

太平洋火山特征与深部成因机制

林间^{1,2,3}, 查财财^{1,2}, 周志远^{1,3}, 张帆^{1,2}, 张旭博^{1,2}, 陈占营^{1,2,4}

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458
2. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 南海生态环境工程创新研究院, 广州 511458
3. 南方科技大学海洋科学与工程系, 深圳 518055
4. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 太平洋板块边界和内部均发育大量火山, 是研究地球火山的天然实验场。综述了太平洋火山特征与深部成因机制, 表明研究人员对地球不同环境下的火山(包括大洋中脊、俯冲带岛弧、板内地幔柱等)进行了系统性研究, 分别构建了减压熔融、俯冲板片脱水与富水地幔楔熔融、地幔柱高温熔融的经典模式。但目前学界对于板内非地幔柱型火山的深部岩浆起源以及浅部喷发通道等重要科学问题仍缺乏清晰的认识。未来需要采用创新观测手段, 开展多学科交叉研究以取得突破。

关键词 太平洋; 火山成因; 俯冲带岛弧; 地幔柱; 深部熔融

火山是地球内外部物质与能量循环的通道。火山活动通常伴随着剧烈的熔岩喷发和挥发性气体释放。火山是重要的地球过程: 一方面, 地球深部的大量高温气体和挥发分物质被快速带出到地球浅表, 释放到大气圈, 影响气候; 另一方面, 剧烈的火山活动也会引发地震、海啸等灾害。因此, 研究火山对认识地球机制以及对人类的防灾减灾都

具有重要意义。

火山的形成, 从深部到浅部包含地幔熔融与岩浆产生、岩浆运移、侵入和喷出等过程。深部过程控制了地幔熔融方式和熔融量, 并且在不同构造背景下具有其明显特征。太平洋因其丰富的构造特征成为研究火山的天然实验室, 本文聚焦不同类型火山及其深部熔融过程。

收稿日期: 2022-11-13; 修回日期: 2023-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41890813, 92258303, 41976066, 91858207); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0205); 中国科学院项目(133244KYSB20180029, 131551KYSB20200021, ISEE2021PY03, Y4SL021001); 广东省自然科学基金项目(2021A1515012227); 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111520001); 深圳市科创委项目(KCXFZ20211020174803005)

作者简介: 林间, 欧洲科学院院士, 讲席教授, 研究方向为海洋地质与地球物理、地球动力学, 电子信箱: jianlin@scsio.ac.cn

引用格式: 林间, 查财财, 周志远, 等. 太平洋火山特征与深部成因机制[J]. 科技导报, 2023, 41(2): 23-28; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.02.002

1 太平洋火山特征

太平洋中发育了大量的火山,主要分布于太平洋洋底以及周边的岛弧上。其中岛弧火山超过450座,占全球活火山数量的75%^[1](图1)。这些火山由于靠近大陆,其不定期喷发会对地球气候和人类生活产生重大影响。而在海水覆盖下的太平洋底,发育的火山数量起码5000座,大约占全球海底火山的28%(图2(a)),其中高度超过1 km的火山数量占比更是超过50%^[2](图2(b))。太平洋底火山主要分布于东太平洋洋隆(EPR)附近以及西北部海底。有些火山呈线性的链状分布,而另一些则无序分布(图1)。

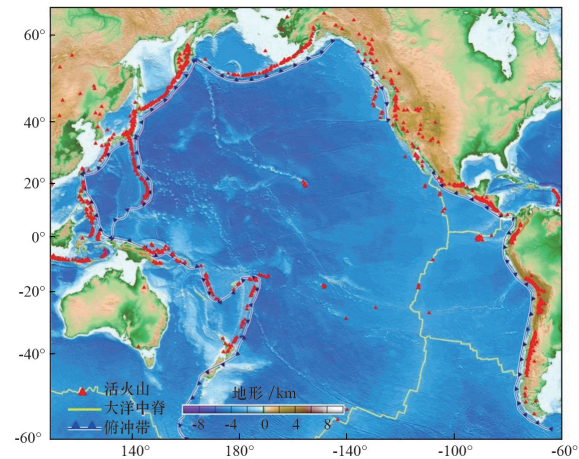
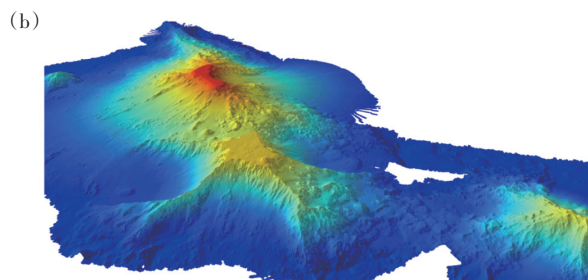
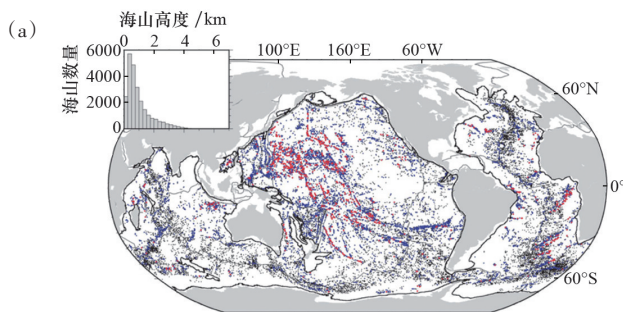


图1 太平洋构造特征

(火山位置数据来源于 <https://volcano.si.edu>)



注:(a)修改自文献[2],蓝点表示火山高度介于1~3 km,红点表示火山高度超过3 km。

(b)来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)。

图2 全球海底火山的分布特征(a)和海山三维视图(b)

岛弧火山与俯冲带密切相关。全球地震层析成像的结果表明,环太平洋的岛弧火山下方均存在明显的俯冲作用^[3](图3)。马蹄状的环太平洋俯冲带是一个火山、地震的频发带,全球90%大地震和75%活火山主要发育于这一长度超过4万 km的活动构造带上,因而被称为“太平洋火环”(ring of fire)^[1](图4)。2022年1月引起全球广泛关注的汤加火山就是此类火山的典型代表。

相较于岛弧火山,海底火山的喷发较为“安静”。一部分海底火山分布在大洋中脊附近,由洋中脊的岩浆活动所形成,然后伴随板块运动迁移到洋脊两翼,如东太平洋洋隆附近的火山群(图5(a))。

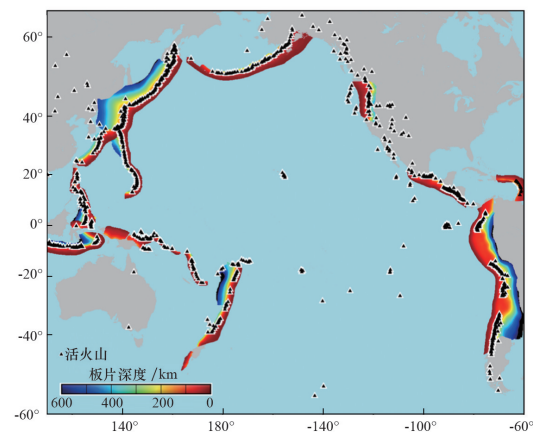


图3 环太平洋俯冲带和岛弧火山特征

(板片深度数据来源于 <https://hwpi.harvard.edu/hilt/slab-20>)

在远离板块边界(大洋中脊和俯冲带)的板块内部,还发育着相当数量的海底火山,通常被称为板内火山。太平洋的板内火山主要发育在其西北部海底。其中一部分与地球内部的热点活动有关,通常表现为线性分布的海山链,如夏威夷-帝王海山链;而另一部分则被认为与热点活动无直接关系,散布于西太平洋海底(图5(b))。

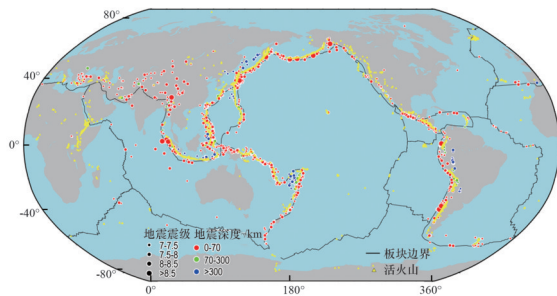


图4 环太平洋火环

(地震数据来源于美国地质勘探局(USGS))

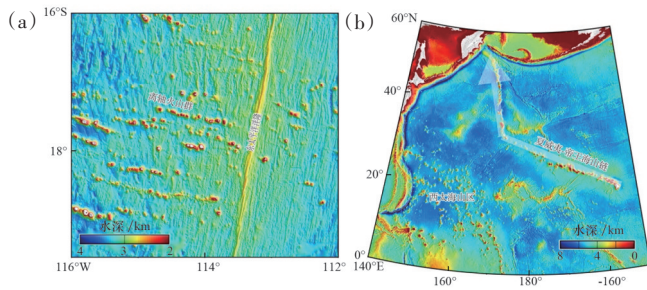


图5 太平洋海底脊轴火山(a)和板内火山特征(b)

2 火山成因

2.1 地幔熔融机制

1) 地球上地幔的减压熔融,是最重要的地幔熔融机制之一,主要发生在洋中脊、弧后盆地以及大陆裂谷等构造拉伸环境。以大洋中脊为例,上覆板块在洋中脊处扩张,引起脊轴下方的地幔物质上涌。随着压力的减小,地幔物质的熔点会逐渐降低,当地幔温度高于地幔固相线时,地幔物质就会发生部分熔融,形成的熔融体然后上升聚集在洋中脊轴下,形成海洋地壳(图6(a)和6(c))。而在远离洋中脊的洋盆内部,地幔温度始终低于地幔固相线,地幔物质不会发生部分熔融(图6(b))。

2) 另外2种地幔熔融机制则是分别通过提高地幔物质的温度或降低地幔固相线实现的。通常认为,一部分地幔柱起源于核幔边界,其温度远高于周围地幔,因此导致地幔物质在较深的位置发生熔融,产生大规模的熔体^[4]。由于板块相对于地幔柱的运动,岩浆活动会在上覆板块上形成一条海山链(图6),最典型的例子是夏威夷-帝王海山链(图6(a)和6(d))。俯冲带的岛弧火山是由于俯冲板片脱水造成上覆地幔楔物质熔点降低,从而发生熔融形成的(图6(a)和6(e)),最典型的例子是环太平洋火山带(图4)。

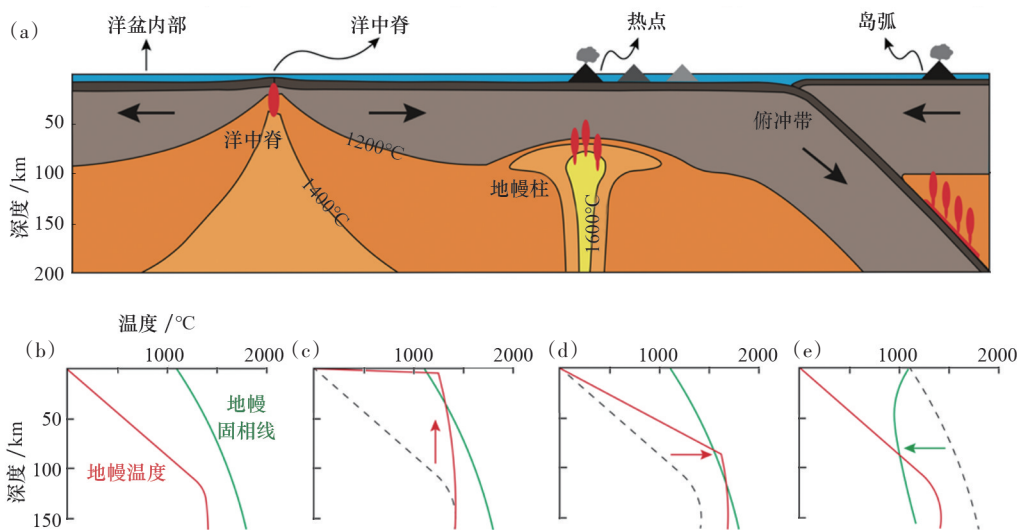


图6 不同构造背景下的地幔熔融过程(修改自文献[5])

2.2 太平洋火山链成因

1) 地幔柱成因。太平洋洋盆内部发育着大量板内火山,最典型的代表就是位于西北太平洋的夏威夷-帝王海山链(图7)。整条海山链总长度约6000 km,海山年龄沿着海山链由北向东南逐渐减小,最年轻的夏威夷岛现今仍存在岩浆活动。该类型的火山通常被认为是由起源于核幔边界的高温地幔柱引起的^[6-7]。由于上覆板块相对于地幔柱的运动,地幔柱引起的岩浆活动会在上覆板块上形成一条海山链,且海山年龄沿着板块运动方向逐渐增加(图7)。上覆板块相对运动方向的改变,会造成海山链的走向发生改变,例如夏威夷-帝王海山链^[8]。但目前也有研究人员认为地幔柱之间也有可能具有相对运动^[9]。

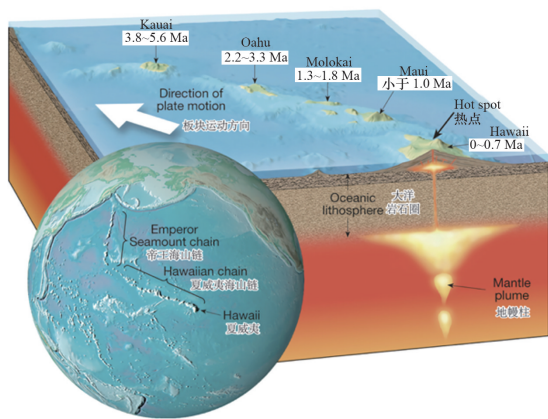


图7 夏威夷-帝王海山链的形成模式
(修改自文献[10])

2) 非地幔柱成因。另一类广泛分布于太平洋洋盆内部的海山链,其年龄不具有明显的时空变化规律,且远离已知地幔柱。部分学者认为该类型火山是由岩石圈底部小尺度地幔对流引起地幔减压熔融形成的^[11-12](图8)。近些年,还有一种观点

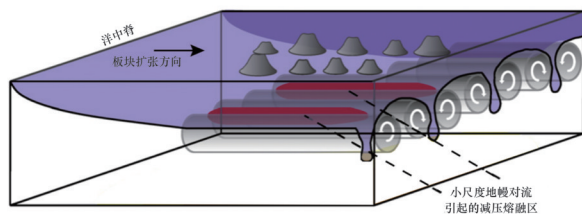


图8 小尺度地幔对流模式(修改自文献[14])

则认为岩石圈-软流圈界面是一个富含熔体的边界层,上覆岩石圈内部由于构造伸展作用形成的裂隙为这些熔体逃逸至地表提供了通道,从而形成海底火山^[13]。

2.3 斑点火山

斑点火山是近20年来在俯冲带外缘区域新发现的一种海底火山类型。斑点火山通常成簇出现,体积较小,形状不规则,直径只有数公里,高度大多为100~200 m^[15],其年龄一般小于10 Ma,远小于其下伏洋壳年龄^[15]。

由于斑点火山的形成位置远离板块边界和热点,其有可能代表了一种新型的岩浆活动机制。目前,关于斑点火山形成机制的模型主要有3种:(1)俯冲板片在海沟附近发生挠曲形变,形成外缘隆起,导致俯冲板片底部发生拉张破裂,诱发了地幔物质向上运动发生减压熔融,形成斑点火山^[16](图9(a))。(2)岩石圈-软流圈界面是一个富含熔体的边界层,在合适的条件下,这些熔体可能沿着俯冲板片内部的裂隙到达地表,形成斑点火山^[17](图9(b))。(3)俯冲至地幔转换带的俯冲板片发生后撤(roll back),导致后方的地幔转换带物质向上运动,发生部分熔融,形成斑点火山^[18](图9(c))。

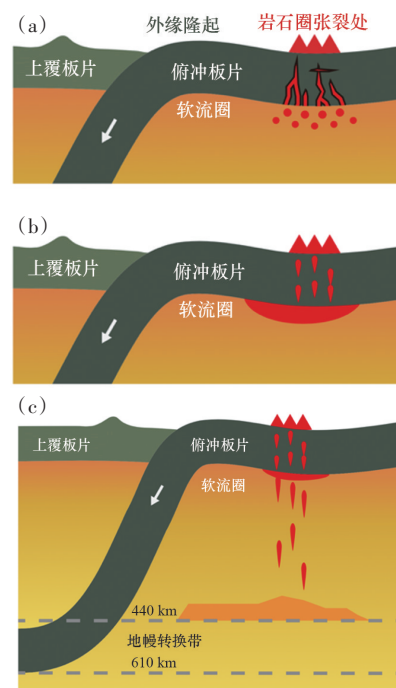


图9 斑点火山形成机制模式(修改自文献[19])

3 未来研究方向

近年来,由日本、美国、欧洲、澳大利亚、韩国、中国等国家和地区的国际科学家团队联合发起了太平洋阵列(Pacific Array)计划。该计划拟在太平洋挑选区域开展新一代海底大规模地震阵列实验,每个阵列实验布放多台(如10~30台)长周期海底地震仪,在海底连续观测一段时间(如1~2 a),力争通过10 a或更长时间的努力,使得地震台站能覆盖大部分太平洋海底,从而解析太平洋岩石圈与软流圈结构。目前,该计划已经在太平洋完成了3片区域实验,其中1片区域正在探测中,2片区域已受资助拟开展中。

在海底长期进行地震观测实验,需要攻克关键技术,研发可长时间稳定在海底工作的仪器。近年来该方向取得了多项突破性进展,包括:(1)国际科学家团队联合研制的潜浮式地震仪MERMAID,已用于组建全球海洋地震台网引领EarthScope-Oceans国际合作计划。(2)2020年,中国自主研发成功国内首台移动式海洋地震仪“海豚”,并于南海完成了海试。不同于传统的固定式坐底海底地震仪,这种新型地震仪可以自动漂浮到不同地点,在多点接收地震信号,因此可以较低成本覆盖大片海域,解决海洋中台站少的难题。

为解决海洋板块构造与火山重大科学问题,亟需加强多学科交叉研究,尤其是地球化学、地球物理与地球动力学等多种研究手段的交叉。2018年,国家自然科学基金委员会重大研究计划“西太平洋地球系统多圈层相互作用”获批启动,通过进行多学科、跨尺度、跨圈层综合研究,发展板块构造理论,解决以流体为纽带的跨圈层动力过程与能量物质循环这一重大科学问题。目前该计划已经开展至第4年,在西太平洋取得了多项重要成果,有望推动探索太平洋火山成因机制问题。

4 结论

太平洋具有丰富的构造体系,是研究地球构造与岩浆活动的绝佳窗口。已有研究大多关注于板

块边界处的火山以及板内地幔柱型火山,对其深部的熔融过程以及浅部的喷发过程都有了相对清晰的认识。而板内非地幔柱型火山的研究则相对匮乏,尤其对其深部的岩浆来源以及浅部的岩浆通道等尚知之甚少。未来亟需开展长周期的精密观测以及多学科交叉研究,聚焦攻关地球海洋板块火山的成因机制问题。

参考文献(References)

- [1] Britannica T. Ring of fire. Encyclopedia Britannica[EB/OL]. [2022-05-06]. <https://www.britannica.com/place/Ring-of-Fire>.
- [2] Kim S S, Wessel P. New global seamount census from altimetry-derived gravity data[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 186: 615-631.
- [3] Hayes G. Slab2-A comprehensive subduction zone geometry model[EB/OL]. (2018-08-08) [2022-03-16]. <https://doi.org/10.5066/F7PV6JNV>.
- [4] Ito G, Lin J, Graham D. Observational and theoretical studies of the dynamics of mantle plume-mid-ocean ridge interaction[J]. *Review of Geophysics*, 2003, 41: 1017.
- [5] Niu Y L. Lithosphere thickness controls the extent of mantle melting, depth of melt extraction and basalt compositions in all tectonic settings on Earth: A review and new perspectives[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 217: 103614.
- [6] Wilson J T. A possible origin of the Hawaiian Islands[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1963, 41(6): 863-870.
- [7] Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle[J]. *Nature*, 1971, 230(5288): 42-43.
- [8] Torsvik T H, Doubrovine P V, Steinberger B, et al. Pacific plate motion change caused the Hawaiian-Emperor Bend[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1-12.
- [9] Tarduno J A, Duncan R A, Scholl D W, et al. The Emperor seamounts: Southward motion of the Hawaiian hotspot plume in Earth's mantle[J]. *Science*, 2003, 301: 1064-1069.
- [10] Condie K C, Tasa D. Plate tectonics and how the Earth works[M]. Taos, NM: Tasa Graphic Arts, Inc., 2009.
- [11] Buck W R, Parmentier E M. Convection beneath young oceanic lithosphere: Implications for thermal structure and gravity[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*

- Earth, 1986, 91(B2): 1961–1974.
- [12] Ballmer M D, van Hunen J, Ito G, et al. Non-hotspot volcano chains originating from small-scale sublithospheric convection[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23): L23310.
- [13] Sandwell D T, Winterer E L, Mammerrickx J, et al. Evidence for diffuse extension of the Pacific plate from Pukapuka ridges and cross-grain gravity lineations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B8): 15087–15099.
- [14] Ballmer M D, Ito G, van Hunen J, et al. Small-scale sublithospheric convection reconciles geochemistry and geochronology of ‘Superplume’ volcanism in the western and south Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 290(1/2): 224–232.
- [15] Hirano N, Koppers A A, Takahashi A, et al. Seamounts, knolls and petit-spot monogenetic volcanoes on the subducting Pacific Plate[J]. *Basin Research*, 2008, 20(4): 543–553.
- [16] Hirano N, Takahashi E, Yamamoto J, et al. Volcanism in response to plate flexure[J]. *Science*, 2006, 313(5792): 1426–1428.
- [17] Yamamoto J, Korenaga J, Hirano N, et al. Melt-rich lithosphere–asthenosphere boundary inferred from petit-spot volcanoes[J]. *Geology*, 2014, 42(11): 967–970.
- [18] Yang J, Faccenda M. Intraplate volcanism originating from upwelling hydrous mantle transition zone[J]. *Nature*, 2020, 579(7797): 88–91.
- [19] 潘谟哈, 杨挺, 林间, 等. 斑点火山的形成机制和岩石圈-软流圈边界(LAB)的性质[J]. *地球科学*, 2021, 46(3): 817–825.

Characteristics and deep origins of the Pacific volcanos

LIN Jian^{1,2,3}, ZHA Caicai^{1,2}, ZHOU Zhiyuan^{1,3}, ZHANG Fan^{1,2}, ZHANG Xubo^{1,2}, CHEN Zhanying^{1,2,4}

1. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China
2. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Innovation Academy of South China Sea Ecology and Environmental Engineering, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China
3. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A large number of volcanoes with distinct origins are developed on the tectonic boundaries and interior of the Pacific plate, thus the Pacific Ocean is an excellent laboratory to study volcanism on Earth. This review finds out that, scientists have conducted systematic researches of volcanism at mid-ocean ridges, subduction zone island arcs, and intraplate mantle plumes, proposing classical models of decompression melting, slab dehydration-induced mantle melting, and plume-related high temperature mantle melting. However, the deep origins and shallow channels of non-plume intra-plate volcanoes are still poorly understood. To address these important scientific issues, comprehensive multi-disciplinary joint observations must be conducted in the future.

Keywords Pacific Ocean; volcanic origin; island arcs; mantle plume; deep melting ●



(责任编辑 王志敏)