

多火山系统下的岩浆迁移模式—— 来自希腊圣托里尼和科伦博火山的地球物理观测约束

刘博达

中国科学院 地质与地球物理研究所, 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

摘 要: 希腊圣托里尼(Santorini)与科伦博(Kolumbo)火山虽相距仅15 km, 但所喷发岩浆的地球化学特征却存在显著差异。2025年1月以来, 两座火山表现出显著的动力学联动: 伴随着裂谷带下方持续一月有余的密集地震, 二者分别经历了地表隆升与沉降。针对这一多火山系统的岩浆运移与失稳机制, 近期国际上一项新研究利用高精度的机器学习地震目录及地表形变反演技术, 重建了此次动荡期间岩浆活动的时空轨迹。研究显示, 震群具有明显的向东北方向及浅部迁移特征(水平位移约30 km), 而且地震矩张量呈现出的正各向同性与补偿线性矢量偶极分量, 有力证实了岩浆沿岩墙侵入的过程。地表变形模拟约束了圣托里尼下方岩浆房膨胀、科伦博下方岩浆房收缩, 以及沿裂谷带侵入岩墙的岩浆量。其中, 侵入岩墙的岩浆体积(0.331 km^3)远远高于岩浆房体积的缩小量(0.076 km^3)。值得注意的是, 此次双火山系统呈现“膨胀-收缩”格局, 而区别于靠压力传递耦合的多火山系统, 揭示出构造应力与地壳薄弱带在岩浆侧向输运中的主导地位, 即“深部岩浆起源—浅部构造分流”的新模式。

关 键 词: 岩浆迁移; 大地测量; 震群; 地表变形模拟

中图分类号: P588.11; P631.4 文章编号: 1007-2802(2026)03-0955-04 doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20260030

A model for the magma migration beneath the multi-volcanic system: Constraints from the geophysical observations of the Santorini and Kolumbo volcanos in Greece

LIU Bo-da

State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100029, China

Abstract: Although the Santorini volcano is only approximately 15 km away from the Kolumbo volcano in Greece, geochemical signatures of the erupted magma of the Santorini volcano are obviously different from those of the Kolumbo volcano. However, since January 2025, these two volcanoes have shown dynamically linked behaviors. The Santorini volcano experienced the surface uplift while the Kolumbo volcano underwent the surface subsidence, accompanied by the continuous and intense earthquakes that lasted for more than a month beneath the rift zone. Regarding to the mechanisms of magma movement, and instability in this multi-volcano system, a recent international study has utilized the high-resolution machine-learning-derived seismic catalogs and the surface deformation inversion techniques to reconstruct temporal and spatial trajectories of magmatic activities during this seismic and volcanic upheaval. The results show that epicenters of the seismic swarm occurred in that period are gradually changed to the northeastward and upward directions with the time, with a final horizontal displacement straight distance of approximately 30 km. Moreover, the positive isotropy presented by the seismic moment tensor is consistent with the compensated linear vector dipole

收稿编号: 2026-0001, 2026-01-01 收到, 2026-01-26 改回

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项B(XDB0710000)

作者简介: 刘博达(1992—), 男, 副研究员, 研究方向: 地幔地球化学, 岩浆系统演化. email: bodaliu@mail.iggcas.ac.cn

引用此文:

刘博达. 2026. 多火山系统下的岩浆迁移模式——来自希腊圣托里尼和科伦博火山的地球物理观测约束. 矿物岩石地球化学通报, 45(3): 955–958

Liu B D. 2026. A model for the magma migration beneath the multi-volcanic system: Constraints from the geophysical observations of the Santorini and Kolumbo volcanos in Greece. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 45(3): 955–958

components, strongly confirming the intruding process of magma along a dike. The surface deformation modelings have constrained the expansion of a magma chamber beneath the Santorini volcano, the contraction of a magma chamber beneath the Kolumbo volcano, and the amount of magma that intruded along the rift zone to form the dike. Especially, the volume of magma for the intruded dike (0.331 km^3) was much larger than the reduced volume of the magma chamber (0.076 km^3). It is worth noting that this double volcano system exhibits an "expansion-contraction" pattern, which is different from the multi-volcano systems that are coupled through the pressure transmission. This reveals that the tectonic stress and pre-existing crustal weak zone played a dominant role in the lateral transport of magma, presnting a new model of "the deep origin of magma - the shallow structural diversion of magma".

Key words: magma migration; surface deformation; seismic swarms; surface deformation modeling

1 研究背景

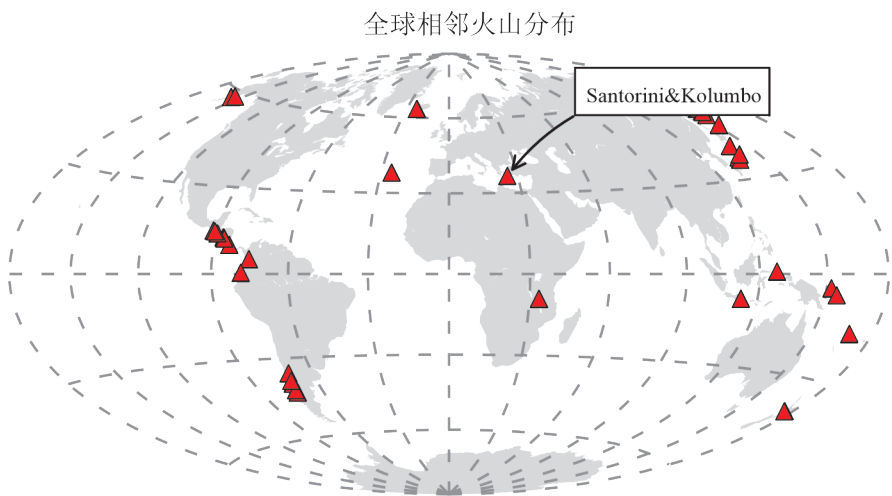
相邻火山在数天内相继喷发的频率显著升高,这是Manga和Brodsky(2006)通过统计全球火山数据得出的结论(图1)。尽管统计规律明显,但要厘清岩浆在运移过程中如何与地壳储库及构造应力场发生耦合,进而准确预警,依然是地学界的难题。2025年初,希腊圣托里尼-科伦博火山系统出现了长达30多天的震群活动,并引发了显著的地表形变,希腊政府因此启动了紧急状态。该系统位于圣托里尼-阿莫尔戈斯裂谷带,历史上曾多次发生大规模爆炸性喷发(如公元前1600年的米诺斯、726年的卡美尼和1650年的科伦博)。此次两个火山中心(间距15 km)岩浆活动的同步增强,为我们剖析相邻火山间岩浆储存、输运及系统失稳的动力学关联提供了绝佳案例。

2 震群和地表变形揭示岩浆迁移模式

岩浆侵入往往是火山喷发的导火索,地表形变、

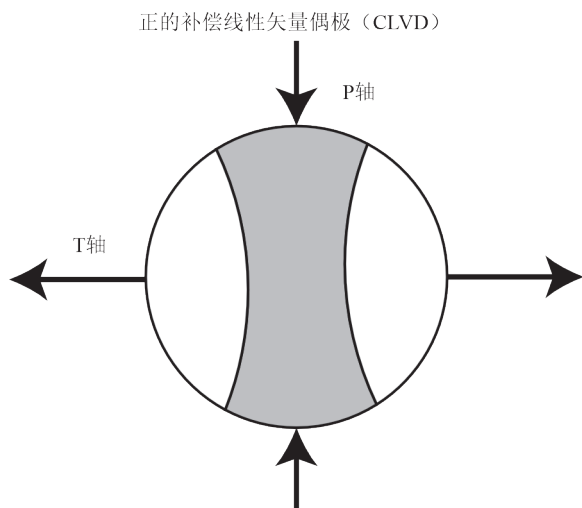
地震激增及气体逸出是其典型前兆。德国亥姆霍兹地学研究中心团队(Isken et al., 2025)利用机器学习算法构建了高分辨率地震目录,共识别出约3万次地震事件。震源机制解显示,这些地震多为北东走向的正断层型,与区域构造应力方向吻合,说明圣托里尼-阿莫尔戈斯构造带对地震活动起到了控制作用。从空间分布看,震群中心经历了两阶段的抬升(总体变浅约10 km),并呈现出从圣托里尼向科伦博方向(自西向东)约30 km的迁移特征。针对 M_w 3.6以上的180个强震事件,矩张量分析表明其T轴垂直于迁移路径。分解出的正各向同性分量(ISO)与补偿线性矢量偶极(CLVD)分量,分别对应体积膨胀与沿T轴的张裂(图2)。这些证据链共同指向了一个结论:震群岩浆沿北东走向岩墙注入并向北东迁移。

大地测量数据进一步刻画了岩浆的时空演化轨迹。GNSS与InSAR的时间序列显示,圣托里尼火山口在2024年下半年仅有缓慢隆升(约50 mm)。但进入2025年1月27日后,随着岩墙活动的启动,观测数据捕



图中所示为陆地上有历史喷发记录(VEI≥3)的86座相邻火山(相距20 km以内)。数据来源为史密森尼学会全球火山计划

图1 全球邻近火山的分布
Fig.1 Global distribution of neighboring volcanoes



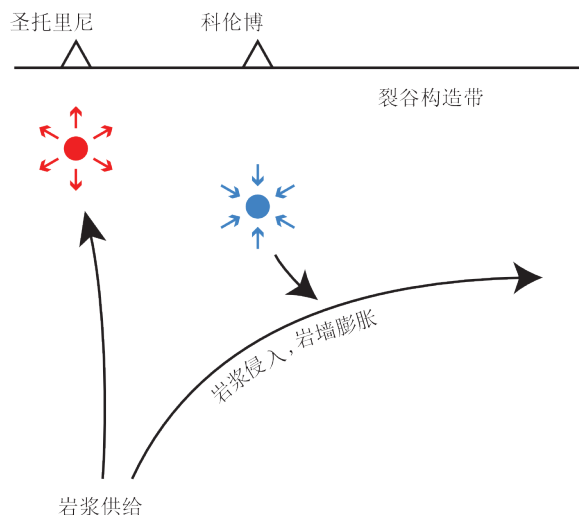
地震矩张量分解获得的T轴与裂谷构造带垂直。单一补偿线性矢量偶极的T轴拉伸量等于P轴收缩量两倍,故不产生体积增长。结合地震矩张量分解得到的正的各向同性分量(ISO)可知,此次震群活动是由岩浆侵入北东方向岩墙引发

图2 2025年1月27日开始的圣托里尼火山东部震群活动以正的补偿线性矢量偶极(CLVD)为特征

Fig.2 The earthquake swarm that began on January 27, 2025, in the eastern part of Santorini volcano is characterized by a positively compensated linear vector dipole (CLVD) component

提到了科伦博火山凹陷和后续的构造带区域隆升。研究人员利用点源(代表岩浆房)和矩形源(代表岩墙)模型重现了上述形变场。模拟结果指出:早期(2024年7月至2025年1月中旬)圣托里尼火山口隆升对应3.8 km深处岩浆房的微量膨胀(约0.004 km³);后期(2025年1月27日后)科伦博火山下方约7.6 km处的岩浆房体积则大幅收缩(约0.076 km³),同时构造带经历了5期次共0.331 km³的岩浆补充(图3)。通过分段分析地表形变,研究重建了岩浆沿北东走向岩墙侵入速率的演化规律。分段速率分析表明,岩浆注入在2月4日至12日达到洪峰(约200 m³/s),随后在2月底迅速衰减至停滞。需要指出的是,研究团队限定的岩墙位置和地震活动中心错位,多期次岩墙膨胀的时间也与地震活动激增的时间点错开。显然,仅依赖地表形变反演难以完全刻画深部岩浆运移过程。

地表形变反演的不确定性在全球多个火山案例中已得到验证。运用类似的地表形变反演方法,研究者发现2004年9月至2004年12月埃塞俄比亚达罗尔火山下方约2.4 km深度岩浆房体积缩小0.0018 km³,同时约0.058 km³岩浆侵入2~6 km深度南北走向的岩墙,并引发了裂谷带上一次M_w 5.5级地震(Nobile et al., 2012)。侵入岩墙的岩浆体积达到岩浆房缩小量的30倍。为了解释如此巨大的体积差异,有学者提出岩浆



该双火山系统位于北东向的圣托里尼-阿莫尔戈斯裂谷带内,两地相距约15 km。深部岩浆(>18 km)的注入首先引起圣托里尼岩浆房膨胀。紧接着,岩浆流向导致科伦博下方储库收缩,并驱动地震活动向北东方向扩展

图3 圣托里尼-科伦博火山带(2025年1至2月)的岩浆运输机制(据Isken et al., 2025修改)

Fig.3 A model for the supply and migration of magma for the Santorini-Kolumbo volcanic system in Greece from January to February 2025 (modified after Isken et al., 2025)

从岩浆房撤离后经历了去气和体积膨胀。

结合重力数据和大地测量可以约束深部岩浆系统的体积和质量增量,从而更好地确定含挥发分熔体的贡献。研究者发现,意大利埃特纳火山在2021年6月至7月期间的喷出物质量约为0.14亿t(Carbone et al., 2023),换算成岩浆体积约为5000万m³。然而,地表形变观测显示,火山下方约2.6 km深度的岩浆房体积仅减少了约230万m³。这一显著差异表明,重力数据所反映的质量亏损并非主要由熔体排空引起,而是源于岩浆脱气导致的整体密度降低。

3 相邻火山的联动机制

岩石地球化学证据指出圣托里尼和科伦博火山具有截然不同的源区特征和岩浆演化模式(Klaver et al., 2016)。一方面,科伦博火山的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb值较低(18.73~18.81),而圣托里尼火山的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb值较高(18.8~19.0,多数大于18.88)。另一方面,科伦博火山喷发岩浆中普遍存在黑云母,角闪石则常见于熔岩和包体中,并在浮岩中零星出现。相比之下,圣托里尼岩浆中较少见这两种矿物,其演化主要通过无水矿物组合的分离结晶作用进行(Druitt et al., 1999)。

尽管地球化学特征迥异,但这并不意味着两座火山在动力学上是孤立的。以夏威夷冒纳罗亚(Mauna

Loa)与基拉韦厄(Kīlauea)火山为例,Gonnermann等(2012)认为,深部软流圈的富熔体层可以作为压力传递介质,使相邻火山产生耦合。在该模型中,一个火山下方的压力变化可通过共有的深层高孔隙度熔体层传递,影响邻近火山的地壳储库。然而,这种耦合通常表现为同步膨胀,而2024—2025年圣托里尼-科伦博的地球物理观测显示出相反的形变模式:圣托里尼破火山口发生显著抬升,而科伦博下方则出现明显收缩。如此“膨胀-收缩”显然无法单纯用压力传递来解释。

综合震群路径与形变模型,本研究推测,岩浆起源于圣托里尼下方18 km深处,向上向北东穿过了地震波低速体(Autumn et al., 2025; Hufstetler et al., 2025)。更深处的岩浆迁移可能不引发地震因而没有被记录。深部岩浆的注入首先导致了圣托里尼下方储库的增压,随后在构造应力的引导下进入北东向岩墙。在此过程中,科伦博下方的岩浆房因与主侵入通道连通导致岩浆流失,进而引发地表塌陷。这次深部岩浆供给事件中沿岩墙侵入的岩浆量远远高于圣托里尼火山岩浆房的增量,说明构造应力(Liu et al., 2024)或薄弱带显著引导了岩浆的横向运移,形成“深部岩浆起源-浅部构造分流”的运输模式。

作者贡献声明: 作者保证本文无利益冲突。

致谢: 感谢朱弟成老师邀请撰写此简评。感谢审稿人的建议,极大提高了本文术语的准确性。

参考文献 (References):

Autumn K R, Hooft E E E, Toomey D R. 2025. Exploring mid-to-lower crustal magma plumbing of Santorini and kolumbo volcanoes using PmP tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 26(4): e2025GC012170

- Carbone D, Cannavò F, Montagna C P, Greco F. 2023. Gas buffering of magma chamber contraction during persistent explosive activity at Mt. Etna volcano. *Communications Earth & Environment*, 4: 471
- Druitt T H. et al. 1999. Santorini Volcano. The Geological Society, London, U. K
- Gonnermann H M, Foster J H, Poland M, Wolfe C J, Brooks B A, Miklius A. 2012. Coupling at Mauna Loa and Kīlauea by stress transfer in an asthenospheric melt layer. *Nature Geoscience*, 5(11): 826–829
- Hufstetler R S, Hooft E E E, Toomey D R, VanderBeek B P, Papazachos C B, Chatzis N. 2025. Seismic structure of the mid to upper crust at the Santorini-kolumbo magma system from joint earthquake and active source V_p - V_s tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 26(4): e2024GC012022
- Isken M P, Karstens J, Nomikou P, Parks M M, Drouin V, Rivalta E, Crutchley G J, Haghighi M H, Hooft E E E, Cesca S, Walter T R, Hainzl S, Saul J, Anastasiou D, Raptakis K, Shapiro N M, Münchmeyer J, Higuieret Q, Soubestre J, Brenguier F, Hufstetler R S, Autumn K R, Tsakiri M, Lange D, Kopp H, Urlaub M, Blanch Jover M, Preine J, Hübscher C, Motagh M, Müller D, Dahm T, Berndt C. 2025. Volcanic crisis reveals coupled magma system at Santorini and Kolumbo. *Nature*, 645(8082): 939–945
- Klaver M, Carey S, Nomikou P, Smet I, Godelitsas A, Vroon P. 2016. A distinct source and differentiation history for Kolumbo submarine volcano, Santorini volcanic field, Aegean arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(8): 3254–3273
- Liu B D, Qi C, Mitchell R N, Lee C A, Liu C Z. 2024. A model for melt-preferred orientation and permeabilities in deformed partially molten peridotites. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25(8): e2024GC011588
- Manga M, Brodsky E. 2006. Seismic triggering of eruptions in the far field: Volcanoes and Geysers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34: 263–291
- Nobile A, Pagli C, Keir D, Wright T J, Ayele A, Ruch J, Acocella V. 2012. Dike-fault interaction during the 2004 Dallol intrusion at the northern edge of the Erta Ale Ridge (Afar, Ethiopia). *Geophysical Research Letters*, 39(19): 2012GL053152