

# 利用垂直形变资料分析龙岗火山的活动性<sup>\*</sup>

胡亚轩, 王庆良, 王 雄

(中国地震局第二监测中心, 西安 710054)

摘要: 首先分析了龙岗火山区及其附近 20 多年来 5 条水准路线所反映的垂直形变背景场情况, 发现相对于长春基准点, 长白山区东部和北部地区主要表现为大面积下沉运动, 而龙岗火山区则表现为相对上升运动; 然后分析了龙岗火山区主要隆起区垂直形变场变化以及剪切和张裂变形率变化, 所得结果均反映了长抚线发生了较明显的活动; 最后运用改进的  $Mog$  模型, 采用  $I$  曲线法反演了主要隆起区可能的压力源参数。结果表明, 龙岗火山区岩浆的位置在  $42.1^{\circ}N$   $126.5^{\circ}E$  附近, 与深地震测深研究结果近似。相对于长白山天池火山, 压力源等效半径变化较大, 达到  $183\text{ km}$  左右, 源的深度在  $30\text{ km}$  左右, 相对较深。

关键词: 龙岗火山; 垂直形变场; 反演

中图分类号: P317.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2009)03-0289-06

## 0 引言

广义的长白山火山区在我国境内的部分包括天池火山、望天鹅火山、图们江火山和龙岗火山, 是我国最大的第四纪火山岩分布区 (樊祺诚等, 2007)。龙岗火山群位于吉林省东南部龙岗山脉的中段。其范围东起靖宇县三道乡白江河, 西至辉南县三统河畔, 北达靖宇县龙泉镇, 南抵柳河县回头沟一带, 东西长  $52\text{ km}$ , 南北宽  $22.5\text{ km}$ , 共有 260 多个火山锥, 是东北地区火山数目最多、火山结构最完整和火山地貌景观最优美的火山群之一。龙岗火山群主要经历了 4 次火山活动: ① 中更新世中期活动, 主要发生在二龙湾—龙湾断裂以西地区; ② 晚更新世晚期活动, 主要发生在东部的金川以东的新开岭—四海一代; ③ 全新世早期活动, 仍发生在东部, 是第二次休眠结束后火山的再次复活; ④ 全新世末期结束的喷发活动, 从东到西, 波及范围较广 (刘尔义, 1990)。地质研究结果表明龙岗火山活动可划分为 3 期: 小椅山期 (早更新世)、龙岗期 (中—晚更新世) 和金龙顶子期 (距今 1600 年左右)。长白山西麓靖宇—辉南近  $2\ 000\text{ km}^2$  的龙岗火山群有 160 余座星罗棋布的矮火山锥, 显示出高密度、多中心爆炸式喷发特点, 喷发物主要由玄武质火山渣、火山弹、火山碎屑岩和少量熔岩构成。

龙岗火山是中国少数几个近代仍有喷发活动的第四纪火山之一 (樊祺诚等, 2002)。

从大地构造位置上分析, 龙岗火山群属华北地台边缘, 位于北东向的敦化—密山断裂与图门江—鸭绿江断裂之间。新生代以来, 由于太平洋板块向西俯冲, 对吉林省东部产生板缘裂谷火山作用, 形成一系列北东向、北西向和近东西向的断裂构造与断陷盆地, 并引起强烈的火山活动, 构成了雄伟壮观的龙岗火山群 (徐德兵等, 2005)。

2002 年 6 月吉林汪清地震后, 地震学、地球化学和形变等资料均表明长白山天池火山区经历了一次比较强烈的岩浆上涌活动过程。龙岗火山的活动情况又如何呢? 笔者首先对龙岗火山区约  $1\ 500\text{ km}^2$  的水准路线资料进行分析, 然后根据分析结果, 运用改进的  $Mog$  模型对主要隆起区进行压力参数反演分析。

## 1 龙岗火山垂直形变背景场分析

笔者利用龙岗火山及其周围地区的国家第二、三期一等水准复测结果, 分析火山区垂直形变场的变化情况。龙岗火山水准点位分布在  $125^{\circ}\sim 130^{\circ}E$   $41.5^{\circ}\sim 45.8^{\circ}N$  范围内, 共 338 个, 海拔高程在  $550\sim 1\ 520\text{ m}$  之间。观测时依据《一、二、三、四等水准测量细则》(国家测绘总局, 1958)、《国家水准

\* 收稿日期: 2008-06-04.

基金项目: 国家科技支撑项目 (2006BAC01B02-01-03) 和国家自然科学基金项目 (40574041) 联合资助。

测量规范》(国家测绘总局, 1974)以及《大地形变测量规范》(国家测绘总局, 1983)及其修订本等执行, 成果质量符合一等水准测量精度要求。水准路线施测的详细情况见表 1和图 1。

表 1 水准路线观测情况  
Tab 1 Observation of the leveling lines

路线名称	分析的水准点个数	施测年代	施测单位
抚松—吉林 (长抚)	108	1975 1992-1997	国家测绘局第二大地测量队
通化—抚松 (丹抚)	55	1975 1994-1997	中国人民解放军第五测绘大队 国家测绘局第二大地测量队
抚松—图门 (抚图)	83	1977-1978 1991-1992	黑龙江第一测绘大队 国家测绘局第二大地测量队
哈尔滨—牡丹江 (哈牡)	43	1977 1991	国家测绘局第二大地测量队
图门—牡丹江 (牡图)	49	1981 1991-1992	国家测绘局第二大地测量队

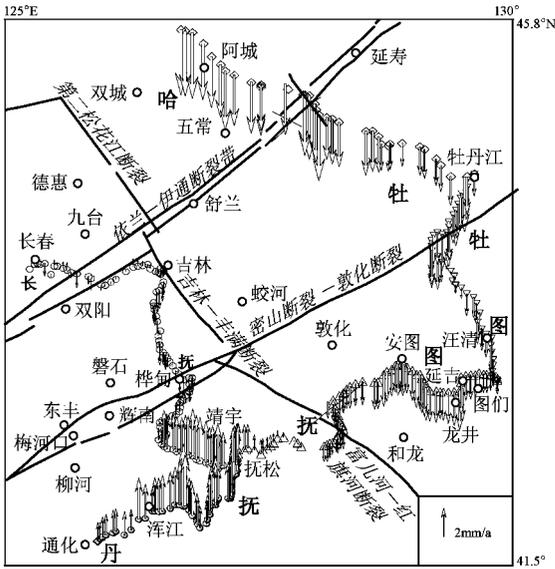


图 1 水准点位和路线及垂直形变速率分布图  
Fig 1 Distribution of the leveling stations, lines and vertical deformation velocity

利用以上资料求出相对于基岩点——长春基准点(哈沈 45基)的位移速率, 作出速率等值线图(图 1)。可以看出, 相对长春基准点, 长白山区东部、北部主要表现为 2~5 mm/a 的大面积下沉运动, 而龙岗火山区表现为相对上升运动, 其相对长春基准点的上升速率超过 4.0 mm/a。主要上升的水准路线为抚松—吉林线的南部和通化—抚松线。最大上升点为丹抚 120 点, 相对上升速率为 4.33 mm/a。

隆升中心区域大概在 42°N 127°E 处。

## 2 龙岗火山垂直形变分析

本文中, 笔者只对龙岗火山区的主要隆起区域(42.3°~43.7°N 126.0°~127.9°E)进行分析(图 1, 2)。敦化—密山断裂为研究区内的主要断裂带。该断裂带为规模巨大、发育历史悠久、活动期次较多的区域性深大断裂, 主要形成于中生代, 新生代又有继承性活动。断裂带活动的启动时间为晚三叠世, 并在侏罗纪—白垩纪期间经历多次挤压、拉张及走滑运动。大规模左行平移时间为早白垩世末期, 最新一次活动是在中更新世。断裂带及邻近地带以中小地震活动为主, 地震活动主要集中在两个地段: 辽宁省的沈阳—清源、吉林省的辉南—二道甸子, 其余地段地震活动较弱。该断裂带的中生代火山岩主要为晚侏罗世—早白垩世的中酸性火山熔岩及其碎屑岩, 它们构成了一套陆相碎屑—火山岩建造组合。自中新世以来, 该断裂带火山活动逐渐频繁, 喷发规模大, 形成了我国东北有名的北东向火山岩带, 喷发方式主要为裂隙—中心式, 火山岩相为溢流相(王凯红等, 2004)。从敦化—密山断裂附近的水准点位活动来分析, 各点相对长春基准点表现为下沉运动, 断层两侧点位速率相差较小, 表明

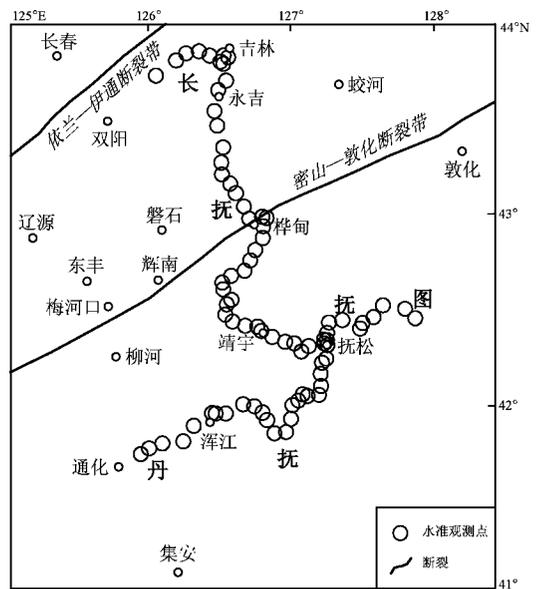


图 2 龙岗火山区主要隆起的区域及水准路线图  
Fig 2 Main uplift and the leveling lines in Longgang volcano area

研究区域内的断层活动不很明显。

以丹抚线上的“丹抚 140 基”为直角坐标原点，其它点位为相对坐标，作出垂直形变等值线图（图 3）。图 3 中的虚线所围区域为主要隆起区，范围大概在东西 -100 ~ 50 km，南北 -37 ~ 50 km 的区域，即图 2 所示区域，它主要包括长抚线和丹抚线上所有水准点和抚图线上的部分点位。

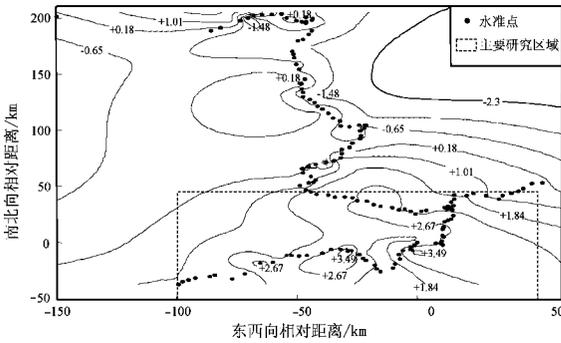


图 3 垂直形变等值线图

Fig 3 Contour of the vertical deformation

地壳的剪切变形及扩张变形分量反映了地壳变形的类型。笔者根据相邻 3 个点的垂直运动速率和点间距离，用应变率公式计算垂直剖面上的剪切变形率和扩张变形率（崔笃信等，2007），所得结果见图 4。图中给出了不同水准路线剖面上的应变率变化。为了比较不同路线应变率的大小，笔者使垂直方向的坐标取值范围相等，均为  $-4 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 。

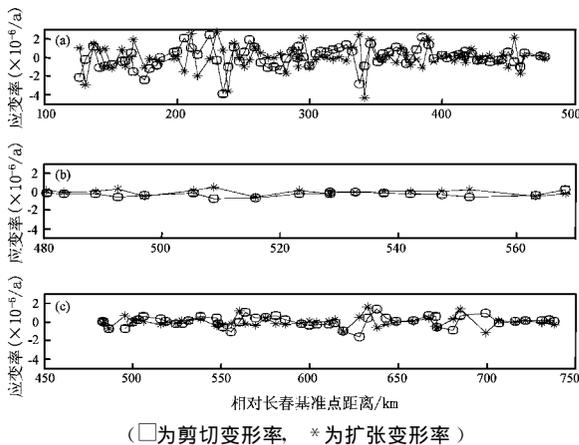


图 4 龙岗火山水准剖面垂直应变率变化图  
(a) 长抚线；(b) 抚图线；(c) 丹抚线

Fig 4 Vertical strain rate changes of the leveling profile in Longgang volcano

(a) Changfu line (b) Futu line (c) Danfu line

从图 4 a可以看出，长抚线上的点位发生了明显的剪切变形和扩张变形率变化：剪切变形率绝对值平均为  $0.82 \times 10^{-6} / a$ ，扩张变形率绝对值平均为  $0.85 \times 10^{-6} / a$ ，两种变形率量值相当；从图 4 b可以看出，抚图线上距火山较近的部分点位变化最小，分别平均为  $0.29 \times 10^{-6} / a$  和  $0.20 \times 10^{-6} / a$ ；从图 4 c可以看出，丹抚线上的点位变化较小，分别平均为  $0.43 \times 10^{-6} / a$  和  $0.35 \times 10^{-6} / a$ 。

### 3 改进的 Mog模型公式 (mMog<sub>i</sub>)

Mog模型是将岩浆压力源置于均匀弹性半空间中，在源的半径远小于源的深度时，得出的由于爆炸性或收缩性压力源引起的弹性半空间地表的水平变形和垂直变形与源的参数之间的表达式 (Mog<sub>i</sub> 1958; 王勇, 1996; 胡亚轩等, 2003)。Mog模型已被用来模拟和解释大量的火山区地面变形 (Yokoyama 1971; Decker et al 1983; Ber-rino et al 1984; Yang et al 1992)。但是由于火山区特殊的地貌，地形影响往往不可忽视。于是人们对 Mog模型公式进行了改进，即在深度方向考虑点位高程的影响，这样，改进后的 mMog模型水平形变和垂直形变与源的参数之间的表达式为

$$\Delta r = \frac{3 a^2 \Delta P_0 r}{4 \mu [(D+h)^2 + r^2]^{3/2}} \quad (1)$$

$$\Delta h = \frac{3 a^2 \Delta P_0 D}{4 \mu [(D+h)^2 + r^2]^{3/2}} \quad (2)$$

式中， $a$ 为压力源半径， $\mu$ 为剪切模量， $D$ 为球状压力源中心深度， $r$ 为地表径向距离， $\Delta P$ 是源的内部由于岩浆运动引起的压力变化量， $h$ 为各观测点的高程。

若用  $\hat{r} = r/D$ 来表示地表径向无量纲距离，无量纲位移为各点位移相对于中心点的最大垂直位移的比值。对 mMog模型，假定  $D=5000 \text{ m}$ ， $R=500 \text{ m}$ ，高程在  $550 \sim 1600 \text{ m}$ 之间呈递减数列变化，则源上方中心点位高程最大。将各点位移表示成无量纲位移，作出模型改进前后位移随距离的变化图（图 5）。从图 5 可以看出，当考虑高程时，离源心越近的点，改进后的模型与原模型形变差异越大。另外，水平位移差异主要表现在距离 2.5 倍源深以内的点位，垂直位移差异主要表现在距离 1.5 倍源深以内的点位。由于各点位移会随高程

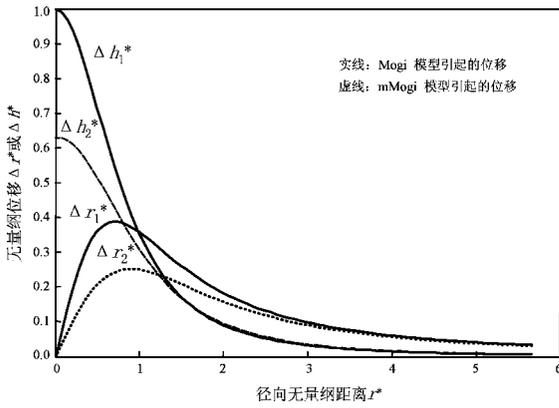


图 5 位移随径向距离的变化  
(D=5 000 m, R=500 m)

Fig 5 Displacement changes with the radial distance (D=5 000 m, R=500 m)

的起伏变化而变化，故在分析火山区形变时，若点位离源心较近，高程需予以考虑。

### 4 龙岗火山区压力源参数反演

由于火山区地下岩浆运动可引起地表形状发生畸变，使得火山近旁地面发生局部隆起，周围大部分地方下降，因此可以运用火山区的形变测量数据来反演岩浆压力源参数，这对评价火山的危险性有很大的意义。火山压力源模型很多，有 Yang 等 (1992) 提出的有限标准长椭球体，张开的矩形位错模型 (Okada 1985) 等，而最早提出的 Mogi 模型到目前为止仍为适合火山地区地表变形模拟研究最常用、最简单的模型，并已在很多火山区应用，能够较好地模拟和解释地面的垂直变形 (施行觉等, 2005; 胡亚轩等, 2007 b)。该模型有一定的局限性，在源的形状和深度间存在一个两者不能同时兼顾的强烈的权衡，但由于龙岗火山区目前仅有一种观测数据，隆起区域断层活动不太明显，故笔者采用点源模型做为初步反演。反演方法采用  $\chi^2$  曲线法。该方法理论严密、定位准确、适用性好，常用来解决测量中的不适当问题 (王振杰, 2006; Hansen 1992; Hansen & O'Leary 1993)。笔者运用该方法反演火山区的压力源参数。

首先给定隆起的主要区域初始源的中心位置坐标，源深度依据长白山天池火山区地震测深研究结果和中国地震局地球物理勘探中心在长白山天池火山区布设的南起八道沟，北至桦甸市的 I4

剖面的 P<sub>s</sub>波反演结果来给定。研究结果认为在距八道沟 80 km 处有一深度约为 17 km 的低速区 (段永红等, 2003; 张先康等, 2002)。为了进行对比，笔者分别给出 Mogi (方法 1) 和 mMogi 模型 (方法 2) 的反演结果 (表 2 和图 6)，所用到的水准点位有 109 个，平均残差定义为 (许才军, 李志才, 2003)

$$\bar{\tau} = \sqrt{(\bar{y} - \bar{y}')^2 / n} \quad (3)$$

式中， $\bar{y}$  表示各点位实际观测到的位移， $\bar{y}'$  表示反演得到的各点位的理论位移， $n$  为观测点数。

表 2 两种模型计算结果对比  
Tab 2 Results from two models respectively

方法	X/km	Y/km	D/km	等效压力源半径 R <sub>0</sub> /m	$\bar{\tau}$ /mm
初始值	-18	10	17	100	
方法 1	-18.944	12.375	45.556	206.0	0.64
方法 2	-19.451	11.521	30.521	183.4	0.74

从表 2 及图 5 可以看出，运用这两种方法计算得到的源的中心位置、大小和平均残差相差不大，源的中心位置大概在 42.1°N 126.5°E 附近，在地震测深 I4 剖面偏左、老火山口偏南的地方 (段永红等, 2003)。差异较大的是源的深度。从结果看，方法 2 更接近地震测深研究的结果，再结合长白山火山的相关研究结果 (段永红等, 2003; 张先康等, 2002; 张成科等, 2002)，笔者认为此深度可能更合理一些。从图 6 可以看出，距离源中心 100 km 以内的点位得到了较好的拟合，这与模型

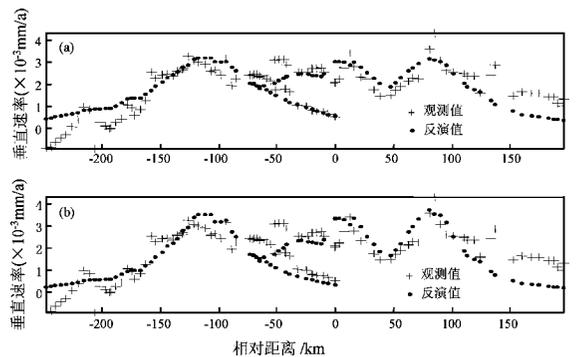


图 6 用 Mogi 模型 (a) 和 mMogi 模型 (b) 反演得到的结果

Fig 6 Inversion results from Mogi model (a) and mMogi model (b)

的理论分析一致。由图 5 可以看出, 径向距离为 4 倍源深度的点位的垂直位移较大, 对  $D$  为 30 km 的源来说, 影响较大的点大概在 120 km 范围内。长白山天池火山, 其压力源半径变化较大, 源的深度相对较深 (胡亚轩等, 2007b), 利用垂直形变数据反演得到的龙岗火山压力源深度大概在 30 km 左右。

## 5 结论与讨论

通过分析龙岗火山区及其附近的垂直形变资料, 笔者发现龙岗火山近年来相对隆升较明显。对主要隆起区的形变速率以及剪切和张裂变形率变化的研究表明长抚线发生了较大的变化, 丹抚线次之。火山区内的敦化—密山断裂带活动目前不太明显。再结合高程对位移变化的影响, 应用  $Mog$  模型和改进后的  $mMog$  模型反演主要隆起区可能存在的压力源参数, 结果显示龙岗火山区岩浆位置大概在  $42.1^{\circ}N$   $126.5^{\circ}E$  附近, 接近地震测深研究所得的位置; 相对长白山天池火山 2002~2005 年的变化 (胡亚轩, 2007b), 压力源半径变化较大, 有 183 m 左右, 源的深度相对较深, 为 30 km 左右。从图 6 可看出, 在距水准点“丹抚 140 基”约 120 km 范围内的点位得到了较好的拟合, 大于该距离的点位速率拟合较差, 这可能与模型的选择有关; 另外, 反演深度为 30 km (段永红等, 2003; 张先康等, 2002), 这一方面是由于模型的局限性, 另一方面与  $I_4$  剖面 and 所反演压力源位置不同有关, 需用地质、地球物理及水平位移观测等更详尽的资料才能作进一步分析。该主要隆起区是龙岗火山区另一值得关注的地震危险区。

## 参考文献:

- 崔笃信, 王庆良, 李克, 等. 2007. 长白山天池火山近期形变场演化过程分析 [J]. 地球物理学报, 50 (6): 1731—1739.
- 陈运泰, 黄立人, 林邦惠, 等. 1979. 用大地测量资料反演的 1976 年唐山地震的位错模式 [J]. 地球物理学报, 22 (3): 201—216.
- 段永红, 张先康, 杨卓新, 等. 2003. 长白山天池火山区基底结构研究 [J]. 地震地质, 25 (3): 501—508.
- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 等. 2002. 吉林龙岗第四纪火山活动分期 [J]. 岩石学报, 18 (4): 495—500.
- 樊祺诚, 隋建立, 王团华, 等. 2007. 长白山活动历史、岩浆演化与喷发机制探讨 [J]. 高校地质学报, 13 (2): 175—190.

- 国家测绘总局. 国家水准测量规范 [S]. 1974. 北京: 测绘出版社.
- 国家测绘总局. 一、二、三、四等水准测量细则 [S]. 1958. 北京: 测绘出版社.
- 国家地震局. 大地形变测量规范 [S]. 1983. 北京: 地震出版社.
- 胡亚轩, 施行觉, 王庆良, 等. 2003. 腾冲火山区地表垂直形变分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 23 (2): 37—41.
- 胡亚轩, 王庆良, 崔笃信, 等. 2007b.  $Mog$  模型在长白山天池火山区的应用 [J]. 地震地质, 29 (1): 144—151.
- 胡亚轩, 王庆良, 崔笃信, 等. 2007a. 用形变资料分析腾冲火山区岩浆的活动特征 [J]. 地震研究, 30 (2): 164—168.
- 刘尔义. 1990. 吉林省龙岗火山群地质构造特征研究 [J]. 中国区域地质, (2): 157—165.
- 施行觉, 胡亚轩, 毛竹, 等. 2005. 以垂直形变资料反演腾冲火山区岩浆活动性的初步研究 [J]. 地震研究, 28 (3): 256—261.
- 王凯红, 纪春华, 王秀萍. 2004. 敦密断裂带的地质特征及演化 [J]. 吉林地质, 23 (4): 23—27.
- 王勇. 1996. 粘弹性半空间内膨胀引起的地表垂直位移和重力的变化 [J]. 地壳形变与地震, 16 (2): 8—11.
- 王振杰. 2006. 测量中不定问题的正则化解法 [M]. 北京: 科学出版社.
- 徐德兵, 白志达, 张秉良, 等. 2005. 吉林龙岗火山碎屑基岩堆特征与成因机理 [J]. 沉积学报, 23 (1): 60—66.
- 许才军, 李志才. 2003. 轮回搜索——贝叶斯法及其在大地测量反演中的应用 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 28 (6): 658—662.
- 张成科, 张先康, 赵金仁, 等. 2002. 长白山天池火山区及邻近地区壳幔结构探测研究 [J]. 地球物理学报, 45 (6): 812—820.
- 张先康, 张成科, 赵金仁, 等. 2002. 长白山天池火山区岩浆系统深部结构的深地震测深研究 [J]. 地震学报, 24 (2): 135—143.
- Berjino G, Corrado G, Lucgo G, et al. 1984. Ground deformation and gravity changes accompanying the 1982 Pozzuoli uplift [J]. Bull Volcanol, 47 (2): 187—200.
- Decker R W, Koyanagi R Y, Dvorak J J, et al. 1983. Seismicity and surface deformation on Mauna Loa volcano, Hawaii [J]. EOS, 64 (37): 545—547.
- Hansen P C, O'Leary D P. 1993. The use of the  $L$ -curve in the regularization of discrete ill-posed problems [J]. SIAM J Sci Comput, 14 (6): 1487—1503.
- Hansen P C. 1992. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the  $L$ -curve [J]. SIAM Review, 34 (4): 561—580.
- Mogi K. 1958. Relation between eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them [J]. Bull Earthq Res Inst, 36: 99—134.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space [J]. BSSA, 75 (4): 1135—1154.
- Yang X, Davis P M, Jamies H D. 1988. Deformation from inflation of a dipping finite prolate spheroid in an elastic half-space as a model for volcanic stressing [J]. GR, 93 (85): 4249—4257.

- Yang X, Davis PM, Delaney PT et al. 1992. Geodetic analysis of dike intrusion and motion of the magma reservoir beneath the summit of Kilauea volcano, Hawaii 1970—1985 [J]. *Geophys Res* 97 (B3): 3305—3324
- Yokoyama I. 1971. A model for the crustal deformations around volcanoes [J]. *J Phys Earth* 19 (3): 199—207.

## Analysis of Activity of Longgang Volcano Based on Vertical Deformation

HU Ya-xuan, WANG Qing-liang, WANG Xiong

(Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

### Abstract

Firstly we analyze the vertical deformation rates of five leveling lines in more than twenty years in Longgang volcano region. The rates at the stations are calculated relative to the Changchun fiducial position. The large area in the east and the north of the Changbaishan mountain is subsiding but the sites in the Longgang is rising. Then we analyze the vertical rate and the vertical strain in the main swollen region. Both of them show that the rate of the Fusong-Jilin leveling line is the biggest. At last the source parameters are inverted by using the improved Mogi model. The data is analyzed mainly in the swollen region. The inversion method is L-curve. The location of the source is  $42.1^{\circ}\text{N}$ ,  $126.5^{\circ}\text{E}$  that is the same as the result from the deep seismic sounding investigation. The equivalent radius of the pressure source is about 183 m, bigger than Tianchi volcano in Changbaishan Mountain. The depth is about 30 km, which is deeper than Tianchi volcano too.

Key words: Longgang volcano, vertical deformation field, inversion