小波.式中 L^2 表示全体实数上平方可积的函数空间. $\Psi(W)$ 为 $\Psi(x)$ 的付氏变换. 定义 2:函数 f(x)的连续小波变换为

$$W_{f}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{C_{\Psi}}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) + a + \frac{1}{2} \Psi(\frac{x-b}{a}) dx$$
(4)

其逆变换为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{C_{\Psi}}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_f(a,b) + a + \frac{1}{2} \Psi(\frac{x-b}{a}) \frac{\mathrm{d}a \mathrm{d}b}{a^2}$$
(5)

从(4)式可看出,小波变换是通过小波的平移和伸缩而得到的.它可以自动调频率域和空间域 的窗口,从而使局部化程度相应提高,故有"数学显微镜"之称.对二维平面重力变化,我们可构 造如下二维小波分析递推算法^[7]:

$$W_{2^{j}}f(x, y) = \sum_{n} \sum_{l} P_{n}q_{1}S_{2^{j-1}}f(x - 2^{j-1}n, y - 2^{j-1}l) \\S_{2^{j}}f(x, y) = \sum_{n} \sum_{n} P_{n}P_{n}S_{2^{j-1}}f(x - 2^{j-1}n, y - 2^{j-1}n)$$
(6)

频率窗的宽度变宽(图1).因此,通过时间窗的变化,我

(6)式中系数 *p_n* 和 *q*₁ 可事先确定^[8],不同阶的小波分解可看成以 *p*, *q* 为权的加权滑动平均. 3 重力变化小波分解的时频分析



Fig. 2 Distribution of faults, epicenter and gravity traverses in west Yunnan.

第21卷

们可有效地分离出重力变化中不同的频率成分.

4 云南丽江 7.0 级地震前后重力资料计算结果分析

为了研究重力变化与地震活动的关系,我们讨论云南西部地区重力变化与小波计算结果. 丽江地区地质构造、地震震中位置以及重力复测网分布如图2所示.

云南地震主要发生在浅、中、深3个地层,浅层地震深度约10 km,中层地震深度约20 km, 深层地震深度约40 km.丽江7.0级地震发生于1996年2月3日19时14分18.1秒,地点在 云南省丽江与中甸两县交界处的丽江县境内(27°18′N,100°13′E),该地震序列含有 $M_L \ge 4.0$ 的余震22个,主破裂近南北方向.主震应力方向为N3°E,主震深度约10 km,属于浅源地震.



图 3 云南西部地区 1992~1996 年重力变化 Fig. 3 Gravity variation in west Yunnan from 1992 to 1996. A 1992~1993; B 1993~1994; C 1994~1995; D 1995~1996

与震源区主压应力优势方位有一小角度的偏差,不仅有水平应力作用,同时还有明显的垂直力的作用.推测主震发生在北西向边界断裂与断块内近南北向断裂的交汇部位,并且由交汇点分别向两侧破裂,形成震源的两次破裂过程.主震的破裂错动以正倾滑动为主,兼具左旋剪切错动分量.丽江主震及强余震震源参数为:断层破裂长度 L = 33 km,宽度 W = 16 km,平均错距 D = 0.78 m,地震矩 $M_0 = 12.5 \times 10^{18}$ N·m,应力降 $\Delta \sigma = 4.6$ MPa,环境剪切应力 $r_0 = 33.6$ MPa,破裂时间 13.8 s,破裂速度 $\nu_r = 2.4$ km/s,面积 S = 490 km², 矩震级 $M_W = 6.7$.

由图 3A 可看出, 震中区附近已有重力变化, 但由于观测时间距发震时间相对较长, 再加 上渡口地区重力变化较大, 因此震中区附近的重力变化显得不太明显. 由图 3B 可看出, 震源 区附近的重力变化范围扩大, 同时振幅也相应加强. 从图 3C 看出, 震源区附近重力变化在范 围上进一步扩大, 但幅度变得相对缓和. 从图 3D 看出, 地震区重力的大范围变化已经消失, 只



图 4 云南西部地区 1992~1996 年重力变化一阶小波计算结果 Fig. 4 The first wavelet transformation results of gravity variation in west Yunnan from 1992 to 1996. A 1992~1993; B 1993~1994; C 1994~1995; D 1995~1996

有震中附近出现局部幅度较大的同震重力变化.

为了进一步研究不同波重力变化与丽江地震之间的关系,我们利用小波方法对丽江地区 1992~1996年的重力变化资料进行了分解.由于重力点位分布不规则,因此,我们必须采用数 学方法对其进行规则化.本文中,我们采用最小二乘配置法^[9]进行了内插和外推,以求出网格 的重力变化,然后选用三次样条函数 $N_3(x)$ 作为尺度函数求相应的小波函数 $\Psi(x)$.分别按 (7)式构造出相应的二维尺度函数 $\Phi(x, y)$ 和二维小波基函数 $\Psi^1(x, y)$,然后,采用二维小波 基函数 $\Psi^1(x, y)$ 按(6)式分别对丽江地区 4 个时段的重力观测数据进行了计算,重力变化的 一阶小波计算结果如图 4 所示.

图 4 为 1992~1993 年云南西部重力变化的一阶小波分解结果. 从图 4A 可看出, 在震中 附近出现幅度较明显(约 30×10⁻⁸m/s²)的重力变化. 从图 4B 看出, 在震中附近重力变化不但 幅度上有所增强(约 40×10⁻⁸m/s²), 变化范围也有所扩大. 图 4C 重力变化幅度基本上与图



图 5 云南西部地区 1992~1996 年重力变化二阶小波计算结果 Fig. 5 The second wavelet transformation results of gravity variation in west Yunnan from 1992 to 1996. A 1992~1993; B 1993~1994; C 1994~1995; D 1995~1996

第21卷

4B相同,约 $40 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$,但范围主要集中在震源区附近.图 4D 为丽江地震的同震重力变 化,最大值仍在震中附近.其幅度约 $40 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$.

图 5 为云南西部地区 1992~1996 年重力变化的二阶小波分解结果. 从图中可看出, 在震前丽江地区反映中深部物质状态的重力场虽有一定的变化, 但震前异常不十分明显, 而反映同 震中深部物质状态的重力场变化较明显.

图 6 为云南西部地区 1992~1996 年重力变化的三阶小波分解结果. 从图中可看出, 重力 变化的三阶小波分解对丽江地震只有微弱反映.

5 结论与认识

通过对云南丽江 7.0 级地震过程的重力变化的小波分解计算结果分析,我们可得出以下 结论与认识:①小波分解本质是窗口加权滑动平均,能有效地对各种不同频率成分的重力变化 按不同的频段分离,为识别地震重力异常提供一种新的手段;②从震前的重力变化分解结果可 看出,该地震与重力变化的一阶小波分解结果有较明显的对应关系,其原因可能是震源较浅 (10 km);③震源区附近的重力变化以正变化为主,地幔物质上升,地壳隆起模型所引起的重



图 6 云南西部地区 1992~1996 年重力变化三阶小波计算结果 Fig. 6 The third wavelet transformation results of gravity variation in west Yunnan from 1992 to 1996. A 1992~1993; B 1993~1994; C 1994~1995; D 1995~1996

力变化与之相反.主要原因可能是震源区在强应力作用下,浅部物质状态发生变形所致,有关的细节有待进一步探讨.

参考文献

- [1] 李世雄.小波变换和反演数学基础[M].北京:地质出版社,1995,03~04.
- [2] 章珂,刘贵忠,等.二进小波变换方法的地震信号分时分频去噪处理[J].地球物理学报,1996,39(2):265~271.
- [3] 邵正良,李德仁.小波变换及其在影像表示中的应用和其它方向选择性算法的改进[J].武汉测绘科技大学学报,1993, 18(2):01~09.
- [4] 高静怀,等.地震资料处理中小波函数的选择研究[J].地球物理学报,1996,39(3):392~399.
- [5] Harald Granser. Nonlinear inversion of gravity data using the Schmidt-Lichtenstein in appreoach [J]. Geophysics, 1987, 52 (1):88~93.
- [6] 崔锦泰著,程正兴译.小波分析导论[M].西安:西安交通大学出版社,1995.
- [7] 张永志, 丁平, 王继英, 等. 河西重力变化的小波分解与地震活动关系研究[J]. 地壳形变与地震, 1997, 17(3):26~32.
- [8] 张永志,王双绪.河西地区地壳垂直形变的小波分析结果与中强震关系研究[J].地震学报,1998,20(2):150~157.
- [9] 赫尔墨特.莫著.物理大地测量学[M].北京:测绘出版社,1984.

THE RELATIONSHIP BETWEEN WAVELET TRANSFORMATION RESULTS OF GRAVITY VARIATION AND THE LIJIANG $M_s7.0$ EARTHQUAKE

ZHANG Yong-zhi, LIANG Wei-feng, ZHU Yi-qing

(The Second Crustal Deformation Monitoring Center, CSB, Xi'an 710054, China)

Abstract

The gravity variation before and after the Lijiang $M_S7.0$ earthquake that province occurred in Yunnan in 1996 is calculated by wavelet analysis method and the relationship between different wavelet transformation results and the earthquake is discussed. The conclusions are: ① The first wavelet transformation results reflect the shallow layer material density variation in the earth from 1992 to 1993, from 1993 to 1994 and from 1994 to 1995, and there are anomalous gravity variations near the earthquake area before the earthquake. Especially, the gravity variation is very clear during the earthquake from 1995 to 1996. ② Although the second and third wavelet transformation results of gravity variation according with the deep layer material density change of the earth have some variations during the earthquake, they are all not obvious. The reason may be that the Lijiang $M_S7.0$ earthquake occurred in the shallow layer of the earth crust (10 km).

Key words: Yunnan; Gravity variation; Wavelet analysis; Lijiang $M_{\rm S}7.0$ earthquake