



武汉大学学报(信息科学版)
Geomatics and Information Science of Wuhan University
ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: InSAR 火山形变监测与参数反演研究进展
作者: 许文斌, 罗兴军, 朱建军, 王嘉庚, 谢磊
DOI: 10.13203/j.whugis20230090
收稿日期: 2023-03-08
网络首发日期: 2023-03-15
引用格式: 许文斌, 罗兴军, 朱建军, 王嘉庚, 谢磊. InSAR 火山形变监测与参数反演
研究进展[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230090>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20230090

引用格式：

许文斌，罗兴军，朱建军，等. InSAR火山形变监测与参数反演研究进展[J]. 武汉大学学报（信息科学版），2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230090 (XU Wenbin, LUO Xingjun, ZHU Jianjun, et al. Review of Volcano Deformation Monitoring and Modeling With InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j. whugis20230090)

InSAR 火山形变监测与参数反演研究进展

许文斌¹ 罗兴军¹ 朱建军¹ 王嘉庚¹ 谢 磊¹

1 中南大学地球科学与信息物理学院，湖南 长沙，410083

摘要：火山形变监测是星载合成孔径雷达干涉测量技术（Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR）应用最为广泛的研究领域之一。近年来，在InSAR数据开源获取，数据处理技术快速发展和多学科交叉融合的背景下，国内外火山形变监测与火山源参数反演相关研究进入了新的阶段。本文对基于InSAR技术的火山形变监测和参数反演研究进行阶段性的梳理和总结：首先，介绍InSAR的基本原理以及主流多时相InSAR技术，分析其在火山监测过程中的主要误差源；其次，总结常用的火山地表形变参数反演解析模型和数值模型；然后，结合国内外火山研究案例，分析InSAR和火山地球物理模型在岩浆转移、喷发、脱气与热液作用等火山构造动力学机制研究中的具体应用；最后，介绍我国火山形变监测的发展现状并探讨了InSAR火山形变监测的挑战和前沿方向。

关键词：InSAR；火山；形变监测；参数反演

Review of Volcano Deformation Monitoring and Modeling With InSAR

XU Wenbin¹ LUO Xingjun¹ ZHU Jianjun¹ WANG Jiageng¹ XIE Lei¹

1 School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: Volcano deformation monitoring is one of the most widely studied research topics by using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). In the new open and big SAR data era, the development of data processing methods, and interdisciplinary integration have pushed volcanic study into a new stage. This paper reviews the studies of volcano monitoring and parameter inversion based on InSAR. We start by introducing the principle of InSAR, advanced InSAR time series methods, and the main error sources; We then summarize the commonly used classical

收稿日期：2023-03-08

资助项目：中国地震局地质研究所国家野外科学观测研究站研究课题(NORSCBS20-04); 国家自然科学基金项目(42174023); 中南大学前沿交叉研究项目(2023QYJC006)。

第一作者：许文斌，博士，教授，主要研究方向为 InSAR 地表形变监测和建模。
wenbin.xu@csu.edu.cn

通讯作者：朱建军，博士，教授。zjj@mail.csu.edu.cn

analytical and numerical models in volcanic deformation modeling. We select several cases to introduce the specific InSAR applications in studying volcanic tectonic dynamic mechanisms including magma transfer, eruption, degassing and hydrothermal activity. Finally, we summarize the current status of volcanic deformation monitoring in China and the future advances of InSAR volcano geodesy.

Key Words: InSAR; volcano; deformation monitoring; parameter inversion

合成孔径雷达干涉测量技术（interferometric synthetic aperture radar, InSAR）包含合成孔径雷达技术（synthetic aperture radar, SAR）与干涉测量技术，前者是一种主动微波遥感技术，雷达卫星通过发射和接受微波信号来观测地物散射特性；后者通过多次对地表重复观测形成的相位变化获取地形和形变^[1]。SAR 卫星具有全天时、全天候对地观测的优势，可以弥补传统地面形变监测点分布的不足。Massonnet 等^[2]首次利用 ERS-1 数据识别出 1993 年意大利 Etna 火山喷发后的地表持续收缩信号，让人们认识到了 InSAR 技术在火山学研究中的潜力。

近几十年来，InSAR 技术快速发展，成为全球地壳形变监测的重要手段，尤其是高时空分辨率 InSAR 对地观测技术的发展促进了对火山各个阶段、不同类型活动的精细监测，在探究岩浆起源、火山系统结构和运动过程、地貌塑造作用等方面起到关键作用。采用 InSAR 技术研究火山系统的结构和时空变化，有利于促进对火山喷发机制的认识，进而提高对火山灾害的防灾减灾能力。

为了更系统地阐述 InSAR 技术在火山形变监测及参数反演领域的研究进展，本文梳理分析了目前该领域的研究现状和挑战。

1 InSAR 形变监测的原理与方法

1.1. InSAR 形变监测基本原理

InSAR 技术通过对同一区域两幅 SAR 影像的相位差测量获取区域地形或影像获取时间间隔内的地表形变^[3]，其重复轨道差分干涉测量（differential InSAR, DInSAR）模型可表示为：

$$\varphi_{\text{diff}} = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{defo}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{noise}}$$

式中， φ_{diff} 为差分相位观测值； φ_{flat} 为平地相位； φ_{topo} 为地形相位； φ_{defo} 为地表形变相位； φ_{atmo} 为大气延迟相位； φ_{noise} 为噪声相位；雷达视线向（line of sight, LOS）的地表形变几何关系如下图 1 所示，可通过去除观测相位中的平地、地形、大气延迟、噪声引起的相位得到。

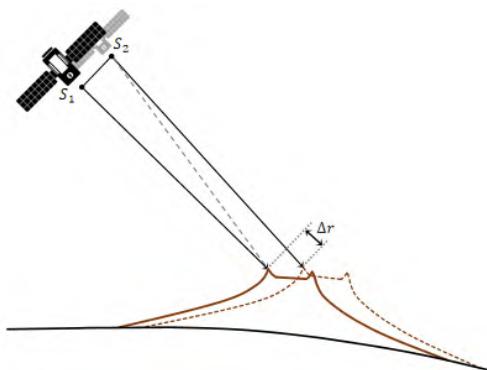


图 1 差分干涉测量几何关系示意图

Fig. 1 The Geometric Relationship of DInSAR.

DInSAR 技术在地表形变测量领域展示了极大优势，但是常受到失相干噪声、大气延迟、轨道误差等影响，在植被覆盖、地形陡峭等区域难以通过单幅干涉图得到可靠的地表形变结果。随着 SAR 影像的不断积累，通过对多时相 InSAR 技术（MT-InSAR）开展时间序列分析可实现毫米级的地表形变监测，现已成为开展火山形变监测的主流技术。

1.2 时序 InSAR 形变监测技术

1.2.1 永久散射体技术（persistent scatterers InSAR, PS-InSAR）

永久散射体技术是最早提出的多时相 InSAR 技术。在 PS-InSAR 技术中，通常使用振幅离差作为筛选指标，选取由永久散射体（persistent scatterers, PS）主导的像元候选点，并使用时间相干性进一步剔除不稳定像元；然后，将选出的 PS 点连接到参考点以形成三角网，利用三角网中的弧段对连接像素进行差分，并建立二阶差分相位模型。PS-InSAR 具有显著的抑制空间和时间失相干的能力，可以使用时空滤波将大气相位分离，并迭代消除噪声像素以提高精度。Hooper 等利用相位模型的空间相关性进行迭代选点，并提出了三维解缠算法，最后整合成为斯坦福 PS 方法（stanford method for persistent scatterers, StaMPS）^[4]。为了提高 PS 选取的准确性以及优化 PS 构网，Costantini 等^[5]提出使用迭代方法建立 PSP 网络，来提高永久散射体的识别率与参数求解的准确性；Kampes 等^[6]提出了一种多阶网络算法，该算法通过迭代计算保证像素连接数的冗余度；Liu 等^[7]提出了一种自由连接的网络（FCN）算法，在该网络中，如果两个 PS 之间的距离小于阈值，则以弧段连接。基于 FCN 网络的相位估值比 Delaunay 三角网精度更高，代价则是更长的计算时间。Werner 等^[8]引入了分块网络来解决这个问题，每个块中的点只与内部参考点相连，相邻块通过块之间的参考点相连。另外还有最小生成树网络以及基于截断处理的方法等用以改进 PS 构网。

1.2.2 小基线集技术（small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR）

小基线集技术利用短时空基线集配置下的干涉信息进行形变解算^[9]，一定程度上缓解了时空失相干现象，适用于大范围地壳形变监测；其在参数解算时一般采用最小二乘法^[10]，在方程秩亏时采用 SVD 方法进行解算^[9]。Sowter 等提出了 ISBAS 的改进选点方法，该方法对每个像素统计成功解缠的干涉图数量，高于阈值的像素被选为高相干点并构建参数方程，该方法使 SBAS-InSAR 方法选点的数量大大增加，更加适用于自然地表^[11]。也有学者将 PS-InSAR 与 SBAS-InSAR 进行融合以利用 PS-InSAR 技术在估计大气和轨道误差以及解缠方面的优势^[12]。时域相干点（temporarily coherent point, TCP）InSAR 技术选择相对较短的时空基线的干涉图来识别 TCP，通过构建 Delaunay 三角网连接候选点，去除长弧段（大于 500 m）以减少大气延迟并基于最小二乘残差的粗差探测器去除具有相位模糊的弧段^[12]。Mora 等提出的相干点目标分析（coherent point target analysis, CPTA）方法，首先从平均相干性中选择高相干点，并使用 Delaunay 三角网构网，然后通过在每个弧段上最大化相干系数来估计形变线性分量和残余 DEM 误差，去除线性形变和残余 DEM 误差之后计算非线性形变分量，并进行时空滤波。CPTA 无需地表形变的先验信息，在 SAR 影像数量较小时也能得到较为精确的地表形变估计^[10]。

1.2.3 分布式散射体技术（distributed scatterers InSAR, DS-InSAR）

单独的 DS 像素在分析时相干性较低，但是可以使用特定的算法识别具有相同散射机制的 DS 以降低非平稳信号成分，使 DS 具备较为稳定的散射特征，显著提高其相干性。要保持影像全分辨率计算，首要问题是识别时间序列 SAR 影像中哪些像素属于同一个“分布式散射体”，即具有同质性。Ferretti 等首先提出了使用 KS 检验来识别同质像素，但是 KS 检验的效率较低，在样本较少的情况下会选中较多的异质像素且对分布尾部差异不敏感^[13]。通过同质像素解算

精确的时间序列形变，传统的思路是构建更加稳健的干涉网络，例如小基线集、基于图论的生成网络等。小基线网络难以精确地对高相干干涉对进行选择，而基于特定条件的图论网络的优化目标实际上与 InSAR 的目标并不完全一致。因此，Ferretti 等提出使用极大似然估计从协方差矩阵中重构相位信息。该方法利用了 SAR 数据的所有干涉信息，并使用非线性优化算法求解参数，与优化基线构网的方式存在本质区别^[13]。后续有学者提出了改进的相位优化算法，目的同样是提高效率和解算精度，如协方差矩阵奇异值分解^[14]、M 估计量^[15]、相干矩阵特征值分解^[16]等，这类利用相位三角闭合原理的相位优化方法被统称为 Phase-Linking 方法。重构的 SAR 影像消除了多余观测，只需进行单主影像构网，并可联合 PS 技术进行解算。以 DS-InSAR 为代表的第二代 InSAR 时间序列技术为火山的精细监测和反演提供了有力支持。

1.3 InSAR 火山测量中的误差源

利用 InSAR 研究火山形变经常会受到多种误差源的影响，最直接的误差源来自火山活动或植被覆盖造成的失相干现象。PS-InSAR 利用散射特性在时序上稳定的散射体对地表形变进行监测，在一定程度上避免了失相干的影响^[17]。对于火山附近常见的火山灰或熔岩流覆盖区域、裸地及低矮植被区等 DS 目标，短基线干涉图之间的散射机制和侧视角度差异很小，可以使用 DS-InSAR 技术进行观测。

火山形变监测还受到严重的垂直分层大气和湍流大气影响，形变的监测精度依赖于对大气延迟相位的改正。Lee 等^[18]通过迭代使用带通滤波的方法改进 SBAS-InSAR 中的大气和轨道误差校正，改进后方法的监测精度达到 1 mm/a。Jung 等^[19]提出采用从 WRF 模型中获得的分层大气相位屏（APS）校正 PSI 中的大气相位，并在日本 Shinmoedake 火山验证了该方法的有效性。Remy 等^[20]基于 MERIS 和 MODIS 水汽产品评估了大气相位在 Laima 火山形变监测中的影响可以达到厘米级，并说明 GPS 对 InSAR 观测改正的有效性。Stephens 等^[21]对比了经验线性校正方法和 3 种全球天气模型在火山大气相位估计中的效果，并指出不同方法的局限性。

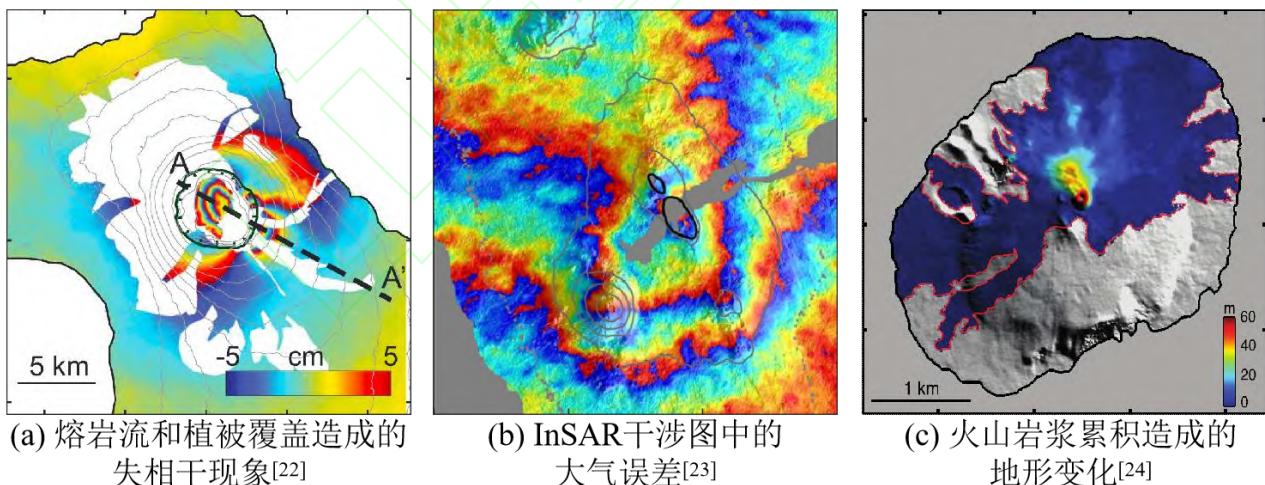


图 2 InSAR 测量火山形变的主要误差源

Fig. 2 Main Errors of InSAR Volcanic Deformation Monitoring

火山活动剧烈地改变着地形地貌，因此，地形误差也是火山监测时需要重点考虑的误差源，在时序处理中一般使用已有的数字高程模型（DEM）作为先验的地形信息，然后将 DEM 误差定义为与基线相关的常数项进行最小二乘反演。Fattah 等^[22]提出了一种在时域中进行 DEM 误差校正的方法，并通过模拟实验和加拉帕戈斯群岛 Fernandina 火山的实测数据进行验证。

2 火山形变地球物理参数模型

2.1 火山形变解析模型

地球物理参数反演是地球物理学中利用地表观测现象推断地球内部介质物理状态空间变化及物性结构的一个分支。通过对火山岩浆源的形态、物理状态、动态变化的准确描述，有助于了解岩浆过程，并在火山喷发前进行快速风险评估，为数据和建模方法的选择以及火山活动的预测提供重要指导^[23]。在火山形变反演中，常用的模型有 Mogi 模型^[24]、Yang 椭球模型^[25]、近垂直的 Okada 模型模拟岩脉（Dyke）以及水平的 Okada 模型^[26]和硬币形状（Penny-crack）模型^[27]模拟水平基台（Sill）等。多种模型对应的 InSAR 观测如图 3 所示：

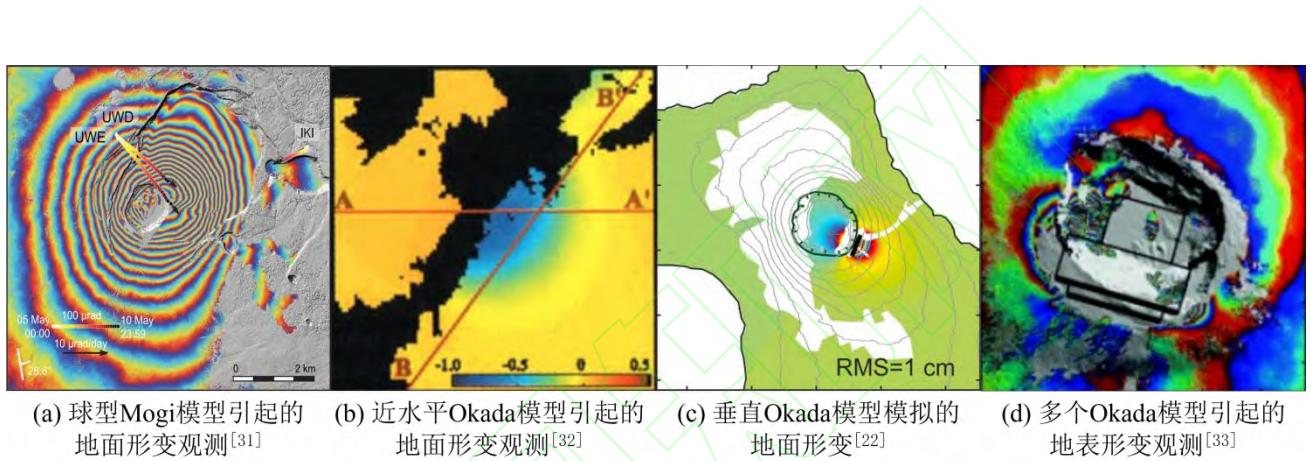


图 3 不同形变模式对应的 InSAR 观测结果

Fig. 3 InSAR observed volcanic deformation driving by different source mechanisms

Mogi 模型在物理上代表弹性半空间中均匀加压的球形模型，由于其参数简洁，能够高效地拟合地表观测，是目前应用最广泛的岩浆房模型^[24]。假设火山的岩浆房满足各向同性、岩浆不可压缩且火山源半径远小于其深度，该模型如图 4(a)所示。其中， d 为 Mogi 球心 $S(x, y, -d)$ 距离上方坐标系原点 O 的深度， $P(u, v, w)$ 为地表位置处的三维形变， R 为 Mogi 源半径， ΔP 为源内部的压力变化。Davis 等扩展了 Mogi 模型，建立了近似于长轴垂直的点源扁球形球腔，以解释非对称的地表形变，并于 1986 年将模型推广到任意方向的三轴椭圆体^[28-31]。

Yang 模型可以近似为多种火山形变源，如相对平坦的 Sill、Dyke 或管状管道的岩浆流。Yang 等给出了表面沿法线方向产生均匀应力的椭球模型的解析表达式，该表达式近似计算了嵌入弹性半空间中有限尺寸任意方向的椭球状岩浆房引起的地表位移^[25]，该模型如图 4(b)中所示。其中， d 为 Yang 椭球球心 $S(x, y, -d)$ 距离上方坐标系原点 O 的深度， a 为椭球的半长轴， c 为椭球的焦距， α 为椭球长轴的走向角， δ 为椭球长轴的倾向角， ΔP 为源内部的压力变化。

Okada 模型是弹性半空间中位错模型的解析表达式^[26]，其最早广泛应用于地震断层破裂研究中。由于拉张型断层与火山的 Dyke 和 Sill 的形成模式非常相似，因此在火山学中的 Okada 模型特指拉张型 Okada 位错模型，以研究火山岩浆的侵入路径和管道，该模型如图 4(c)所示。其中， d 为 Okada 模型起算点 $S(x, y, -d)$ 距离上方坐标系原点 O 的深度， W 为断层面宽度， L 为断层面长度， α 为断层走向角， δ 为断层倾向角， U_1, U_2, U_3 分别对应走向、倾向、垂向上的滑动量。由于 Okada 模型在火山中常为拉张，因此将其走向和倾向滑动量 U_1, U_2 均设为 0。当 δ

为 0° 时，代表水平的 Sill，当 δ 为 90° 时，代表垂直的 Dyke 模型。

Penny-crack 扁椭球体模型由 Fialko 等提出^[27]。该模型为一个弹性半空间中半径为 R ，深度为 H 的水平圆形面，其解值为竖直方向上的垂直位移以及指向圆面原点在地表投影点方向上的水平位移。通过求解垂直位移，可以得到由岩浆注入或退出而引起的体积变化。图 4(d)中 d 为 Penny-crack 模型圆心 $S(x, y, -d)$ 距离上方坐标系原点 O 的深度， R 为水平圆形面的半径， ΔP 为源内部的压力变化。

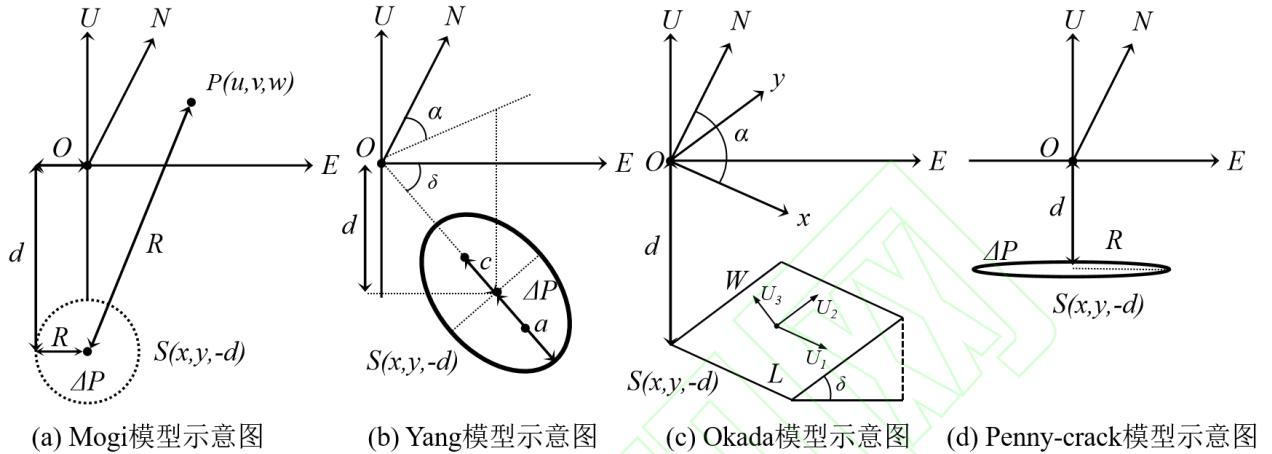


图 4 火山源模型平面示意图

Fig. 4 Schematic diagrams for volcanic source models.

2.2 基于结构计算的数值模型

基于几何形状的解析模型能够简单高效地拟合大地测量数据，在实践中被广泛使用，但是其本质是对岩浆房的高度抽象化以及对低时空分辨率大地测量数据的妥协。随着空间大地测量数据的时空分辨率不断提高，简单的几何解析模型很难精确拟合新的观测数据，并反演岩浆房的动态变化。另一方面，计算能力的提高也促进了数值模拟方法的快速发展，这些方法能够结合材料特性和结构异质性研究地下结构并可用于反演^[32]，因此被广泛引入到火山学的研究中。Ronchin 等为巴布亚新几内亚的 Rabaul 破火山口构建了有限元模型，使用从地形、地质和地震等手段推测的材料属性进行约束，最后通过预测形变和观测形变之间的差异确定了多个形变源^[33]。Charco 等开发了一个可用于反演的有限元模型程序，能够高效估计形变源位置和压力（体积）变化参数^[34]。Hickey 等采用了考虑材料异质性和地形的有限元模型反演了 Cotopaxi 等火山的源位置，并进一步考虑温度和粘弹性以拟合形变和地震数据^[35]。Wallace 等利用有限元法揭示了俄罗斯堪察加 Shiveluch 火山熔岩穹顶塌陷的材料特性和触发机制，证实了仅地面加速度就可能引发穹顶崩塌^[36]。

研究者还提出了考虑岩浆和地壳真实属性的模型，对火山系统的描述不再局限于岩浆房，对火山形变的探讨也涉及到多种作用机制和过程。Wang 等使用 Furuya 于 2004 年提出的热弹性模型研究了日本 Usu 火山的长期地表形变，并基于热弹性模型发现沉降由火山喷发时侵入的岩浆的热弹性收缩产生^[37]。Shreve 等利用边界元法对 InSAR 地表位移进行反演，得到了 2015–2017 年 Ambrym 沉降期间储层压力变化的边界，系统地探索了自由参数（如储层大小和导管半径）的影响，发现在一些火山由于脱气引起的收缩可能会减少甚至抵消岩浆流入引起的膨胀信号^[38]。

3 InSAR 火山形变监测与反演

3.1 InSAR 研究岩浆转移的形变

火山岩浆转移机制是引起火山形变最常见的因素，主要包括岩浆房的膨胀与收缩；岩浆沿 Dyke 或 Sill 侵入火山侧翼；沿熔岩湖相连火山管道的上升或下降等形式。D'Auria 等发现意大利那不勒斯 Campi Flegrei 火山口在休眠近 30 年后岩浆及热液系统重新侵入 Sill，并提出重复侵入 Sill 是该火山短期及长期演变的重要机制^[39]。由于 SAR 卫星时间分辨率的限制，监测的形变通常为多个源形变的复合。在 InSAR 干涉图中可能包含喷发阶段的岩浆房和岩浆运移通道的体积变化和岩浆作用诱发地震导致的地表形变等；对于存在热液系统的火山，还要考虑热液的运移和变化^[40]。Pritchard 利用 ALOS 影像观测到 2008 年智利 Chaiten 火山的流纹岩喷发，并发现该喷发事件由 Dyke、倾斜的 Sill 和火山管道共同参与作用^[41]。Xu 等使用 Sentinel-1 及 ALOS-2 数据研究 2015 年加拉帕戈斯群岛 Wolf 火山喷发事件，发现了 Wolf 火山两个形变源之间的连通性^[42-44]。Smittarello 等利用 Sentinel-1、COSMO-SkyMed 和 ALOS-2 数据分析了 2021 年 5 月 Nyiragongo 火山的无前兆喷发事件，并用 Dyke 模型解释岩浆入侵的三个过程^[45]。

因拉张或剪切位移形成的裂缝有助于岩浆侵入，如板块边界的裂谷带和火山口断层。构造因素形成的裂谷带使岩石圈破裂减薄，促使岩浆沿着裂谷带或断层侵入和传播，引起区域的应力变化并造成地震。Pallister 等使用 Dyke 模型研究 2009 年岩浆侵入阿拉伯 Harrat Lunayyir 区域引起的地表形变，并结合地震台站数据确定了 30,000 多次异常地震的成因为岩浆侵入而非构造因素^[46]。因板块分离与地幔柱上涌形成的冰岛区域，其火山喷发特征同样受裂谷系统影响。Sigmundsson 等通过分析 2010 年冰岛 Eyjafjallajökull 火山的异常喷发行为，使用 InSAR 数据确定该次喷发形变的三个阶段与裂谷系统及侵入复合体有关^[47]。2014 年岩浆沿裂谷侵入 Bárðarbunga 火山事件，Sigmundsson 等分析多幅同喷干涉图并以 Dyke 模型分段建模，结合地震波、GPS 数据，揭示了 Dyke 演化过程中的方向变化与区域应力、地震活动间的关系^[48]。Ruch 等利用 COSMO-SkyMed 影像观测到火山口东北侧形成的地堑，并用 Dyke 模型沿该裂隙方向进行建模^[49]。

岩浆因喷发或转移使岩浆房部分排空，导致火山口失去支撑而坍塌；火山口坍塌形成的环状断层滑动会引起另一类集中于火山口的地表形变。目前通过 InSAR 数据反演已获得多个典型的环形火山口断层结构模型，包括加拉帕戈斯群岛 Fernandina 火山^[22,50]，日本 Mijakejima 火山^[51]，苏格兰 Glen Coe 火山^[52]及冰岛 Bárðarbunga 火山^[48,49]。其中，Jónsson 等首次利用 1992–2005 年的 Envisat InSAR 数据发现加拉帕戈斯群岛 Sierra Negra 火山的活板门结构^[53]，Bell 等进一步结合 Sentinel-1、ALOS-2 数据及 GPS 等资料，解释了 2018 年加拉帕戈斯群岛 Sierra Negra 火山喷前及喷发中激活火山口内活板门断层的机制与过程^[54]。Bathke 等对土耳其 Tendürek 火山口环状断层进行建模，使用 SBAS 方法对 2003–2010 年的火山口平均形变速率进行监测，发现该火山的形变由 Sill 收缩与整个环状断层滑动共同造成^[55]。

热点移动、岩浆运移通道关闭等造成的岩浆供应量改变同样会造成火山的形变，甚至影响火山岛屿的形成。典型区域如地幔柱成因的夏威夷-帝王海山链、加拉帕戈斯群岛、冰岛等。Poland 等利用 Envisat 影像观测到夏威夷岛 Kilauea 火山在 2003–2007 年间岩浆供应量激增引起的地表形变^[56]。Xu 等通过 TerraSAR-X 发现了红海两座火山岛屿的形成过程^[57]。Amelung 等发现夏威夷岛 Mauna Loa 火山在 2002–2005 年间西南裂谷带的地面膨胀是由于 Dyke 沿此裂谷

带侵入造成^[58]。

3.2 时序 InSAR 研究时空火山形变演化

目前有多种时序 InSAR 算法及软件用于火山形变时序分析。Ofeigsson 等利用 StaMPS 方法获取冰岛 Hekla 火山在 1993–1999 年及 2003–2008 年两个时间段的形变速率场，并采用 Mogi 模型对该期间的形变源进行建模^[59]，解释了 Hekla 火山的膨胀及 2000 年喷发造成的收缩现象。Samsonov 等提出了 MSBAS 多维小基线集方法，并对东非裂谷维龙加火山省的 Nyamuragira 和 Nyiragongo 火山进行监测^[60]，并解释 2004 – 2010 年三次喷发的形变值。Fattah 等对 InSAR 时间序列的 DEM 误差校正进行了研究，并应用于加拉帕戈斯群岛的 Fernandina 火山^[22]，经过 DEM 校正的时序位移表现出更高的精度。Wang 等结合 StaMPS 和 SqueeSAR 方法，采用 Sentinel-1 和 ALOS-2 数据研究了日本 Asama 形变的可能机制^[61]。Fernández 等使用 Envisat、RADARSAT-2 及 Sentinel-1 数据对加纳利群岛的 La Palma 岛上的火山进行时序分析，通过对 2021 年的形变时间序列进行建模反演，发现此次喷发的浅层岩浆在喷发前 3–5 个月已开始积累^[62]。Polcari 等利用 ERS-1/2，Envisat 及 COSMO-SkyMed 数据获取了 1992–2021 年意大利 Campi Flegrei 火山口形变，并得到该区域的火山形变从收缩到低速膨胀再到高速膨胀的结论^[63]。Gregg 等使用 MintPy 计算了加拉帕戈斯群岛 Sierra Negra 火山 2015 – 2018 年的地表形变，使用 EnKF 模型评估期间的压力变化及岩浆储层周围的破坏条件^[64]。Hamling 等使用 Envisat 和 ALOS-1 数据对新西兰 Taupo 火山带 2004–2011 年间的形变位移序列进行研究，并联合 GPS 数据研究岩浆在弧后裂谷带的发展过程^[65]。

3.3 InSAR 大数据与人工智能火山形变监测

InSAR 大数据计算和机器学习在火山学的应用改变了传统的干涉图相位解缠以及火山形变信号识别方法。Anantrasirichai 等探讨了卷积神经网络在检测缠绕干涉图中的缓慢火山形变信号的局限性，在模拟数据中使用仅包含形变信号的检测阈值为 3.9 cm，考虑大气误差时为 6.3 cm，解缠后分别为 1.8 cm 和 5.2 cm^[66]。Zhao 等提出了包含注意力机制的卷积神经网络 DeforNet，可以有效降低大气延迟和地形噪声的影响^[67]。Beker 等提出了一种用于检测火山形变的卷积神经网络，使用了混合模拟-真实数据集用于微调模型，结果显示大部分微调方式的性能都有显著提高^[68]。Biggs 等处理了 Sentinel-1 卫星 2015–2020 年获取的超过 1000 座火山的约 600,000 张图像，探索了机器学习在形变信号检测方面的适用性和局限性，整个数据集的检测阈值约为 1.2cm/y^[69]。Bountos 等提出了使用视觉转换器从模拟的干涉图中学习火山形变信号，在无需手动标记任何样本的情况下准确率可达 97%^[70]。

面向全球火山活动监测，以海量 SAR 数据和云计算技术为数据和平台驱动，逐步完善 InSAR 数据处理中的诸多自动化关键技术；引入先进人工智能算法解决火山学中的诸多模式识别问题；建立整合多学科信息的全球火山观测系统，是目前火山大地测量学发展的重要方向之一。

4 中国火山 InSAR 形变监测研究现状与进展

在中国，近一万年内有喷发历史的火山（群）有十余座，其中长白山火山监测站是监测手段最全、测点密度最大的监测站^[71]。潘波等^[72]通过对长白山火山自 1999 以来的地震、形变和气体地球化学连续监测资料的综合分析，发现了 2002–2005 年岩浆扰动期间深部岩浆扰动的同步异常信号。胡亚轩等^[73]利用水准和 GPS 资料，通过 Mogi 源模型对火山区的压力源参数进行联合反演，得到岩浆房深度区间为 2–10 km。陈国浒等^[74]利用 JERS-1 以及 ASAR 数据进行

了长白山火山的监测,结果显示长白山火山在1995–1998年间的LOS向形变速率为2–4 mm/a。Meng等^[75]利用2016–2020年的Sentinel-1数据和SBAS方法获取了长白山火山的形变,形变结果表明局部的放射状断层对地表形变起到控制作用,且火山口内壁存在明显的滑坡形变。Trasatti等^[76]利用2018–2020年的ALOS-2数据监测表明长白山火山处于膨胀阶段,并且部分形变受到断层控制。长白山以外的火山主要表现为热液活动和长周期的岩浆活动,并且受到局部断层的控制。Ji等^[77]使用GPS和InSAR数据监测海南岛北部的琼北火山,发现该区域存在疑似拉张应力构造引起的地表形变。Ji等^[78]使用JERS-1数据监测了腾冲火山1995–1997年的地表形变,结果表明,胆寨—高田断裂带两侧的形变存在明显差异,可能与下方的岩浆房有关,而打鹰山地区的形变模式表明地下可能存在一条隐伏断层;该断层在1998–2000年有随时间的变化的局部垂直形变,表明火山岩区下方有岩浆活动^[79]。

总之,我国活跃的火山较少,InSAR需要结合火山地质学、火山物理学、火山地球化学、气候学、灾害学、环境学等多科学知识或多源火山监测技术,才能有效研究这些休眠火山扰动的动力学机制,评估火山的潜在喷发危险性及对区域环境的影响^[80]。

5 结语

随着SAR卫星数量的增多、数据质量的提高以及InSAR技术的日益成熟,基于InSAR的火山形变研究正在迅速发展。虽然InSAR技术为火山地球物理模型提供了高时空分辨率的数据输入,提高了研究者们监测和解释岩浆过程的能力,但在实际研究中依然存在来自数据共享、模型解算和国际合作等多方面的挑战,尤其在如何提高InSAR火山形变监测质量、火山复杂形变获取、火山模型多维参数解算以及人工智能在InSAR火山形变监测中的应用等方面仍然存在很多技术瓶颈和挑战值得进一步探索。

参考文献

- [1] Zhu Jianjun, Li Zhiwei, Hu Jun. Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1717–1733. (朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717–1733.)
- [2] Massonnet D, Briole P, Arnaud A. Deflation of Mount Etna Monitored by Spaceborne Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1995, 375(6532): 567–570.
- [3] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B7): 9183.
- [4] Hooper A, Zebker H, Segall P, et al. A new Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(23): 1–5.
- [5] Costantini M, Falco S, Malvarosa F, et al. A new Method for Identification and Analysis of Persistent Scatterers in Series of SAR Images[C]. *IGARSS*, 2008.

- [6] Kampes B M. Radar Interferometry Persistent Scatterer Technique[M]. Springer, 2006.
- [7] Liu G, Jia H, Zhang R, et al. Ultrashort-baseline Persistent Scatterer Radar Interferometry for Subsidence Detection[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, 1: 41–48.
- [8] Werner C, Wegmuller U, Strozzi T, et al. Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping[C]. *IGARSS*, 2003.
- [9] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375–2383.
- [10]Mora O, Mallorqui J J, Broquetas A. Linear and Nonlinear Terrain Deformation Maps from a Reduced set of Interferometric sar Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2243–2253.
- [11]Sowter A, Bateson L, Strange P, et al. DInSAR Estimation of land Motion Using Intermittent Coherence with Application to the South Derbyshire and Leicestershire Coalfields[J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(10): 979–987.
- [12]Zhang L, Ding X, Lu Z. Deformation rate Estimation on Changing Landscapes Using Temporarily Coherent Point InSAR[C]. *Fringe Conference Proceedings*, 2012.
- [13]Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3460–3470.
- [14]Fornaro G, Verde S, Reale D, Pauciullo A. CAESAR: An Approach Based on Covariance Matrix Decomposition to Improve multibaseline-multitemporal interferometric SAR processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 2050–2065.
- [15]Wang Y, Zhu X. Robust Estimators for Multipass SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 968–980.
- [16]Cao N, Lee H, Jung H C. A Phase-Decomposition-Based PSInSAR Processing Method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(2): 1074–1090.
- [17]Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8–20.
- [18]Lee C W, Lu Z, Jung H S. Simulation of Time-series Surface Deformation to Validate a Multi-interferogram InSAR processing technique[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(22): 7075–7087.

- [19]Jung J, Kim D J, Park S E. Correction of Atmospheric Phase Screen in time Series InSAR Using WRF Model for Monitoring Volcanic Activities[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2678–2689.
- [20]Remy D, Chen Y, Froger J L, et al. Revised Interpretation of Recent InSAR Signals Observed at Llaima volcano (Chile)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(10): 3870–3879.
- [21]Stephens K J, Wauthier C, Bussard R C, et al. Assessment of Mitigation Strategies for Tropospheric Phase Contributions to InSAR Time-series Datasets over two Nicaraguan Volcanoes[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(5).
- [22]Fattah H, Amelung F. DEM Error Correction in InSAR time series[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(7): 4249–4259.
- [23]Zhan Y, Le Mével H, Roman D C, et al. Modeling Deformation, Seismicity, and Thermal Anomalies Driven by Degassing During the 2005-2006 Pre-eruptive Unrest of Augustine Volcano, Alaska[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 585: 117524.
- [24]Mogi K. Relations Between the Eruptions of Various Volcanoes and the Deformation of the Ground Surfaces[J]. *WAUTHIER ET AL*, 1958, 64.
- [25]Yang X-M, Davis P M, Dieterich J H. Deformation from Inflation of a Dipping Finite Prolate Spheroid in an Elastic half-space as a Model for Volcanic Stressing[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1988, 93(B5): 4249–4257.
- [26]Okada Y. Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J]. *Bulletin of the seismological society of America*, 1985, 75(4): 1135–1154.
- [27]Fialko Y, Khazan Y, Simons M. Deformation due to a Pressurized Horizontal Circular Crack in an Elastic Half-space, with Applications to Volcano Geodesy[J]. *Geophysical Journal International*, 2001, 146(1): 181–190.
- [28]Kyle R. A, Ingrid A. J, Matthew R. P, et al. Magma Reservoir Failure and the Onset of Caldera Collapse at Kilauea Volcano in 2018[J]. *Science*, 2019, 336(6470).
- [29]Jónsson S, Zebker H, Cervelli P, et al. A Shallow-dipping dike fed the 1995 Flank Eruption at Fernandina Volcano, Galápagos, Observed by Satellite Radar Interferometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(8): 1077–1080.
- [30]Chadwick W W, Jónsson S, Geist D J, et al. The May 2005 Eruption of Fernandina Volcano, Galápagos: The first Circumferential dike Intrusion Observed by GPS and InSAR[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2011, 73(6): 679–697.
- [31]Davis P M. Surface Deformation due to Inflation of an Arbitrarily Oriented Triaxial Ellipsoidal

- Cavity in an Elastic Half-space, with Reference to Kilauea Volcano, Hawaii[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B7): 7429–7438.
- [32] Trasatti E, Giunchi C, Agostinetti N P. Numerical Inversion of Deformation Caused by Pressure Sources: Application to Mount Etna (Italy)[J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 172(2): 873–884.
- [33] Ronchin E, Masterlark T, Molist J M, et al. Solid Modeling Techniques to Build 3D Finite Element Models of Volcanic Systems: An Example from the Rabaul Caldera system, Papua New Guinea[J]. *Computers & Geosciences*, 2013, 52: 325–333.
- [34] Charco M, Galán del Sastre P. Efficient Inversion of Three-dimensional Finite Element Models of Volcano Deformation[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 196(3): 1441–1454.
- [35] Hurwitz S, Christiansen L B, Hsieh P A. Hydrothermal Fluid flow and Deformation in Large Calderas: Inferences from Numerical Simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B2): B02206.
- [36] Wallace C S, Schaefer L N, Villeneuve M C. Material Properties and Triggering Mechanisms of an Andesitic Lava Dome Collapse at Shiveluch Volcano, Kamchatka, Russia, Revealed Using the Finite Element Method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(5): 2711–2728.
- [37] Wang X, Aoki Y. Posteruptive Thermoelastic Deflation of Intruded Magma in Usu Volcano, Japan, 1992–2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(1): 335–357.
- [38] Shreve T, Grandin R, Boichu M. Reservoir Depressurization Driven by Passive gas Emissions at Ambrym Volcano[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 584: 1-36.
- [39] D'Auria L, Pepe S, Castaldo R, et al. Magma Injection Beneath the Urban area of Naples: a new Mechanism for the 2012–2013 Volcanic Unrest at Campi Flegrei Caldera[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-11.
- [40] Flóvenz Ó G, Wang R, Hersir G P, et al. Cyclical Geothermal Unrest as a Precursor to Iceland's 2021 Fagradalsfjall eruption[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15(5): 397–404.
- [41] Pritchard M E, Jay J A, Aron F, et al. Subsidence at Southern Andes Volcanoes Induced by the 2010 Maule, Chile Earthquake[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(8): 632–636.
- [42] Xu W, Jónsson S, Ruch J, Aoki Y. The 2015 Wolf Volcano (Galápagos) Eruption Studied Using Sentinel-1 and ALOS-2 data: The 2015 Wolf Eruption in the Galápagos[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(18): 9573–9580.
- [43] Xu W, Xie L, Aoki Y, Rivalta E, Jónsson S. Volcano-Wide Deformation After the 2017 Erta Ale Dike Intrusion, Ethiopia, Observed With Radar Interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(8): 1–11.

- [44] Xu W, Jónsson S. The 2007–8 Volcanic Eruption on Jebel at Tair Island (Red Sea) Observed by Satellite Radar and Optical Images[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2014, 76(2): 1–14.
- [45] Smittarello D, Smets B, Barrière J, et al. Precursor-free Eruption Triggered by Edifice Rupture at Nyiragongo Volcano[J]. *Nature*, 2022, 609(7925): 83–88.
- [46] Pallister J S, McCausland W A, Jónsson S, et al. Broad Accommodation of Rift-related Extension Recorded by dyke Intrusion in Saudi Arabia[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(10): 705–712.
- [47] Sigmundsson F, Hreinsdóttir S, Hooper A, et al. Intrusion Triggering of the 2010 Eyjafjallajökull Explosive Eruption[J]. *Nature*, 2010, 468(7322): 426–430.
- [48] Sigmundsson F, Hooper A, Hreinsdóttir S, et al. Segmented Lateral dyke Growth in a Rifting Event at Bárðarbunga Volcanic System, Iceland[J]. *Nature*, 2015, 517(7533): 191–195.
- [49] Ruch J, Wang T, Xu W, Hensch M, Jónsson S. Oblique rift Opening Revealed by Reoccurring Magma Injection in Central Iceland[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 1–7.
- [50] Jónsson S. Stress Interaction Between Magma Accumulation and Trapdoor Faulting on Sierra Negra volcano, Galápagos[J]. *Tectonophysics*, 2009, 471(1–2): 36–44.
- [51] Holohan E P, Schöpfer M P J, Walsh J J. Mechanical and Geometric Controls on the Structural Evolution of pit Crater and Caldera Subsidence[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(B7):B07202.
- [52] Holohan E P, Walter T R, Schöpfer M P J, et al. Origins of Oblique-slip Faulting During Caldera Subsidence[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(4): 1778–1794.
- [53] Moore I, Kokelaar P. Tectonically Controlled Piecemeal Caldera Collapse: A case Study of Glencoe Volcano, Scotland[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1998.
- [54] Bell A F, La Femina P C, Ruiz M, et al. Caldera Resurgence During the 2018 Eruption of Sierra Negra Volcano, Galápagos Islands[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1397.
- [55] Bathke H, Nikkhoo M, Holohan E P, et al. Insights into the 3D Architecture of an Active Caldera Ring-fault at Tendürek Volcano Through Modeling of Geodetic data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 422: 157–168.
- [56] Poland M P, Miklius A, Jeff Sutton A, et al. A Mantle-driven Surge in Magma Supply to Kīlauea Volcano During 2003–2007[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(4): 295–300.
- [57] Xu W, Ruch J, Jónsson S. Birth of two Volcanic Islands in the Southern Red Sea[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1–7.

- [58]Amelung F, Yun S-H, Walter T R, et al. Stress Control of Deep Rift Intrusion at Mauna Loa Volcano, Hawaii[J]. *Science*, 2007, 316(5827): 1026–1030.
- [59]Ofeigsson B G, Hooper A, Sigmundsson F, et al. Deep Magma Storage at Hekla Volcano, Iceland, Revealed by InSAR time Series Analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B5): 1-15.
- [60]Samsonov S, d'Oreye N. Multidimensional Time-series Analysis of Ground Deformation from Multiple InSAR data sets Applied to Virunga Volcanic Province[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(3): 1095–1108.
- [61]Wang X, Aoki Y, Chen J. Surface Deformation of Asama volcano, Japan, Detected by time Series InSAR Combining Persistent and Distributed Scatterers, 2014–2018[J]. *Earth, Planets and Space*, 2019, 71(1): 1-16.
- [62]Fernández J, Escayo J, Hu Z, et al. Detection of Volcanic Unrest Onset in La Palma, Canary Islands, evolution and implications[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-15.
- [63]Polcari M, Borgstrom S, Del Gaudio C, et al. Thirty Years of Volcano Geodesy from Space at Campi Flegrei Caldera (Italy)[J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 1-13.
- [64]Gregg P M, Zhan Y, Amelung F, et al. Forecasting Mechanical Failure and the 26 June 2018 Eruption of Sierra Negra Volcano, Galápagos, Ecuador[J]. *Science Advances*, 2022, 8(22): 1-9.
- [65]Hamling I J, Wright T J, Hreinsdóttir S, et al. A Snapshot of New Zealand's Dynamic Deformation Field from Envisat InSAR and GNSS Observations Between 2003 and 2011[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(2): 1-10.
- [66]Anantrasirichai N, Biggs J, Albino F, et al. The Application of Convolutional Neural Networks to Detect Slow, Sustained Deformation in InSAR time Series[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(21): 11850–11858.
- [67]Zhao Y, Feng G, Wang Y, et al. A new Algorithm for Intelligent Detection of Geohazards Incorporating Attention Mechanism[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 113: 1-13.
- [68]Beker T, Ansari H, Montazeri S, et al. Fine-tuning CNNS for Decreased Sensitivity to Non-volcanic Deformation Velocity Signals[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022, V-3–2022: 85–92.
- [69]Biggs J, Anantrasirichai N, Albino F, et al. Large-scale Demonstration of Machine Learning for the Detection of Volcanic Deformation in Sentinel-1 Satellite Imagery[J]. *Bulletin of Volcanology*, 2022, 84(12): 1-17.
- [70]Bountos N I, Michail D, Papoutsis I. Learning from Synthetic InSAR with Vision Transformers: The case of Volcanic Unrest Detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1–12.

- [71] Chen Qifu, Ai Yinshuang, Chen Yun. Overview of Deep Structures Under the Changbaishan Volcanic Area in Northeast China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(5): 778–795 (陈祺福, 艾印双, 陈赟. 长白山火山带深部结构探测的研究进展与展望[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(5):778-795)
- [72] Pan B, Liu G, Cheng T, et al. Development and Status of Active Volcano Monitoring in China[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2021, 510(1): 227–252.
- [73] Hu Yaxuan, Wang Qingliang, Cui Duxin, et al. Application of mogi Model at Changbaishan Tianchi Volcano[J]. *Seismology and Geology*, 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.)
- [74] Chen Guohu, Shan Xinjian, Moon W M, et al. A Modeling of the Magma Chamber Beneath the Changbai Mountains Volcanic Area Constrained by InSAR and GPS derived deformation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(4):1085-1092. (陈国浒, 单新建, Moon WOOL 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): 1085–1092.)
- [75] Meng Z, Shu C, Yang Y, et al. Time Series Surface Deformation of Changbaishan Volcano Based on Sentinel-1B SAR Data and Its Geological Significance[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1-22.
- [76] Trasatti E, Tolomei C, Wei L, et al. Upward Magma Migration Within the Multi-Level Plumbing System of the Changbaishan Volcano (China/North Korea) Revealed by the Modeling of 2018–2020 SAR Data[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9(December): 1–12.
- [77] Ji L, Xu J, Liu L, et al. A Review of Present-day Deformation of Active Volcanoes in China Between 1970 and 2013[J]. *Geological Society Special Publication*, 2021, 510(1): 215–226.
- [78] Ji Lingyun, Wang Qingliang, Cui Duxin, et al. Time Series of Deformation in Tengchong Volcanic area Extracted by SBAS-DInSAR[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(4): 149–159. (季灵运, 王庆良, 崔笃信, 等. 利用 SBAS-DInSAR 技术提取腾冲火山区形变时间序列[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(4): 149–159.)
- [79] Li Chunguang, Wang Qiongwei, Shao Desheng, et al. Deformation Characteristic of Tengchong Volcanic Area[J]. *Journal of Seismological Research*, 2000, 23(2):165-171. (李春光, 王琼伟, 邵德晟, 等. 腾冲火山区的形变特征[J]. 地震研究, 2000, 23(2): 165–171.)
- [80] Xu Jiandong. Review of China Active Volcano Monitoring and Research History[J]. *City and Disaster Reduction*, 2018, 5:54-59. (许建东. 中国活动火山监测与研究历史回顾[J]. 城市与减灾, 2018, 5: 54–59.)

网络首发:

标题: InSAR火山形变监测与参数反演研究进展

作者: 许文斌, 罗兴军, 朱建军, 王嘉庚, 谢磊

DOI: 10.13203/j.whugis20230090

收稿日期: 2023-03-08

引用格式:

许文斌, 罗兴军, 朱建军, 等. InSAR火山形变监测与参数反演研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230090 (XU Wenbin, LUO Xingjun, ZHU Jianjun, et al. Review of Volcano Deformation Monitoring and Modeling With InSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j. whugis20230090)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

InSAR林下地形测绘方法与研究进展

朱建军, 付海强, 汪长城

武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 2030-2038

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180266>