

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2022.04.002

引用格式:段政,张翔,陈荣,等. 火山监测研究进展及其对中国火山灾害监测预警工作的启示[J]. 华东地质, 2022, 43(4): 391-414. (DUAN Z, ZHANG X, CHEN R, et al. Advances on volcano monitoring and its implications for volcanic hazards monitoring and early warning in China[J]. East China Geology, 2022, 43(4): 391-414.)

火山监测研究进展及其对中国火山灾害监测 预警工作的启示

段 政, 张 翔, 陈 荣, 余明刚, 褚平利, 洪文涛, 曹明轩

(中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 中国及邻区分布着众多的全新世陆相活火山, 并留下了大量的喷发历史记录。对这些活火山开展监测和研究工作是预测火山喷发和火山灾害减灾防灾工作的重要途径。高度剥蚀的晚中生代火山区的大量地质填图, 以及在活火山区的地球物理、地球化学等近实时的探测工作, 极大地深化了我国东部中生代—新生代陆相火山岩的成分特征、岩浆演化规律及喷发方式等方面的认识, 是开展火山监测的理想研究对象。近年来, 火山灾害日益引起关注, 全球火山监测研究进展迅速。本文系统梳理了目前国内外主要的火山监测方法及取得的重要进展, 并分析了未来火山灾害减灾防灾工作的发展趋势及我国火山监测工作的发展方向, 旨在通过介绍国际火山监测工作, 为我国将来开展火山监测、预测与火山灾害相关的减灾防灾等方面的研究和国际合作提供借鉴。

关键词: 火山监测; 活火山; 研究进展; 火山灾害; 中国

中图分类号: P317; P588.14

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2022)04-391-24

火山喷发是地球内部物质和能量最直接的释放形式, 它既为地球生命的起源和演化提供了物质和能量基础, 也为现代人类文明的发展创造了重要的矿产资源和景观资源^[1]。另一方面, 火山作用是地球深部 CO₂ 等挥发份排放的主要方式, 对全球气候的演变有着重要影响^[2-5]。火山喷发, 特别是超级火山爆发也是地球上最剧烈、最极端的自然灾害之一, 在过去的两个世纪里共导致全球约 25 万人死亡^[6]。目前, 全球约有 8 亿人生活在活火山(1 万年来发生过喷发的火山)100 km 内的区域内^[7], 潜在的火山喷发灾害是影响这些地区(甚至全球)人们生命财产安全的最大威胁。特别是 2022 年 1 月汤加王国境内的洪阿哈阿帕伊岛(Hunga Tonga-Hunga Ha'apai)火山的“世纪大爆发”再次将火山的危险性置于公众视野^[8], 变幻莫测的火山活动也一时成为人们关注的焦点。因此,

开展活火山的监测预警工作, 在当今全球“双碳目标”和“减灾防灾”及“宜居地球”研究领域均具有重要的现实意义^[2-5]。

全球约 80% 的活火山分布在环太平洋地区, 此区域也被称为“环太平洋火环”, 尤其是在西太平洋的东南亚及我国南海地区, 分布着全世界约三分之一的活火山, 是全球最为活跃的一条“火链”(图 1)^[9]。同时, 该“火链”也是全球人口最为密集、数量最集中的地区, 其中可能的火山喷发不仅会直接造成周边人民生命财产的重大损失, 一次大规模的喷发, 特别是超级火山爆发可能对包括我国在内的全球气候、航空安全等产生重大影响。更为重要的是, “火链”内的火山监测工作严重不足(仅有 <10% 的活火山得到了近实时监测)^[10], 很多火山的喷发难以提前预警。例如, 2022 年 1 月的洪阿

* 收稿日期: 2022-09-23 修订日期: 2022-11-02 责任编辑: 袁静

基金项目: 国家自然科学基金“挥发份对流纹质火山喷发方式转变的制约: 基于雁荡山破火山的熔体包裹体研究(编号: 42202060)”、中国地质调查局“华东地区自然资源动态监测与风险评估(编号: DD20211390)”和“全国地质遗迹立典调查与评价(南京地质调查中心)(编号: DD20190603)”、雁荡山世界地质公园管委会“雁荡山世界地质公园火山岩国际对比研究(编号: NJZX-K-2020-28)”项目联合资助。

第一作者简介: 段政, 1987 年生, 男, 副研究员, 硕士, 主要从事火山地质研究工作。Email: dz19882010@163.com。

哈阿帕伊岛火山大爆发便是如此,其首次喷发的火山灰就上升至 20 km 高的平流层,而 1 月 15 日产生的喷发柱最高达到 58 km,进入了大气的中间层^[11],其高度甚至已经超过了人类历史上迄今有记录的最强烈火山喷发活动——公元 180 年的新西兰陶波(Taupo)火山超普林尼式喷发(火山喷发柱高约 50 km)^[12]。这次洪阿哈阿帕伊岛火山喷发还罕

见地诱发了海啸,由于没有提前预警,在汤加王国造成了人员伤亡和大规模破坏^[11]。由此可见,火山活动与人类的生存和发展密切相关,我们在利用火山活动带来的资源的同时,更应警惕火山活动的潜在威胁。因此,加强火山灾害的监测和预防工作已成为火山地质学研究乃至减灾防灾工作的一项重要内容。

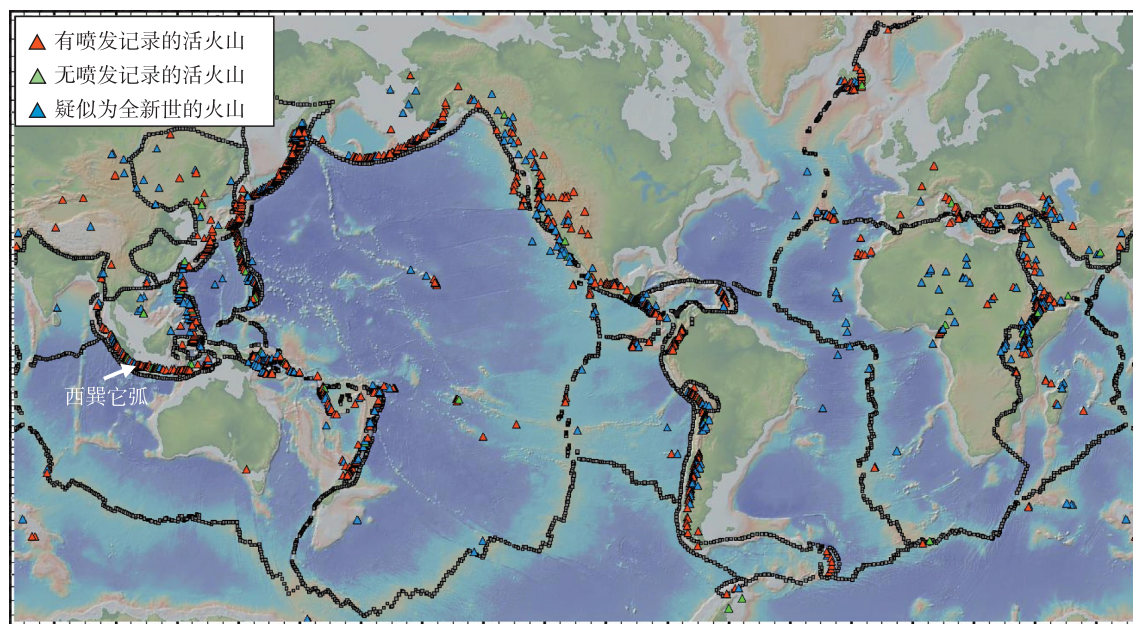


图 1 全球全新世活火山分布图^[9]

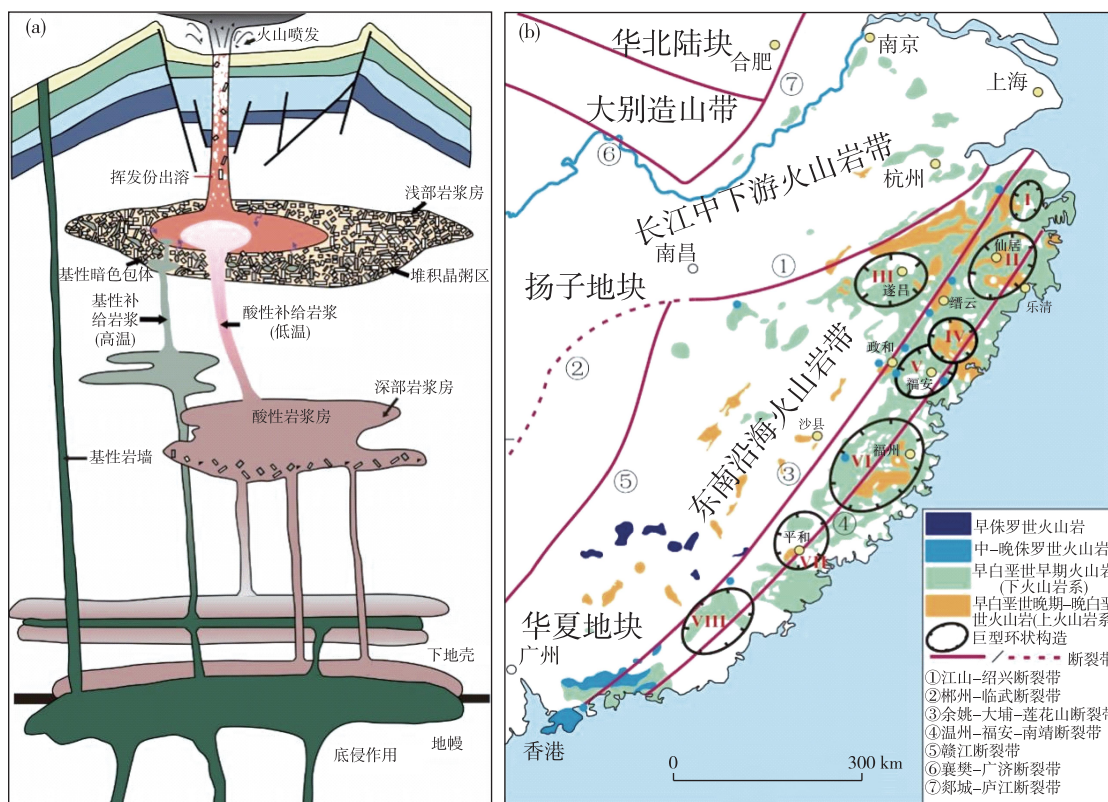
Fig. 1 Distribution map of global Holocene active volcanoes^[9]

1 火山喷发机制与监测技术的研究进展

火山喷发机制研究是揭示火山活动规律的重要途径。一般而言,火山喷发活动主要受到火山通道系统内的岩浆物理化学过程、岩浆储库的深度、岩浆房顶盖的强度、早期喷发通道裂隙发育程度等因素的控制^[13-14]。对于因剥蚀作用而暴露出地表的古老火山,可通过地质填图直接观察到其内部结构;对于活火山,地球物理方法则能够实时观测到火山活动过程中岩浆动力学变化过程^[15]。因此,古老火山机构的地质填图解剖和对活火山的深部探测,可以为火山喷发机制研究和监测预警工作提供更为全面的信息。

一般而言,火山喷发是岩浆在浮力驱动下,从地壳浅部的岩浆房(<12 km,大部分集中于 4~10 km)通过火山通道快速上升至地表的过程^[13-14]。这种浅部岩浆房多由来源于更深部岩浆储库的岩浆经多期次注入形成,其与上方的火山通道共同组

成了与喷发相关的火山系统^[16](图 2(a))。我国东南沿海以分布大面积的晚中生代流纹质火山岩为主要特征,这些流纹质火山岩常出露于破火山口及火山构造洼地等不同级别的火山机构中,如浙江芙蓉山、拔茅、小雄、雁荡山,江西相山,福建云山、大帽山等破火山口和浙江桐庐,安徽庐枞等火山构造洼地,这些火山构造又共同组成更高级的巨型环状构造(图 2(b))。同时,这些古老的火山经历了长期的风化剥蚀作用,火山内部结构已经暴露地表。经过长期的地质调查研究工作,已基本查明了这些火山机构的岩性-岩相-火山构造特征,厘清了火山喷发序列和内部结构组成^[17-24]。在此工作基础上,很多学者还进行了系统性的岩石成因及岩浆演化过程研究,取得了丰硕的成果^[19, 25-37]。这些调查和研究成果可作为探讨大型火山机构内部组成的重要基础资料,为进一步深入研究火山的喷发机制及其资源环境效应提供立体的研究窗口。



代表性巨型环形火山构造: I. 四明山; II. 括苍山; III. 遂昌; IV. 南雁荡山; V. 福安; VI. 戴云山; VII. 平和; VIII. 丰顺

图 2 火山喷发系统(浅部岩浆房-火山通道)模型(a)^[16]及东南沿海晚中生代火山岩及巨型环状构造分布图(b)^[23]

Fig. 2 Volcanic plumbing system (shallow magma chamber-volcanic channel) model (a)^[16] and distribution map of Late Mesozoic volcanic rocks and mega-circular structure in Southeast Coastal China(b)^[23]

通过对活火山的研究,人们注意到火山喷发前通常会发生多种前兆迹象,而火山监测就是通过探测和分析这些前兆信息,从而达到预测火山喷发的目的。一个完整的火山喷发周期一般可以划分为喷发间歇期、喷发前期、喷发期和喷发后期 4 个阶段^[38],每个阶段的火山气体组分、地震活动强度、变形程度和岩浆温度均不同。近 20 年来,依托大量先进的监测技术,人们针对火山喷发周期内的各种变化开展了深入研究,并取得了显著的进展。如,利用卫星监测火山 SO_2 气体的释放,利用全球定位系统(GPS)和干涉雷达(InSAR)监测地面形变等。此外,互联网技术的发展也使得监测数据能够实时传输至计算机上进行自动解译。这些新技术的应用大大提高了人们对火山喷发的预测能力^[39]。

目前,常用的火山监测技术主要有 3 类:地震、地面形变和气体地球化学监测。另外,次声波监测,重、磁和电磁监测,水位监测和近实时摄影监测

等方法也日渐成熟,并逐步投入了实际应用^[40-43]。

1.1 火山地震监测技术

研究表明,当岩浆向地表运移时,火山机构的应力分布会随之发生改变,同时发生的岩浆破裂和黏滑运动,会导致火山发生规律性的震动,形成火山地震^[44]。近百年来的地震资料表明,火山活动前或火山活动过程中均伴随着火山地震。因此,火山地震也被认为是预测火山活动的最理想的指示器,尤其对中短期的预测极为有效^[45]。实时的火山地震监测也是最常用的监测工具之一,尽管这种监测方法在偏远地区收集和传输数据比较困难,但由于设备便宜、安装简单,因而极利于推广。然而,这种低成本的地震仪(地震检波器)频段较窄(0.7~30 Hz),仅能够测量地震波的垂直分量。近年来,频率范围更广的数字宽频地震台网(0.2~50 Hz)发展迅速,其能够测量地震波形全部的 3 个分量^[45]。同时,地震波的无线电信号还可以通过网络

进行传输,从而实现实时监测。特别是随着低成本的小口径卫星接入互联网以及移动网络覆盖率的逐年增高,现在一些极偏远地区的观测站点也能实现地震波信息的实时传输。

值得一提的是,当火山地震背景值确定时,其地震活动的强度或地表形貌的变化可以作为火山活动的预测依据^[46-47]。该项技术的预测结果可靠性受控于布设在火山及周围的地震台数量,布设的监测仪器越多,预测结果就越准确。近些年爆发的菲律宾皮纳图博(Pinatubo)火山和印度尼西亚的默拉皮(Merapi)火山在喷发前均发生了地震异常波动^[45]。然而,对于一些经常发生小规模喷发的火山而言,由于火山喷发前的地震次数较少,规模也较小,其火山喷发前的地震异常难以被监测到,甚至一些前兆地震被当作了地震活动高背景值而被忽略掉,例如尼加拉瓜的特里卡(Telica)火山^[46]和印度尼西亚索普坦(Soputan)火山^[47]等的喷发即是如此。

另一方面,尽管近年来火山地震监测技术得到了蓬勃发展,但对其发生机制的认识仍明显不足,其中的难点主要集中在如何将火山地震监测结果与岩浆动力学过程进行耦合^[48]。研究表明,诱发火山产生异常地震活动的震源机制非常复杂,主要有两种模式:①主动型,岩浆补给导致岩浆房压力增大,驱使岩浆侵入于先存的或新形成的裂隙中,使得岩浆和围岩持续发生振动(图 2(a));②被动型,地壳发生脆性破裂,当应力调整时,会导致其中熔体分布情况发生改变,从而诱发地震^[49-50]。然而,目前普遍认为火山前兆地震是由岩浆挥发份、熔体和晶体之间的相互作用共同导致的^[48],一些火山地震预测模型也在火山喷发预测中得到了有效应用^[51-52]。

另外,除了实时的地震台网监测技术外,地震检波器阵列监测也常应用于对岩浆系统的地震层析成像研究^[53]。由于地震检波器阵列监测不是实时监测,因而并不适合火山爆发预警,但其却能够提供火山喷发前、火山喷发系统变化过程的直接观测信息,是研究火山喷发机制的重要依据。更重要的是,研究表明,一些微弱的重复性火山地震通常是由火山系统内部的流体迁移所导致的,这些微弱的重复性地震事件对火山喷发预警尤为重要^[53]。然而,这种震动信号在喷发间歇期只能被近距离布设在火山周围的设备所监测到。最近,

有学者以日本阿苏火山为例,利用远距离的地震台网监测资料,对火山内浅部岩浆通道和深部岩浆房内流体迁移所诱发的重复性地震事件进行了分析,认为其中超长周期的重复性地震事件与浅部岩浆通道内的流体迁移有关,而微弱的地震事件则可能与岩浆房顶部的流体迁移有关^[54],从而实现了对远距离重复性震动信号的解译。另外,喷发前火山内部的一些岩浆过程,如气泡聚合^[55]、气泡或气泡云的振荡^[56]以及火山通道的共振^[57],甚至喷发过程中的喷气过程^[58],都可能会导致火山产生谐波或非谐波的震动。因此,深入研究火山喷发前的岩浆动力学过程,是准确解译火山喷发前地震异常信号的关键。

1.2 地面形变监测技术

地面形变测量是另一种常用的火山监测技术。该技术主要利用地表相对高度和(或)水平距离的变化来揭示火山内部岩浆活动。地面变形监测技术有多种方法,包括电子距离测量(EDM)、水准测量和 GPS 测量,尤其是 GPS 测量可通过网络提供近乎实时的空间变化数据,从而可以揭示地表由于岩浆/热液侵入产生的细微变化。此外,与传统的 EDM、水准测量技术相比, GPS 测量还具有速度快、劳动强度低、不受天气影响等优势^[59]。特别是近年来,在 GPS 监测技术基础上,合成孔径雷达干涉测量(InSAR)在火山监测中的应用取得了重大进展^[60-66]。InSAR 监测是利用不同时段遥感图像之间的差异来反映地面的变形程度,这种监测技术对<1 cm 的移动非常敏感。同时,InSAR 雷达信号还可以穿透云层,因而极有利于热带多云层地区的火山监测工作。近年来,星载 InSAR 技术的应用,可以约每 12 天监测一次近赤道火山、约每 4 天监测一次高纬度火山的频率监测火山的地面形变,并有望在 10 年内实现对重要火山的每日重复监测^[52]。更重要的是,卫星遥感影像可提供更广阔的全球视角,能够对偏远、监测设备少或难以到达的地区开展火山监测。基于近年来的 InSAR 监测工作,很多之前被认为是休眠的火山竟也显示出活动迹象^[67],这给未来的火山监测工作(尤其是我国的休眠火山区)提出了新的挑战。

值得指出的是,很多地质过程(岩浆运移、滑坡、断层作用、热液活动及加热/冷却/熔融/结晶等过程导致的热力学体积变化)均能引起火山发生

地面形变,甚至一些特征的地面形变模式还可以与岩浆动力学过程进行较好地对应,如岩脉侵入、熔岩流/碎屑流冷却或岩浆房增压等岩浆动力学过程产生的地面形变,均能通过 InSAR 监测系统进行识别^[68]。不同的火山活动过程似乎还表现出不同特征的 InSAR 干涉图像,如火山锥体均匀膨胀形成的同心环状干涉图(图 3(a)),由岩脉侵入形成的特征

型双叶型干涉图(图 3(b)),火山碎屑流沉陷形成的不规则状干涉图(图 3(c)),以及由火山浅表滑坡形成的线性位移(图 3(d)),岩浆房冷却结晶导致锥体收缩(图 3(e)),破火山塌陷、同时火山中心隆起(图 3(f))和火山收缩沉降过程中受到岩浆的侧向补给(图 3(g))等,均能显示出特征性的 InSAR 干涉图像^[48]。

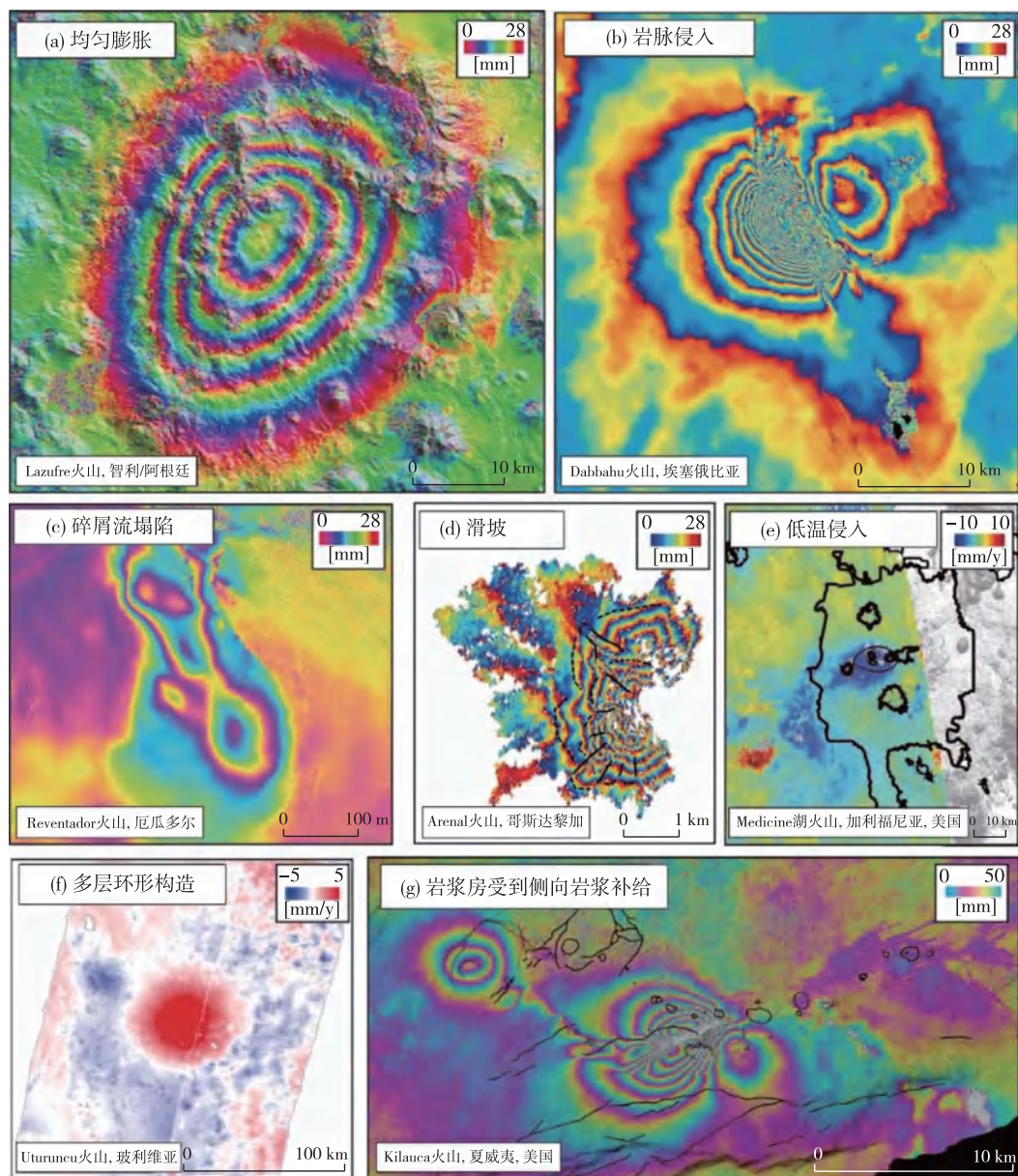


图 3 不同火山活动过程产生的 InSAR 干涉图像^[48]

Fig. 3 The InSAR interferograms of different volcanic process^[48]

另一方面,地面传感器形变监测系统是星载 InSAR 监测的有效补充,可用于验证或校正 InSAR 监测带来的误差。目前应用最为广泛的是连续全

球导航卫星系统(GNSS),其原理主要是基于 GPS 和其他导航卫星的信号来测量火山的三维变化,精度可达到亚毫米级^[68]。其他地面监测系统(如倾斜

仪、应变仪、地面雷达、水准测量和三角测量)也是有效的地面监测手段^[68]。但相对而言,这些监测技术还只应用到少量火山的监测上,且难以识别地面形变的影响范围。另外,基于地面传感器形变监测系统,可以对火山形变过程进行连续监测,这对于理解岩浆动力学过程具有重要意义。对大量不同喷发周期的火山监测结果表明,大尺度变形的火山一般持续时间都极短(<1 年),而长时间持续变形的火山(>10 年),其形变量一般都非常小(图 4(a))。

此外,火山内部的岩浆动力学过程对地面形变监测也有重要影响。在一般的经典火山喷发模型中,如果深部岩浆以固定的补给速率注入浅部岩浆房时,则火山表面会以恒定的速率发生膨胀并导致喷发^[50],且由于岩浆房排空,火山的膨胀速率又会迅速下降至岩浆补给前状态;而当补给到浅部岩浆房的岩浆通量逐渐减少时,火山的膨胀速率会随着补给速率的降低而减缓^[48];当岩浆快速上升导致火山突然喷发时,这种膨胀过程也随之迅速发生,喷发后膨胀速率又会迅速恢复到岩浆快速上升前的状态;当补给岩浆脉冲式注入浅部岩浆房时,随着补给岩浆的累积而触发火山喷发,火山的膨胀速率亦随着补给岩浆的脉冲式注入而呈阶梯式上升,并在火山喷发后迅速下降;长期活跃但不喷发的破火山,当浅部岩浆房受到岩浆或热液的混合时,会发生脉冲式膨胀;当深部岩体以恒定的速率生长或冷却时,则会导致火山表面以恒定的速率膨胀或收缩^[48](图 4(b))。有研究者基于 InSAR 技术对不同岩浆动力学过程中的地面形变特征进行了深入研究,发现墨西哥中部的跨墨西哥火山带(Trans-Mexican Volcanic Belt)和西巽他弧(The West Sunda Volcanic Arc)两个地区的火山在喷发前表现出显著不同的形变特征^[69]。跨墨西哥火山带中的火山喷发时并不发生形变,而西巽他弧的火山却普遍发生膨胀或收缩。一般而言,地表形变的强弱是火山活跃程度的反映,这也与西巽他弧火山喷发次数远大于跨墨西哥火山带相耦合。跨墨西哥火山带和西巽他弧具有相似的俯冲速率、俯冲角度及地壳厚度^[70],然而二者却呈现出显著不同的活跃度,这种现象以往一直未能得到较好的解释。CHAUSSARD E 等^[62]注意到西巽他弧的火山存在 3 种形变情形,即火山喷发前发生膨胀并喷发、火山发生膨胀但不喷发、火山喷发但不发生膨胀,并认为这种差异是由火山喷发体系(开放或封闭)所控

制的。研究表明,开放体系的火山喷发系统以频繁去气为特征,而封闭体系以不喷气但熔岩穹持续隆起为标志^[71]。ALBINO F 等^[72]认为火山机构尺度的膨胀仅能发生于封闭体系之中,在该体系下,岩浆房(岩浆补给或挥发份出溶)(图 2(a))的增压过程会导致火山喷发前数月内发生持续隆起。相对而言,在开放体系中的岩浆则会沿火山通道喷出地表,岩浆房的增压过程难以持续,因而不会发生长时间的膨胀。因此,对于长期活跃的西巽他弧火山而言,当没有岩浆或出溶的挥发份向浅部岩浆房补给时,火山就会处于休眠状态,火山机构不发生形变(图 5(a)-a)。当岩浆或出溶的挥发份补给进入浅部岩浆房时,则会导致火山机构发生膨胀(图 5(a)-b),当压力超过岩浆房围岩的形变强度时,岩浆和挥发份就会沿着火山通道喷出地表(图 5(a)-①),导致岩浆房的压力降低,使得火山机构缓慢收缩(图 5(a)-c),并进入休眠期;当下一次岩浆补给作用发生时,又会重复上述活动过程。不过,如果岩浆房增加的压力始终低于围岩形变强度时,则不会诱发火山喷发(图 5(a)-②)。如果岩浆停止补给,甚至还会导致浅部岩浆房冷却,使火山发生收缩(图 5(a)-c')。另一方面,对于开放体系而言(如跨墨西哥火山带),当无岩浆补给时,火山始终处于休眠状态(图 5(b)-a);当浅部岩浆房受到深部岩浆补给时,火山即进入活跃期,并发生喷气或熔岩穹生长等现象。在此情况下,岩浆房不需要经历增压过程就能使岩浆上升到地表^[72],因而火山喷发前并不发生膨胀(图 5(b))。GOTTSMANN J S 等^[73]的研究进一步表明,这样的状态可能会使火山长期处于近喷发的临界状态,岩浆房中一次小型岩浆补给、火山通道内岩浆超压的累积,甚至顶部熔岩穹的垮塌,都有可能导导致火山喷发。

以上研究结果表明,封闭体系的火山系统可能会发生周期性的喷发,且在喷发前可能会发生火山机构尺度的整体隆升,这种系统性的地表形变就可以通过 InSAR 来进行监测。然而,对于喷发前未发生明显膨胀的火山,其情况就比较复杂,因为开放体系或无浅部岩浆房的封闭系统火山都有可能产生这样的情况。南美洲很多火山在喷发前均未发生膨胀作用,如智利的伊瑞普坦丘(Irruputuncu)、拉斯卡尔(Lascar)、内瓦多·德·鲁伊斯(Nevado del Chillan)、科帕韦(Copahue)、亚依玛(Llaima)、维利亚里卡(Villarrica)及柴滕(Chaiten)^[74-75],阿根廷的阿拉卡斯(Aracas)和奥霍

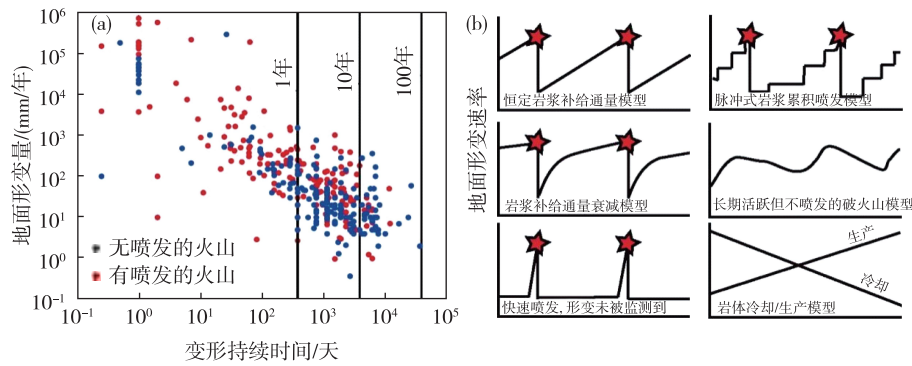


图 4 全球典型活火山地面形变与喷发持续时间关系图(a)(地面形变量指地面形变最大位移)及火山地面形变与时间关系图(b)(星形代表火山喷发)^[48]

Fig. 4 Diagram of the ground deformation vs. eruption duration of global typical active volcanoes(a) (ground deformation values refer to maximum displacement of ground deformation) and diagrams of volcanic ground deformation vs. time (b) (the stars represent volcanic eruption) ^[48]

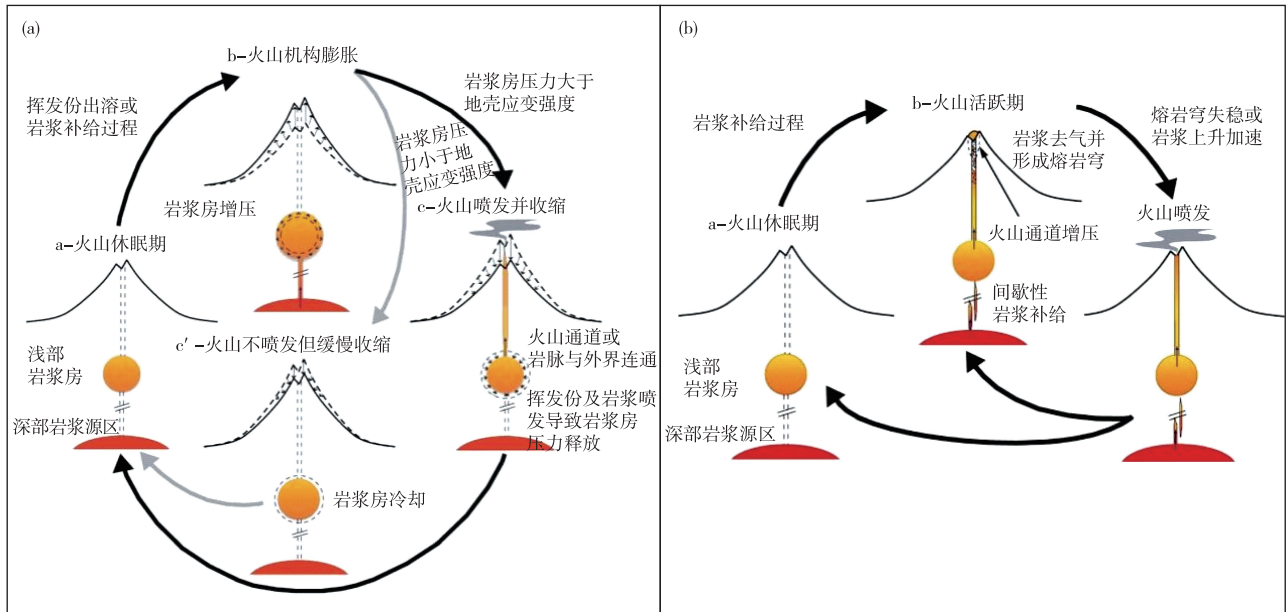


图 5 封闭体系(a)与开放体系(b)下的火山喷发循环模型^[62]

Fig. 5 Volcanic eruption cycle model under closed system (a) and open system (b) ^[62]

斯德尔萨拉多(Ojos del Salado),秘鲁的萨班卡亚(Sabancaya)和乌比纳斯(Ubinas)^[74]等火山均是如此,表明这些火山可能属于开放体系。因此,确认火山喷发系统的状态是理解火山喷发及形变特征,进而开展科学监测的重要前提。

1.3 火山气体和温度监测技术

火山气体是火山活动的重要产物,也是喷发启动时释放最为显著、最易被监测到的对象。在岩浆上升过程的各个阶段,火山气体含量和成分均会发

生明显的变化,故而对预测火山喷发具有重要作用,被形象地称为“来自地球深部的电报”^[69]。同时,火山气体组分与含量主要受岩浆中的挥发份成分与去气过程的控制,因而对岩浆动力学和岩浆挥发份的去气过程也有重要的指示意义,而后者更是控制火山喷发和喷发方式的关键因素^[76-80]。因此,火山气体的监测对于理解火山喷发机制、预测火山喷发均具有重要意义。早期的火山气体监测工作是通过人工用真空瓶从喷气孔中抽取气体,然后进行实验室分析,这样的气体收集工作危险性较大,

而现在可通过安全性较高的机载紫外、红外光谱仪和化学传感器获得实时数据^[81]。火山气体作为火山监测的关键指标,在火山喷发预测中多次得到成功应用,这些火山气体主要包括酸性气体(如 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 、 HCl 、 HF)、水、稀有气体和少量挥发性的微量金属元素^[82],而其中的 CO_2 和 SO_2 又是主要的监测对象(表 1)。由于 CO_2 在浅部岩浆中的溶解度很低,易大量喷出地表,当深部岩浆注入到浅部岩浆房或岩浆去气作用增强时,常导致 CO_2 排放量/浓度的显著升高。在火山喷发前,往往会出现

CO_2 排放量/浓度的大幅升高现象, CO_2 因此成为最有价值的火山喷发指示性气体^[83]。例如,2009 年 5 月 15 日喷发的阿拉斯加的雷多堡(Redoubt)火山,其在喷发前的平静期, CO_2 通量长期稳定在 1 000 t/d 左右,但在喷发前的一个月, CO_2 通量突然上升到 3 000~9 000 t/d^[84]。同样,意大利的埃特纳(Etna)火山分别在 1999 年^[85]、2002—2003 年^[86]、2010 年^[86] 3 次喷发以及印度尼西亚的默拉皮火山^[87]在 2010 年的喷发之前,均直接监测到了 CO_2 排放量突然升高的信号。

表 1 典型火山气体监测到的气体组分

Table 1 Volcanic gas compositions used in gas monitoring of the typical volcanoes

火山	国家	监测的火山气体	参考文献
玛萨亚(Masaya)	尼加拉瓜	$\text{SO}_2/\text{HCl}, \text{SO}_2$	[88]
圣海伦斯(St. Helens)	美国	$\text{HCl}, \delta\text{D}-\text{H}_2\text{O}, \delta^{18}\text{O}-\text{H}_2\text{O}$	[89]
埃特纳(Etna)	意大利	CO_2, SO_2	[85]
雷德堡(Redoubt)	美国	$\text{CO}_2, \text{SO}_2, \text{H}_2\text{S}, \text{CO}_2/\text{SO}_2$	[84]
斯通博利(Stromboli)	意大利	$\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{He}$	[90]
别济米安纳(Bezymianny)	俄罗斯	$\text{SO}_2, \text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2, \text{CO}_2/\text{S}, \text{S}/\text{HCl}$	[91]
科利马(Colima)	墨西哥	$\text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2/\text{SO}_2$	[92]
伊豆大岛(Izu-Oshima)	日本	SO_2	[93]
大屯火山群	中国	$\text{CO}_2, \text{O}_2, \text{H}_2$	[94]
长白山	中国	$\text{CO}_2, \text{He}, \text{H}_2, \text{O}_2, \text{CH}_4$	[95]
腾冲	中国	$\text{Hg}, \text{CO}_2, \text{CH}_4$	[96]

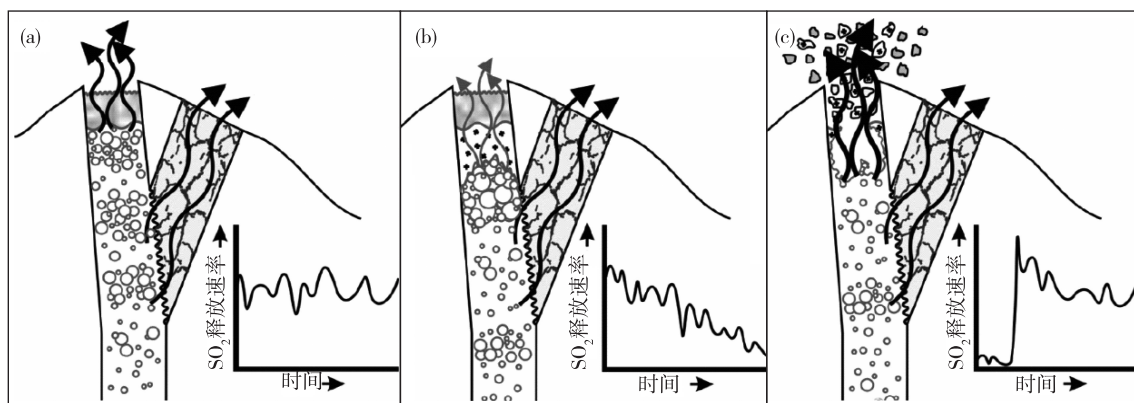
另一方面,火山喷发释放出的 SO_2 进入大气平流层后,会形成硫酸盐的气溶胶,能够长时间影响全球气候达数十年之久,特别是酸性超级火山的爆发,这种影响尤为显著^[97]。例如,7.5 万年前的印尼多巴(Toba)超级火山喷发,导致全球平均气温在数十年内下降了 3~15 $^{\circ}\text{C}$;1815 年,印度尼西亚的坦博拉(Tambora)火山喷发,使得第二年(1816 年)成为“无夏之年”^[98]。更重要是, SO_2 还能与 O_3 结合,破坏大气圈中的臭氧层,如 1991 年菲律宾皮纳图博火山喷发,导致中纬度地区臭氧层减少了约 5%,且火山喷发可能还是导致生物灭绝事件的重要因素^[99]。实际上,虽然很多火山喷发的监测结果表明火山喷发时常伴随着 SO_2 释放的显著变化,但 SO_2 释放量的监测却长期是火山监测工作的难点。20 世纪 70 年代以来,主要利用紫外光谱仪(UV)对火山 SO_2 释放量进行地面监测,但因时间分辨率较低而难以与连续的地球物理监测数据进行结合,仅能

进行长时间尺度的 SO_2 释放监测^[100]。后来,随着紫外线相机的应用,使得 SO_2 图像实时监测成为可能^[101],这极大地促进了对火山去气的连续监测研究。特别是近年来星载传感器(如高光谱)有效应用于 SO_2 排放的监测工作中,可将气体监测与火山地震和地面形变等地球物理监测技术进行联用^[102],从而使得火山监测信息更为全面。目前,美国星载臭氧层监测仪(OMI)、大气红外探测仪(AIRS)以及我国的高光谱观测卫星大气微量气体差分吸收光谱仪(EMI)是进行火山喷发监测和火山气体排放监测的主要卫星系统,前两者的数据可通过 NASA 网站免费获取。

值得一提的是,挥发份出溶作为火山喷发的重要驱动力之一,了解气体释放速率与其他地球物理特征的变化关系,对深入理解火山喷发过程至关重要。长期的 SO_2 监测结果表明, SO_2 的释放速率似乎与地震活动密切相关^[103],于是可以利用高分辨

率的 SO_2 释放速率与地震强度变化关系来建立 SO_2 释放通量与火山活动关系的喷发动力学模型。研究表明,岩浆中气泡浓度越高或气泡上升速度越快,产生的震动可能就越强,因而岩浆挥发份浓度越高、上升速率越快,其产生的震动信号振幅就越大,通过火山通道释放的气体速率也就更高^[104]。NADEAU P A 等^[102]通过联用地震仪、目视监测和紫外摄像机对危地马拉富埃戈(Fuego)火山在 2009 年 1 月喷发时的喷气与地震震动之间的关系进行研究,发现在该座火山的喷发过程中, SO_2 从火山的

两个喷口中喷出(图 6(a)),且地震二次平均振幅与 SO_2 的释放速率存在显著的相关性。同时,这座火山无溢流作用,可能表明其岩浆的补给量较低,导致火山通道中的岩浆更易冷却和固结,甚至堵塞火山喷发通道(图 6(b)),从而更进一步阻碍岩浆中挥发份的上升,使得挥发份在被堵塞的火山通道下方进一步聚集,当其中的岩浆超压超过围岩的应变强度时,就会导致火山再次发生爆发,而 SO_2 气体排放会再次升高,然后逐步下降到挥发份自由去气的水平(图 6(c))。



(a).两个喷发口都能自由去气;(b).火山通道上部固结抑制了顶部气体的释放,但侧面喷气不受影响;(c).固结岩浆下的压力超出围压,导致富火山灰式爆发,积聚气体突然释放,然后恢复到自由喷气状态

图 6 富埃戈火山爆发过程中火山气体释放速率示意图^[102]

Fig. 6 Schematic diagrams of the volcanic gas releasing rate during the eruption of Fuego volcano^[102]

有意思的是,不同构造背景下的火山喷出的气体组分与温度似乎也存在明显差异,俯冲带的火山气体温度一般 $<1\ 000\ ^\circ\text{C}$,但裂谷和洋岛背景下的火山气体温度一般 $>1\ 000\ ^\circ\text{C}$ (表 2)。SYMONDS R B 等^[105]注意到俯冲带的火山气体一般比裂谷带和洋岛的 H 含量偏高,含有更多的 HCl,而 C 和 S 偏低。因此,俯冲带火山气体 SO_2/HCl 值一般低于裂谷带。另外,也有研究认为碱性岩浆通常具有较高的 CO_2 含量,而富含 Mg 和 Fe 的岩浆则 H_2O 含量较高^[106,113]。然而,目前仍未明确建立火山气体组分与岩浆类型之间的关系。

另一方面,温度监测也是一种较为常用的监测方法,其主要是通过使用极高分辨率辐射计等传感器来探测火山的生热区^[114]。然而,由于热源(火山的喷口或新的熔岩流)太小,卫星热传感器无法定量分析,只能通过手持或机载的红外传感器进行地面或低空监测。

1.4 次声波监测技术

次声波监测是近年来发展起来的火山监测技术。该技术主要是通过监测火山排气过程(爆炸、爆发、喷射、喷发震动)与大气耦合产生的 20 Hz 以下且与 p 波相似的声波来进行监测。这种监测方式不仅可以预测火山喷发时间,还可以预测火山喷发的类型和烈度^[115]。

1.5 重、磁和电磁监测技术

火山喷发前,当岩浆上升至浅部时会造成磁场的显著变化,地面形变也会导致重力发生细微变化,其与磁异常相结合已被有效地用于火山监测,被称为微重力监测组合技术。西西里岛埃特纳玄武质火山喷发前就发生过显著的磁异常,这种异常主要是由于浅部岩浆房受到了补给岩浆的注入^[116]。微重力监测可以对火山进行实时的连续监测,并能探测到其他技术无法获取的火山机

构内部的变化信息。这种技术已有效地应用于对美国加州长谷(Long Valley)火山口下岩浆侵入活动^[117],以及对埃特纳火山岩浆岩脉侵入活动^[118]等研究上。另外,一些电磁方法,如瞬变电磁、自然电位和大地电磁,也可能揭示火山喷发前热液系统的变化过程。有意义的是,伴随着火山气体和火山灰的爆发会产生大量的电荷,从而导致闪

电现象,放电过程会产生非常低频的无线电波,利用低成本的无线电频率传感器网络,可实现远程无线电波探测。2010年以来,全球闪电定位网(WWLLN; wwlln.net)实施的火山灰云监测项目已经通过该技术监测到多个火山喷发产生的火山灰云,尤其是在雷暴罕见的高纬度地区产生的火山爆发。

表 2 不同构造背景下火山喷发的气体组分

Table 1 Volcanic gas compositions from various tectonic environments

火山	国家	构造背景	温度/℃	H ₂ O/ mol	H ₂ / mol	CO ₂ / mol	CO/ mol	SO ₂ / mol	H ₂ S/ mol	HCl/ mol	HF/ mol	参考文献
圣海伦斯(St. Helens)	美国		710	98.9	0.4	0.88	0.003	0.27	—	0.15	0.03	[105]
埃特纳(Etna)	意大利		1 000	19.6	—	22.2	—	25.2	3.4	—	—	[106]
瑙鲁赫伊(Ngauruhoe)	新西兰		640	96.0	2.6	16.1	—	10.2	6.8	2.5	—	[107]
阿苏(Usu)	日本		690	99.3	0.26	3.85	—	0.23	0.26	0.35	—	[107]
昭和新山(Showa-Shinzan)	日本	俯冲带	800	98.0	0.63	1.2	0.003	0.04	0.000 4	0.053	0.024	[108]
默拉皮(Merap)	印尼		803	88.7	0.50	5.56	0.024	0.98	0.134	0.608	—	[109]
克柳切夫(Klyuchevskoy)	俄罗斯		1 075	94.8	1.15	2.3	—	0.1	—	1.72	0.015	[110]
博阿斯(Poas)	哥斯达黎加		940	95.0	0.9	1.35	0.012	2.83	—	0.38	0.029	[111]
莫莫通博(Momotombo)	尼加拉瓜		844	95.1	0.87	2.38	0.025	0.7	0.049	0.35	—	[108]
尔塔阿雷(Erta Ale)	埃塞俄比亚		1 130	77.2	1.39	11.3	0.44	8.34	0.68	0.42	—	[105]
阿尔都巴(Ardoukoba)	吉布提	大陆裂谷	1 070	77.4	1.7	3.7	0.2	14.2	1.7	—	—	[112]
舒尔特赛(Surtsey)	冰岛		1 125	92.0	1.65	1.94	0.07	3.27	0.012	—	—	[113]
基拉韦厄(Kilauea)	美国	洋岛	1 170	37.1	0.49	48.9	1.51	11.8	0.04	0.08	—	[105]

1.6 水位监测技术

当岩浆上升到火山机构浅部时,会影响地下水系统。上升的岩浆和气体可能会对含水层加压而产生喷泉,使井中的水位上升或下降。例如,1993年菲律宾马荣(Mayon)火山^[119]和2000年日本阿苏火山^[120]在爆发前均发生了地下水位变化。此外,地下水位的变化还可能导致大量地下水直接排出地表,并形成更为直观的火山泥流现象,如1902年发生的培雷(Pelée)火山^[121]以及2007年哥伦比亚威拉(Huila)火山爆发^[122]。火山喷发前水位的变化通常可以利用建立水位传感器网络来进行监测,虽然目前火山监测站通常无水位监测项目,但这种监测方法却是一种相对低成本和灵敏的监测方法。

1.7 目测及其他类型的监测技术

目测监测技术是最基础,也是最传统的监测技术,但近十年来迅速发展的近实时摄影定量测量在

火山监测中取得了重大进展^[45]。同时,对火山进行野外调查和取样分析,可以对岩浆挥发份浓度比值(CO₂/H₂O、CO₂/SO₂、CO₂/HCl、SO₂/HCl和SO₂/HF等)、同位素浓度比值(³He/⁴He)、黏度和孔隙度等参数的变化进行岩石学监测,而这些参数是预测火山喷发的重要依据^[84,123]。值得一提的是,近年来迅速发展的无人机火山监测技术得到了有效的应用,MCGONIGLE A J S等^[124]首次应用无人机搭载光谱仪和热红外电子传感器对意大利武尔卡诺岛上未喷发的拉佛萨(La Fossa)火山释气情况进行了监测,并成功直接获取了SO₂气体通量和CO₂/SO₂值,通过计算获得CO₂通量。此外,SHINOHARA H^[125]还利用无人机搭载光谱仪对正在喷发的日本新燃岳火山喷出气体进行了持续监测,其获得的SO₂/H₂S值与距火山5 km的固定台站观测的火山气体的SO₂/H₂S值一致,证实了无人

机火山监测技术的有效性。

2 国际活火山监测现状

2.1 美国火山监测工作

美国地质调查局(USGS)主要负责太平洋西北部、阿拉斯加和夏威夷的火山监测,并设立了火山灾害项目(VHP)。该项目负责管理美国 5 个火山监测站的运行与维护,每个火山监测站负责某一活火山区内的火山监测工作。VHP 主要通过对活火山开展详细的地质填图和年代学测试工作,划分火山喷发时代和期次,查明火山喷发规律,为科学预测下一次火山喷发提供依据。同时,火山监测站还要根据监测资料的分析结果,向公众发布近期和远期的火山灾害信息,如灾害疏散通知、灾害地图、灾害评估及相关新闻;负责编制有关火山研究报告,定期提供火山活动状态和远期活动预测结果。

另外,美国地质调查局还积极参与到全球火山灾害援助工作中,其联合美国境外灾害援助办公室共同设立了火山灾害援助项目(VDAP),该项目主要为全球有关国家的火山灾害管理部门提供技术支撑和科学援助,包括提供火山监测工具,如地震仪、卫星、GPS 和气体监测装备等。同时,根据外方的需求,参与项目的约 20 名美国科学家会协助进行火山灾害监测、火山活动预测、早期预警评估与制定应急预案和国际救援机构沟通等工作。尤为重要的是,在火山喷发前、喷发期间和喷发后的全过程中,他们还提供一些基础的监测设备,如地震台站、监测卫星影像、GPS 信息和气体监测装备等^[45]。VDAP 属于典型的互利双赢科研项目,该项目目前已协助全球 12 个国家处理了 70 多次火山紧急情况,使美国和受援国政府都直接从合作中受益。更重要的是,通过协助其他国家进行火山监测与减灾工作,美国地质调查局不仅加强了国际合作,而且还获得了第一手监测数据和经验,为美国火山灾害政策的制定也提供了重要的科学经验和方法。

2.2 日本火山监测工作

日本气象厅(JMA)负责监测和发布日本火山危险警报。气象厅负责日本全国 50 座重要的活火山的监测网络,这些监测网络通常装备有地震仪、水平仪、应变仪、次声波和可视摄像机,监测数据全年 24 小时不断地实时传输到气象厅的 6 个火山观测站和预警中心。同时,研究人员会根据研究项目

需要而布设监测网络,这些研究数据也会传输到日本气象厅监测系统。国立地球科学和防灾研究所为日本 16 座火山建立了“火山监测系统”,主要设备为钻孔型高灵敏度地震仪和水平仪、宽频地震仪和全球定位系统(GNSS)。日本地理空间信息管理局负责的“地理信息网络”系统中的 1 300 个 GNSS 台站数据也被应用于火山活动监测与评估^[126]。火山警报一般由日本气象厅的火山观测与预警中心根据监测数据发布,然后通过媒体和当地相关部门通知到本地居民。另外,日本气象厅还会根据日本火山爆发预测协调委员会(CCPVE)的讨论结果,适时举办新闻发布会,如发布正在进行的火山喷发活动情况,然后地方政府市长会根据日本气象厅的火山灾害评估结果判断是否进行紧急疏散。

2.3 欧盟火山监测工作

近年来,欧盟主要通过设立 FUTUREVOLC 和 EVOSS 两个火山监测项目来开展欧洲火山监测工作。FUTUREVOLC 项目主要针对欧洲等地的 6 座火山进行监测和研究,通过火山气体探测器、次声波传感器、高分辨率照相机和地震仪等设备,建立起欧洲火山监测数据库和预测模型(<http://futurevolc.hi.is/>)。同时,该项目还致力于加强火山学家和民防部门的沟通联系,并协助后者更好地接收火山喷发方面的科学建议并采取妥善对策。EVOSS 项目(European Volcano Observatory Space services)是一个卫星监测系统,可自动监测全球范围内的火山喷发情况,并可将实时数据传送到相关民防部门。这个系统能提供火山爆发产生的高温、火山灰和火山气体以及地球表面的形变 3 个方面的监测数据,研究人员可以利用这些信息预测某座火山的未来发展趋势。

此外,一些活火山分布较多的国家还设有专门的机构来开展全国的火山监测工作,如意大利国家地球物理与火山研究所(INGV)负责意大利火山的监测和信息发布工作;冰岛气象局(IMO)向冰岛公众和航空部门发出火山喷发警报,同时开展火山学监测和研究;英国还设立了 STREVA 项目(<https://streva.ac.uk/>)用来评估火山喷发风险及危害,并建立有效的应对预案。

3 中国火山监测现状

中国是活火山分布较广的国家,目前共确定

了 14 个全新世活火山喷发区,东达台湾、西至昆仑,北起黑河,南极琼岛,辐射全国,其中 12 个处于环太平洋火山活动区(图 7)。长白山天池火山是我国规模最大、最具潜在灾害性喷发危险的活火山,明代以来就发生过 5 次中小规模喷发,而公元 946 年的大喷发称之为“千年大喷发”(Millennium Eruption),更被认为是全球近 2 000 年来最大的火山喷发事件之一,其火山灰漂落到 1 000 km 之外的日本^[127]。我国对这些火山区已开展了大量的研究工作,尤其是火山的高分辨率年代学研究,这对火山灾害评估和火山分类具有重

要意义。对于缺乏历史记载的全新世火山,直接对火山岩进行同位素定年很困难,以往对中国活火山年龄的限定主要通过⁴⁰Ar-³⁹Ar 法,但误差较大。最近,邹海波等^[128]利用具有高时间分辨率的锶-钍-铀非平衡法精确测定了中国东部若干年轻火山的年龄,限定了海南岛的火山活动时代为 5 ka 之内(马鞍岭:4.3 ka;雷虎岭:4.7 ka),镜泊湖火山为 4.9 ka;龙岗火山最晚喷发时代为 7.0 ka,它们均明显小于以往的测年结果,而与历史文献记录较为接近^[129],更加凸显了我国活火山活动的频繁性与火山监测的迫切性。

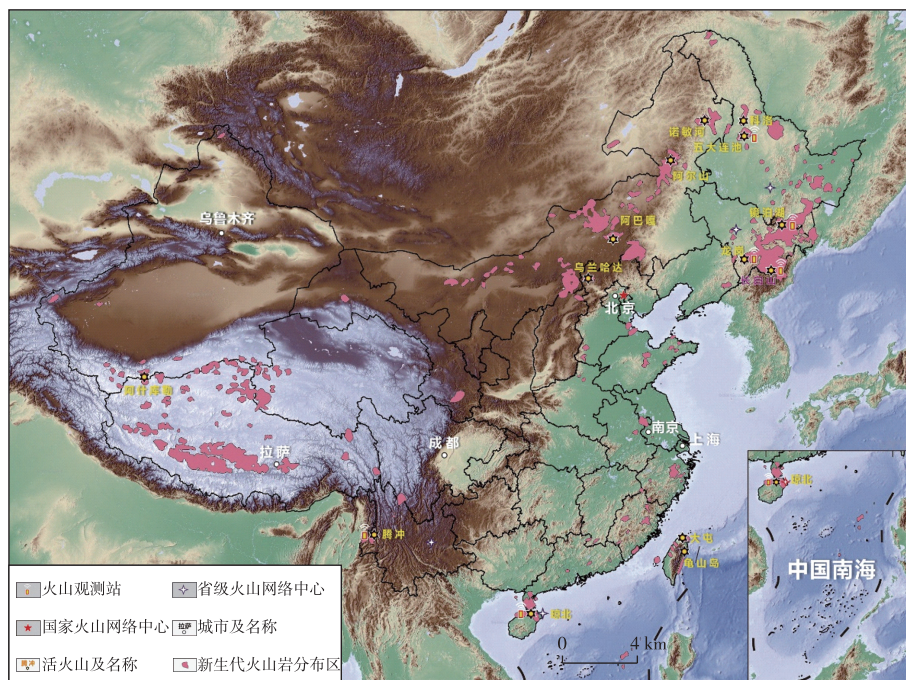


图 7 我国新生代火山岩、活火山与火山监测机构分布图

Fig. 7 Distribution of Cenozoic volcanic rocks, active volcanoes and volcanic monitoring institutions in China

然而,相对国际火山监测工作而言,我国的火山监测工作起步较晚。2000 年,中国地震局成立了中国地震局火山研究中心,重点开展我国的火山监测和预警研究。20 余年来,我国已经陆续在长白山、龙岗、五大连池、镜泊湖、腾冲和琼北地区建立了 6 座火山观测站,负责野外观测点的建设,设备的安装和维护,数据的采集、分析和传输,异常的验证。依托吉林、黑龙江、云南和海南 4 省地震局分别建立了 4 个省级火山网络中心(图 7),负责全省活火山监测和研究工作,管理和组织全省所有的野外观测点和火山观测站。2006 年,在中国地震局地质研究所建成了国家火山监测台网中心,负责从全国

各地的观测网络和临时监测站传输的监测数据的收集、分析、处理、存储和对外服务^[130]。尤其是 2020 年 11 月在吉林长春成立了中国地震局火山研究所,主要开展国内火山监测预测预警、国外火山活动跟踪及信息服务工作,使我国的火山监测研究与预警工作迈入了新的发展阶段。

另一方面,在监测技术上,与国外相比我国仍处于相对落后的状态,主要体现在监测的项目较少。目前我国主要是沿用传统的地震监测方法,虽然火山气体监测工作已有 30 余年,但除五大连池和腾冲火山开展了连续气氮和气汞监测外,其他火山区均不具备连续监测手段,更未开展连续的火山气

体通量监测。近年来,部分学者开展了活火山区岩浆房温度和温室气体释放通量研究。赵慈平等^[96]应用 $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 的碳同位素分馏数据,计算出腾冲火山区 3 个岩浆囊的现今平均温度分别为 773 °C、566 °C 和 524 °C,由南向北逐渐降低;郭正府等^[131]初步估算出,目前中国大陆典型活火山区向大气圈输送的温室气体(CO_2 和 CH_4)总通量约 8.13×10^6 。这些研究对于理解岩浆去气过程及估算火山来源温室气体的规模具有重要意义,但由于缺少连续实时的监测装置,这些火山区温室气体的测量实际上并不具备火山监测意义。

尽管我国的火山监测工作与国际先进水平还存在较大差距,但总体而言,近年来我国在火山监测方面仍然取得了系列重要的进展,主要可分为以下 3 个方面。

(1)在火山气体地面监测方面,认识到近年来长白山火山表现活跃,尤其是 2002—2005 年,长白山天池火山聚龙温泉火山气体中的 CO_2 平均浓度达 96.1%,高于背景值的平均浓度 93%; He 、 H_2 浓度由低于 10×10^{-6} 的背景值分别上升到 700×10^{-6} 和 $2\,750 \times 10^{-6}$ 。结合火山地震活动、火山区形变测量等其他监测结果,普遍认为长白山天池火山经历了一次明显的岩浆扰动过程^[127,132]。

(2)在星载气体监测方面,高分五号卫星搭载的大气痕量气体差分吸收光谱仪(GF-5 EMI)是我国首颗紫外可见光波段的高光谱载荷,其通过探测地球大气或表面反射、散射的紫外辐射来解析 SO_2 总量的分布和变化。最近,闫欢欢等^[133]利用 GF-5 EMI UV-2 通道观测数据,采用 DOAS 算法反演获得 GF-5 EMI 大气 SO_2 总量,并将反演结果与国际同类载荷 S5P/TROPOMI SO_2 总量结果进行比较分析,评判 GF-5 EMI 在全球火山活动 SO_2 变化监测方面的能力。结果显示,GF-5 EMI 能够获取火山喷发 SO_2 排放的时空分布特征,并与国际同类载荷 TROPOMI 反演结果具有较高的空间一致性,能够满足全球火山喷发监测、预警及其气候影响研究的应用需求。

(3)在地面形变监测方面,现有研究主要集中于对长白山天池、腾冲、海南以及阿什库勒火山。例如,陈国浒等^[134]利用 D-InSAR 技术获取了长白山 1995—1998 年 6~12 cm 的形变;JI L Y 等^[135]应用 PS-In SAR 技术,利用 ENVISAT 卫星影像数

据,获取了天池火山 2004—2010 年的形变时间序列;何平等^[136]利用 ALOS-1 数据结合 PS-InSAR 技术,发现天池火山口存在 10 mm/a 的上升速率;季灵运等^[137]通过 SBAS 技术提取了腾冲火山地区 1995—1997 年地表形变时间序列;JI L Y 等^[138]利用 Stacking 技术获取了海南火山 2007—2011 年的形变,还测得阿什库勒火山 2008—2010 年发生了约 1 cm 的形变^[139]。虽然我国利用 InSAR 在火山形变监测方面取得了显著的进展,但总体而言,我国利用 InSAR 结果对火山模型构建研究还较为单一,与国际地面形变监测研究上还存在较大差距^[138]。

4 火山监测技术体系发展趋势分析

近几十年来,地面形变监测、气体监测和卫星监测技术取得的进步,极大地促进了火山监测工作的发展^[9,46,60-63],有效降低了火山灾害带来的影响^[45,140]。然而,目前全球 1 500 座活火山中仅有不到 10%得到了系统的监测^[141],还亟待从以下几方面加强火山监测工作。

4.1 多种监测手段联用,形成联合监测体系

单一的火山监测手段获取的数据不确定性高,甚至可能获得误导性的数据。如地震监测中,经常性小规模喷发的火山会引发一些极小的前兆地震,甚至一些小震级的前兆地震还可能被当作区域地震的高背景值而被忽视;地面形变监测中,InSAR 受大气影响明显,而火山喷发时地面形变可能是突然发生的,或与喷发同时发生,甚至有时火山不发生喷发时也可能发生地面形变,这些因素都会对地面形变监测造成干扰。因此,不能只依赖一种监测设备,而应综合利用多种监测仪器的数据,形成联合监测体系,从而更科学地开展火山监测。

4.2 增设监测终端,建立监测数据共享平台

随着电子技术的发展,形成了大量的经济而有效的电子传感器和无线电遥测技术,这对发展中国家开展实时的火山监测工作极为有利。尤为重要的是,互联网技术的发展为火山监测信息的共享交流提供了理想平台。目前,越来越多的火山观测站都可以自动分析监测数据,且分析结果均能实现网络共享。国际上已经开展了多个火山监测数据库项目,例如 WOVODat(<http://www.wovodat.org>)、VHUB(<https://vhub.org/>)、VOGRIPA(<http://www.bgs.ac.uk/vogripa/index.cfm>)、FUT-

UREVOLC(<http://futurevolc.hi.is/>)等。同时,分析火山监测数据的通用软件也得到了长远的发展,研究人员通过互联网免费获取这些数据和软件进行火山预测工作。

4.3 深化综合解译技术研究,建立科学火山预测模型

解译监测数据时,需要综合考虑火山机构的复杂性与不均匀性。尽管目前地震监测仍是最重要的监测手段,但将地震数据与其他方法(例如基于大地测量、次声波、气体和热通量以及重力和电信号的方法)相结合,将会使解译结果更科学。目前正在开发和应用的高分辨三维地震层析成像技术可以对宽频带地震数据进行详细解译,而使用人工神经网络和顺序数据同化技术的智能系统,还可以综合计算大量已有数据,产生最佳的拟合模型。

另外,一些新技术的发展也为未来的火山监测提供了便利。如,利用最新的宇宙 μ 射线摄影,可以提供火山内部结构和低密度区域(如岩浆或热液流体)成像信息。同时,新一代的远程气体监测技术可以定量研究喷发前气体释放过程,这使得岩浆补给的早期预警成为可能。近年来快速发展的岩石学、地震学以及其他地球物理成像技术,极大地促进了对火山通道和岩浆动力学过程的认识。卫星监测将成为未来火山监测的重点发展领域,首先,卫星可为偏远的活火山提供监测数据;其次,卫星图像覆盖率高,能提供整个活火山区的完整覆盖数据;再次,火山区的地面变形、气体排放和热特征均可以通过使用卫星的多传感器进行监测。

总之,火山监测的未来发展将在多方面共同发展,包括监测设备的发展、分析和解译技术的改进、综合分析多种类数据集的能力,以及对火山结构和岩浆动力学过程的理解等领域。

5 现代火山监测技术发展对中国火山监测工作的启示

我国大陆境内新生代火山岩分布面积约186 000 km²,近20年来,初步完成了以东北长白山天池火山、黑龙江五大连池火山及西南腾冲火山等3个地区的活火山为代表的近代活火山地质调查与填图工作,厘定出14个活火山喷发区(图7)^[130]。在火山监测与灾害性研究方面,积累了以长白山天池火山为代表的6座活火山20多年的监测数据,发

展了适合中国活动火山特点的火山喷发危险性和灾害分析理论与方法,完成了与国际接轨的火山灾害区划图。然而,总体而言,我国火山监测技术和监测体系与国际前沿还存在较大的差距,未来我国应进一步加强相关方面的工作部署与科学研究,建议从以下4个方面开展相关的工作。

5.1 建立多种类火山联合监测技术和“空-天-地”立体监测体系

我国火山监测研究起步较晚,与国外先进火山监测水平相比,还存在一定的差距。目前,我国火山监测技术主要包括火山地震监测、火山形变监测和火山气体监测等传统监测手段,且监测网络的密度仍然相对较小,明显限制了监测能力。未来应进一步加强新型监测技术的应用,特别是加强实时、连续、高采样率的监测手段(如星载/机载高光谱监测技术)的应用。另外,在监测对象上,应持续加强对长白山、五大连池—科洛、腾冲—阿什库勒和雷琼—南海地区等重点区活火山的监测工作,特别是应增设监测网点和监测手段。通过以上方式,建成多种类的火山联合监测体系,是提高我国火山监测—预警及火山灾害预防工作的重要途径。

5.2 开展火山监测与灾害援助国际合作,加强对西南太平洋火山监测的国际合作与数据共享

近年来,西南太平洋“火链”区火山活动频繁,仅西巽他弧就分布着占全球13%的活火山^[142],苏门答腊、爪哇和巴厘岛上有84座火山,其中有76座火山在史上较为活跃^[143],且这一地区人口密度高,其潜在的喷发可能对周边国家人民的生产和生活带来很大的危害^[62]。更重要的是,这一地区的火山爆发产生的海啸、火山灰等会对中国产生直接影响。因此,加强对这一地区火山的监测工作,对我国参与全球事务管理,科学制定火山监测预警、预防方案也具有重要意义。

目前,全球重要经济体(如美国、日本和欧盟等)已深度参与到对这一地区的火山监测与援助工作中。相对而言,我国对这一地区火山监测工作的参与度还明显不足,火山灾害国际援助工作更是有待开展。未来,基于国际合作计划(如“亚洲大洋洲区域综合地球观测计划”),我国应设立专门针对该地区的火山监测与灾害援助国际合作项目,并基于我国和国际卫星监测体系,对该地区进行近实时监测和喷发预测。同时,进一步加强国际交流合作,

增加该地区的地面传感器,建立监测数据共享平台,主动发布火山预警信息,并积极参与到火山灾害国际援助工作中。

5.3 加强国内活火山区域地质详细调查与喷发机制的合作研究

我国活火山地质研究与国际前沿还存在较大的差距。目前,对我国已确定的 14 个活火山区的火山喷发机制、活动特征、火山产物空间分布及火山成因与演化过程等方面的研究尚不足^[130]。下一步,应针对每个活火山区开展详细的区域地质调查,并结合野外和实验分析,建立每个活火山区详细的火山活动史,重点对历次喷发的喷发时间、规模和堆积特征进行深入研究。更为重要的是,火山喷发机制是目前国际火山学研究中的前沿性课题,对火山喷发灾害的预测和预警均具有重要意义,研究内容大体包括火山喷发规律、火山触发机制、火山喷发规模和周期性控制因素等方面。目前,国际上在火山喷发机制研究领域取得了丰硕的成果,但仍然存在一系列科学问题尚待解决,包括:什么因素造成了不同火山的喷发规律存在差异?火山喷发历史中自身喷发周期性发生变化的原因?我国火山喷发机制的研究尚处于起步阶段,长白山、腾冲火山等大型火山的喷发序列仍存在较大争议,仅长白山火山开展了初步的岩浆混合作用及触发机制等研究,对火山喷发规模、周期性控制因素、火山触发机制、火山岩浆补给速率等均缺乏深入认识。

值得指出的是,中国地质调查局系统对我国的中生代—新生代火山开展了长期的、多尺度的区域性地质调查工作,积累了海量的野外地质调查、地球物理探测和地球化学分析数据,这为火山喷发机制研究提供了极为重要的多维度(地表+深部)实物资料。因此,中国地质调查局系统的相关科研单位应与中国地震局相关研究机构进一步深化合作,基于各自的专业优势,以我国长白山、腾冲等典型活火山和雁荡山、云山等经历了高度剥蚀的中生代破火山为范例,进一步合作开展系统的地表区域地质详细调查,深部地球物理探测及岩石学、矿物学、地球化学、年代学分析,精细建立火山机构三维模型,开展数值模拟等研究工作,深化我国火山喷发机制研究,共同推进我国火山学及火山灾害减灾防灾工作的高质量发展。

5.4 建立中国中生代—新生代火山数据库

我国分布着大量的中生代—新生代火山群,针对这些火山群的结构组成、喷发特征及资源环境效应已开展了大量的调查和研究工作。特别是 20 世纪 60—70 年代以来,在东南沿海中生代火山岩区开展的火山地质调查研究^[144-145],以及 90 年代以来开展的全新世活火山与喷发危险性预测研究工作,积累了海量火山地质调查、监测与研究成果数据,急需建立全国性火山数据库,支撑服务于中国火山研究的可持续发展。

建立中国中生代—新生代火山数据库不仅是我国火山灾害防灾减灾工作的重要基础,也是对我国大陆活动火山活动规律性认识的重要步骤,还可为火山资源、环境评价、旅游开发和当地经济可持续发展等提供重要科学依据。中国火山数据库作为国家科技基础性调查工作,对于科学认识我国火山活动特点和潜在火山灾害评估可提供重要的基础数据,同时也对全国火山研究队伍的健全、培养和可持续发展起着极其重要的作用。通过建立我国活火山数据库,可以帮助研究人员进一步了解大陆板内火山作用,同时透过火山这个窗口透视地球内部的岩浆作用过程和喷发机制,为预测未来的火山喷发类型及其灾害特点、制定防范措施等提供科学依据。

目前,我国已经开展了中国大陆活火山数据库建设工作,该数据库主要包括活火山的火山地质-岩石学-地球化学数据库、活火山监测数据库、活火山灾害模拟数据库和其他数据库(含基础地理数据、遥感数据、火山区深部结构地球物理数据、火山史料和火山科普资料)4 部分内容^[146],并以上述数据库为基础,建立了基于 GIS 数据库管理技术的数据库交流平台,可以对活火山的火山地质、火山监测、火山灾害,以及与中国活动火山监测研究等有关的信息进行查询。然而,这一数据库主要限于长白山、腾冲、五大连池、镜泊湖、龙岗和海口 6 个地区的少量活火山机构的信息进行搜集,尚未囊括中国其他地区的活火山数据。更重要的是,中国东部广泛发育的白垩纪流纹质火山举世瞩目,火山机构保留相对完好,在全球特别是环太平洋流纹质火山中最具代表性和典型性^[144],其丰富的火山学信息亟待整理建库。通过长期的区域地质调查工作,中国东部已经厘定出数百个火山机构,这些火山机构经历

了亿万年的风化剥蚀,火山内部的地质结构已暴露出地表^[17-24],相较于具有完整火山锥体覆盖的活火山而言,更具火山机构解剖学意义。同时,通过对大规模流纹质火山的地质填图解剖与研究,是理解超级火山喷发机制,开展超级火山喷发预测和预防工作的有效途径^[15]。因此,建立中国东部白垩纪典型火山机构的区域地质学、岩石学和地球化学数据库,可为开展巨型-超级火山喷发机制研究及喷发预测、灾害防治工作提供新的思路 and 重要支撑。

致谢:自 2012 年南京地质调查中心(时亦称南京地质矿产研究所)建所 50 周年时,我即入所攻读火山地质学的硕士学位,青葱光阴,迅如弹指,逡巡间又逢中心 60 周年大庆。十年间,我有幸能一直在东南沿海火山岩区上下求索,未移其志,期间更感念于中心各位前辈、老师的言传身教,实在受益良多。今年十月,著名火山地质学家陶奎元先生与世长辞,不胜哀惋。先生生前长期从事火山地质研究和科学普及工作,在火山地质理论研究、野外调查实践和成果应用领域进行了大量开创性工作。退休后,先生更是以极大的科研热情为我国国家级和世界地质公园体系的创建和提升作出了卓越贡献。先生博学精业、厚德敦行、一生勤恳、不辍笔耕,实是后辈学人楷模。十年来,我有幸能跟随先生在东南沿海火山岩区考察学习,尤其是先生在雁荡山中生代流纹岩区和海口新生代玄武岩区对笔者的谆谆教诲永远是鼓舞笔者砥砺前行动力。硕学虽已往,不废仰高山。今撰此文,以示怀念,愿先生千古,并志所庆纪念。

参考文献

- [1] MATHER T A, PYLE D M, OPPENHEIMER C. Tropospheric volcanic aerosol[M]. Geophys. Monogr. American Geophysical Union, 2003, 139: 189-212.
- [2] 郭正府, 郑国东, 孙玉涛, 等. 中国大陆地质源温室气体释放[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(2): 204-212.
GUO Z F, ZHENG G D, SUN Y T, et al. Greenhouse gases emitted from geological sources in China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(2): 204-212.
- [3] GUO Z F, WILSON M, DINGWELL D B, et al. India-Asia collision as a driver of atmospheric CO₂ in the Cenozoic[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 3891.
- [4] RAE J W B, ZHANG Y G, LIU X Q, et al. Atmospheric CO₂ over the past 66 million years from marine archives[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2021, 49: 609-641.
- [5] 周金胜, 王强. 地壳内的岩浆动力学过程及其资源与环境效应[J]. 岩石学报, 2022, 38(5): 1399-1418.
ZHOU J S, WANG Q. Magma dynamics in the crust and its resource and environmental effects[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(5): 1399-1418.
- [6] FURTNEY M A, PRITCHARD M E, BIGGS J, et al. Synthesizing multi-sensor, multi-satellite, multi-decadal datasets for global volcano monitoring [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2018, 365(OCT.1): 38-56.
- [7] LOUGHLIN S C, SPARKS S, BROWN S K, et al. Populations around Holocene volcanoes and development of a Population Exposure Index [J]. Global Volcanic Hazards and Risk, 2015(4): 223-232.
- [8] GLOBAL VOLCANISM PROGRAM. Report on Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (Tonga)[R]. Bulletin of the Global Volcanism Network, 2022, 47: 2.
- [9] BLAKE S. Volcanoes[C]// ALDERTON D, ELIAS S A. Encyclopedia of Geology (Second Edition) [M]. Pittsburgh: Academic Press, 2021: 1-19.
- [10] FERRUCCI F, PRATA F, AMELUNG F, et al. Perspectives concerning satellite EO and geohazard risk management: volcanic hazards[C]. European Space Agency, Santorini, Greece, 2012.
- [11] GLOBAL VOLCANISM PROGRAM. Report on Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (Tonga) [C]// SENNERT S K. Weekly Volcanic Activity Report[R]. Smithsonian Institution and US Geological Survey, 12 January-18 January, 2022.
- [12] WALKER G P L. The Taupo pumice: product of the most powerful known (ultraplinian) eruption? [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1980(8): 395-407.
- [13] BACHMANN O, BERGANTZ G. The Magma Reservoirs That Feed Supereruptions[J]. Elements, 2008(4): 17-21.
- [14] CASHMAN K V, SPARKS R S J, BLUNDY J D. Vertically extensive and unstable magmatic systems: a unified view of igneous processes[J]. Science, 2017, 355(6331): eaag3055.
- [15] PRITCHARD M E, GREGG P M. Geophysical

- evidence for silicic crustal melt in the continents; where, what kind, and how much? [J]. *Elements*, 2016, 12:121-127.
- [16] CASSIDY M, MANGA M, CASHMAN K. Controls on explosive-effusive volcanic eruption styles [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2839.
- [17] 陶奎元, 吴岩, 黄光昭, 等. 娘娘山古火山口的构造和岩相特征[J]. *地质学报*, 1978(1): 40-52.
- TAO K Y, WU Y, HUANG G Z, et al. The structural and facies characteristics of Niangniangshan paleocalder[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 1978(1): 40-52.
- [18] 陶奎元, 薛怀民. 论南京娘娘山碱性岩浆房的梯度及其成因机制[J]. *岩石矿物学杂志*, 1989, 8(4): 289-298.
- TAO K Y, XUE H M. The Characteristics and Origin of Gradient in Niangniangshan Alkaline Magma Chamber[J]. *Acta Petrologica et Mineralgica*, 1989, 8(4): 289-298.
- [19] 陶奎元, 高天钧, 陆志刚, 等. 东南沿海火山岩基底构造及火山-侵入作用与成矿系统[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-371.
- TAO K Y, GAO T J, LU Z G, et al., Basement tectonics of volcanics and volcanic-intrusive complex in southeast China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-371.
- [20] 尹家衡, 王占宇, 陶奎元, 等. 桐庐火山-构造洼地基本特征及演化[J]. *中国地质科学南京地质矿产研究所刊*, 1985, 6(4): 1-16.
- YIN J H, WANG Z Y, TAO K Y, et al., Tonglu volcano-tectonic depression: basic features and its evolution[J]. *Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R. Chinese Acad. Geol. Sci*, 1985, 6(4): 1-16.
- [21] 冯宗帜, 亓润章, 黄水兴, 等. 福建永泰—德化地区火山地质及火山岩含矿性[J]. *南京地质矿产研究所刊*, 1991, 12(增刊): 1-100.
- FENG Z Z, QI R Z, HUANG S X, et al., Mesozoic volcanology and mineralization related to volcanics in Yongtai-Dehua District, Fujian Province[J]. *Bull. Nanjing Inst. Geol. M. R. Chinese Acad. Geol. Sci*, 1991, 12(supp): 1-100.
- [22] 谢家莹, 陶奎元, 黄光昭. 中国东南大陆中生代火山岩带的火山岩相类型[J]. *火山地质与矿产*, 1994, 15(4): 45-51.
- XIE J Y, TAO K Y, HUANG G Z. The volcanic facies types of Mesozoic terrane in southeast China continent [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 1994, 15(4): 45-51.
- [23] 谢家莹, 陶奎元, 尹家衡, 等. 中国东南大陆中生代火山地质及火山-侵入杂岩[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-277.
- XIE J Y, TAO K Y, YIN J H, et al. Mesozoic volcanic geology and volcano-intrusive complexes of southeast China continent [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-277.
- [24] 谢家莹, 蓝善先, 张德宝. 运用火山地质学理论研究竹田头火山机构[J]. *火山地质与矿产*, 2000, 21(2): 87-95.
- XIE J Y, LAN S X, ZHANG D B. The study on revived caldera using volcanology [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 2000, 21(2): 87-95.
- [25] 邢光福, 卢清地, 陈荣, 等. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研——兼与华北燕山地区对比[J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 451-463.
- XING G F, LU Q D, CHEN R, et al. Study on the Ending Time of Late Mesozoic Tectonic Regime Transition in South China——Comparing to the Yanshan Area in North China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(4): 451-463.
- [26] 邢光福, 陈荣, 杨祝良, 等. 东南沿海晚白垩世火山岩浆活动特征及其构造背景[J]. *岩石学报*, 2009, 25(1): 77-91.
- XING G F, CHEN R, YANG Z L, et al. Characteristics, tectonic setting of Late Cretaceous volcanic magmatism in the coastal Southeast China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(1): 77-91.
- [27] 段政, 邢光福, 余明刚, 等. 浙闽边界区晚中生代火山作用时序与过程分析[J]. *地质论评*, 2013, 59(3): 454-469.
- DUAN Z, XING G F, YU M G, et al. Time Sequence and Geological Process of Late Mesozoic Volcanic Activities in the Area of Zhejiang-Fujian Boundary [J]. *Geological Review*, 2013, 59(3): 454-469.
- [28] 段政, 赵希林, 邢光福, 等. 浙闽相邻区白垩纪上下火山岩系成因与壳幔作用对比研究[J]. *地质学报*, 2015, 89(2): 319-338.
- DUAN Z, ZHAO X L, XING G F, et al. Comparison Study of Petrogeneses and Crust-Mantle Interactions between Cretaceous Lower and Upper Volcanic Series in the Adjacent Area of Zhejiang-Fujian Provinces [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(2): 319-338.
- [29] 段政, 邢光福, 余明刚, 等. 东南沿海早白垩世火山岩的极低级变质作用研究[J]. *岩石学报*, 2018, 34(3): 656-668.

- DUAN Z, XING G F, YU M G, et al. Very Low-Grade Metamorphism of Early Cretaceous Volcanic rocks in Coastal Southeast China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(3): 656-668.
- [30] 段政, 张翔, 卢琴飞, 等. 浙江晚中生代雁荡山地貌成因及其与火山构造协同性演化规律研究[J]. *地质学报*, 2022, 96(6): 2021-2038.
- DUAN Z, ZHANG X, LU Q F, et al. Late Mesozoic geomorphic origin of Yandangshan and its synergistic evolution with volcanic structures in Zhejiang Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(6): 2021-2038.
- [31] XING G F, LI J Q, DUAN Z, et al. Mesozoic-Cenozoic Volcanic Cycle and Volcanic Reservoirs in East China[J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32(4): 742-765.
- [32] HE Z Y, XU X S. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction[J]. *Chemical Geology*, 2012, 328: 208-221.
- [33] LIU L, XU X S, ZOU H B. Episodic eruptions of the Late Mesozoic volcanic sequences in southeastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and implications for the geodynamics of paleo-Pacific subduction[J]. *Lithos*, 2012, 154: 166-180.
- [34] LIU L, XU X S, XIA Y. Cretaceous Pacific plate movement beneath SE China: Evidence from episodic volcanism and related intrusions[J]. *Tectonophysics*, 2014, 614: 170-184.
- [35] LIU L, XU X S, XIA Y. Asynchronizing paleo-Pacific slab rollback beneath SE China: Insights from the episodic Late Mesozoic volcanism [J]. *Gondwana Research*, 2016, 37: 397-407.
- [36] GUO F, FAN W M, LI C W, et al. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces [J]. *Lithos*, 2012, 150: 62-84.
- [37] GUO F, WU Y M, ZHANG B, et al. Magmatic responses to Cretaceous subduction and tearing of the paleo-Pacific Plate in SE China: An overview [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 212(1): 103448.
- [38] MENYAILOV I A. Prediction of eruptions using changes in composition of volcanic gases[J]. *Bulletin Volcanologique*, 1975, 39(1): 112-125.
- [39] LOUGHLIN E S, SPARKS S, BROWN S, et al. *Global Volcanic Hazards and Risk*[M]. Cambridge: University Printing House, 2015: 1-410.
- [40] PRITCHARD M E, SIMONS M. A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes [J]. *Nature*, 2002, 418 (6894): 167-171.
- [41] MCCORMICK B T, EDMONDS M, MATHER T A, et al. First synoptic analysis of volcanic degassing in Papua New Guinea [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13 (3): 1-21.
- [42] JAY J A, WELCH M, PRITCHARD M E, et al. Volcanic hotspots of the central and southern Andes as seen from space by ASTER and MODVOLC between the years 2000 and 2010[J]. *Geological Society of London Special Publication*, 2013, 380 (1): 161-185.
- [43] BIGNAMI C, CORRADINI S, MERUCCI L, et al. Multi-sensor satellite monitoring of the 2011 Puyhuet-Cordon Caulle eruption[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(7): 2786-2796.
- [44] IVERSON R M, DZURISIN D, GARDNER C A, et al. Dynamics of seismogenic volcanic extrusion at mount St. Helens in 2004-2005 [J]. *Nature*, 2006, 444: 439-443.
- [45] PALLISTER J, MCNUTT S R. Chapter 66-Synthesis of Volcano Monitoring [C]// SIGURDSSON H. *The Encyclopedia of Volcanoes (Second Edition)* [M]. Amsterdam: Academic Press, 2015: 1151-1171.
- [46] RODGERS M, ROMAN D C, GEIRSSON H, et al. Seismicity accompanying the 1999 eruptive episode at Telica Volcano, Nicaragua[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, 265: 39-51.
- [47] KUSHENDRATNO, PALLISTER J S, KRISTIAN-TO, et al. Recent explosive eruptions and volcano hazards at Soputan volcano-a basalt stratovolcano in north Sulawesi, Indonesia [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2012, 74(7):1581-1609.
- [48] BIGGS J, PRITCHARD M E. Global volcano monitoring: What does it mean when volcanoes deform? [J]. *Elements*, 2017, 13(1): 17-22.
- [49] WHITE R, MCCAUSLAND W. Volcano-tectonic earthquakes: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2016, 309: 139-155.
- [50] ZOBACK M L, GEIST E, PALLISTER J, et al. Advances in natural hazard science and assessment, 1963—2013 [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2013, 501: 81-154.

- [51] WAITE G P, CHOUET B A, DAWSON P B. Eruption dynamics at Mount St. Helens imaged from broadband seismic waveforms; Interaction of the shallow magmatic and hydrothermal systems[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: B02305.
- [52] PALLISTER J S, CASHMAN K V, HAGSTRUM J T, et al. Faulting within the Mount St. Helens conduit and implications for volcanic earthquakes [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2013, 125: 359-376.
- [53] WAITE G P, CHOUET B A, DAWSON P B. Eruption dynamics at Mount St. Helens imaged from broadband seismic waveforms; Interaction of the shallow magmatic and hydrothermal systems[J]. *Journal of Geophysics Research*, 2008, 113: B02305.
- [54] NIU J M, SONG T A. Validation of repetitive volcano-seismic signals in Aso volcano, Japan with distant stations implications of source characterization and remote sensing in un-instrumented volcanoes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022; e2021JB023400.
- [55] RIPEPE M, GORDEEV E. Gas bubble dynamics model for shallow volcanic tremor at Stromboli[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1999, 104: 10639-10654.
- [56] CHOUET B A. A seismic model for the source of long-period events and harmonic tremor, in *Volcanic Seismology* [M]. New York: Springer, 1992: 133-156.
- [57] CHOUET B A. New methods and future trends in seismological volcano monitoring, in *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*[M]. Berlin: Springer, 1996: 23-98.
- [58] PALMA J L, CALDER E S, BASUALTO D, et al. Correlations between SO₂ flux, seismicity, and outgassing activity at the open vent of Villarrica volcano, Chile[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: B10201.
- [59] DZURISIN D. *Volcano Deformation: Geodetic Monitoring Techniques*[M]. Chichester: Springer/Praxis Publishing, 2007: 441.
- [60] PARKER A L, BIGGS J, LU Z. Investigating long-term subsidence at Medicine Lake Volcano, CA, using multitemporal InSAR[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 199: 844-859.
- [61] BIGGS J, EBMEIER S, ASPINALL W, et al. Global link between deformation and volcanic eruption quantified by satellite imagery[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 1-7.
- [62] CHAUSSARD E, AMELUNG F, AOKI Y. Characterization of open and closed volcanic systems in Indonesia and Mexico using InSAR time series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118: 3957-3969.
- [63] EBMEIER S, ANDREWS B, ARAYA M, et al. Synthesis of global satellite observations of magmatic and volcanic deformation; Implications for volcano monitoring & the lateral extent of magmatic domains[J]. *Journal of Applied Volcanology*, 2018, 7(1): 1-26.
- [64] LU Z, DZURISIN D. *InSAR imaging of Aleutian volcanoes* [C]//*InSAR imaging of Aleutian volcanoes* [M]. New York: Springer, 2014: 87-345.
- [65] PINEL V, POLAND M P, HOOPER A. *Volcanology: Lessons learned from synthetic aperture radar imagery*[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2014, 289: 81-113.
- [66] REATH K, PRITCHARD M, POLAND M, et al. Thermal, deformation, and degassing remote sensing time series (CE 2000—2017) at the 47 most active volcanoes in Latin Ame[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124: 195-218.
- [67] SPARKS R, BIGGS J, NEUBERG J. Monitoring volcanoes[J]. *Science*, 2012, 335(6074): 1310-1311.
- [68] CARICCHI L, BIGGS J, ANNEN C, et al. The influence of cooling, crystallization and re-melting on the interpretation of geodetic signals in volcanic systems [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 388: 166-174.
- [69] CHAUSSARD E, AMELUNG F. Precursory inflation of shallow magma reservoirs at west Sunda volcanoes detected by InSAR[J]. *Geophysical Research Letter*, 2012, 39: L21311.
- [70] HUGHES G R, MAHOOD G A. Silicic calderas in arc settings: Characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123(7/8): 1577-1595.
- [71] NEWHALL C G. *Volcanology 101 for seismologists* [C]//SCHUBERT G, KANAMORI H. *Treatise on Geophysics*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2007, 4(12): 351-388.
- [72] ALBINO F, PINEL V, MASSOL H, et al. Conditions for detection of ground deformation induced by conduit flow and evolution[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(B6): B06201.

- [73] GOTTSMANN J S, ANGELIS D, FOURNIER N, et al. On the geophysical fingerprint of Vulcanian explosions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 306(1/2): 98-104.
- [74] PRITCHARD M E, SIMONS M. An InSAR-based survey of volcanic deformation in the southern Andes [J]. *Geophysical Research Letter*, 2004, 31: L15610.
- [75] FOURNIER T J, PRITCHARD M E, RIDDICK S N. Duration, magnitude, and frequency of subaerial volcano deformation events: New results from Latin America using InSAR and a global synthesis[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11: Q01003.
- [76] CASTRO J M, BINDEMAN I N, TUFFEN H, et al. Explosive origin of silicic lava: textural and $\delta\text{D-H}_2\text{O}$ evidence for pyroclastic degassing during rhyolite effusion[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 405: 52-61.
- [77] CASSIDY M, CASTRO J M, HELO C, et al. Volatile dilution during magma injections and implications for volcano explosivity[J]. *Geology*, 2016, 44(12): 1027-1030.
- [78] CASSIDY M, MANGA M, CASHMAN K. Controls on explosive-effusive volcanic eruption styles [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2839.
- [79] POPA R G, BACHMANN O, ELLIS B S, et al. A connection between magma chamber processes and eruptive styles revealed at Nisyros-Yali volcano (Greece) [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2019, 387: 106666.
- [80] POPA R G, DIETRICH V J, BACHMANN O. Effusive-explosive transitions of water-undersaturated magmas: The case study of Methana Volcano, South Aegean Arc [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, 399: 106884.
- [81] GALLE B, JOHANSSON M, RIVERA C, et al. Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC)-A global network for volcanic gas monitoring: Network layout and instrument description[J]. *Journal of Geophysical Research: atmospheres*, 2010, 115: D05304.
- [82] SPARKS R S J. Forecasting volcanic eruptions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210(1/2): 1-15.
- [83] LEE S C, KANG N H, PARK M J, et al. A review on volcanic gas compositions related to volcanic activities and non-volcanological effects[J]. *Geosciences Journal*, 2018, 22(1): 183-197.
- [84] WERNER C, KELLY P J, DOUKAS M, et al. Degassing of CO_2 , SO_2 , and H_2S associated with the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, 259: 270-284.
- [85] BRUNO N, CALTABIANO T, GIAMMANCO S, et al. Degassing of SO_2 and CO_2 at Mount Etna (Sicily) as an indicator of pre-eruptive ascent and shallow emplacement of magma[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2001, 110(1/2): 137-153.
- [86] GIAMMANCO S, NERI M, SALERNO G G, et al. Evidence for a recent change in the shallow plumbing system of Mt. Etna (Italy): Gas geochemistry and structural data during 2001—2005[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, 251: 90-97.
- [87] JOUSSET P, PALLISTER J, SURONO. The 2010 eruption of Merapi volcano[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, 261: 1-6.
- [88] DUFFELL H J, OPPENHEIMER C, PYLE D M, et al. Changes in gas composition prior to a minor explosive eruption at Masaya volcano, Nicaragua [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2003, 126: 327-339.
- [89] SHEVENELL L, GOFF F. Temporal geochemical variations in volatile emissions from Mount St. Helens, USA, 1980—1994[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2000, 99: 123-138.
- [90] CARAPEZZA M L, INGUAGGIATO S, BRUSCA L, et al. Geochemical precursors of the activity of an open-conduit volcano: the Stromboli 2002—2003 eruptive events [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L07620.
- [91] LÓPEZ T, USHAKOV S, IZBEKOV P, et al. Constraints on magma processes, subsurface conditions, and total volatile flux at Bezymianny volcano in 2007—2010 from direct and remote volcanic gas measurements [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, 263: 92-107.
- [92] ZOBIN V M, VARLEY N R, GONZÁLEZ M, et al. Monitoring the 2004 andesitic block-lava extrusion at volcán de Colima, México from seismic activity and SO_2 emission[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2008, 177: 367-377.
- [93] SHIMOIKE Y, NOTSU K. Continuous chemical monitoring of volcanic gas in Izu-Oshima volcano, Japan [J]. *Volcanology and Geothermal Research*, 2000, 101: 211-221.

- [94] OHBA T, SAWA T, TAIRA N, et al. Magmatic fluids of Tatun volcanic group, Taiwan[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25: 513-523.
- [95] 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): 2905-2911.
- LIU G M, SUN H Y, GUO F. The newest monitoring information of Changbaishan volcano, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(10): 2905-2911.
- [96] 赵慈平, 冉华, 陈坤华. 腾冲火山区壳内岩浆囊现今温度: 来自温泉逸出气体 CO_2 、 CH_4 间碳同位素分馏的估计[J]. *岩石学报*, 2011, 27(10): 2883-2897.
- ZHAO C P, RAN H, CHEN K H. Present-day temperatures of magma chambers in the crust beneath Tengchong volcanic field, southwestern China: Estimation from carbon isotopic fractionation between CO_2 and CH_4 of free gases escaped from thermal springs[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(10): 2883-2897.
- [97] SELF S. The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2006, 364(1845): 2073-2097.
- [98] ROBOCK A. Climatic impacts of volcanic eruptions [C]//SIGURDSSON H. *The Encyclopedia of Volcanoes*, 2nd Edition[M]. Amsterdam: Elsevier, 2015: 935-942.
- [99] BLACK B A, KARLSTROM L, MATHER T A. The life cycle of large igneous provinces [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(12): 840-857.
- [100] FISCHER T P, MORRISSEY M M, CALVACHE M L, et al. Correlations between SO_2 flux and long-period seismicity at Galeras volcano [J]. *Nature*, 1994, 368: 135-137.
- [101] DALTON M P, WATSON I M, NADEAU P A, et al. Assessment of the UV camera sulfur dioxide retrieval for point source plumes[J]. *Volcanology and Geothermal Research*, 2009, 188: 358-366.
- [102] NADEAU P A, PALMA J L, WAITE G P. Linking volcanic tremor, degassing, and eruption dynamics via SO_2 imaging[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L01304.
- [103] PALMA J L, CALDER E S, BASUALTO D, et al. Correlations between SO_2 flux, seismicity, and outgassing activity at the open vent of Villarrica volcano, Chile[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: B10201.
- [104] KUMAGAI H, CHOUET B A. Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 25493-25512.
- [105] SYMONDS R B, ROSE W I, BLUTH G J S, et al. Volcanic-gas studies: methods, results, and applications[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1994, 30: 1-66.
- [106] GERLACH T M. Evaluation and restoration of the 1970 volcanic gas analyses from Mount Etna, Sicily[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1979, 6: 165-178.
- [107] GIGGENBACH W F, MARTINI M, CORAZZA E. The effects of hydrothermal processes on the chemistry of some recent volcanic gas discharges[J]. *Periodico Di Mineralogia*, 1986, 55: 15-28.
- [108] GIGGENBACH W F. Chemical composition of volcanic gases [C]//SCARPA R, TILLING R I. *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 221-256.
- [109] GIGGENBACH W F, TEDESCO D, SULISTIYO Y, et al. Evaluation of results from the fourth and fifth IAVCEI field workshops on volcanic gases, Vulcano island, Italy and Java, Indonesia[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2001, 108: 157-172.
- [110] TARAN Y A, ROZHKOV A M, SERAFIMOVA E K, et al. Chemical and isotopic composition of magmatic gases from the 1988 eruption of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1991, 46: 255-263.
- [111] ROWE G L, BRANTLEY S L, FERNANDEZ M, et al. Fluid-volcano interaction in an active stratovolcano: the crater lake system of Poas volcano, Costa Rica [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1992, 49: 23-51.
- [112] ALLARD P. The origin of hydrogen, carbon, sulphur, nitrogen and rare gases in volcanic exhalations: evidence from isotope geochemistry [C]//TAZIEFF H, SABROUX J C. *Forecasting Volcanic Events*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1983: 337-386.
- [113] GERLACH T M. Evaluation of volcanic gas analyses from Kilauea volcano[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1980, 7: 295-317.
- [114] DEHN J, DEAN K, ENGLE K. Thermal monitoring of North Pacific volcanoes from space[J]. *Geology*, 2000, 28: 755-758.

- [115] GARCÉS M A, FEE D, MATOZA R. Volcano Acoustics, (Chapter 16)[C]//FAGENTS S A, GREGG T K P, LOPEZ R M C. Modeling Volcanic Processes: The Physics and Mathematics of Volcanism[M]. New York: Cambridge University Press, 2013: 359-383.
- [116] DEL NEGRO C, CURRENTI G, NAPOLI R, et al. Volcano-magnetic changes accompanying the onset of the 2002~2003 eruption of Mt. Etna (Italy)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 229: 1-14.
- [117] BATTAGLIA M, SEGALL P, ROBERTS C. The mechanics of unrest at long valley caldera, California: constraining the nature of the source using geodetic and micro-gravity data [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2003, 127: 219-245.
- [118] CARBONE D, ZUCCARELLO, SACCOROTTI G. Analysis of simultaneous gravity and tremor anomalies observed during the 2003-2003 Etna eruption[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 245: 616-629.
- [119] GLOBAL VOLCANISM PROGRAM. Report on Mayon (Philippines)[R]. Bulletin of the Global Volcanism Network, 18;1. Smithsonian Institution, 1993.
- [120] GLOBAL VOLCANISM PROGRAM, Report on Toya (Japan)[R]. Bulletin of the Global Volcanism Network, 25;3. Smithsonian Institution, 2000.
- [121] BOUDON G, LAJOIE J. The 1902 Peléean deposits in the Fort Cemetery of St. Pierre, Martinique: a model for the accumulation of turbulent nuées ardentes[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1989, 38(1/2): 113-129.
- [122] GLOBAL VOLCANISM PROGRAM. Report on Nevado del Huila (Colombia)[R]. Smithsonian Institution, Bulletin of the Global Volcanism Network, 2008, 33;1.
- [123] AIUPPA A, BURTON M, MURE F, et al. Inter-comparison of volcanic gas monitoring methodologies performed on Vulcano Island, Italy[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(2): L02610.
- [124] MCGONIGLE A J S, AIUPPA A, GIUDICE G, et al. Unmanned aerial vehicle measurements of volcanic carbon dioxide fluxes [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (6): L06303.
- [125] SHINOHARA H. Composition of volcanic gases emitted during repeating Vulcanian eruption stage of Shinmoedake, Kirishima volcano, Japan[J]. Earth Planets and Space, 2013, 65(6): 667-675.
- [126] 藤田英輔, 魏费翔. 日本活动火山监测与减灾[J]. 城市与减灾, 2018(5): 78-83.
- FUJITA E, WEI F X. Active volcano monitoring and mitigation in Japan[J]. City and Disaster Reduction, 2018(5): 78-83.
- [127] WEI H Q, LIU G M, GILL J. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: implications for possible future eruptions[J]. Bulletin of Volcanology, 2013, 75: 1-14.
- [128] 邹海波, 郭紫佩, 樊祺诚, 等. 中国东部全新世火山的锶-钍同位素年代学[J]. 岩石学报, 2020, 36(7): 1945-1952.
- ZOU H B, GUO Z P, FAN Q C, et al. Holocene volcanoes from eastern China: Constraints from Ra/Th isotope disequilibrium [J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(7): 1945-1952.
- [129] 郭正府, 李晓惠, 张茂亮. 火山活动与深部碳循环的关系[J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 497-505.
- GUO Z F, LI X H, ZHANG M L. Volcanic activities and deep carbon cycle[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(3): 497-505.
- [130] XU J D, OPPENHEIMER C, HAMMOND J, et al. Active Volcanoes of China[M]. London: Geological Society, Special Publications, 2021: 1-14.
- [131] 郭正府, 张茂亮, 成智慧, 等. 中国大陆新生代典型火山区温室气体释放的规模及其成因[J]. 岩石学报, 2014, 30(11): 3467-3480.
- GUO Z F, ZHANG M L, CHENG Z H, et al. Fluxes and genesis of greenhouse gases emissions from typical volcanic fields in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(11): 3467-3480.
- [132] 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]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(16): L16305.
- [133] 闫欢欢, 王后茂, 王维和, 等. 高分五号大气痕量气体差分吸收光谱仪观测数据的火山喷发 SO₂ 总量反演[J]. 遥感学报, 2021, 25(11): 2326-2338.
- YAN H H, WANG H M, WANG W H et al. Volcanic SO₂ retrieved from GF-5 Environmental trace gas Monitoring Instrument[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(11): 2326-2338.
- [134] 陈国许, 单新建, MOON W M, 等. 基于 In SAR、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.
- CHEN G H, SHAN X J, 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]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 51(4): 1085-1092.
- [135] JI L Y, XU J D, WANG Q L, et al. Episodic Deformation at Changbaishan Tianchi Volcano, Northeast China during 2004 to 2010, Observed by Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 073499.
- [136] 何平, 许才军, 温扬茂, 等. 利用 PALSAR 数据研究长白山火山活动性[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(2): 214-221.
- HE P, XU C J, WEN Y M, et al. Estimating the Magma Activity of the Changbaishan Volcano with PALSAR Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(2): 214-221.
- [137] 季灵运, 王庆良, 崔笃信, 等. 利用 SBAS-DIn SAR 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): 149-153, 159.
- JI L Y, WANG Q L, CUI D X, et al. Time Series of deformation in Tengchong volcanic area extracted by SBAS-DInSAR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(4): 149-153, 159.
- [138] JI L Y, HU Y, WANG Q, et al. Large-scale Deformation Caused by Dyke Intrusion Beneath Eastern Hainan Island, China Observed Using In SAR[J]. *Journal of Geodynamics*, 2015, 88: 52-58.
- [139] 季灵运, 许建东, 赵波, 等. 利用 In SAR 技术研究新疆阿什库勒火山群现今活动性[J]. *地震地质*, 2013, 35(3): 532-541.
- JI L Y, XU J D, ZHAO B, et al. Present-day activity of ashikule volcanic group from InSAR[J]. *Seismology and Geology*, 2013, 35(3): 532-541.
- [140] BELL A, KILBURN C, MAIN I. Volcanic eruptions, real-time forecasting of. *Encyclopedia of earthquake engineering*[M]. New York: Springer, 2016: 3892-3906.
- [141] POLAND M. Volcano monitoring from space[C]// LOUGHLIN S C, SPARKS R S J, BROWN S K, et al. *Global volcanic hazards and risk* [M]. 2015: 311-316.
- [142] MCCAFFREY R. The tectonic framework of the Sumatran subduction zone[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2009, 37(1): 345-366.
- [143] SIMKIN T, SIEBERT L. Global Volcanism Program. Smithsonian Institution [R]. Global Volcanism Program Digital Information Series, GVP-5, 2002, <http://www.volcano.si.edu/education/questions/>.
- [144] 高丽, 洪文涛, 杨祝良, 等. 浙东小雄破火山晚白垩世火山-侵入杂岩成因及岩浆演化[J]. *华东地质*, 2019, 40(3): 161-169.
- GAO L, HONG W T, YANG Z L, et al. Petrogenesis and magmatic process of Late Cretaceous volcano-intrusive complex from Xiaoxiong Caldrea, Eastern Zhejiang Province[J]. *East China Geology*, 2019, 40(3): 161-169.
- [145] 余明刚, 洪文涛, 钱迈平, 等. 浙东象山石浦生物礁灰岩时代厘定及其层位归属[J]. *华东地质*, 2021, 42(3): 260-268.
- YU M G, HONG W T, QIAN M T, et al. Geochronological definition on Shipu biohermal limestone and its regional stratigraphic attribution in Xiangshan, eastern Zhejiang Province[J]. *East China Geology*, 2021, 42(3): 260-268.
- [146] PAN B, CHENG T, XU J D, et al. Knowledge base of Cenozoic volcanoes in China[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2021, 510: 291-304.

Advances on volcano monitoring and its implications for volcanic hazards monitoring and early warning in China

DUAN Zheng, ZHANG Xiang, CHEN Rong, YU Minggang, CHU Pingli,
HONG Wentao, CAO Mingxuan

(*Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, 210016, Jiangsu, China*)

Abstract: A large number of Holocene active volcanoes are distributed in China and adjacent areas, leaving many eruption histories. Monitoring and researching these active volcanoes is a critical process to predict volcanic eruption and respond to volcanic hazards. According to the long-term geological mapping in the Late Mesozoic volcanoes region with deep denudation and the near real-time geophysical and geochemical detection on active volcanic area, the understanding on the composition characteristics, evolution and eruptive style of Mesozoic-Cenozoic continental volcanic rocks in eastern China is significantly enhanced, proving these volcanoes are ideal research objects for continental volcano monitoring. For another, the global volcanic monitoring developed rapidly in recent years with the rising concerns on volcano hazards. In this paper, the main methods and important progress of domestic and overseas continental volcanoes monitoring are systematically reviewed. Furthermore, the development trend of volcanic hazard reduction and prevention in the future, and the development direction of volcano monitoring in China are analyzed. The aim is to provide reference for future research and international cooperation on volcano monitoring, prediction, hazard prevention in China by introducing the work of international volcano monitoring.

Key words: volcano monitoring; active volcanoes; research progress; volcanic hazards; China