

青藏高原东北侧断层活动引起的地壳三维变形与重力场变化研究

张永志¹⁾ 王卫东¹⁾ 祝意青²⁾ 徐云马²⁾

1) 长安大学地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安, 710054;

2) 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安, 710054

摘 要 本文推导了断层活动与地面重力变化的理论关系, 讨论了与断层活动有关的三维形变场变化与实际观测的重力变化之间的关系。利用位错理论模型模拟了青藏高原东北侧的多组断层活动引起的地壳三维变形与重力场变化分布。并结合该地区 2001 年 11 月 14 日昆仑山 $M_s 8.1$ 地震前观测的两期重力资料, 讨论了该地区的地质构造活动与重力变化过程与地震活动的关系。

关键词 断层活动 三维变形 重力变化 地震活动

Gravity Variation and Three-Dimensional Deformation in the Northeastern Margin of Tibetan Plateau

ZHANG Yongzhi¹⁾ WANG Weidong¹⁾ ZHU Yiqing²⁾ XU Yunma²⁾

1) Department of Geological and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi, 710054;

2) No.2 Monitoring Center, China Seismological Bureau, Xi'an, Shaanxi, 710054

Abstract In this paper, the formula for expressing gravity variation due to fault movement is deduced and the relationship between the deformation field resulting from fault movement and the observed gravity variation is discussed. The crustal deformation and gravity distribution caused by several sets of fault movement in the northeastern margin of Tibet where Kunlun $M_s = 8.1$ strong earthquake had occurred on 14 November 2001 were calculated and simulated by numerical method with the dislocation model. The computed results from the dynamic model of East Kunlun fault and Altyn Tagh fault were compared with the gravity variation observed in the period from October 1998 to November 2001. Moreover, the relationships of the earthquake activity to the tectonic activity and gravity variation are discussed.

Key words fault movement three-dimensional deformation gravity variation earthquake activity

地震前的重力变化能用许多理论模型来进行理论解释, 如 Walsh(1975) 和 Reilly(1952) 研究了局部地壳变形引起的重力变化; Nutt(1974) 采用扩容模型研究了日本地震群发生过程其重力场的变化; Fujii(1966) 通过地壳的上隆来解释地震过程重力场的变化; 陈运泰(1980) 采用质量迁移模型解释了唐山 $M_s 7.6$ 地震的重力变化过程; 张超(1981) 等讨论了断层活动与重力变化理论关系; 黄建梁(1995) 等研究了点源位错引起的重力变化。本文则结合青藏高原东北侧多组断层分布和构造运动特征, 采用矩形位错理论模型研究了该地区三维地壳变形与重力变化的关系, 并结合该地区的实测重力结果对构造运

动和重力变化进行解释。

1 重力变化理论模型

为讨论问题方便, 将地面的引力位 V 分为两部分, 第一部分为扣除断层变形体后地球质量的影响, 第二部分为断层变形体的影响。用引力位公式(管泽霖等, 1981) 表示:

$$V = \mu \frac{(M - \int \rho d\Omega)}{R} + \mu \int_{\Omega} \rho \frac{d\Omega}{r} \quad (1)$$

式中, μ 为万有引力常数; ρ 为断层变形体内物质密度; Ω 是断层变形体的体积; R 是观测点到地

球质心的距离; r 是观测点到断层变形体内质点之间的距离。如果以地面某一参考点为原点建立直角坐标系,以 a, b, c 表示地心在直角坐标系中的坐标; x, y, z 表示观测点的坐标; ξ, η, ζ 表示断层变形

体内质点的坐标。引力位随时间的变化如式(2)表示,如果不考虑地球自转变化的影响,在进行潮汐影响改正后,重力随时间的变化如式(3)表示:

$$\frac{dV}{dt} = \mu \int_{\Omega} \frac{d\rho}{dt} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) d\Omega - \mu \left(\frac{x-a}{R^3} \frac{dx}{dt} + \frac{y-b}{R^3} \frac{dy}{dt} + \frac{z-c}{R^3} \frac{dz}{dt} \right) M - \int_{\Omega} \rho d\Omega - \mu \int_{\Omega} \left(\frac{x-\xi}{r^3} \frac{d(x-\xi)}{dt} + \frac{y-\eta}{r^3} \frac{d(y-\eta)}{dt} + \frac{z-\zeta}{r^3} \frac{d(z-\zeta)}{dt} \right) d\Omega \quad (2)$$

$$\frac{dg}{dt} = \frac{d}{dz} \left(\frac{dV}{dt} \right) = \mu \int_{\Omega} \frac{d\rho}{dt} \left(-\frac{z-\zeta}{r^3} + \frac{z-c}{R^3} \right) d\Omega - \mu \left[\frac{-\mathfrak{X}(x-a)\mathfrak{Y}(z-c)}{R^5} \frac{dx}{dt} - \frac{\mathfrak{X}(y-b)\mathfrak{Y}(z-c)}{R^5} \frac{dy}{dt} + \frac{R^2 - \mathfrak{X}(z-c)^2}{R^5} \frac{dz}{dt} \right] M - \int_{\Omega} \rho d\Omega - \mu \int_{\Omega} \left[\frac{-\mathfrak{X}(x-\xi)\mathfrak{Y}(z-\zeta)}{r^5} \frac{d(x-\xi)}{dt} - \frac{\mathfrak{X}(y-\eta)\mathfrak{Y}(z-\zeta)}{r^5} \frac{d(y-\eta)}{dt} + \frac{r^2 \frac{dz}{dt} - \mathfrak{X}(z-\zeta)^2}{r^5} \frac{d(z-\zeta)}{dt} \right] d\Omega \quad (3)$$

式(3)中,等号右边第一部分为断层变形体的密度变化对重力变化速率的影响;第二部分为观测点的三维形变速率对重力场变化速率的影响;第三部分为观测点与断层变形体之间的相对变化速率对重力场变化速率的影响。

2 位错模型计算结果

位错理论首先由 Steketee 于 1958 年引入地震学研究领域(黄建梁,1995),从那时起,位错理论在断层活动与地面变形的关系研究中得到了成功而迅速发展。Okada(1985,1992)对各种位错理论在介质表面和内部变形作了系统的归纳和总结。对任意一个断层,均可将其分成多个小断层,分别采用图1所示的矩形位错理论模型来分别进行模拟。

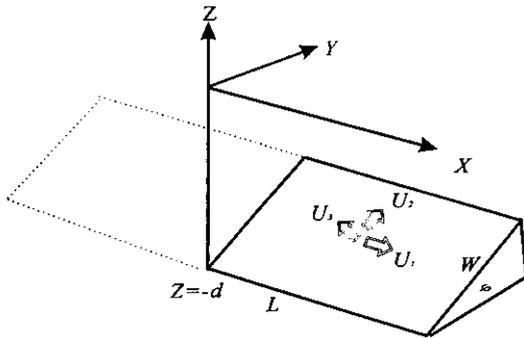


图1 矩形位错理论模型
Fig.1 Rectangle dislocation model

图1中, X 为轴在地平面内平行于断层走向; Y 为轴在地平面内垂直于断层走向; Z 为轴垂直地面向上。 $U_i (i=1, 2, 3)$ 表示长度为 L 、宽度为 W 、下底深度为 d 、倾角为 φ 的矩形断层面上盘相对于下盘分别在走向、倾向和法线方向的滑动量。

倾滑矩形位错引起的地面位移场为

$$\begin{cases} u_x = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \tan^{-1} \frac{\xi q}{qR} + I_1 \sin \varphi \right] \\ u_y = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \varphi}{R+\eta} + I_2 \sin \varphi \right] \\ u_z = -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d} q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \varphi}{R+\eta} + I_4 \sin \varphi \right] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_x = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} - I_3 \sin \varphi \cos \varphi \right] \\ u_y = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y} q}{R(R+\xi)} + \cos \varphi \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_1 \sin \varphi \cos \varphi \right] \\ u_z = -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d} q}{R(R+\xi)} + \sin \varphi \tan^{-1} \frac{\xi \eta}{qR} - I_5 \sin \varphi \cos \varphi \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} f(\xi, \eta) &= f(x, p) - f(x, p - W) \\ &\quad - f(x - L, p) + f(x - L, p - W) \\ I_1 &= -\frac{\mu}{\eta + \mu} \left[\frac{-1}{\cos \varphi} \frac{\xi}{R+d} \right] \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} I_5 \\ I_2 &= -\frac{\mu}{\lambda + \mu} [-\ln(R + \eta)] - I_3 \\ I_3 &= -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\tilde{y}}{R+d} - \ln(R + \eta) \right] + \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} I_4 \\ I_4 &= -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \varphi} \\ &\quad [\ln(R + \tilde{d}) - \sin \varphi \ln(R + \eta)] \\ I_5 &= -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \varphi} \tan^{-1} \\ &\quad \frac{\mathfrak{X}(X + q \cos \varphi) + \mathfrak{X}(R + X) \sin \varphi}{\mathfrak{X}(R + X) \cos \varphi} \end{aligned} \quad (6)$$

如果 $\cos \varphi = 0$, 上述公式(6)的参数由公式(7)计算:

$$I_1 = -\frac{\mu}{\mathfrak{X}(\lambda + \mu)(R + \tilde{d})} \frac{\xi q}{(R + \tilde{d})} \frac{\tilde{y} q}{(R + \tilde{d})} - \ln(R + \eta)$$

走滑矩形位错引起的地面位移场可表示为:

$$I_4 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{q}{R + d}$$

$$I_5 = -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi \sin \varphi}{R + d} \quad (7)$$

而 $\rho = y \cos \varphi + d \sin \varphi$
 $q = y \sin \varphi - d \cos \varphi$
 $\tilde{y} = \eta \cos \varphi + q \sin \varphi$
 $\tilde{d} = \eta \sin \varphi - q \cos \varphi$
 $R^2 = \xi^2 + \eta^2 + q^2 = \xi^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{d}^2$
 $X^2 = \xi^2 + q^2 \quad (8)$

3 断层活动与三维变形和重力场变化模拟结果

青藏高原东北侧是中国构造运动活跃地区之一。2001 年 11 月 14 日,在该地区的昆仑断层发生了 M_s 8.1 的强震(Woerd, 2002),为深入理解该地区三维地壳变形和重力场变化与断层活动的关系,笔者采用位错理论模型对该地区的断层滑动引起的三维形变场和重力场进行了模拟计算。在数值模拟中,断层参数分别为:①阿尔金断裂其长度为 877 km,深度为 22 km,宽度为 30 km,走向 $NE72^\circ$,倾角 65° ,走滑速率为 3 cm/年,倾滑速率为 2 cm/年,张开速率为零;②昆仑断裂其长度为 1 000 km,深度为 21 km,宽度为 30 km,走向 $NE95^\circ \sim 100^\circ$,倾角为 85° ,走滑速率为 4 cm/年,倾滑速率为 0.3 cm/年,张开速率为零。

昆仑断裂和阿尔金断裂同时滑动时三维形变场的模拟结果如图 2 所示。图中圆点表示地震的震中位置,箭头指向代表水平变形局部运动方向,箭头的长度代表水平变形运动量大小;双实线为该地区的主要断层。不同颜色代表垂直形变的大小。

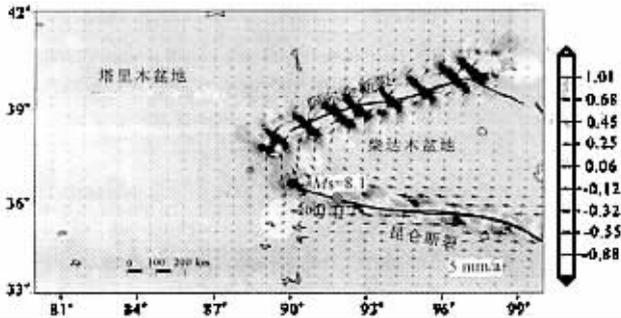


图 2 青藏高原东北侧断层活动引起的三维变形场分布
 Fig.2 Deformation distribution caused by fault movement in north-east margin of the Qinghai-Tibet Plateau

从图 2 看出,断层在地震前的小于 3 cm/年的走滑和倾滑速率引起的垂直变形基本集中在断层附近,变化量较小 (< 1 mm)。水平变形平均大约为几个毫米。万方数据

图 3 为利用公式(3)和位错理论计算的水平位移场变化与重力场变化分布,计算中所用到的高程数据取自美国地球物理数据中心网站 www.ngdc.noaa.gov 中的 DEM 数字高程模型。

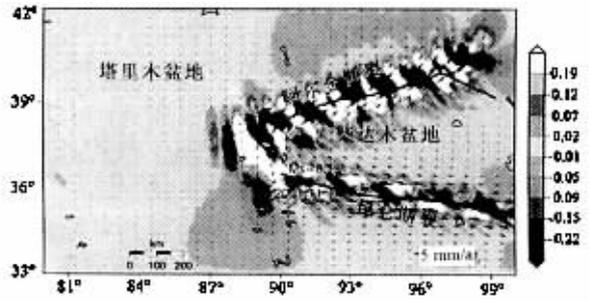


图 3 青藏高原东北侧断层活动引起的水平变形与重力场变化

Fig.3 Horizontal deformation and gravity variation caused by fault movement in north-east margin of the Qinghai-Tibet Plateau

图 3 中圆点表示地震的震中位置,箭头指向代表水平变形局部运动方向,箭头的长度代表水平变形运动量大小;双实线为该地区的主要断层。不同颜色代表重力变化的大小。

从图 3 看出,断层震前走滑速率小于几个厘米/年的情况下,引起的重力场变化小于 10^{-8} ms^{-2} 。

4 重力观测结果分析

为研究地壳的构造运动与重力场的变化关系,国家重大科学工程项目“中国地壳运动观测网络”分别于 1998 年 11 月和 2000 年 10 月对青藏高原东北侧地区采用 LACOSTE & ROMBERG-G 型重力仪进行了两次流动重力观测,重力点与断层之间的分布关系(图 4)。图中正方形为重力观测点;双实线为主要断层;圆点为震中位置。该地区重力观测结

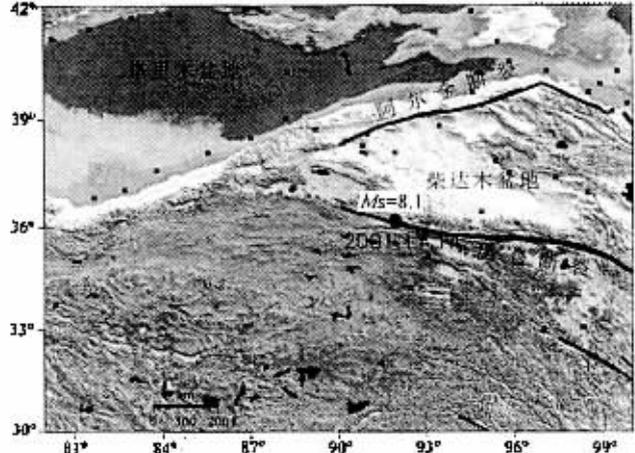


图 4 青藏高原东北侧地质构造与重力点分布
 Fig.4 Geological tectonic and the gravity stations in north-east margin of the Qinghai-Tibet Plateau

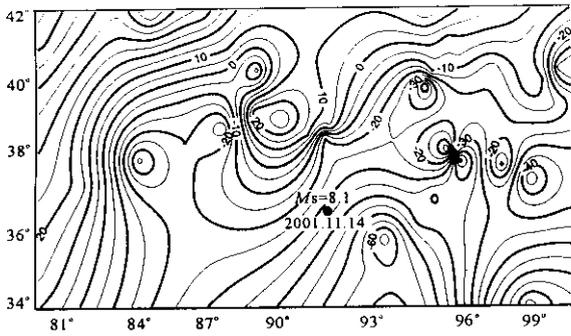


图5 青藏高原东北侧的重力变化
观测结果(1998~2000年)

Fig.5 Gravity variation observed in north-east margin
of the Qinghai-Tibet Plateau(1998~2000)

果如图5所示。

从图5可以看出,青藏高原东北侧地区的实测重力变化基本上在 $(-60 \sim 50) \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 之间变化,在震区的南部山区,山区由于受到强应力场的作用上升,使重力场呈负的变化,在观测区的西北部,由于盆地的下沉而出现正的重力变化。因此,该地区的重力场变化反映了该地山区上升、盆地下沉的地质构造特征。

5 讨论与认识

青藏高原东北侧地区的构造运动受印度板块与西北利亚块体之间的相对运动控制,印度板块与西北利亚块体之间每年以5 cm的速率缩短(Lave, 2000; Bilham, 1997),其中2 cm的缩短被喜马拉雅山前断裂吸收,导致了目前世界上最高的山脊持续升高。其余缩短的大部分被青藏高原东北侧地区岩石圈块体走滑和倾滑逆冲挤压吸收(Avouac, 1993; Barnes, 1966)。位于柴达木盆地北缘的阿尔金断裂,每年以几个厘米的速率左旋滑动(Lasserre, 1999; Meriaux, 2000)。昆仑断裂也是受青藏高原的挤压而形成的左旋走滑和倾滑逆冲断裂之一。从本文对阿尔金断裂和昆仑断裂左旋走滑和倾滑逆冲模拟的三维形变场和重力场变化结果可以看出,由纯断层活动引起的垂直形变和重力场变化较小。通过模拟结果与该地区的实际重力观测结果以及构造运动特征比较,可以看出,实际重力观测结果反映了该地南部山区地震前在强应力场的作用下垂直形变上升,重力变化下降;而在西北部盆地区,垂直形变下降,重力变化上升的构造运动趋势。

参考文献

陈运泰, 顾浩鼎, 卢造勋等. 1980. 1975年海城地震与1976年唐山大地震的构造背景. *地震学报*, 2(1): 21~30.

震前后的重力变化. *地震学报*, 2(1): 21~30.

管泽霖, 宁津生. 1981. 地球形状及外部重力场(上). 北京: 测绘出版社, 154~185.

黄建梁, 李辉, 李瑞浩. 1995. 点源位错引起的重力、位势及其梯度变化. *地震学报*, 17(1): 72~80.

张超, 赵国光. 1981. 断层活动的重力效应. *地震学报*, 3(4): 400~408.

References

Avouac J P, Tapponnier P. 1993. Kinematics model of active deformation in central Asia. *Geophys. Res.* 91: 13803~13872.

Barnes D F. 1966. Gravity variations during the Alaska earthquake. *J Geophys Res.* 71(2): 451~456.

Bilham R, Larson K, Freymueller J et al. 1997. GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya. *Nature (Lond)*, 386: 61~64.

Chen Yuntai, Gu Haoding, Lu Zaoxun. 1980. Gravity variation of Haicheng earthquake, 1975 and Tangshang earthquake 1976. *Earthquake* 21(1): 21~30 (in Chinese).

Fujii Y. 1966. Gravity variations in the shock area of the Niigata earthquake. *Zisin.* 19(3): 200~216.

Guan Zelin, Ning Jinsheng. 1981. The shape and gravity of the earth. Beijing: Surveying and Mapping Press, 154~185 (in Chinese).

Huang Jianliang, Li Hui, Li Ruihao. 1995. Gravity, power and gradient variation caused by point dislocation. *Earthquakes*, 17(1): 72~80 (in Chinese).

Lasserre C, Morel P H, Gaudemmer Y, P et al. 1999. Post-glacial left slip-rate and past occurrence of $M_s \geq 8$ earthquakes on the western Haiyuan fault (Gansu, China). *J. Geophys. Res.* 104: 17633~17651.

Lave J, Avouac J P. 2000. Active folding of fluvial terraces across the Siwaliks Hills, Himalayas of central Nepal. *Geophys. Res.* 105: 5735~5770.

Meriaux A S, Tapponnier P, Ryerson F J et al. 2000. Fast extrusion of the Tibet plateau: A 3 cm/yr, 100kyr slip rate on the Altyn Tagh Fault. *Eos, Trans. Am. Geophys. U.* 81: 1137~1150.

Nur A, Matsuhiro. 1974. Japan earthquake swarm: Confirmation of the dilatancy-fluid diffusion model. *Geology* 2(5): 217~221.

Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 82: 1018~1040.

Okada Y. 1992. Internal Deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 82: 1018~1040.

Reilly W I, Hunt T M. 1952. Comment on "An analysis of local variations in gravity due to deformation" by J B Nabarro. *F. R. N., Adv. Phys.* 1: 169~179.

Woerd Van der, J A, Meriaux S, Klinger Y et al. 2002. The 14 November 2001, $M_s = 7.8$ Kokoxili earthquake in Northern Tibet (Qinghai Province, China). *Seis. Res. Lett.* 73(2): 125~130.

Walsh J B. 1975. An analysis of local variations in gravity due to deformation. *Pure Appl Geophys.* 113: 97~106.

Zhang Chao, Zhao Guoguang. 1981. Gravity effect caused by fault movement. *Earthquakes* 3(4): 400~408 (in Chinese).

陈运泰, 顾浩鼎, 卢造勋等. 1980. 1975年海城地震与1976年唐山大地震的构造背景. *地震学报*, 2(1): 21~30.