



2011 年 3 月 11 日日本宫城 M_w 9.0 级地震对其周边地区火山活动的影响

王凡^①, 沈正康^{②①*}, 王阁昭^①, 王敏^①

① 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;

② 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

* 联系人, E-mail: zhengkangshen@pku.edu.cn

2011-03-28 收稿, 2011-04-22 接受

地震动力学国家重点实验室自主课题(LED2009A02)、国家自然科学基金重大项目(41090294)和中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA1011)资助

摘要 2011 年 3 月 11 日日本宫城 M_w 9.0 级大震后的两天九州岛上新燃岳火山发生大规模喷发。此次火山喷发是否是受地震触发所致, 以及地震是否同样也会造成富士山火山和长白山火山的喷发成为人们关注的热点。通过对地震造成的区域应力应变场的计算, 发现富士山火山、新燃岳火山和长白山火山均处于体膨胀区, 在地下 10 km 处体膨胀分别达到~220, ~8 和 ~14 nano-strain。由同震 GPS 位移场计算得到的 3 个火山地区地表面应变也表现为膨胀, 符合模型计算结果。考虑到拉张应力可能对岩浆通道产生的扩张作用、对包容在岩浆内二氧化碳气体的分异作用以及由此引发的一系列正反馈过程, 此次地震可能造成这些火山活动的增加, 应当警惕触发影响可能造成的火山喷发。

关键词

日本宫城地震
富士山
新燃岳
长白山
体膨胀
火山活动

2011 年 3 月 11 日日本东北部宫城县以东太平洋海域发生 M_w 9.0 级地震。地震及其引发的海啸造成巨大破坏和大量人员伤亡, 到目前为止已致 12468 人遇难, 15091 人失踪(http://news.xinhuanet.com/english2010/world/2011-04/06/c_13815236.htm)。地震引发的核泄漏危机使形势进一步恶化。2011 年 3 月 13 日日本东南部新燃岳火山再次喷发, 该火山自 2011 年 1 月 19 日以来已发生多次喷发(<http://news.xinhuanet.com/world/2011-01/26/c121028245.htm>)。此次喷发是否与 3 月 11 日宫城大震有关? 地震对日本和中国境内东部地区的其他火山活动具有怎样的影响? 研究地震造成的应力应变场变化, 估计地震对火山活动的影响, 对于加深火山喷发机制及其与地震之

间关系的认识、火山灾害预警具有重要意义。

新燃岳火山位于日本九州岛上鹿儿岛县与宫崎县交界处, 为雾岛火山链的火山之一, 火山口直径约 790 m。三维 P 波结构和 Q 值结构研究表明, 雾岛山地下~10 km 处存在低速异常和耗损因子高异常, 可能存在岩浆活动^[1,2]。富士山位于日本东京西南方向, 静冈县和山梨县交界处。P 波和 S 波三维速度结构研究表明, 富士山地下 7~17 km 处可能存在 H_2O 和 CO_2 等超临界挥发性流体活动, 地下 15~25 km 处可能存在玄武岩部分熔融^[3]。我国吉林省与朝鲜交界处的长白山天池火山在过去 300 多年间有过多次喷发活动, 具有潜在喷发能力。该火山的最近一次喷发发生在 1903 年。陈国祥等

人^[4]利用 Mogi 点源模型在 GPS 和 InSAR 数据约束下反演得到岩浆囊的位置大约在天池火山口下方 7.9 km 深处。朱桂芝等人^[5]则以 GPS 和水准资料为约束利用椭球点源模型模拟了长白山天池火山区岩浆囊压力变形源, 估计岩浆囊位于地下 9.2 km 深处。刘若新等人^[6]对长白山火山岩浆演化的研究表明, 天池下部分别在地壳内和地幔内各存在一个岩浆囊。

2011 年日本宫城地震之后, 东京大学地震研究所(<http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp>)、美国地质调查局(<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqint>)、Henews/2011/usc0001xgp)和哈佛大学(<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>)给出的震源机制解都表明此次地震为一次低角度纯逆冲型地震。ARIA

英文版见: Wang F, Shen Z K, Wang Y Z, et al. Influence of the March 11, 2011 M_w 9.0 Tohoku-oki earthquake on regional volcanic activities. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4523-y

团队利用 GEONET 的 GPS 数据给出了此次地震造成的日本境内地表同震位移场, 结果显示, 日本北部地区存在明显东向位移, 水平位移量在靠近震中区的东海岸达到 5.3 m. 同时伴随 ~1.1 m 的垂直沉降 (<http://supersites.earthobservations.org/honshu.php>). 利用地震波形数据和 GPS 同震位移场为约束反演得到的地震同震破裂分布, 断层面最大位移量接近 30 m (<http://supersites.earthobservations.org/honshu.php>).

王敏等人^[7]利用中国境内连续 GPS 台站和全球 IGS 台站的数据给出了 2011 年日本宫城 9 级地震在中国东部地区产生的同震位移场. 结果表明, 此次大地震产生的影响波及中国东北和华北的大部分地区, 特别是在吉林省东部边境地区, 最大位移达 32 mm.

上述研究结果表明富士山、新燃岳和长白山 3 座火山均处于日本大地震影响范围之内. 分别利用地震同震破裂模型和 GPS 同震位移数据计算该次地震造成的其周边地区应力应变场的变化, 并由此分析其对火山活动的影响.

选取 Wei 等人同震破裂模型(http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2011_taiheiyo-oki/)计算地震对其周边地区产生的应变场. 该模型中断层走向 201°, 倾角 9°, 断层走向长度 625 km, 宽度 280 km, 最大位错量 30 m, 断层破裂面顶端距地表 5.35 km. 之所以选择 Wei 等人模型是因为该模型同时采用地表近、中场 GPS 位移场和地震波形数据作为约束, 破裂面位错分布的分辨率较高.

在介质参数为 $V_p=6.7$ km/s, $V_s=3.87$ km/s 的情况下, 利用半无限空间弹性位错模型^[8]计算了 30°~46°N, 124°~150°E 范围内自地表至地下 100 km 不同深度的体膨胀. 地表的体膨胀 (图 1) 表明地震造成的应变场仅在日本北海道东部表现为压缩, 在日本其他地区以及中国东部则表现为膨胀. 其中新燃岳火山地表的体膨胀约为 8 nano-strain, 富士山火山的地表体膨胀

约为 220 nano-strain, 长白山火山的地表体膨胀约为 14 nano-strain (nano-strain 表示 1×10^{-9} 应变, 余同). 图 2 显示了富士山、新燃岳和长白山火山地区体膨胀与深度的关系. 可见, 虽然 3 个火山所处地区体膨胀都随深度的增加在递减, 但可以肯定的是岩浆囊所在深度都依然处于膨胀状态.

由于新燃岳火山和长白山火山距震中区较远, 而 Wei 等人的同震破裂模型对中、远场的 GPS 同震位移拟合并不理想. 因此, 我们又直接基于 GPS 同震位移数据 (ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/users/ARIA/ARIA_postseismic_offsets.v0.3.table)^[7]采用插值的方法^[9]计算了地表的面膨胀 (图 3). 计算结果表明富士山、新燃岳和长白山火山同样都处于膨胀区, 面膨胀分别为 ~203, ~85 和 ~46 nano-strain. 考虑岩浆囊位于地下数公里至数十公里深处, 其活动性应由体膨胀变化而非面膨胀变化决定, 由 GPS 位移场得到的地表面膨胀不能对火山活动性作出直接判断. 但 GPS 所得结果可以用来校验 Wei 等人模型结果. 由 Wei 等人模型正演计算得到 3 个火山地区的地表面

膨胀分别为 ~421, ~14 和 ~23 nano-strain, 与 GPS 结果符号相同、量级相似, 但数值有明显不同. 这种数值上的不同是由于 Wei 等人同震破裂模型和 GPS 同震位移数据在不同区域的精度均存在差异造成的. 但无论如何, 3 个火山都处于膨胀区这一结论是一致的, 彼此间相互验证更保证了结果的可靠性, 数值上的差异并不影响地震对火山触发作用的定性分析.

历史上有大量火山在大地震后喷发的记录^[10]. Walter 和 Amelung^[11]通过统计历史上火山喷发与大地震之间的关系, 发现大地震后的火山喷发多发生在地震造成的体膨胀区, 并提出了体膨胀触发火山喷发的可能机制. Walter 和 Amelung^[11]认为拉张应力可能对岩浆通道产生扩张作用并使包容在岩浆内的二氧化碳气体分异. 扩张的岩浆通道使得岩浆囊中的岩浆上涌更为通畅. 分异出的二氧化碳气体降低了岩浆的密度和黏度, 造成气体体积的膨胀, 从而导致岩浆上涌; 同时, 上涌的岩浆进一步导致周围不同成分的岩浆混溶. 不同成份岩浆的混溶促使更多的气体分异出来^[12], 使得体膨

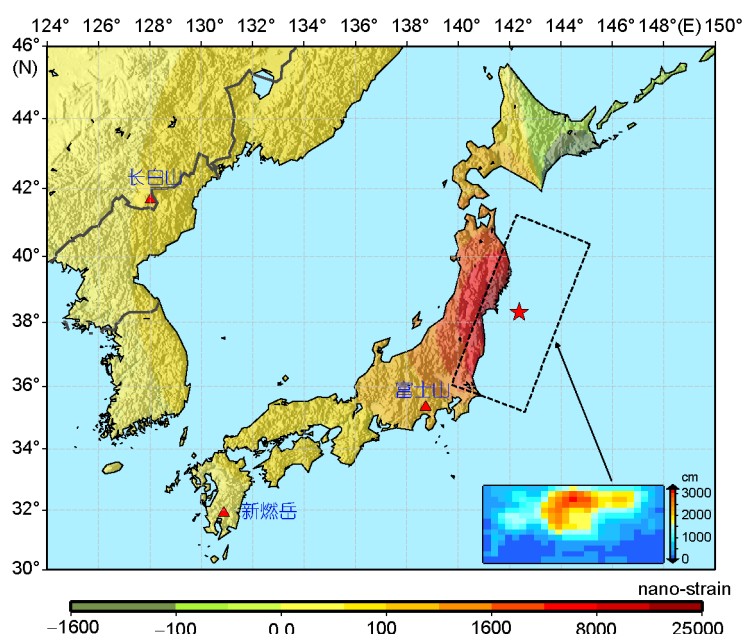


图 1 由 Wei 等人同震破裂模型计算的体膨胀

★表示震中位置; 右下角小图为断层破裂面上的同震位错分布

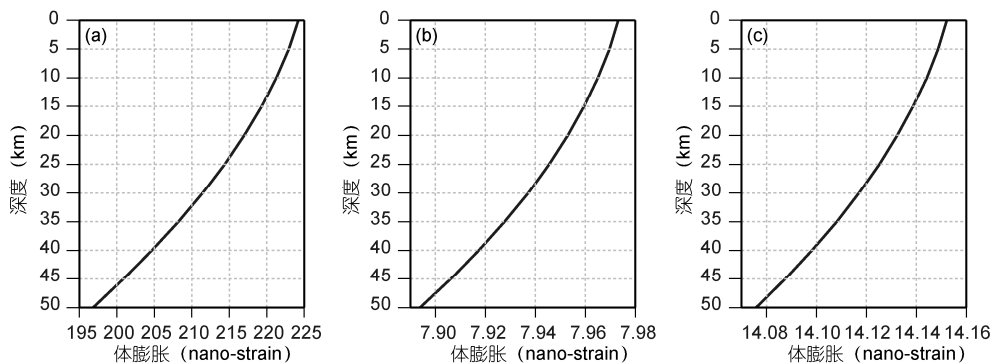


图 2 体膨胀随深度变化

(a) 富士山火山; (b) 新燃岳火山; (c) 长白山火山

胀增强^[13]. 这一系列的反应形成一个正反馈机制. 岩浆上涌的过程中分异出来的水会使上涌的岩浆黏度上升^[14], 进而阻碍岩浆的上涌, 这种情况常出现在酸性岩石中^[14]. 但挥发性气体与岩浆的相互作用超过岩浆的可承载压力, 就可能导致火山的喷发.

地震能否触发火山喷发还与火山区的围岩组成、震前火山活动状态以及地震距离火山的位置等因素有关^[10]. 在各种因素作用下岩浆囊内产生的压力升高有一个逐步发展过程, 因此地震的触发作用会使得火山可能在地震后的几天、几个月甚至几年后喷发. 如果震前火山处于活跃状态, 那么即使地震造成的体膨胀量很小, 也会有很大的触发作用, 造成火山的喷发. 新燃岳火山于 2011 年 1 月首次喷发, 至 3 月 11 日大地震前已喷发 6 次, 表明其处于活跃状态, 虽然地震在该地区产生的体膨胀较小, 仍然造成了其在地震后的两天发生大规模喷发.

自 2011 年 3 月 11 日日本发生大地震以来, 在富士山周边出现了“群发地震”现象, 总共观测到了近千次地震, 其中 3 月 15 日的 6.4 级地震的震源正位于富士山下. 根据我们的计算结果, 富士山地区的体膨胀较大. 由于地下 15~25 km 处可能存在的玄武岩^[3]不易在岩浆上涌的过程中分异出水, 所以体膨胀导致的岩浆上涌为主导态势, 火山的喷发危险性明显增高.

如前所述, 长白山火山是一座具

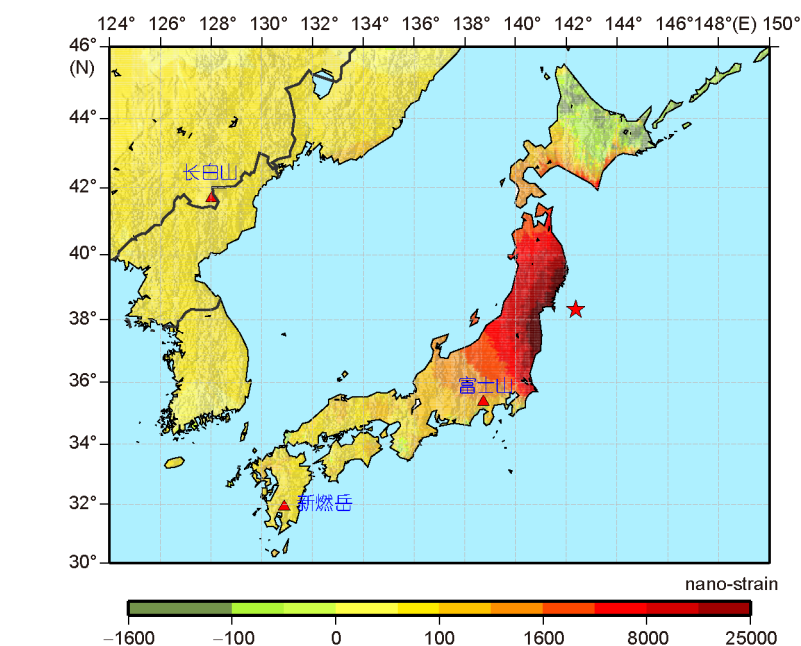


图 3 由 GPS 同震位移数据计算的面膨胀

★表示震中位置

有潜在喷发危险性的近代火山^[15-17]. 测深研究表明, 长白山天池火山区下部存在低速高导岩浆囊^[18], 可能正处于初始扰动状态向开始动荡状态的演化阶段. 崔笃信等人^[19]根据 GPS、水准和地倾斜监测资料的研究结果表明, 2002~2003 年长白山火山区的水平运动表现为以天池为中心呈放射性向外膨胀, 垂直运动表现为火山口快速隆起, 具有典型的岩浆囊膨胀、岩浆上涌特征. 虽然 2003~2005 年的 GPS 和

水准资料表明该地区变形速率有所减缓, 但深部仍在继续上升和膨胀, 火山区浅层岩浆仍有少量的活动^[20]. 已有研究表明该地区地壳内的岩浆囊主要成分是粗面岩和流纹岩^[6], 偏酸性, 宫城地震造成的体膨胀可能造成溶解在岩浆内水的分异, 使得岩浆黏滞性增加^[14], 由此驱动岩浆上涌的作用有限. 但其地幔内部的岩浆囊的主要组成是粗面玄武岩^[6], 为基性, 体膨胀可能造成二氧化碳气体的分异从而降低

岩浆的密度和黏度^[11], 加大其喷发的危险性. 值得一提的是, 地震的发生会对区域应力应变场产生影响, 这种影响一般会通过断层面的震后滑移、下地壳-上地幔的弛豫变形持续作用几年、几十年、甚至上百年. 已有的研究表明一些板块边界上由大地震震后持续不断的非震滑移所释放的能量甚至与主震相当^[21-23], 而且下地壳-上地幔的弛豫变形会影响更大的范围. 这势必会进一步增加长白山火山喷发的危险性. 因此, 密切关注长白山地区的火山活动, 加强火山区的应力应变监测, 继续深入开展地震对火山活动的影响研究是很有必要的.

参考文献

- 1 Yamamoto K, Ida Y. Three-dimensional P-wave velocity structure of Kirishima volcanoes using regional seismic events (in Japanese). *Bull Earth Res Inst Univ Tokyo*, 1994, 69: 267-289
- 2 Yamamoto K, Ida Y. Significant P wave attenuation for a specific frequency range beneath Kirishima Volcano. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 1275-1278
- 3 Nakamichi H, Watanabe H, Ohminato T. Three-dimensional velocity structures of Mount Fuji and the South Fossa Magna, central Japan. *J Geophys Res*, 2007, 112: B03310
- 4 陈国洪, 单新建, 沈正康. 基于 InSAR、GPS 形变场的长白山地区火山岩浆囊参数模拟研究. *地球物理学报*, 2008, 51: 1085-1092
- 5 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. *地球物理学报*, 2008, 51: 1108-1115
- 6 刘若新, 樊祺诚, 郑详身, 等. 长白山天池火山的岩浆演化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 226-231
- 7 王敏, 李强, 王凡, 等. 全球定位系统测定 2011 年日本 9 级大震的远场同震位移. *科学通报*, 2011, 56
- 8 Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull Seismol Soc Amer*, 1985, 75: 1136-1154
- 9 Shen Z-K, Jackson D D, Ge B X. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin for geodetic measurements. *J Geophys Res*, 1996, 101: 27957-27980
- 10 Hill D, Pollitz F, Newhall C. Earthquake-volcano interactions. *Physics Today*, 2002, 55: 41-47
- 11 Walter T R, Amelung F. Volcanic eruptions following $M \geq 9$ megathrust earthquakes: Implications for the Sumatra-Andaman volcanoes. *Geology*, 2007, 35: 539-542
- 12 Sparks R S J, Sigurdsson H, Wilson L. Magma mixing: A mechanism for triggering acid explosive eruptions. *Nature*, 1977, 267: 315-318
- 13 Eichelberger J. Vesiculation of mafic magma during replenishment of silicic magma reservoirs. *Nature*, 1980, 288: 446-450
- 14 Dixon J E, Stolper E M, Holloway J R. An experimental study of water and carbon dioxide solubilities in mid-ocean ridge basaltic liquids. Part I: Calibration and solubility models. *J Petrol*, 1995, 36: 1607-1631
- 15 刘嘉麒. 中国火山活动及其潜在的危险性. 见: 刘若新, 编. 火山作用与人类环境. 北京: 地震出版社, 1995. 182-190
- 16 刘若新, 魏海泉, 李继泰, 等. 长白山天池火山. 见: 刘若新, 编. 火山作用与人类环境. 北京: 地震出版社, 1995. 1-13
- 17 刘若新, 魏海泉, 李继泰. 长白山天池火山近代喷发. 北京: 科学出版社, 1998
- 18 张先康, 张成科, 赵金仁, 等. 长白山天池火山区岩浆系统深部结构的深地震测深研究. *地震学报*, 2002, 24: 135-143
- 19 崔笃信, 王庆良, 李克, 等. 长白山天池火山地壳形变演化及火山活动状态. *地球物理学报*, 2007, 50: 1731-1739
- 20 胡亚轩, 王庆良, 崔笃信, 等. 长白山天池火山区形变监测及火山活动状态分析. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27: 22-25
- 21 Heki K, Miyazaki S, Tsuji H. Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench. *Nature*, 1997, 386: 595-598
- 22 Takuya N, Satoshi M, Kenji T, et al. Distribution of seismic coupling on the subducting plate boundary, in northeastern Japan inferred from GPS observations. *Tectonophysics*, 2000, 323: 218-238
- 23 Ozawa S, Kaidzu M, Murakami M, et al. Coseismic and postseismic crustal deformation after the M_w 8 Tokachi-oki earthquake in Japan. *Earth Planet Space*, 2004, 56: 675-680