

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.415>



火山喷发机制、气候效应及火山地球工程

马昌前^{1,2}, 邹博文¹, 黄贵治¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430078

摘要: 火山是地球内部与表层系统连接的纽带, 是地球充满生机活力的体现. 减轻大型火山喷发对全球气候和环境的影响是地球科学的重大研究主题. 提出探索岩浆储库的累积组装和演变规律, 研究火山喷发的触发机制, 聚焦地球内、外层圈的相互作用, 认识火山活动与全球气候和表层环境变化的互馈关系, 构建火山地球工程的理论体系和技术框架, 是减轻火山灾害对全人类不利影响的关键. 其中, 基于岩浆动力学和火山学的岩浆通道系统研究, 将会为火山活动的预测和监测提供新的理论依据. 火山活动的影响是全球性的. 所以, 我们要抢占先机, 在深化火山喷发机制理论研究和构建减轻火山灾害影响的工程技术体系等方面有所作为.

关键词: 火山喷发; 火山冬天; 火山活动监测; 火山地球工程; 岩石学.

中图分类号: P58

文章编号: 1000-2383(2022)11-4114-08

收稿日期: 2022-08-29

Volcanic Eruption Mechanism, Climate Impacts and Volcano Geoengineering

Ma Changqian^{1,2}, Zou Bowen¹, Huang Guizhi¹

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

Abstract: Volcanoes are the link connecting the Earth's interior and surface systems and are seen as a sign of the vitality of the Earth. Mitigating the impact of large volcanic eruptions on Earth's climate and environment is a major topic in geosciences. In this paper we propose that in order to reduce the negative impact of volcanic disasters on all human beings, it is necessary to explore the incremental assembly and evolution of magma reservoirs, study the triggering mechanism of volcanic eruptions, focus on the interaction between the inner and outer layers of the Earth, and understand the feedback relationship between volcanic activity and global climate and surface environmental changes, and construct the theoretical system and technical framework of volcano geoengineering. Among them, the study of magma plumbing systems based on magma dynamics and volcanology will provide a new theoretical basis for the prediction and monitoring of volcanic activities. The influence of volcanic activity is global. Therefore, it must seize the opportunity to make progress in deepening the theoretical research on the mechanism of volcanic eruption and building an engineering technology system to reduce the impact of volcanic disasters.

Key words: volcano eruption; volcanic winter; monitoring volcanic activities; volcano geoengineering; petrology.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos.42130309, 41972066).

作者简介: 马昌前 (1958-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩石学、岩浆动力学、地球系统科学的教学与研究工作. ORCID: 0000-0002-1778-0547.
E-mail: cqma@cug.edu.cn

引用格式: 马昌前, 邹博文, 黄贵治, 2022. 火山喷发机制、气候效应及火山地球工程. 地球科学, 47(11):4114-4121.

Citation: Ma Changqian, Zou Bowen, Huang Guizhi, 2022. Volcanic Eruption Mechanism, Climate Impacts and Volcano Geoengineering. *Earth Science*, 47(11):4114-4121.

0 引言

岩浆是地球的血液,火山是连接地球内部与表层系统的纽带,是地球具有生机活力的体现.火山和岩浆活动不仅导致了地球的分异,形成了大气圈,而且是地球环境和气候变化的强大驱动力.

全球有 1 500 座活火山(即 1 万年内喷发过的),有史以来记录的火山喷发约 600 座,每年有 50~70 座/次火山喷发.几千年来,火山灾害已经夺走了超过 100 万人的生命.我国的东北地区(例如,五大连池、阿尔山、镜泊湖、长白山等)、台湾地区(例如大屯、龟山岛)、琼北海口、云南腾冲等都是活火山分布区.根据对两极冰芯的研究,火山爆发指数(VEI)达到 7 级的喷发大约相隔 625 年出现一次,VEI8 的超级喷发大约每 14 300 年发生 1 次(Lin *et al.*, 2022).已知离现在最近的 VEI8 超级喷发是约 2.56 万年前的新西兰陶波火山喷发,喷发物体积达 $1\ 170\ \text{km}^3$,此次喷发直接导致新西兰怀卡托北岛毁灭,喷出的火山灰在大气中多年才消散;而 7.4 万年前印度尼西亚苏门答腊北部的多巴超级火山(VEI8),喷发物体积更是超过了 $2\ 800\ \text{km}^3$,造成了 6~10 年的火山冬天,险些导致人类灭绝.在几乎同一时期,还出现了 VEI8 的美国黄石越桔梅岭(Huckleberry Ridge)超级喷发,喷发体积达到了 $2\ 450\ \text{km}^3$ (该火山的喷发时间有 7.4 万年和 210 万年两种说法).最近一次 VEI7 喷发,是 1815 年 4 月的印度尼西亚坦博拉火山喷发.该火山向 44 km 高空的平流层注入了 60~80 万亿吨的 SO_2 ,喷发物体积为 $160\sim 180\ \text{km}^3$,导致当地超 20 万人死亡(Wirakusumah and Rachmat, 2017),全球气温平均下降 $1\ ^\circ\text{C}$,并经历了 3 年以上的无夏之年,农作物大范围歉收,饥荒遍布全球,暴力和流行病频发,甚至改写了中国和人类的历史进程.而根据从格陵兰和南极洲冰芯提取的信息,在过去的 11 500 年中,总共有 26 次火山喷发向平流层注入了比 1815 年坦博拉大喷发更多的硫酸盐.这表明,在全球范围内,VEI7 以上的火山喷发频率是以前认为的两倍以上(Sigl *et al.*, 2022),也说明还可能有一些离现在较近的 VEI8 和 VEI7 大喷发尚未被发现.

今年 1 月,南太平洋岛国汤加的洪加汤加-洪加哈阿派发生剧烈的火山喷发,不仅造成了严重的生命财产损失,使汤加的国内生产总值损失了 18.5%,爆炸产生的冲击波和海啸更是波及全球,产生的巨

大火山灰柱上升到了大气圈 58 km 高空,并将大约 1.46 亿吨的水(可装满 58 000 个奥林匹克游泳池)注入到平流层(Cassidy and Mani, 2022; Millán *et al.*, 2022).据估计,该火山达到 VEI6,是近 30 年来最大的一次喷发(Poli and Shapiro, 2022).如果规模更大,对全球贸易、能源和粮食供应、关键基础设施、水和食品安全以及金融体系都将造成不可估量的负面影响(Cassidy and Mani, 2022).

汤加火山喷发给人类敲响了警钟.从冰芯收集到的关于长时间喷发频率的数据来看,在未来 100 年内发生 VEI7 以上剧烈火山喷发的概率为 17%(Cassidy and Mani, 2022).火山活动造就了生命支撑系统,在带给人类巨大的财富和资源的同时,也会瞬间将火山灰云注入大气圈而对全球气候产生重要影响,是生物大灭绝和灾害性气候的罪魁祸首,并多次改变了人类社会的发展进程.人类必须立即行动起来,做好减轻大型火山甚至超级火山喷发对全球影响的准备.研究火山喷发机制及其气候效应,积极采取行动,预防火山喷发带来的灾害效应,已经成为地球科学服务全人类的重要任务.

1 火山喷发的触发机制

火山系统是复杂和动态的,许多过程可能同时发生.活火山下面的岩浆储库(包括晶粥体和岩浆房)与周围的岩石在很大程度上处于一种微妙的重力平衡状态,许多因素都可能导致它们的不稳定和随后的喷发活动(Lockwood and Hazlett, 2010; 马昌前等, 2020).触发喷发的内因主要与增加岩浆体内部的浮力和流动性的过程有关,同时受火山系统的外部因素所制约(图 1).

岩浆储库含有足够多的热和具有流动性的岩浆,就能为岩浆提供足够的能量到达地表,也为火山喷发提供物质(Caricchi *et al.*, 2021).新的研究表明,许多大型侵入体是多批次岩浆脉动、累积添加和组装而成的(马昌前等, 2020 及其中的文献),意味着,岩浆储库的形成也不是一蹴而就的,而是逐渐生长组装的产物.在储库组装过程中,就有可能增加岩浆系统的热和流动性,促进内部超压.而要触发火山喷发,岩浆系统内部就需要有以下一种或多种方式参与:(1)岩浆补给是岩浆储库加压和不稳定的主要驱动力,尤其是幔源高温岩浆注入,对储库产生再加热作用,可以使晶粥发生重熔,延长晶粥保持液相的时间,增大熔体迁移和喷发的可能

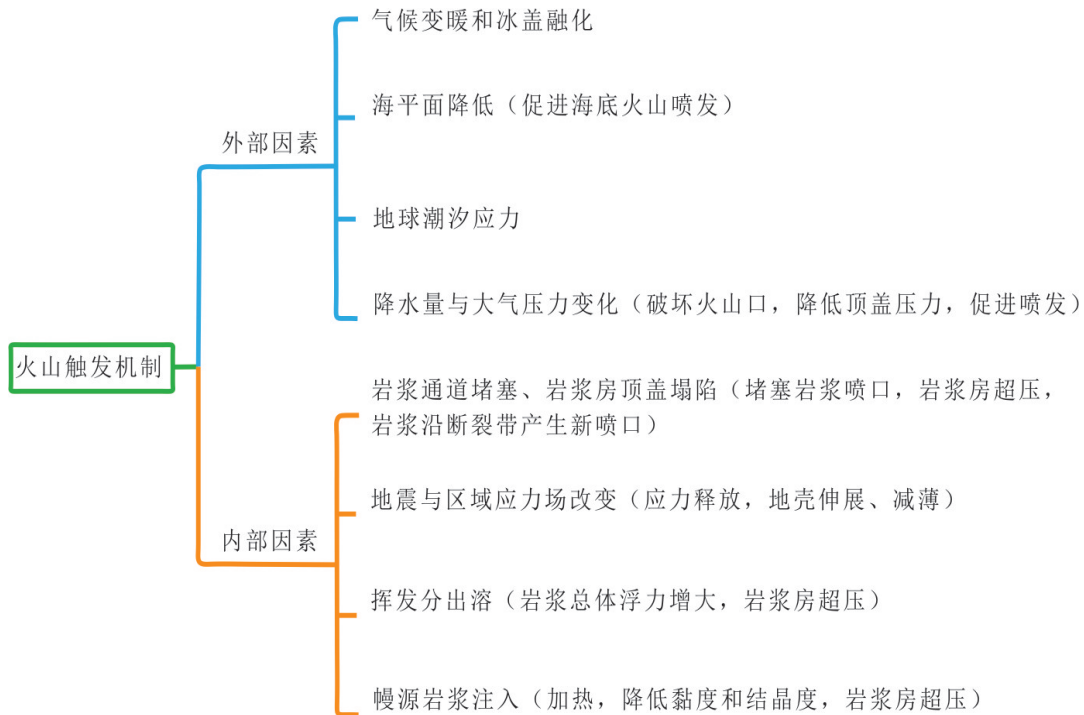


图 1 火山喷发的主要触发机制

Fig. 1 Major triggering mechanisms of volcano eruption

性,也可能控制着火山喷发的方式(Ruprecht and Bachmann, 2010; Sigmundsson *et al.*, 2010; Sliwinski *et al.*, 2017; Garibaldi *et al.*, 2018);(2)幔源岩浆的加热和挥发分的出溶,不仅增大了岩浆浮力,而且产生岩浆房超压,影响着岩浆的行为.增加岩浆中包含的挥发分(水)不仅可以降低其黏度、密度、结晶度、液相线温度等,也可以延长岩浆保持液相时间,增加岩浆喷发的可能性(Pistone *et al.*, 2017; Hartung *et al.*, 2019; Utami *et al.*, 2021);(3)由于岩浆补给、构造挤压或挥发分累积等导致的岩浆储库内增压,有利于火山熔体迁移和岩浆喷发(Degruyter *et al.*, 2017; Garibaldi *et al.*, 2018; Humphreys *et al.*, 2021; 田京京等, 2021; 周逍遥等, 2021);(4)岩浆的温度和挥发分含量的变化,直接影响到岩浆的结晶度.而岩浆的结晶度影响着储库内部的孔隙度、渗透率、密度、流变学特征等,进而限制了熔体和晶体的相对运动,同时,过高或过低的结晶度都不利于熔体发生分离(Dufek and Bachmann, 2010; Bachmann and Huber, 2019; Carter *et al.*, 2021).可见,岩浆的温度、结晶度和挥发分含量,不仅影响岩浆的流变学性质,而且也控制了岩浆是上升还是停止、是爆发还是溢流(Parmigiani *et al.*, 2016; Di Genova *et al.*, 2017; Langhammer *et al.*, 2021; Rasmussen *et al.*,

2022);(5)岩浆房顶盖和火山口塌陷,会堵塞岩浆上升通道,导致岩浆房的构造超压,岩浆就可能沿断裂带运移,产生新的火山口并喷出地表.冰岛的Holuhraun火山就是老火山口塌陷后,在横向上远离储库40余公里外产生新火山喷口的实例(Gudmundsson *et al.*, 2016).此外,岩浆储库的深度、岩浆房顶盖的强度及完整性(有没有裂隙等)、早期喷发通道堵塞程度(包括充填物的岩性、通道长度)等因素也可能对喷发过程和方式产生影响.

在外因方面,已经认识到,地球表层环境和气候变化也会影响和触发火山的喷发.尤其在过去的20年里,加深了与冰川循环相关的冰和水分布的变化对火山喷发影响的认识:包括对地幔熔融、地壳岩浆作用和喷发速率的影响,提出了气候变化影响喷发过程的新假设,认识到地表和大气条件对喷发方式和火山灰柱上升过程有明显影响,而大气环流和降水的变化也可能影响到火山灰的生命周期(Aubry *et al.*, 2022).在活火山区,大规模的冰川融化会加剧火山活动.在冰岛,与较早的寒冷冰期相比,末次冰期结束后的平均喷发率高达100倍.即冰盖较厚时,火山喷发较少,1~3 km的冰层厚度就会使冰覆盖的火山延迟数年至数十年才喷发(Lucas *et al.*, 2022);而冰川消融,会加快火山喷发的进

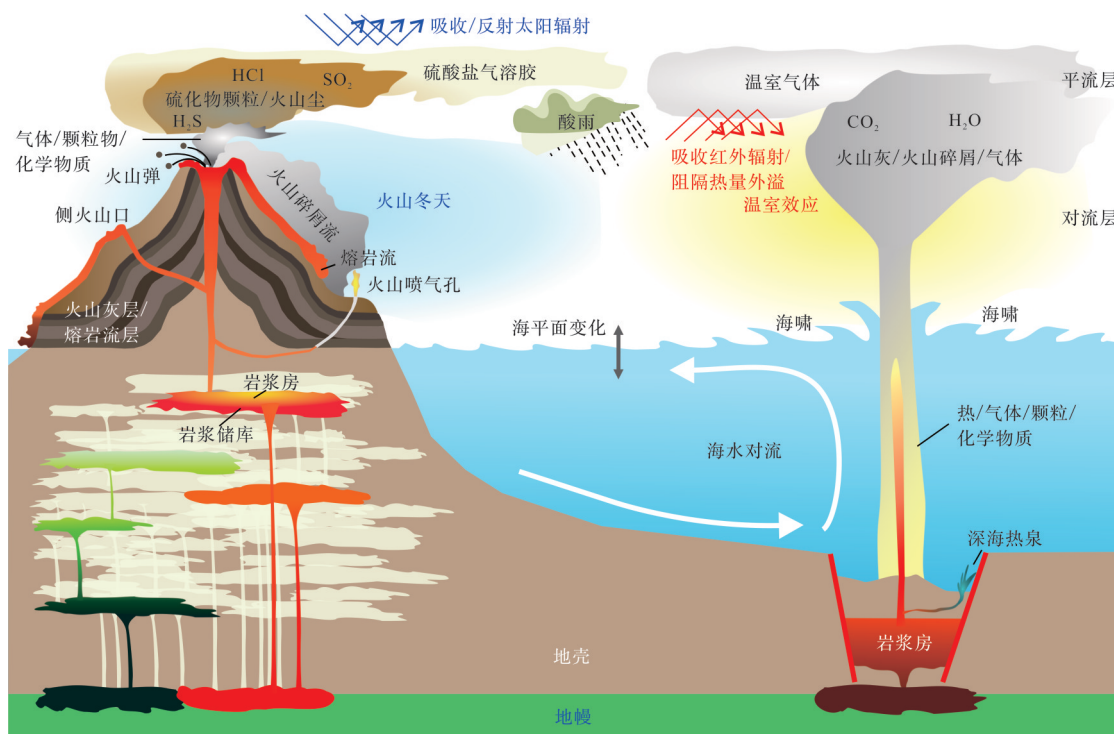


图2 岩浆通道系统与火山-气候效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of magma plumbing systems and volcanic-climate impacts

程.这是由于,随着冰川和冰盖的融化,地球表面的压力减小,作用在地圈内岩石上的力(应力)也发生了变化,从而改变岩浆房的状态,引发更多的喷发(Tuffen, 2010; Lucas *et al.*, 2022).海平面降低、潮汐应力变化甚至降水量的变化,都会对埋深较浅的岩浆房产生影响,并诱导更多的火山喷发(Satow *et al.*, 2021).总之,“气候-火山效应”问题,正成为一个新兴的研究方向(Aubry *et al.*, 2022).

2 火山喷发的气候效应

与“气候-火山效应”相对应的是“火山-气候效应”问题,即研究火山喷发对气候的影响(Aubry *et al.*, 2022).大型火山喷发往往伴随着巨量有害气体的释放,例如二氧化硫、硫化氢等.这些酸性气体进入平流层后会和空气混合,形成酸雨.同时,含硫气体被氧化成硫酸盐气溶胶后,会在全球范围内扩散,吸收或阻拦太阳辐射,造成全球降水减少,干旱频发,导致无夏之年或火山冬天(图2; Zuo *et al.*, 2022).相反地,火山喷发出的大量二氧化碳和水蒸气改变了地球的大气层,导致了过度的温室效应和全球变暖,并引起海洋循环减慢、缺氧和海水酸化(图2; Liu *et al.*, 2020; Racki, 2020).显生宙生物大

灭绝正是这些全球尺度的气候变化的结果.虽然强烈的火山喷发会造成气候灾害,但长期看,其具有调节气候的效应.一方面,这些火山喷发出大量的二氧化碳,增加了大气中的二氧化碳水平,另一方面,这些火山也通过快速的风化作用帮助消化了碳,稳定了地球表面的温度,进而调节地质时期的全球气候情况(Gernon *et al.*, 2021).火山作用导致的全球气候变化程度和火山喷发强度呈正比,而火山喷发强度往往取决于岩浆瞬时通量大小、岩浆储库超压状态、挥发分含量、岩浆的结晶度等众多因素.因此,研究火山喷发机制也有益于认识火山活动的气候效应,有助于开展火山活动的预测和监测.

根据 USGS 的统计资料,不同构造环境火山气体组成有所不同.例如,汇聚板块边缘和离散板块边缘环境的火山气体均以水蒸气占主导,但后一环境中还含有较多的 CO₂ 和 SO₂.相反,夏威夷热点火山中,水蒸气和 CO₂ 的含量相当,也有五分之一左右的 SO₂ 气体.未来,对不同环境、不同岩浆类型的火山气体开展研究,迫在眉睫.

近年来,由于卫星观测技术的改进,能够对小型火山爆发的气候影响进行量化研究,获得了来自地面、气球和卫星测量的火山二氧化硫、硫酸盐气溶胶和气溶胶消光的综合数据集,特别是有关两极

冰芯和树木年轮等的研究在重建过去火山爆发的影响方面取得了重要进展,认识到火山的气候效应是多方面的,包括大气动力学变化、臭氧层消耗、降水减少、较弱的季风、海洋热量降低、热带辐合带位置的变动、海冰增加、大西洋经向翻转环流和大西洋多年代际变率的变化、碳循环的变化等(Marshall *et al.*, 2022).通常认为,温带火山喷发在推动大规模地表冷却方面不如热带喷发有效.然而,最近的研究表明,小规模火山喷发对气候也很重要,高纬度地区的小型喷发可显著影响北半球气候,产生比热带同等规模喷发更强的半球降温(Toohey *et al.*, 2019).但有关火山喷发对热带水文气候和北半球冬季气候的影响,以及喷发在长期气候变化中的作用认识还远远不够.此外,不同的火山喷发方式对地球环境和气候的影响的研究也非常薄弱,需要将岩浆过程与表层层圈的相互作用作为关键科学问题开展研究.例如,爆发式喷发与溢流式喷发产生的火山灰体积和熔岩体积有显著差异.其中,爆发式火山喷发产生的大量火山灰、火山颗粒进入到平流层,在全球范围内扩散,就会导致太阳辐射被反射而无法抵达地表,造成数年的火山冬天,而大量的二氧化碳等温室气体的排放,又产生极端炎热的天气,严重影响生态和生物圈平衡(Racki, 2020).海底火山喷发,更是直接影响到水圈和海洋生态.而没有纳入到超级火山范围的大火成岩省,喷发的溢流玄武岩体积巨大(例如,大约2.5亿年前西伯利亚暗色岩省的喷发体积达到了5百万 km^3),被认为是地球历史上包括恐龙灭绝在内的5次生物大灭绝的罪魁祸首(Green *et al.*, 2022).从今年汤加火山喷发来看,尽管估计的 SO_2 排放很低($\sim 0.4 \text{ Tg}$),没有导致全球降温,但这次喷发对于深入研究火山灰柱中的火山灰、水、冰、卤素和硫之间的相互作用以及对区域天气的影响提供了契机(Marshall *et al.*, 2022),也提醒我们应加强海底火山喷发机制和环境效应的深入研究.

3 火山地球工程

地球工程一词,目前广泛用于太阳地球工程(solar geoengineering)中,是指人为模仿火山喷发向平流层注入二氧化硫等含硫气体,反射太阳光,而对地球的气候系统实施大规模干预的技术,以达到抵消温室气体对全球变暖影响的目的,又称太阳辐射干预(solar radiation modification)(Irvine *et al.*,

2016; Reynolds, 2019).目前的研究认为,太阳地球工程能够减少极端温度和降水的频率和强度,减缓北极海冰和山岳冰川以及格陵兰和南极冰盖的融化速度,减缓海平面上升,减少土壤水分的散失,对降低大气中二氧化碳浓度可起到一定的作用,在技术上有一定的可行性.然而,也有很多人认为,这种做法可能产生意外的气候变化,带来新的生物物理和社会风险(Felgenhauer *et al.*, 2022).

最近,Cassidy and Mani(2022)提出了火山地球工程(volcano geoengineering)的概念.他们认为,一是要研究如何应对大规模喷发释放气溶胶的问题,二是要对活火山区进行深入调查,制定穿透地壳岩浆囊的方案,人为干预岩浆喷发过程,从源头上减少火山喷发带来的危害.

我们认为,探索火山地球工程的方案,需要以解剖岩浆储库为基础.在活火山区,即将在冰岛实施的克拉夫拉岩浆试验台计划(Krafla Magma Testbed, KMT)是一个重要的创举(Eichelberger, 2019).冰岛拥有大约30个活火山系统,其中的活火山大约130座,是建造地下岩浆观测站的理想地点.2009年,在扩建克拉夫拉地热发电厂时,在冰岛东北部克拉夫拉火山中心之下2.1 km深处意外钻到了一个温度达 900°C 的岩浆囊.火山学家对此进行了调查,发现该岩浆囊的体积达5亿立方米.因此,在2014年,启动了KMT项目.该项目计划耗资1亿美元,将有来自美国、英国、法国等11个国家38个研究机构和公司的科学家和工程师参与,于2024年开始实施第一次钻探,并计划钻进2 km以下的岩浆囊内,建立长期岩浆观测站,安装测试传感设备,以改进火山预测技术.该研究也有助于探索如何操纵岩浆囊或周围的岩石,以降低火山喷发的爆炸性.其中,欧洲理事会将于2026年对其中的一个项目给予资助,即研究火山喷发和地热勘探过程中的岩浆脱气.

虽然已有直接观察地壳浅部岩浆储库的计划,但要直接系统研究穿地壳岩浆系统与活火山的关系,在短期内仍然是无法实现的.因此,必须要重视古岩浆-火山通道系统的研究,才有可能完整认识穿地壳岩浆系统的形成演化规律.在国家自然科学基金资助下,本项目组正从古火山通道系统视角,研究侵入系统与火山系统的耦合关系,通过侵入体组装机理解剖,重点考察岩基如何生长及岩基生长如何控制火山喷发的问题,聚焦岩浆储库提供喷发

物质、产生喷发动力和控制火山口定位三方面,寻找有关火山喷发触发机制的线索。

4 结语

从古至今,人类生存和气候变化息息相关。任何一地的大型火山喷发,都可能殃及全人类,破坏我们赖以生存的地球环境,甚至导致人类文明的崩溃。尽管地球科学对火山喷发机制的研究已经深入到火山通道系统内部,并开始重视地球内外层圈之间的相互作用关系,不断深化火山活动规律及其气候和环境效应的认识,但我们离把握火山活动规律,构建应对火山灾害影响的理论、技术和政策体系,有效减轻火山灾害的负面影响,还有很长的路要走。加强火山喷发机制理论研究,构建监测、预警和减轻火山灾害影响的地球工程技术体系,已经迫在眉睫。在全球兴起火山活动机制与火山地球工程研究热潮的大背景下,中国不能缺席。

致谢:西北大学张成立教授、中国地质科学院薛怀民研究员提出了宝贵的修改意见,谨致谢忱!谨以此文哀悼中国地质大学教授、第一作者的硕士研究生导师王人镜先生(1936年3月17日—2022年10月11日)!

References

- Aubry, T. J., Farquharson, J. I., Rowell, C. R., et al., 2022. Impact of Climate Change on Volcanic Processes: Current Understanding and Future Challenges. *Bulletin of Volcanology*, 84(6): 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01562-8>
- Bachmann, O., Huber, C., 2018. The Inner Workings of Crustal Distillation Columns: The Physical Mechanisms and Rates Controlling Phase Separation in Silicic Magma Reservoirs. *Journal of Petrology*, 60(1): 3–18. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy103>
- Caricchi, L., Townsend, M., Rivalta, E., et al., 2021. The Build-up and Triggers of Volcanic Eruptions. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2: 458–476.
- Carter, L.C., Williamson, B.J., Tapster, S.R., et al., 2021. Crystal Mush Dykes as Conduits for Mineralising Fluids in the Yerington Porphyry Copper District, Nevada. *Communications Earth & Environment*, 2(1): 1–11.
- Cassidy, M., Mani, L., 2022. Prepare Now for Big Eruptions. *Nature*, 608: 469–471. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-02177-x>
- Degruyter, W., Huber, C., Bachmann, O., et al., 2017. Influence of Exsolved Volatiles on Reheating Silicic Magmas by Recharge and Consequences for Eruptive Style at Volcán Quizapu (Chile). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(18): 4123–4135.
- Di Genova, D., Kolzenburg, S., Wiesmaier, S., et al., 2017. A Compositional Tipping Point Governing the Mobilization and Eruption Style of Rhyolitic Magma. *Nature*, 552(7684): 235–238.
- Dufek, J., Bachmann, O., 2010. Quantum Magmatism: Magmatic Compositional Gaps Generated by Melt-Crystal Dynamics. *Geology*, 38: 687–690.
- Eichelberger, J., 2019. Planning an International Magma Observatory. *EOS*, 100. <https://doi.org/10.1029/2019EO125255>
- Felgenhauer, T., Bala, G., Borsuk, M., et al., 2022. Solar Radiation Modification: A Risk-Risk Analysis. Carnegie Climate Governance Initiative (C2G), New York.
- Garibaldi, N., Tikoff, B., Schaen, A.J., et al., 2018. Interpreting Granitic Fabrics in Terms of Rhyolitic Melt Segregation, Accumulation, and Escape via Tectonic Filter Pressing in the Huemul Pluton, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 10(123): 8548–8567.
- Gemon, T. M., Hincks, T. K., Merdith, A. S., et al., 2021. Global Chemical Weathering Dominated by Continental Arcs since the Mid-Palaeozoic. *Nature Geoscience*, 14(9): 690–696.
- Green, T., Renne, P.R., Keller, C.B., 2022. Continental Flood Basalts Drive Phanerozoic Extinctions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(38): e2120441119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2120441119>
- Gudmundsson, M. T., Jonsdottir, K., Hooper, A., et al., 2016. Gradual Caldera Collapse at Bárðarbunga Volcano, Iceland, Regulated by Lateral Magma Outflow. *Science*, 353(6296): aaf8988.
- Hartung, E., Weber, G., Caricchi, L., 2019. The Role of H₂O on the Extraction of Melt from Crystallising Magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 508: 85–96.
- Humphreys, M. C., Smith, V. C., Coumans, J. P., et al., 2021. Rapid Pre-Eruptive Mush Reorganisation and Atmospheric Volatile Emissions from the 12.9 ka Laacher See Eruption, Determined Using Apatite. *Earth and Planetary Science Letters*, 576: 117198.
- Irvine, P.J., Kravitz, B., Lawrence, M.G., et al., 2016. An Overview of the Earth System Science of Solar Geoengineering. *WIREs Climate Change*, 7: 815–833. <https://doi.org/10.1002/wcc.423>

- Langhammer, D., Di Genova, D., Steinle-Neumann, G., 2021. Modeling the Viscosity of Anhydrous and Hydrous Volcanic Melts. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(8): e2021GC009918.
- Lin, J., Svensson, A., Hvidberg, C.S., et al., 2022. Magnitude, Frequency and Climate Forcing of Global Volcanism during the Last Glacial Period as Seen in Greenland and Antarctic Ice Cores (60–9 ka). *Clim. Past*, 18: 485–506.
- Liu, F., Xing, C., Li, J. B., et al., 2020. Could the Recent Taal Volcano Eruption Trigger an El Niño and Lead to Eurasian Warming? *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(7): 663–670. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-2041-z>
- Lockwood, J.P. Hazlett, R. W., 2010. *Volcanoes: Global Perspectives*. Wiley-Blackwell, Hoboken.
- Lucas, L. C., Albright, J.A., Gregg, P.M., et al., 2022. The Impact of Ice Caps on the Mechanical Stability of Magmatic Systems: Implications for Forecasting on Human Timescales. *Frontiers in Earth Science*, 10: 868569. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.868569>
- Ma, C.Q., Zou, B.W., Gao, K., et al., 2020. Crystal Mush Storage, Incremental Pluton Assembly and Granitic Petrogenesis. *Earth Science*, 45(12): 4332–4351 (in Chinese with English abstract).
- Marshall, L. R., Maters, E. C., Schmidt, A., et al., 2022. Volcanic Effects on Climate: Recent Advances and Future Avenues. *Bulletin of Volcanology*, 84(5): 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01559-3>
- Millán, L., Santee, M. L., Lambert, A., et al., 2022. The Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Hydration of the Stratosphere. *Geophysical Research Letters*, 49(13): e2022GL099381. <https://doi.org/10.1029/2022gl099381>
- Parmigiani, A., Faroughi, S., Huber, C., et al., 2016. Bubble Accumulation and Its Role in the Evolution of Magma Reservoirs in the Upper Crust. *Nature*, 532(7600): 492–495. <https://doi.org/10.1038/nature17401>
- Pistone, M., Blundy, J., Brooker, R.A., et al., 2017. Water Transfer during Magma Mixing Events: Insights into Crystal Mush Rejuvenation and Melt Extraction Processes. *American Mineralogist*, 102: 766–776.
- Poli, P., Shapiro, N.M., 2022. Rapid Characterization of Large Volcanic Eruptions: Measuring the Impulse of the Hunga Tonga Explosion from Teleseismic Waves. *Geophysical Research Letters*, 49(8): e2022GL098123. <https://doi.org/10.1029/2022GL098123>
- Racki, G., 2020. Volcanism as a Prime Cause of Mass Extinctions: Retrospectives and Perspectives. In *Mass Extinctions, Volcanism, and Impacts: New Developments. Geological Society of America Special Paper*, 544: 1–34.
- Rasmussen, D. J., Plank, T. A., Roman, D. C., et al., 2022. Magmatic Water Content Controls the Pre-Eruptive Depth of Arc Magmas. *Science*, 375(6585): 1169–1172. <https://doi.org/10.1126/science.abm5174>
- Reynolds, J. L., 2019. Solar Geoengineering to Reduce Climate Change: A Review of Governance Proposals. *Proceedings Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 475(2229): 20190255. <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0255>
- Ruprecht, P., Bachmann, O., 2010. Pre-Eruptive Reheating during Magma Mixing at Quizapu Volcano and the Implications for the Explosiveness of Silicic Arc Volcanoes. *Geology*, 38(10): 919–922.
- Satow, C., Gudmundsson, A., Gertisser, R., et al., 2021. Eruptive Activity of the Santorini Volcano Controlled by Sea-Level Rise and Fall. *Nature Geoscience*, 14: 586–592. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00783-4>
- Sigl, M., Toohey, M., McConnel, J.R., et al., 2022. Volcanic Stratospheric Sulfur Injections and Aerosol Optical Depth during the Holocene (Past 11 500 Years) from a Bipolar Ice-Core Array. *Earth System Science Data*, 14: 3167–3196. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3167-2022>
- Sigmundsson, F., Hreinsdóttir, S., Hooper, A., et al., 2010. Intrusion Triggering of the 2010 Eyjafjallajökull Explosive Eruption. *Nature*, 468(7322): 426–430. <https://doi.org/10.1038/nature09558>
- Sliwinski, J. T., Bachmann, O., Dungan, M. A., et al., 2017. Rapid Pre-Eruptive Thermal Rejuvenation in a Large Silicic Magma Body: The Case of the Masonic Park Tuff, Southern Rocky Mountain Volcanic Field, CO, USA. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172(5): 1–20. <https://doi.org/10.1007/s00410-017-1351-3>
- Tian, J.J., Ding, F., Hao, S.L., et al., 2021. Petrogenesis of Acidic Volcanic Rocks in Sangxiu Formation, East-Central Segment of Tethyan-Himalaya: Response to Break-up of Eastern Gondwana Continent? *Earth Science*, 46(11): 3926–3944 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.363>
- Toohey, M., Krüger, K., Schmidt, H., et al., 2019. Disproportionately Strong Climate Forcing from Extratropical Explosive Volcanic Eruptions. *Nature Geoscience*, 12(2):

- 100–107. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0286-2>
- Tuffen, H., 2010. How Will Melting of Ice Affect Volcanic Hazards in the Twenty-First Century? *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 368(1919): 2535–2558. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0063>
- Utami, S. B., Costa, F., Lesage, P., et al., 2021. Fluid Fluxing and Accumulation Drive Decadal and Short-Lived Explosive Basaltic Andesite Eruptions Preceded by Limited Volcanic Unrest. *Journal of Petrology*, 62(11): egab086. <https://doi.org/10.1093/petrology/egab086>
- Wirakusumah, A.D., Rachmat, H., 2017. Impact of the 1815 Tambora Eruption to Global Climate Change. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 71: 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/71/1/012007>
- Zhou, X.Y., Zhang, Y.X., Zhang, J.H., et al., 2021. Petrogenesis of Early Paleocene Dengtong Volcanic-Plutonic Complex in Central Lhasa Terrane and Evolution of Crustal High-Silica Magma. *Earth Science*, 46(2): 474–488 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.073>
- Zuo, M., Zhou, T., Man, W., et al., 2022. Volcanoes and Climate: Sizing up the Impact of the Recent Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcanic Eruption from a Historical Perspective. *Advances in Atmospheric Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2034-1>

附中文参考文献

- 马昌前, 邹博文, 高珂, 等, 2020. 晶粥储存、侵入体累积组装与花岗岩成因. *地球科学*, 45(12): 4332–4351.
- 田京京, 丁枫, 郝盛蓝, 等, 2021. 特提斯喜马拉雅中东部桑秀组酸性火山岩岩石成因: 东冈瓦纳大陆裂解的响应? *地球科学*, 46(11): 3926–3944.
- 周逍遥, 张玉修, 张吉衡, 等, 2021. 拉萨地体中部古新世早期灯垌火山-侵入杂岩成因及地壳硅质岩浆演化. *地球科学*, 46(2): 474–488.