

DOI: 10.13203/j.whugis20130077

文章编号: 1671-8860(2015)02-0214-08

利用 PALSAR 数据研究长白山火山活动性

何 平^{1,2,3,4} 许才军¹ 温扬茂¹ 丁升华² 王庆良⁵

¹ 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

² 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉, 430074

³ 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北 武汉, 430077

⁴ 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 湖北 武汉, 430079

⁵ 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安, 710054

摘要: 利用 2006-10~2011-03 期间共 24 景 ALOS 卫星的 PALSAR 数据对长白山天池火山区的近年形变进行了研究, 基于 PSInSAR 方法进行了数据处理, 获取了长白山近年火山的时序形变场和形变速率结果。结果表明, 长白山火山近年火山活动较弱, 仅在火山口附近存在 10 mm/a 的形变速率。同时利用 Mogi 模型对火山区的岩浆变化体积速率进行了反演, 显示该区域的岩浆以 $\sim 1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 的速率补充。

关键词: 长白山火山; PSInSAR; Mogi 模型; 岩浆活动

中图法分类号: P228

文献标志码: A

长白山天池火山(以下简称天池火山)是一座坐落在中朝边界的具有潜在喷发能力的高危险大型复合式火山。长白山天池火山一旦喷发, 不但会直接威胁到当地居民和众多游客的生命安全, 还将引起大范围的原始森林大火。此外, 天池火山口 20 亿 m^3 的天池水体一旦因火山喷发而迅速下泄, 将会引起巨大的碎屑流和洪水灾害, 严重威胁松花江上、中游城镇和水利、水电工程的安全^[1]。对长白山火山的形变监测一直受到研究学者的关注, Kim 等^[2] 利用 JERS 数据探测出在 1992~1998 年间的火山膨胀速率为 3 mm/a ; 胡亚轩等^[3] 利用 GPS 及水准资料推断长白山天池火山在 2002~2003 年岩浆上涌活动比较明显, 同时利用水准和 GPS 观测资料联合反演结果表明火山岩浆在 2002 年后的活动逐年减弱^[4]; 陈国浒等^[5] 基于合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)和 GPS 形变场进行模拟研究火山岩浆囊参数, 研究结果表明长白山火山活动存在时间上的间歇性和空间上的迁移性; 韩宇飞等^[6] 利用差分 InSAR 技术研究结果表明从天池火山山脚到 2 000~2 200 m 高程处表现为逐

渐增强的隆升形变, 最高形变速率达到 5 mm/a 。

上述利用 InSAR 技术对长白山天池火山的监测中, 主要利用 JERS 和 ENVISAT 卫星的数据采用差分 InSAR 技术进行了研究, 其中 JERS 卫星是日本第一代 L 波段的 SAR 卫星, 定轨精度较低; ENVISAT 是欧空局 C 波段的 SAR 卫星, 穿透能力低于 L 波段的 SAR 卫星, 不适合于植被茂密地区的形变监测。ALOS 卫星作为日本第二代 L 波段的 SAR 卫星, 较第一代的 JERS 卫星的定轨精度更高, 同时由于 ALOS 卫星其较长的波长(23.6 cm)以及较大的雷达波入射角($\sim 34^\circ$)可以有效地克服在山区由于雷达影像的叠掩、前缩、阴影以及茂密的地表植被的影响, 从而获取到干涉质量较高的干涉信号。由于长白山天池火山地区地形复杂, 地势高峻, 积雪期长, 植被非常茂密, 仅在天池火山口有部分裸岩, 因此很容易造成 SAR 干涉图像大范围失相干, 应用 DInSAR 技术容易受到大量误差因素的影响。

本文基于时序 InSAR 技术的优势和发展潜力^[7,8], 考虑天池火山的植被覆盖情况, 采用 ALOS 卫星(日本二代 L 波段的 SAR 卫星, 定轨

收稿日期: 2013-04-24

项目来源: 国家重点基础研究发展规划(973 计划)资助项目(2013CB733303, 2013CB733304); 国家自然科学基金项目及创新群体资助项目(41431069, 41204010, 41274019, 41204001); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110141130010); 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGED2013-2-6-E); 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放研究基金资助项目(13-02-11, 13-01-04)。

第一作者: 何平, 博士, 主要研究方向为融合 GPS 和 InSAR 时序技术研究地表形变。E-mail: imheping616@whu.edu.cn

精度高) SAR 数据对天池火山进行研究, 利用时序分析方法获取了 2006~2011 年期间天池火山的时序形变结果。同时基于 Mogi 模型^[9], 利用平均形变速率反演了长白山火山近期的岩浆活动情况, 为研究天池火山喷发活动的预防预测提供基础。

1 长白山火山区地质及监测网概况

长白山火山经过造盾阶段、造锥阶段、全新世喷发间断三个主要发展阶段。在全新世经历了 4 次主要喷发活动, 时间分别为距今约 5 000 年、4 000 年、800 年和公元 1668~1702 年。其中 1 200 年左右的布里尼式爆破式大喷发被认为是全球近 2 000 年以来最大的喷发之一, 同时 1668 和 1702 年相继发生两次中小规模喷发以及 1903 年发生了一次小规模的射气岩浆喷发等, 从而得到全新世以来长白山火山喷发的时间间隔大概从几千年缩短到后来的几百年。

我国于 1985 年开始了对长白山天池火山地区的地震活动监测。1999 年之前, 主要采用单台或少量几个地震台站进行季节性观测, 观测结果表明该火山在 1999 年之前的地震活动性较弱, 且地震多发生在天池的北部, 1999 年之后, 长白山天池火山建立了固定地震台。利用固定地震台记录了 1999 年 7 月到 2011 年 12 月之间火山口附近 50 km 范围内共发生了 3 900 次 ML 1.0 的火山地震。地震活动性根据其时间分布可以分为三个明显的周期, 1999~2002 年和 2006~2011 年之间的不活跃期以及 2002~2006 年之间的活跃期。同时, 相同期间内地震活动的最大震级序列和累积力矩表明为相似的模式, 即“活跃期”的地震能量释放远高于“不活跃期”^[10]。

西太平洋板块是天池未来喷发的主要驱动力, 其向中国大陆持续的俯冲作用使我国东北地区现今呈现挤压状态, 而长白山天池火山正是位于这一地区, 由此可见, 长白山火山再次喷发的危险性不容忽视。长白山火山区域目前存在 11 个地震台站, 15 个会战 GPS 观测站, 2 条高精度的水准路线和 3 个温泉气体监测站^[11], 并进行了均匀的覆盖, 除了部分位于北韩边界的盲点(图 1)。

2 长白山火山区时序形变

2.1 数据源

本文从日本宇宙航空研究开发机构申请了 24 景 ALOS 卫星的 PALSAR 影像, 影像获取的

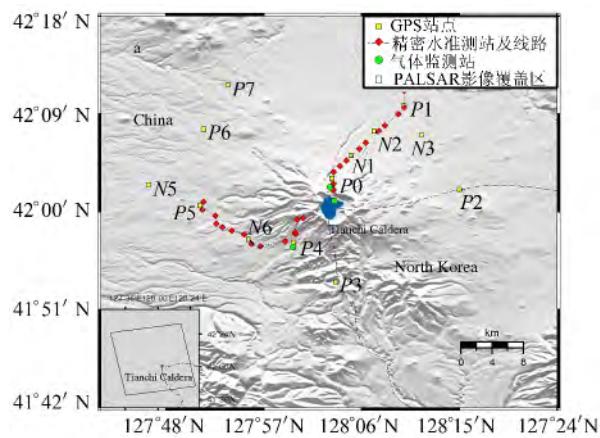


图 1 长白山火山地区的地形及数据监测网

Fig. 1 Topography and Monitoring Net for the Changbaishan Volcano Region

时间段为 2006-10~2011-03 (Track 830), 图 1 中显示了本文选取的 SAR 影像覆盖区域。基于 PSInSAR 技术, 本文选取 2008-07-16 影像为主影像, 其余影像为辅影像, 时空基线分布如图 2 所示。从图 2 的时空基线分布可以看到, 垂直基线变化范围为 -1 500~4 500 m。ALOS 卫星的卫星轨道控制弱于 ENVISAT 卫星, 但由于采用 L 波段微波成像, 干涉处理中垂直基线的长度比 ENVISAT 的可以放宽。本文的 PSInSAR 处理利用了 StaMPS^[12] 软件, 外部 DEM 采用 SRTM DEM^[13], 去除了地形相位的影响。

2.2 PSInSAR 处理结果

利 PSInSAR 技术处理获取得到研究期间长白山天池火山的形变时序结果(见图 3, 其中负号代表靠近卫星方向, 为隆升变化, 正号代表远离卫星方向, 为沉降变化)。图 3 中共选取 PS 点 58 775 个。从图 3 可以看出, 火山西侧靠近朝鲜地区, 点位分布较密集, 观测时间段内长白山火山形变表现为非一致性的线性变化, 形变主要分为两个阶段: 2006~2009 年期间, 火山持续隆升; 2009~2011 年期间, 火山的隆升活动逐渐停止, 部分区域出现下沉变化。同时, 由于长白山地区地质活动及植被的复杂性, 时序结果除上述的整体趋势变化外, 还存在有局部的区域性形变, 如图 3 中的红色虚线区域(望天鹅火山区域)在 2008 年之后出现了隆升现象, 到 2011 年达到 ~4 cm 的形变。即长白山天池火山的岩浆活动性与周围小火山的岩浆活动性并不是完全一致的。

根据图 3 的时序变化, 本文基于线性模型分别获取了观测时间段内总的平均速率、2006-10~2009-01 期间和 2009-01~2011-03 期间的平均速率, 如图 4 所示。图 4(a) 中显示的平均速率范围

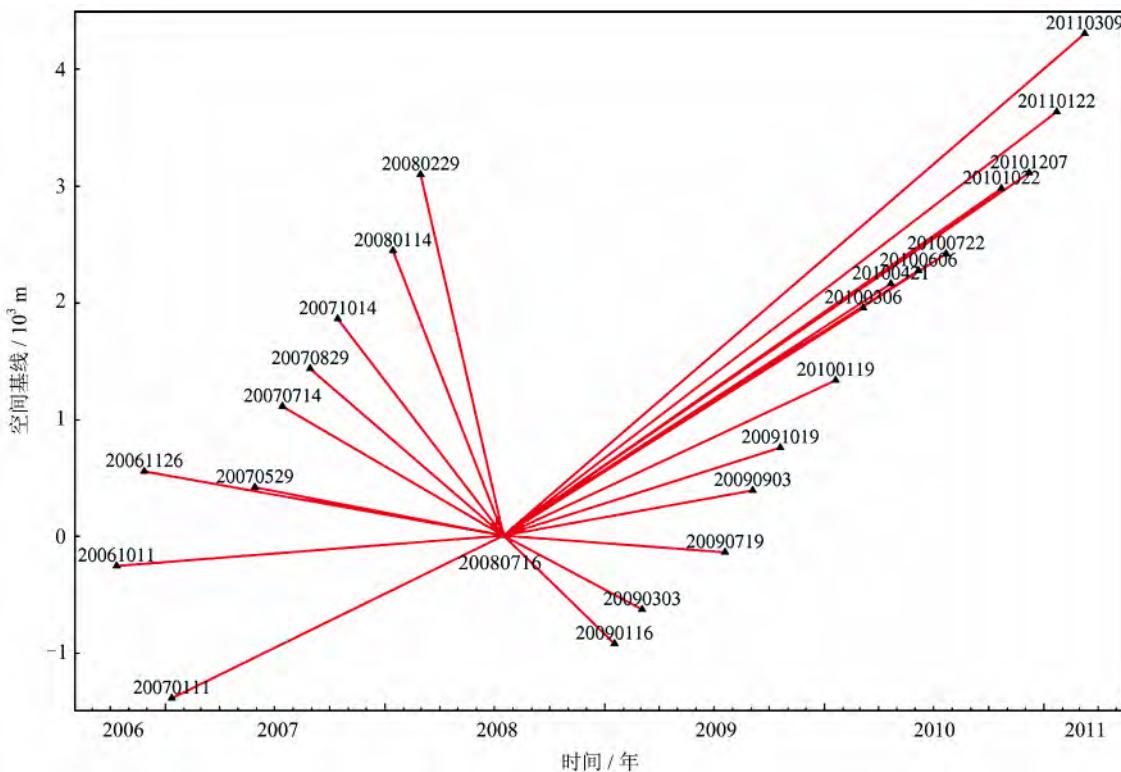


图2 Track 218 时空基线图

Fig. 2 Spatial-temporal Baseline of Track 218

为 $-16\sim0$ mm/a, 图4(b)的范围为 $-32\sim8$ mm/a, 图4(c)的范围为 $-16\sim12$ mm/a。由图3可知, 观测时间段内长白山天池火山为两个阶段的变化, 故图4(a)不能表示细节的形变趋势和阶段内的形变速率, 但可以看出在本文观测时间内长白山天池火山总体是处于岩浆补充期, 是隆升的。图4(b)和4(c)虽然显示的形变速率范围很大, 但结合动力学及地质活动规律可知, 总体的形变趋势才能表示与岩浆相关的活动, 形变速率较大的离散PS点可能由人为活动或塌方引起, 在本文中不作考虑。考虑与岩浆相关的形变速率活动, 图4(b)中的形变速率集中在 $-15\sim10$ mm/a, 图4(c)中的形变速率接近 $-5\sim0$ mm/a。由上述分析可知, 在2006-10~2009-01期间, 长天山天池火山处于隆升期, 其隆升速率逐步减弱; 2009年开始, 该火山降升活动逐步停止, 部分区域存在下沉现象, 对应为岩浆活动减弱, 从图4(c)可以看到, 在火山口附近, 其形变速率仅为 $-2\sim0$ mm/a, 活动很缓慢, 预示着火山活动的停止或下一喷发期的到来, 但在望天鹅火山区域(A), 2009年后仍然为小速率的隆升活动。

2.3 结果分析

为了验证InSAR数据处理结果的精度, 本文利用外部水准监测结果对PS点的时序变化进行

了比较分析。由图1可知, 长白山地区共建立了两条水准观测线路, 西坡有15个水准点, 但是5号点缺失, 剩下14个点, 北坡有13个水准点。考虑水准点的密度以及水准点与PS点的重叠度, 本文选取用于InSAR结果验证的水准点如图4(a)所示, 包括西线(W1、W2、W4、W6、W8、W12)六个点和北线(N1、N2、N5、N7、N8、N9)六个点, 水准点监测结果参考文献[14]。其中, 水准西线, 本文选取观测时段2006~2010年段内共四段的数据; 水准北线, 本文选取观测时段2007~2010年段内共三段的数据(北线的建站时间为2006年, 2006年8月为第一期时间, 本文为避免水准点的自身沉降, 去除了2006年的数据)。对于InSAR结果, 本文选取水准点位置半径250 m范围内的PS点取平均值与水准点结果进行比较。由于InSAR获取的为视线向(line of sight, LOS)形变量, 水准监测为垂向形变, 在比较向需要转化到统一的方向。对缓慢的火山形变, 可以假定水平向位移够小, 可忽略不计, 则可以将水准结果转化为LOS向, 结果比较如图5所示。从图5可以看出: ① W1、W2、W4、W6、N1、N2、N5、N7、N8、N9的水准点结果与InSAR结果吻合情况较好, 而W8、W12两点的差异较好, 本文分析主要原因在于靠近火山口位置会出现较大形变波

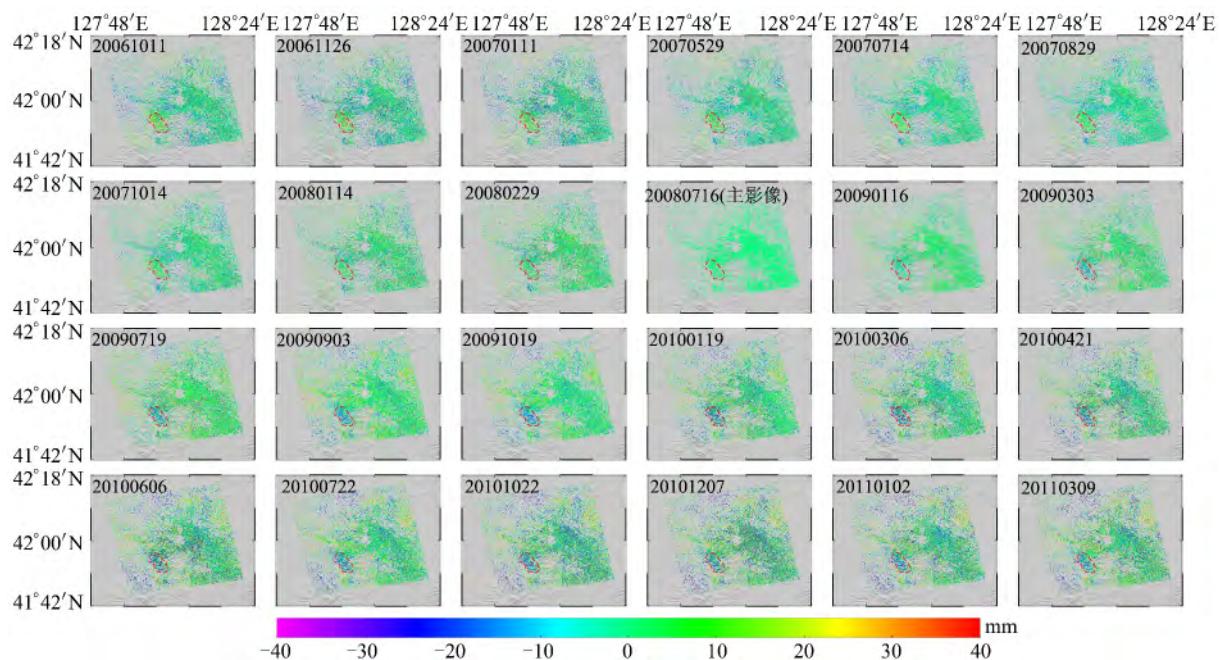


图 3 长白山天池火山时序形变图

Fig. 3 Time Series Deformation Results for the Changbaishan Tianchi Volcano

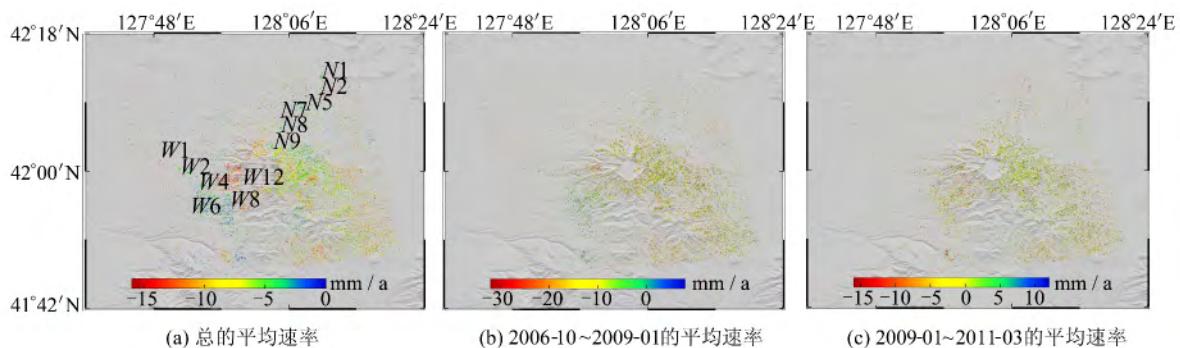


图 4 时序 InSAR 的平均速率(其中绿色三角形点为水准监测点)

Fig. 4 Mean Deformation Rate of Time Series InSAR

动的不稳定点,比较时,难以匹配到水准点上恰好也存在 PS 点,从而导致与水准的结果有一定的差异性;② 分析本文的 PS 时序结果变化可知,长白山天池火山在 2006~2009 年初时间段内存在明显的降升活动,其中,W4、N7、N8、N9 的速率达到 10~15 mm/a,隆升活动离火山口越近越显著;在 2009~2011 年观测时段内,火山的隆升活动基本停止,速率在 0 mm/a 上下波动,部分点位表现为明显的下沉(如 W4、N7),下沉速率达到 5 mm/a;③ 对比西坡与北坡结果,北坡结果与水准结果吻合更好,这是因为西坡相干性较低,且存在一定的叠掩噪声点。

3 Mogi 模型反演

上述对长白山火山地表的形变监测为研究该

地区的动力学机制奠定了基础。为了研究在 2006~2011 年期间该火山的岩浆活动变化,本文利用时序 InSAR 技术获取地表速率结果,基于 Mogi 模型反演了该区域的岩浆房参数情况。

3.1 Mogi 模型

Mogi 模型作为最早应用于火山形变机理的模型,是由日本学者 Kiyoo Mogi 于 1958 年首次依据 Yamakawa 理论公式将岩浆压力源与火山地形变形相联系而建立的,其基本思想是用“埋置”于均匀弹性半空间的点状静水压力源来模拟火山膨胀和收缩期的地表形变,应用前提是压力源的尺寸要远小于源的深度。虽然后人在 Mogi 模型的基础上提出了更复杂的点源模型,但 Mogi 模型仍是迄今为止适合火山地区地表变形模拟最常用、最简单的模型,并得到了大量的应用^[7]。

若已知岩浆压力源的中心位置为 $(x_0, y_0,$

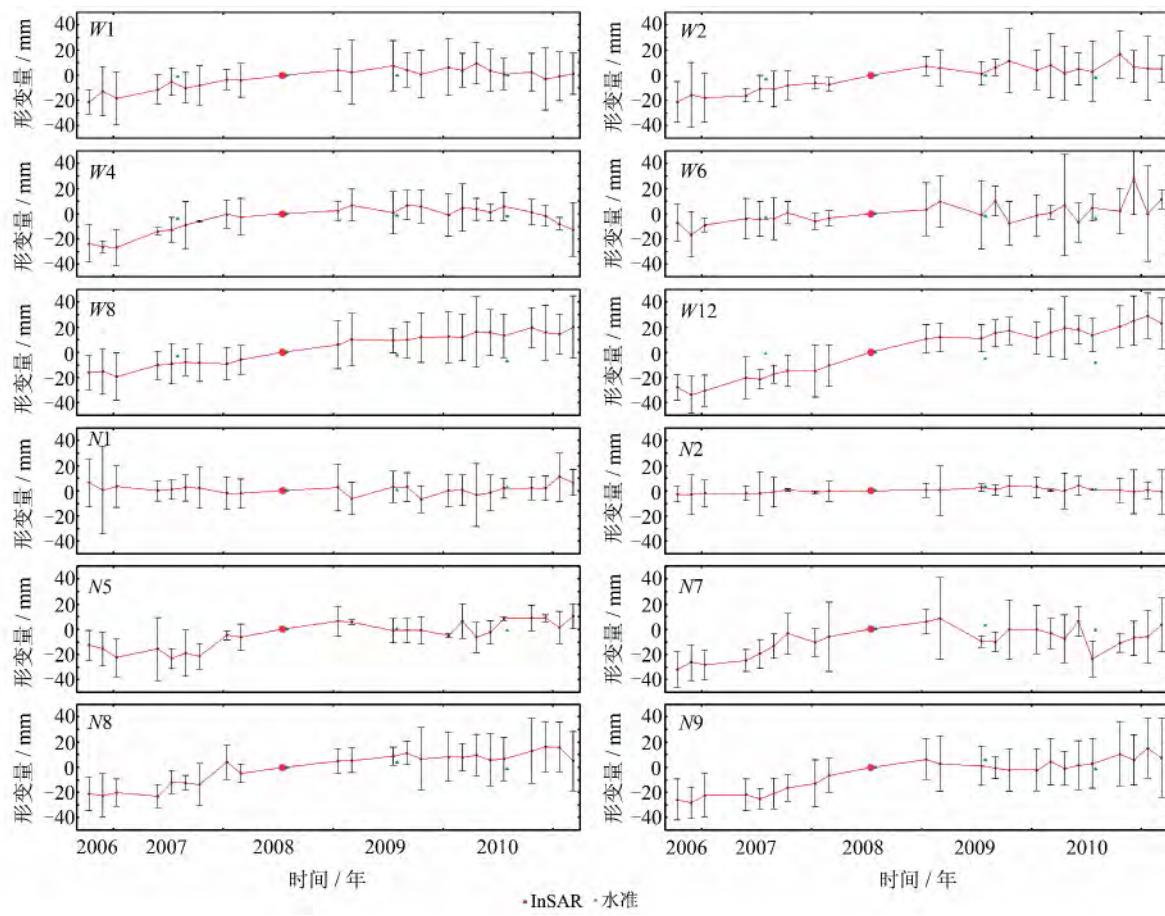


图 5 时序 InSAR 结果的点位特征分析

Fig. 5 Point Deformation Characteristic Analysis from Time Series InSAR Results

$-d$), 则根据 Mogi 模型可以给出相应的 U_r 、 U_x 、 U_y 、 U_z 位移公式如下^[7]:

$$U_r = \frac{3\Delta Pa^3 r}{4\mu (r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{3\Delta Vr}{4\mu (r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

$$U_x = \frac{3\Delta Pa^3 (x - x_0)}{4\mu (r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{3\Delta V(x - x_0)}{4\mu (r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

$$U_y = \frac{3\Delta Pa^3 (y - y_0)}{4\mu (r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{3\Delta V(y - y_0)}{4\mu (r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

$$U_z = \frac{3\Delta Pa^3 d}{4\mu (r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{3\Delta Vd}{4\mu (r^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

其中, U_r 为径向水平位移; U_x 为 x 分量位移; U_y 为 y 分量位移; U_z 为 z 分量位移; ΔP 为源内部的压力变化量; a 为压力源半径; μ 为剪切模量; d 为压力源中心深度; r 为压力源中心到地表点的径向距离, $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ 。由前面分析可知, 长白山地区的地表形变以垂直形变为主, 本文主要利用式(4)进行模型反演。本文的反演程序采用随机迭代的模拟退火方法^[11]。

3.2 模型反演

由式(4)可知, Mogi 模型需要反演的模型参数较少, 不需要对观测结果进行重采样以提高解算效率, 故本文利用所有的 PS 点形变速率结果

作为输入。模型反演分为两期进行, 分别为 2006-10~2009-01 期间和 2009-01~2011-03 期间。反演获取的两个时间段的模型参数如表 1 所示。

表 1 基于 Mogi 模型反演的几何参数(误差置信区间为 95%)

Tab. 1 Parameters from Mogi Inverse

观测时段	X 坐标 /km	Y 坐标 /km	深度 /km	体积变化速率 /($10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)
第一期	424.00	4 651.52	6.3	1.1
第二期	422.86	4 650.94	6.9	0.93

利用表 1 中的反演模型参数, 本文正演了长白山天池火山的地表形变及残差结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 天池火山的岩浆活动是以火山口周围为中心进行的, 火山形变是由其正下方的岩浆活动直接引起的, 岩浆源位于火山口下偏西的位置。由图 4、图 5 的形变速率分析可知, 长白山天池火山的隆升速率在逐渐降低, 由表 1 可知, 两个时段岩浆的年体积变化速率由 $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 减少到 $0.93 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。同时由图 6(a) 和 6(c) 正演的模拟结果可以看到形变速率的下降。本文结果显示, 长白山天池火山的岩浆补充

活动逐渐接近后期,岩浆房更为充实,为下个喷发期的到来奠定基础。残差结果显示,本文的模型

研究提取了由火山岩浆活动引起的形变,一些由局部形变及噪声影响的点则无法模拟。

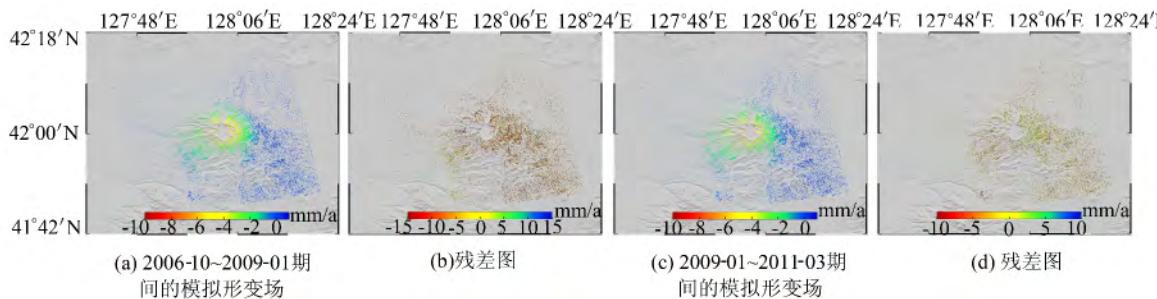


图 6 Mogi 模型反演结果模拟及残差图

Fig. 6 Simulation of Surface Displacement and Residual Results Based on Mogi Model

对长白山火山的岩浆囊探测及活动性研究,研究学者给出了不同的结果。2005 年,杨卓欣等^[15]利用三维层析成像技术推断天池火山口下方壳内岩浆现今仍以“活动”的状况存在,下地壳或更深的地方存在岩浆源(囊),推测它位于天池火山口以西,而不在天池火山口的正下方;2008 年,朱桂芝等^[16]利用 2002~2003 年的 GPS 与水准资料给出岩浆囊深度为 9.2 km;2008 年,陈国浒等人基于 2002~2003 年期间的 InSAR、GPS 观测资料,利用单源 Mogi 模型反演给出长白山天池岩浆囊深度为 6.9 km,岩浆源体积两年内的体积变化为 $5.2 \times 10^6 \text{ m}^3$,平均为 $2.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,同时利用双源 Mogi 模型给出的长白山天池岩浆囊深度为 7.9 km,岩浆源体积两年内的体积变化为 $6.3 \times 10^6 \text{ m}^3$,平均为 $3.15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ 。以上研究分析给出的长白山天池火山岩浆囊的深度存在一定的差异,原因可能是由于利用的数据手段以及研究的时间段不同导致的。本文利用时序 InSAR 结果得出的岩浆深度接近 7 km,与陈国浒等^[5]的研究结果较为接近,同时本文研究时间段内该火山的活动性逐步减弱,表现为反演获取的岩浆体积变化速率较之略小。

4 结语

本文利用 24 景 ALOS 卫星的 PALSAR 数据,采用时序 InSAR 技术进行数据处理,获取了长白山天池火山地区 2006-10~2011-03 期间的时序形变结果,并据此反演确定该火山的岩浆源体积年变化率。

1) L 波段的 PALSAR 数据能够有效减弱植被、复杂地形等失相干因素的影响,克服积雪对地表覆盖的影响,对比长白山地区的时序监测结果与水准资料,两者吻合良好,表明本文研究获取的

长白山 InSAR 观测结果具有较好的精度。

2) 基于 InSAR 的时序变化结果表明,长白山火山形变在监测期间是隆升的,其隆升速率逐渐减弱,在局部地区开始出现下沉,同时该区域的形变速率为非线性变化,基于线性模型的时序处理方法难以有效的应用。

3) 基于 Mogi 模型的反演结果表明长白山天池火山的岩浆囊位于天池火山口下方近西侧,深度接近 7 km,岩浆补充体积年速率约为 $1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,同时该火山的岩浆活动性开始减弱,可能预示进入应力增强期,有必要加强对该地区的关注。

参 考 文 献

- [1] Liu Junqing, Sun Jicai, Wu Chengzhi, et al. Volcano Lake Outburst Flood Maximum Flow of Changbaishan Tianchi Volcano[J]. *Seismol Geol*, 2013, 35(1):85-90(刘俊清,孙继财,武成智,等.长白山天池火山溃湖洪水最大流量的初步估算及影响分析[J].地震地质,2013,35(1):85-90)
- [2] Kim S W, Won J S. Slow Deformation of Mt. Baekdu Stratovolcano Observed by Satellite Radar Interferometry [EB/OL]. http://earth.esa.int/workshops/fringe03/proceedings/posters/57_kim.pdf, 2003
- [3] Hu Yaxuan, Wang Qingliang, Cui Duxin, et al. Joint Inversion of Geometric Deformation in Changbaishan Volcanic Area[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 24(4): 90-94(胡亚轩,王庆良,崔笃信,等.长白山火山区几何形变的联合反演[J].大地测量与地球动力学,2004,24(4):90-94)
- [4] Hu Yaxuan, Wang Qingliang, Cui Duxin, et al. Application of Mogi Model at Changbaishan Tianchi Volcano[J]. *Seismol Geol*, 2007, 29(1): 144-151(胡亚轩,王庆良,崔笃信,等. Mogi 模型在长白山天池火山区的应用[J]. 地震地质,2007,29(1):144-151)

- [5] Chen Guohu, Shan Xinjian, Wooil M M, et al. A Modeling of the Magma Chamber Beneath the Changbai Mountains Volcanic Area Constrained by InSAR and GPS Derived Deformation[J]. *Chinese J Geophys*, 51(4): 1 085-1 092(陈国浒,单新建, Wooil M M,等. 基于 InSAR、GPS 形变场的长白山地区火山岩浆囊参数模拟研究[J]. 地球物理学报, 2008,51(4):1 085-1 092)
- [6] Han Yufei, Song Xiaogang, Shan Xinjian, et al. Deformation Monitoring of Changbaishan Tianchi Volcano Using D-InSAR Technique and Error Analysis[J]. *Chinese J Geophys*, 2010,53(7):1 571-1 579(韩宇飞,宋小刚,单新建,等. D-InSAR 技术在长白山天池火山形变监测中的误差分析与应用[J]. 地球物理学报,2010,53(7):1 571-1 579)
- [7] Xu Caijun, He Ping, Wen Yangmao. Surface Deformation of Mt. Etna, Italy from PSInSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1 012-1 016(许才军,何平,温扬茂. 利用 PSInSAR 研究意大利 Etna 火山的地表形变[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2011,36 (9):1 012-1 016)
- [8] He Ping, Wen Yangmao, Xu Caijun, et al. Volume Change of Groundwater in Langfang Region Derived from Multi-temporal InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37 (10): 1 181-1 185(何平,温扬茂,许才军,等. 多时相 InSAR 技术的廊坊地区地下水体积变化研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版,2012,37(10): 1 181-1 185)
- [9] Mogi K. Relations Between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformation of the Ground Surfaces Around Them[J]. *Bull Earthquake Res Inst Univ of Tokyo*, 1958,36:99-134
- [10] Xu J D, Liu G M, Wu J P, et al. Recent Unrest of Changbaishan Volcano, Northeast China: A Precursor of a Future Eruption[J]. *Geophys Res Lett*, 2012,39:1-7
- [11] Shirzaei M, Walter T R. Randomly Iterated Search and Statistical Competency as Powerful Inversion Tools for Deformation Source Modeling: Application to Volcano Interferometric Synthetic Aperture Radar Data[J]. *J Geophys Res*, 2009,114,1-16
- [12] Hooper A. A Multi-temporal InSAR Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008,35(16):1-5
- [13] Farr M, Rosen A, Caro E. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Rev Geophys*, 2007,45,1-4
- [14] Liu Guoming, Sun Hongyan, Guo Feng. The Newest Monitoring Information of Changbaishan Volcano, NE China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(10): 2 905-2 911(刘国明,孙鸿雁,郭峰. 长白山火山最新监测信息[J]. 岩石学报,2011,27 (10):2 905-2 911)
- [15] Yang Zhuoxin, Zhang Xiankang, Zhao Jinren, et al. Tomographic Imaging of 3D Crustal Structure Beneath Changbaishan-Tianchi Volcano Region[J]. *Chinese J Geophys*, 2005, 48(1):107-115(杨卓欣,张先康,赵金仁,等. 长白山天池火山区三维地壳结构层析成像[J]. 地球物理学报,2005,48(1):107-115)
- [16] Zhu Guizhi, Wang Qingliang, Shi Yaolin, et al. Modelling Pressurized Deformation Source for Changbaishan Volcano with Homogenous Expansion Point Source[J]. *Chinese J Geophys*, 2008, 51(1): 108-115(朱桂芝,王庆良,石耀霖,等. 各向同性膨胀点源模拟长白山火山区岩浆囊压力变形源[J]. 地球物理学报,2008,51(1):108-115)

Estimating the Magma Activity of the Changbaishan Volcano with PALSAR Data

HE Ping^{1,2,3,4} XU Caijun¹ WEN Yangmao¹ DING Kaihua² WANG Qingliang⁵

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Wuhan 430077, China

4 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

5 No. 2 Monitoring Center of China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China

Abstract: A total of 24 scenes ALOS PALSAR satellite data between 2006-10 and 2011-03 were used to monitor the deformation for the Changbaishan volcano area; based on the PSInSAR approach for data processing, the time series and mean rate were obtained for deformation in the Changbaishan vol-

cano region. These results show that the magma activity for the Changbaishan volcano was weak, since only near the crater there was there a 10 mm/a deformation rate. Based on the deformation results, a Mogi model was used to inverse the source parameters in volcanic area; the magma volume increased nearly $1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$.

Key words: the Changbaishan volcano; PSInSAR; Mogi model; magma activity

First author: HE Ping, PhD, specializes in the integration of InSAR and GPS time series analysis for surface deformation. E-mail: imheping616@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Basic Research Development Program (973 Program) of China, Nos. 2013CB733303, 2013CB733304; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41431069, 41204010, 41274019, 41204001; the Doctoral Fund of Ministry of Education of China, No. 20110141130010; the Opening Fund of State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, No. SKLGED2013-2-6-E; the Basic Research Fund of Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education of China, Nos. 13-02-11, 13-01-04.

(上接第 192 页)

Using Non-meteorological Parameters Tropospheric Delay Estimation Model for Accelerating Convergence of PPP

YAO Yibin¹ YU Chen¹ HU Yufeng¹ LIU Qiang¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Research based on non-meteorological parameters in the tropospheric zenith total delay estimation model is becoming mature and the scope of applications continues to broaden. We studied application of non-meteorological parameters to precise point positioning, and analyzed the effect of its application from the aspects of positioning accuracy and convergence time. Experimental results show that, when applied the non-meteorological parameter estimation model, positioning convergence time has been significantly improved by approximately 23%. However, there was no significant change in positioning accuracy.

Key words: non-meteorological parameters; precise point positioning; convergence time; tropospheric delay estimation

First author: YAO Yibin, PhD, professor. His research interest is high-precision GPS data processing. E-mail: ybyao@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41174012, 41274022; the National 863 Program of China, No. 2013AA122502; the New Century Excellent Talents in University, No. NCET-12-0428; the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014214020202).