

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.340>



# 斑点火山的形成机制和岩石圈-软流圈边界(LAB)的性质

潘谟晗<sup>1</sup>, 杨挺<sup>1,3,4\*</sup>, 林间<sup>1,2,3,5</sup>, 张帆<sup>2,3</sup>, 周志远<sup>2,3</sup>, 李海勇<sup>2,3</sup>,  
张旭博<sup>2,3</sup>, 范兴利<sup>1</sup>, 程子华<sup>2,3</sup>

1. 南方科技大学海洋科学与工程系, 广东深圳 518055
2. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 南海海洋研究所, 南海生态环境工程创新研究院, 广东广州 511458
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东广州 511458
4. 上海佘山地球物理国家科学野外观测研究站, 上海 200082
5. 伍兹霍尔海洋研究所, 美国马萨诸塞州伍兹霍尔 02543

**摘要:**近二十年来,在俯冲带外缘发现的斑点火山群代表了一种全新的海底岩浆活动类型.这种火山规模很小,成簇出现,年龄异常年轻,岩样以EM1型碱性玄武岩为主,孔隙度高且富含挥发性组分.有关斑点火山的岩浆起源以及与岩浆上涌相关的动力学过程目前仍然存在广泛的争论.本文系统地介绍了斑点火山的特征,总结了前人针对其形成机制和岩浆源区研究提出的3种模型;另外,结合大洋岩石圈-软流圈边界(LAB)可能含熔体的最新研究成果,指出了斑点火山还可能与LAB的性质这一板块理论的根本科学问题密切相关;由于CO<sub>2</sub>可能是导致LAB深度处出现熔融聚集层的原因,而斑点火山岩样中富含CO<sub>2</sub>,因此斑点火山还可能是碳循环的重要组成部分.最后,本文对未来围绕斑点火山形成机制等科学问题的多学科综合研究做出展望.

**关键词:**斑点火山;海底岩浆作用;岩石圈-软流圈边界;海山;海洋地质.

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2021)03-817-09

收稿日期: 2020-10-30

## The Formation Mechanism of Petit-Spot Volcanoes and the Nature of the Lithosphere-Asthenosphere Boundary (LAB)

Pan Mohan<sup>1</sup>, Yang Ting<sup>1,3,4\*</sup>, Lin Jian<sup>1,2,3,5</sup>, Zhang Fan<sup>2,3</sup>, Zhou Zhiyuan<sup>2,3</sup>, Li Haiyong<sup>2,3</sup>,  
Zhang Xubo<sup>2,3</sup>, Fan Xingli<sup>1</sup>, Cheng Zihua<sup>2,3</sup>

1. Department of Ocean Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, 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. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China
4. Shanghai Sheshan National Geophysical Observatory, Shanghai 200082, China
5. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole 02543, USA

**基金项目:**自然科学基金项目(Nos.92058209,41676033,41890813,41976066,41976064);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(No.GML2019ZD0205);深圳市科创委项目(Nos.KQTD20170810111725321,JCYJ20180504170422082,GJHZ20170313101107497).

**作者简介:**潘谟晗(1992-),女,在读博士生,主要从事海洋地球物理学、地震学研究. ORCID:0000-0003-0445-6462. E-mail:11849522@mail.sustech.edu.cn

**\*通讯作者:**杨挺(1971-),ORCID:0000-0002-3433-0898. E-mail:tyang@sustech.edu.cn

**引用格式:**潘谟晗,杨挺,林间,等,2021.斑点火山的形成机制和岩石圈-软流圈边界(LAB)的性质.地球科学,46(3):817-825.

**Abstract:** The petit-spot volcanoes discovered near the subduction zone's outer rise represent a new type of seafloor magmatic activity. These volcanoes are small in scale, appear in clusters, and are extremely young. The rock samples are dominated by EM1 alkaline basalt, with high porosity and rich volatile components. The origin of magma of petit-spot volcanoes and the dynamic processes related to magma upwelling are still in debate. This paper presents the characteristics of petit-spot volcanoes and summarizes the three models proposed by previous studies on the formation mechanism and magma sources of these unique volcanoes. Based on the latest findings showing the lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) beneath the oceanic plate may contain melts, we infer that the petit-spot volcanoes likely contain the clues about the fundamental scientific question of the nature of LAB. On the other hand, the volcanic rocks are rich in CO<sub>2</sub>, which likely is the volatiles responsible for melt generation in the asthenosphere and melt accumulation at LAB. Therefore, the petit-spot volcano may also account for an important part of the carbon cycle. Finally, this paper proposes a comprehensive multidisciplinary approach is needed to reveal the formation mechanism of such unique volcanoes.

**Key words:** petit-spot volcanoes; seafloor magmatism; lithosphere-asthenosphere boundary; seamounts; marine geology.

## 0 引言

大洋底部广泛分布着大小不一的海山。据测算,高度在 500~1 000 m 之间的海山有 13.8 万余座 (Yesson *et al.*, 2011), 而高于 100 m 的海山则超过 2 500 万座 (Wessel *et al.*, 2010)。这些海山不仅塑造着海底地形,更重要的是,它们记录了大洋岩石圈和地球内部演化的重要信息,而且还是固体地球与其他圈层间能量和物质交换的一种重要形式。

海山是岩浆活动的产物,经典的海底火山岩浆生成机制包括:洋中脊之下地幔被动上涌导致的减压熔融、俯冲板片脱水引发的上覆地幔楔熔融(马超等, 2019),以及主动上涌的地幔热柱在板块内部形成的热点。除此之外,其他的海底火山岩浆生成机制也曾被提出过,例如,用来解释太平洋板块上非热点线性海山链的热弹性张裂和小尺度地幔对流模型等 (Forsyth *et al.*, 2006; Harmon *et al.*, 2006)。但是,上述模型并不足以解释所有海山的岩浆生成机制。

近年来,在全球的多个俯冲带边缘相继发现了一种全新的海山类型(如: Hirano *et al.*, 2001, 2008, 2019; Machida *et al.*, 2015; Taneja *et al.*, 2015; Sato *et al.*, 2018; Reinhard *et al.*, 2019)。因其单个海山规模小,直径只有数公里,高度一般小于 500 m,故而被称作“斑点”火山 (petit-spot volcanoes)。这种火山在很多方面不同于已知的海底火山类型,多种证据表明,它们形成于一种不同于传统模式的岩浆活动 (Hirano *et al.*, 2001, 2006; Fujiwara *et al.*, 2007; Machida *et al.*, 2015)。

本文概述了斑点的特征以及目前与其形成机制相关的研究现状,并着重讨论与其形成

机制密切相关的一个基本科学问题,即岩石圈—软流圈边界 (LAB) 的性质;最后,笔者还提出应该综合多学科的研究手段来深入认识这一特殊火山的形成机制以及它的环境效应。

## 1 斑点的火山基本特征

2001 年,斑点火山在日本海沟东北部海底被首次发现 (Hirano *et al.*, 2001)。不同于太平洋板块上的众多大体量海山,这种斑点海山非常年轻 ( $5.95 \pm 0.31$  Ma), 且其所在位置没有任何热点—地幔热柱相关的观测证据。随后,在日本海沟附近的更多位置 (Hirano *et al.*, 2006, 2008; Machida *et al.*, 2015; Sato *et al.*, 2018)、智利海沟 (Hirano *et al.*, 2013)、汤加海沟 (Reinhard *et al.*, 2019)、印度洋的巽他海沟 (Hoernle *et al.*, 2011; Taneja *et al.*, 2015)、小笠原—北马里亚纳海沟 (Hirano *et al.*, 2019) 以及中美洲俯冲带的增生楔等全球多个俯冲带边缘都陆续发现相似的斑点火山 (图 1)。

斑点火山通常成簇出现,表现为圆锥状的熔岩海山。其体量规模较小,直径只有数公里,高度大多在 200~300 m 左右,一般小于 500 m。它们最突出的特点就是年轻:大部分年龄在几个 Ma 以内,尽管其所在的大洋岩石圈年龄可达 150 Ma。斑点火山出现的位置也很特殊,它们分布在俯冲板片外缘隆起的后方(向洋脊方向)、距海沟轴线 800 km 范围以内,但也有例外:图 1 中,位置 G 的斑点火山群距海沟轴线最远达 1 100 km (Hirano *et al.*, 2019)。通过对北马里亚纳海沟处的斑点火山区域进行海底现场观测,发现在海底地形平坦处,凝固的熔岩呈枕状,而在海底地形较陡处,则

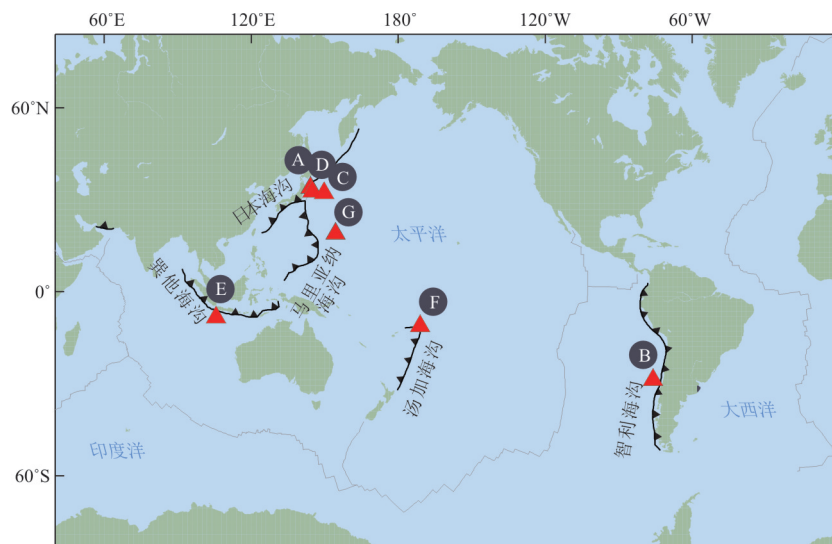


图1 目前已发现的斑点火山群在全球俯冲带的分布

Fig.1 Global occurrence of petit-spot volcanoes

A, C, D. 日本海沟(Hirano *et al.*, 2001, 2008; Fujiwara *et al.*, 2007; Ohira *et al.*, 2018); B. 智利海沟(Hirano *et al.*, 2013); E. 巽他海沟(Hoernle *et al.*, 2011; Taneja *et al.*, 2015); F. 汤加海沟(Reinhard *et al.*, 2019); G. 北马里亚纳海沟(Hirano *et al.*, 2019)

多呈绳状片流态(Hirano *et al.*, 2019).

反射地震实验(Fujiwara *et al.*, 2007; Ohira *et al.*, 2018)排除了斑点海山是海底大火山小露头的可能,证明它是由来自莫霍面(Moho)以下且具有较高密度的岩浆在海底喷发所产生的。地震剖面显示,小体量岩浆侵入大洋基底和沉积层,在斑点海山邻近范围内形成水平层状岩床,构成火山通道,最终在海底喷发。

在多个斑点火山上经采样获得的玄武岩样品显示,斑点火山是由强碱性岩浆冷凝形成,富集轻稀土元素,亏损重稀土元素(Hirano *et al.*, 2006; Machida *et al.*, 2009; Hirano, 2011; Hirano *et al.*, 2019)。尽管形成于近6 000 m水深的静水压力之下,岩样依然呈现明显的多孔构造特征(孔隙体积占比在10%~60%),其玻璃质玄武岩中含有大量的H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>等挥发性组分。根据已发现的斑点火山估计,这一过程释放出的CO<sub>2</sub>质量可以高达岛弧火山和洋中脊火山的1.2%、热点海山的14%(Okumura and Hirano, 2013; Machida *et al.*, 2017)。这说明CO<sub>2</sub>从地球内部的释放过程并不仅仅局限于岛弧、洋中脊和热点火山,斑点火山可能也是碳循环的重要组成部分。

## 2 斑点火山的岩浆起源模型

由于缺乏直接观测证据,斑点火山的岩浆

生成机制、岩浆源区、上升机制等目前还处在广泛的争论中。笔者总结了目前有关其形成机制的3种模型(图2),并分析了这些模型的合理性以及存在的问题。

### 2.1 俯冲板片挠曲模型

第1种模型认为,俯冲板片的挠曲是斑点火山形成的根本原因(如:Hirano *et al.*, 2006; Hirano, 2011)。在俯冲过程中,大洋岩石圈在邻近海沟处会形成外缘隆起,这种板块的挠曲会导致其后方的岩石圈有下陷趋势,其下部会形成拉张应力环境,并形成裂隙。裂隙的存在会引起LAB附近及上地幔发生减压熔融;岩浆通过裂隙上升,在海底喷发形成斑点火山(图2a)。

在这一模型中,一个关键问题是,俯冲板片挠曲会不会导致在距离海沟几百公里外的岩石圈下部形成拉张?前人对全球俯冲带的动力学模拟显示(Zhang *et al.*, 2018; Zhou and Lin, 2018),外缘隆起挠曲影响的波长范围一般在150 km以内,难以在外缘隆起之外的400到800 km,甚至更远处造成岩石圈下部形成拉张环境和裂隙。另外,考虑岩石圈底部的温度已近1 000 °C,拉张作用是否能形成裂隙,以及这种裂隙引起的压力降低是否足以导致LAB附近及其下部的地幔部分熔融等问题都需要进一步的科学观测和动力学模拟来验证。

### 2.2 岩石圈-软流圈边界(LAB)处的熔融层模型

如图2b所示,第2种斑点火山形成机制模型认

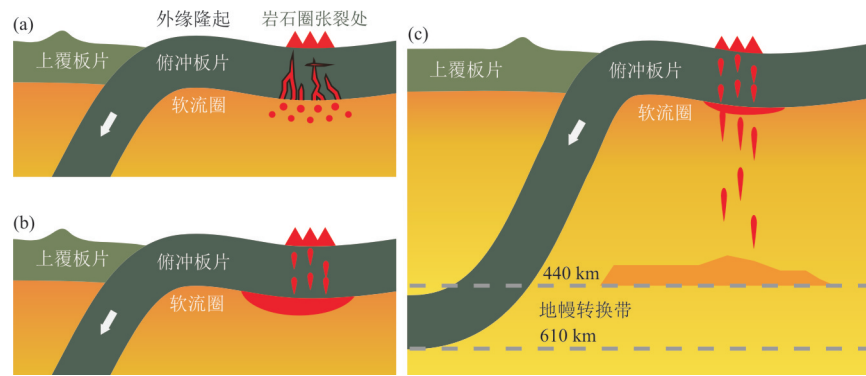


图2 斑点火山形成机制的不同模型

Fig.2 A schematic of petit-spot volcanoes formation mechanisms

为俯冲板块后方的 LAB 深度处普遍含有一定量的部分熔融体 (Sakamaki *et al.*, 2013), 在某种机制作用下这些在岩石圈底部的熔体从外缘隆起后方上升. 尽管裂缝似乎是岩浆上升的合理机制, 但 Valentine and Hirano (2010) 认为, 这种裂隙路径并不是必需的, 因为上升的岩浆在浮力作用下会形成岩脉, 可以自己产生裂隙通道.

这一模型可以合理解释斑点火山群常常呈现年龄和成分差异的现象: 岩石圈下方沿俯冲方向存在着水平方向的压力梯度, 这会引起熔体的横向迁移; 压力梯度的变化会在不同的软流圈位置补给岩浆到 LAB 处的岩浆聚集区 (Yamamoto *et al.*, 2014), 导致了来源于不同源区岩浆的“混合” (Machida *et al.*, 2009), 因此在化学组成上斑点火山群常常表现来自于不同源区的特征.

这一斑点火山的形成模型是建立在俯冲板片后方 LAB 附近原本存在熔体的基础之上, 尽管不少地球化学证据支持在斑点火山之下的 LAB 深度富含熔体 (如, Machida *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2020), 但是这一含熔体层是否普遍存在依然是一个悬而未决的问题 (见 2.3 节的详细讨论). 另一方面, 如果俯冲板片后方的 LAB 位置普遍含有熔体, 为什么斑点火山只零星出现在特定的俯冲带, 而没有广泛且规律地分布在俯冲带后方? 此外, 控制这些熔体上升的因素并不明确, 也许是因为其岩石圈的内部存在薄弱带, 或是斑点火山下的熔体具有某种特殊性.

### 2.3 地幔转换带抬升脱水模型

最近, Yang and Faccenda (2020) 给出了一个全新的斑点火山形成机制的模型 (图 2c). 他们认为斑点火山的岩浆源区要深得多, 它位于俯冲板片后方的地幔转换带 (mantle transition zone, 简称 MTZ) 的上方: 由于回退的俯冲板片与 MTZ 相互

作用, 造成 MTZ 抬升, 而 MTZ 含水量较高, 其抬升进入上地幔的部分发生部分熔融; 这些熔体在上地幔内缓慢渗漏上升, 直至软流圈的顶部, 最后突破岩石圈, 在俯冲带的后方形形成斑点火山.

这一模型主要是基于斑点火山与俯冲带的相对位置, 以及有关地球内部含水量的研究成果 (Bercovici and Karato, 2003; Kelbert *et al.*, 2009; Karato, 2011; Pearson *et al.*, 2014). 他们认为 MTZ, 尤其是中国东北和日本以下的 MTZ, 比上、下地幔矿物中水的溶解度要高 1 至 2 个数量级, 因此在进入上地幔之后, 由于压强降低, 这部分物质易发生部分熔融. 这些熔体在深部地幔能够上涌的机制可能是: 相较于硅酸盐熔体, 高压条件下富  $\text{CO}_2$  熔体的粘度和密度很低 (Kono *et al.*, 2014), 低熔融程度的碳酸岩熔体在地幔中的运移能力及速度很高, 尤其是在富水的情况下 (Ritter *et al.*, 2020); 同时, 在金伯利岩中超深金刚石里发现尖晶橄榄石包裹体从天然样品的角度也证实了从 MTZ 甚至更深的物质喷发至地表是可能的 (Pearson *et al.*, 2014). 当然, 这一模型也存在争议. 一方面, 斑点火山火成岩样品的地球化学分析表明, 其熔融程度极低且源区在较浅的上地幔 (Machida *et al.*, 2009), 可能以氧化还原熔融 (redox melting) 的形式形成富含  $\text{CO}_2$  的熔体而存在 (Stagno *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2020). 而在深度  $>250$  km 的 MTZ 上部, 碳以单质 (金刚石/石墨) 形式存在 (Rohrbach and Schmidt, 2011), 无法以  $\text{CO}_2$  的形式进入熔体, 难以解释斑点火山富  $\text{CO}_2$  的特征. 一个相对合理的解释是, 也许有大量岩浆滞留在岩石圈的底部, 与软流圈地幔物质混染, 只是岩石圈的通道太小, 限制了其大规模的喷发. 根据 Yang and Faccenda (2020) 模拟的结果, 俯冲作用发生后, 如果熔体从 MTZ 直接上涌、在海底喷发,

仅需~12 Ma,斑点火山的年龄应该远远大于目前观测到的<10 Ma,这支持了岩浆滞留在岩石圈底部的假设.对于斑点火山富含CO<sub>2</sub>的特征,可能是由于低熔融程度的碳酸盐熔体在上升至<250 km之后氧化还原形成富含CO<sub>2</sub>的熔体.另外一个争议是,这一模型要求俯冲板片有一定的后撤,从而导致后方的MTZ受压抬升,而智利海沟和巽他海沟并没有明显后撤,却依然观测到了斑点火山.

### 3 斑点火山与LAB的性质

斑点火山成因涉及岩石圈和软流圈的性质、俯冲板片在浅部和深部的动力学过程、碳水循环等多个领域,是研究岩石圈及软流圈性质、圈层间能量交换和认识深部过程的一个窗口.尤其是,它可能与板块理论的基本科学问题——LAB的性质、以及地球系统的碳循环等密切相关.

板块构造理论认为,在刚性的岩石圈和粘性的软流圈之间是LAB,这一全球性的地球内部界面代表了上地幔流变性质的变化,它在深度上与地震低速带(low velocity zone,简称LVZ)相对应(例如, Tan and HelMBERGER, 2007; Kawakatsu *et al.*, 2009; Rychert and Shearer, 2011; Schmerr, 2012).然而, LAB的性质仍然存在争议(Fischer *et al.*, 2010; Karato, 2012; Karato and Park, 2018).

首先,LAB的存在不可能仅仅由地温梯度所导致,因为观测到的LVZ地震波速度下降梯度太大,无法仅由温度所导致的缓慢变化来解释,而且,在大洋板块下LAB的深度与其年龄没有明确的相关性,而温度梯度取决于年龄,说明温度梯度并非LAB的主控因素.LAB也可能是由于地幔岩石晶体颗粒大小变化所引起的晶界滑动(grain boundary sliding,简称GRS)所导致(Faul and Jackson, 2005; Karato, 2012),因为这会引起地震波速度降低,而且可以解释LAB深度与板块年龄无关的现象.但是,它是否能产生如此大的速度负梯度还存在争议.

一个更合理的解释是,LAB深度处存在部分熔融层,因此可以观测到LVZ.但是在这个深度,温度只有~1 000 °C,远低于橄榄岩的固相线(~1 300 °C),理论上不足以导致熔融.只有在含有H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>等挥发性组分的前提下,固相线才有可能与地温梯度曲线相交,产生部分熔融(Wyllie, 1988; Hirschmann, 2010; Green, 2014; 莫宣学, 2019).

近年来,利用新的研究手段,国内外多个研究组给出了LAB附近存在熔融层的证据.例如,Naif *et al.* (2013)通过对中美洲俯冲带前缘的海底电磁观测,发现LAB深度存在高电导率异常层,这是含有熔体的有力证据(Sifré *et al.*, 2014);利用具有较高分辨率的主动源海底地震仪(ocean bottom seismometer,简称OBS)剖面探测方法,研究者们在不同年龄的大洋岩石圈,如洋中脊(Qin *et al.*, 2020)、40~70 Ma的大西洋岩石圈(Mehouachi and Singh, 2018)和俯冲至新西兰之下的古老(~120 Ma)太平洋岩石圈(Stern *et al.*, 2015),均发现了LAB深度存在部分熔融的证据.此外,由上覆板块运动所造成的水平熔融薄层也符合在上地幔观测到的径向各向异性特性(Kawakatsu *et al.*, 2009; Lin *et al.*, 2016; Russell *et al.*, 2019).

那么,到底是H<sub>2</sub>O还是CO<sub>2</sub>在降低地幔橄榄岩固相线方面起到了主导作用呢?LAB的深度与洋中脊开始发生减压熔融的深度大致相同,因此,Garherty *et al.* (1996)认为,地幔熔融所导致的水含量在深度上的变化可能是LVZ的形成原因.然而,在古老的、温度很低的大洋板块中,这种因素对地震波速度的影响应该很小,难以解释为何在古老大洋板块相似深度存在LVZ(Behn *et al.*, 2009).越来越多的证据表明,碳酸盐熔融也许才是这种远离洋中脊的古老大洋岩石圈下引发熔融的主要原因(Dasgupta and Hirschmann, 2006; Hirschmann, 2010),也就是说,上地幔中的CO<sub>2</sub>降低了固相线温度,并在远离洋脊处以及更深处地幔内引发熔融.

对于西太平洋古老的岩石圈上形成的斑点火山的岩浆岩样品分析表明,其惰性气体和Sr-Nd-Pb同位素比值显示其岩浆可能源于软流圈地幔较低程度的部分熔融(Machida *et al.*, 2009);且软流圈地幔中广泛分布着由碳酸盐和循环古洋壳熔融产生的富含CO<sub>2</sub>的碱性熔体(Machida *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2020),斑点火山岩样显示的多孔构造可能是由碱性岩浆冷凝时CO<sub>2</sub>的逃逸所造成.以上特征表明,其源区的LAB深度处极有可能存在一个熔融聚集层(Hirano *et al.*, 2006; Yamamoto *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2020),且CO<sub>2</sub>在其熔体形成过程中的作用十分关键(Machida *et al.*, 2017; Gardés *et al.*, 2020).

根据以上的讨论,斑点火山应该是一个揭示全球LAB性质及其参与碳循环程度的非常理想

的突破口. 因为斑点的火山岩活动普遍存在于俯冲带后方的板块挠曲区域, 它直接提供了来自成熟(古老)大洋岩石圈之下的熔体样品; 对于这种特殊岩浆过程进行形成机制的探究, 可以更深入地理解其源区上地幔和 LAB 的性质, 同时还可以估计参与熔融过程的  $\text{CO}_2$  通量.

#### 4 斑点火山多学科综合研究展望

对斑点火山下方岩石圈和软流圈的精细结构、岩石圈内应力—应变状态、地球化学特征进行精细研究, 对于回答其形成机制及其携带的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  等挥发分通量等具有争议的科学问题有着重要意义, 而这将涉及地球物理、地球化学、地质学等多学科的研究内容. 岩浆源区位置、熔融范围、上升动力、释放的挥发性组分通量等问题, 都需要多学科的综合研究才能得到较好的约束. 例如, 动力学模拟可以得到板块弯曲及裂隙产生的程度和范围, 但是需要地震学手段来提供板块厚度、熔体含量等信息. 因此, 唯有进行多学科的综合研究才能完整且充分地揭示斑点的火山的形成机制.

目前有关斑点火山起源的所有认识几乎都是通过地球化学分析手段获得的, 而地球物理探测对于这一特殊岩浆生成机制的约束仍然是空白. 尽管俯冲带一直是地球物理学关注的重点构造单元, 但过去的研究工作更集中于下行的俯冲板片、地幔楔及俯冲带前方(包括弧前和弧后)的结构和动力学过程, 对于俯冲带后方, 尤其是外缘隆起之后的区域, 缺乏相应的关注.

从地震学的角度, 过去与俯冲带相关的局部研究中, 覆盖斑点的火山的地震台站分布相对稀疏或主要针对浅源, 而区域性或全球性的研究又无法提供所需的分辨率. Ohira *et al.* (2018) 针对日本海沟附近的斑点火山群进行了主动源 OBS 探测, 通过 P 波层析成像工作, 发现斑点火山下方上地壳中存在与斑点火山作用紧密相关的断层、水化和多孔隙作用产生的 P 波速度异常. 由于主动源 OBS 方法的分辨率主要局限在上地壳深度, 对于斑点火山可能的岩浆源区, 如 LAB 深度及更深的上地幔甚至 MTZ, 这种探测方法是无能为力的.

Zhang *et al.* (2018)、Zhou and Lin (2018) 曾对俯冲板片挠曲及外缘隆起的发育进行了大量研究, 例如结合非均衡地形和双有效弹性厚度的二维弹性薄板模型反演板片挠曲受力及有效弹性厚度的变

化, 但是其缺乏对外缘隆起后方的应力状态及其与 LAB 处潜在的部分熔融体相结合的动力学研究; Yang and Faccenda (2020) 成功模拟了 MTZ 与后撤的俯冲板片相互作用产生部分熔融体, 但是岩浆从深部到浅部的演化和运移模式仍不明确.

对于未来斑点火山起源机制的研究, 地震学观测无疑是重要的手段之一. 通过在斑点海山区域布设宽频带 OBS 进行长周期的观测, 可以进行不同尺度、不同分辨率的地震学研究, 包括通过 P 波和 S 波速度异常约束该斑点火山区域下方熔融体的范围和含量、利用方位和径向各向异性分析岩石圈内裂隙或岩浆通道分布, 利用接收函数获得 LAB 和 MTZ 的界面异常等. 而且, 在获得部分熔融含量和岩石圈物理结构参数, 以及热结构的基础上, 可辅以动力学模拟和地化分析, 综合不同学科的证据来揭示斑点的火山的岩浆源区和形成机制. 地球动力学也是讨论岩浆起源和运移机制不可或缺的一部分, 可通过建立板块完全变形模型研究板块变形可能导致地幔减压熔融的控制因素, 计算斑点火山区产生地幔熔融的可能范围及程度, 进而估计斑点火山区可能喷发的岩浆量, 评估板块挠曲对斑点火山形成的影响. 另外, 可通过建立热动力学模型计算上升含水地幔的熔融量和可能范围, 进而估计斑点火山区可能喷发的岩浆量, 讨论对斑点火山形成的影响; 同时模拟岩浆在自身的浮力作用下随时间上升的过程, 并模拟岩浆到达地壳内部产生裂隙形成岩脉的可能性.

总之, 尽管前人针对斑点火山开展了很多地球化学研究, 但是相关的研究结果仍缺少地球物理研究的进一步约束和验证, 如果能够利用地震学所获得的速度异常来推导热结构或者部分熔融含量, 以及动力学模拟所得到的应变范围、裂隙发育程度, 并将此作为地化分析的约束条件, 可以得到更为准确的岩浆生成及挥发性物质通量等信息.

#### 5 结语

对斑点的火山的形成喷发机制的研究是验证 LAB 深度处是否存在部分熔融层和研究潜在熔体产生因素的突破口. 此外, 斑点海山成因的研究还涉及板块性质、俯冲带在浅部和深部的作用、岩浆过程、碳水循环过程、热释放过程等多个议题, 将是研究岩石圈软流圈性质、圈层间能量交换和认识深部过程的窗口. 尽管前人针对斑点火山开展了大量地球化学研究, 但是目前仍缺乏

地球物理的观测约束,斑点火山的形成机制、初始岩浆产生位置、运移通道及动力学过程等科学问题都存在争论.多学科的综合分析将对人们理解这一特殊的海底构造起源至关重要.

## References

- Behn, M. D., Hirth, G., Elsenbeck II, J. R., 2009. Implications of Grain Size Evolution on the Seismic Structure of the Oceanic Upper Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 282(1–4): 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.014>
- Bercovici, D., Karato, S. I., 2003. Whole-Mantle Convection and the Transition-Zone Water Filter. *Nature*, 425(6953): 39–44. <https://doi.org/10.1038/nature01918>
- Dasgupta, R., Hirschmann, M. M., 2006. Melting in the Earth's Deep Upper Mantle Caused by Carbon Dioxide. *Nature*, 440(7084): 659–662. <https://doi.org/10.1038/nature04612>
- Faul, U. H., Jackson, I., 2005. The Seismological Signature of Temperature and Grain Size Variations in the Upper Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 234(1–2): 119–134. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.008>
- Fischer, K. M., Ford, H. A., Abt, D. L., et al., 2010. The Lithosphere–Asthenosphere Boundary. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 38(1): 551–575. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040809-152438>
- Forsyth, D. W., Harmon, N., Scheirer, D. S., et al., 2006. Distribution of Recent Volcanism and the Morphology of Seamounts and Ridges in the GLIMPSE Study Area: Implications for the Lithospheric Cracking Hypothesis for the Origin of Intraplate, Non-Hot Spot Volcanic Chains. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B11): B11407. <https://doi.org/10.1029/2005JB004075>
- Fujiwara, T., Hirano, N., Abe, N., et al., 2007. Subsurface Structure of the “Petit–Spot” Volcanoes on the Northwestern Pacific Plate. *Geophysical Research Letters*, 34(13): L13305. <https://doi.org/10.1029/2007GL030439>
- Gaherty, J. B., Jordan, T. H., Gee, L. S., 1996. Seismic Structure of the Upper Mantle in a Central Pacific Corridor. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B10): 22291–22309. <https://doi.org/10.1029/96JB01882>
- Gardés, E., Laumonier, M., Massuyeau, M., et al., 2020. Unravelling Partial Melt Distribution in the Oceanic Low Velocity Zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 540: 116242. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116242>
- Green, D. H., Hibberson, W. O., Rosenthal, A., et al., 2014. Experimental Study of the Influence of Water on Melting and Phase Assemblages in the Upper Mantle. *Journal of Petrology*, 55(10): 2067–2096. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu050>
- Harmon, N., Forsyth, D. W., Scheirer, D. S., 2006. Analysis of Gravity and Topography in the GLIMPSE Study Region: Isostatic Compensation and Uplift of the Sojourner and HotuMatua Ridge Systems. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B11): B11406. <https://doi.org/10.1029/2005JB004071>
- Hirano, N., 2011. Petit-Spot Volcanism: A New Type of Volcanic Zone Discovered near a Trench. *Geochemical Journal*, 45(2): 157–167. <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0111>
- Hirano, N., Kawamura, K., Hattori, M., et al., 2001. A New Type of Intra-Plate Volcanism; Young Alkali-Basalts Discovered from the Subducting Pacific Plate, Northern Japan Trench. *Geophysical Research Letters*, 28(14): 2719–2722. <https://doi.org/10.1029/2000GL012426>
- Hirano, N., Koppers, A. A., Takahashi, A., et al., 2008. Seamounts, Knolls and Petit-Spot Monogenetic Volcanoes on the Subducting Pacific Plate. *Basin Research*, 20(4): 543–553. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2008.00363.x>
- Hirano, N., Machida, S., Abe, N., et al., 2013. Petit-Spot Lava Fields off the Central Chile Trench Induced by Plate Flexure. *Geochemical Journal*, 47(2): 249–257. <https://doi.org/10.2343/geochemj.2.0227>
- Hirano, N., Machida, S., Sumino, H., et al., 2019. Petit-Spot Volcanoes on the Oldest Portion of the Pacific Plate. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 154: 103142. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2019.103142>
- Hirano, N., Takahashi, E., Yamamoto, J., et al., 2006. Volcanism in Response to Plate Flexure. *Science*, 313(5792): 1426–1428. <https://doi.org/10.1126/science.1128235>
- Hirschmann, M. M., 2010. Partial Melt in the Oceanic Low Velocity Zone. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 179(1–2): 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.12.003>
- Hoernle, K., Hauff, F., Werner, R., et al., 2011. Origin of Indian Ocean Seamount Province by Shallow Recycling of Continental Lithosphere. *Nature Geoscience*, 4(12): 883–887. <https://doi.org/10.1038/ngeo1331>
- Karato, S. I., 2011. Water Distribution across the Mantle Transition Zone and Its Implications for Global Material Circu-

- lation. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(3–4): 413–423. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.038>
- Karato, S. I., 2012. On the Origin of the Asthenosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 321–322: 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.01.001>
- Karato, S. I., Park, J., 2018. On the Origin of the Upper Mantle Seismic Discontinuities. *Lithospheric Discontinuities*, 5–34.
- Kawakatsu, H., Kumar, P., Takei, Y., et al., 2009. Seismic Evidence for Sharp Lithosphere-Asthenosphere Boundaries of Oceanic Plates. *Science*, 324(5926): 499–502. <https://doi.org/10.1126/science.1169499>
- Kelbert, A., Schultz, A., Egbert, G., 2009. Global Electromagnetic Induction Constraints on Transition-Zone Water Content Variations. *Nature*, 460(7258): 1003–1006. <https://doi.org/10.1038/nature08257>
- Kono, Y., Kenney-Benson, C., Hummer, D., et al., 2014. Ultralow Viscosity of Carbonate Melts at High Pressures. *Nature Communications*, 5(1): 5091. <https://doi.org/10.1038/ncomms6091>
- Lin, P. Y. P., Gaherty, J. B., Jin, G., et al., 2016. High-Resolution Seismic Constraints on Flow Dynamics in the Oceanic Asthenosphere. *Nature*, 535(7613): 538–541. <https://doi.org/10.1038/nature18012>
- Liu, J., Hirano, N., Machida, S., et al., 2020. Melting of Recycled Ancient Crust Responsible for the Gutenberg Discontinuity. *Nature Communications*, 11:172. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13958-w>
- Ma C., Tang Y., Ying J., 2019. Magmatism in Subduction Zones and Growth of Continental Crust. *Earth Science*, 44(4): 1128–1142 (in Chinese with English abstract).
- Machida, S., Hirano, N., Kimura, J. I., 2009. Evidence for Recycled Plate Material in Pacific Upper Mantle Unrelated to Plumes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(10): 3028–3037. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.01.026>
- Machida, S., Hirano, N., Sumino, H., et al., 2015. Petit-Spot Geology Reveals Melts in Upper-Most Asthenosphere Dragged by Lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 426: 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.06.018>
- Machida, S., Kogiso, T., Hirano, N., 2017. Petit-Spot as Definitive Evidence for Partial Melting in the Asthenosphere Caused by CO<sub>2</sub>. *Nature Communications*, 8: 14302. <https://doi.org/10.1038/ncomms14302>
- Mehouachi, F., Singh, S. C., 2018. Water-Rich Sublithospheric Melt Channel in the Equatorial Atlantic Ocean. *Nature Geoscience*, 11(1): 65–69. <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0034-z>
- Mo X. X., 2019. Magmatism and Deep Geological Process. *Earth Science*, 44(5): 1487–1493 (in Chinese with English abstract).
- Naif, S., Key, K., Constable, S., et al., 2013. Melt-Rich Channel Observed at the Lithosphere - Asthenosphere Boundary. *Nature*, 495(7441): 356–359. <https://doi.org/10.1038/nature11939>
- Ohira, A., Kodaira, S., Gou, F. J., et al., 2018. Seismic Structure of the Oceanic Crust around Petit-Spot Volcanoes in the Outer-Rise Region of the Japan Trench. *Geophysical Research Letters*, 45(20): 11123–11129. <https://doi.org/10.1029/2018gl080305>
- Okumura, S., Hirano, N., 2013. Carbon Dioxide Emission to Earth's Surface by Deep-Sea Volcanism. *Geology*, 41(11): 1167–1170. <https://doi.org/10.1130/g34620.1>
- Pearson, D. G., Brenker, F. E., Nestola, F., et al., 2014. Hydrous Mantle Transition Zone Indicated by Ringwoodite Included within Diamond. *Nature*, 507(7491): 221–224. <https://doi.org/10.1038/nature13080>
- Qin, Y. F., Singh, S. C., Grevemeyer, I., et al., 2020. Discovery of Flat Seismic Reflections in the Mantle Beneath the Young Juan de Fuca Plate. *Nature Communications*, 11:4122. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17946-3>
- Reinhard, A. A., Jackson, M. G., Blusztajn, J., et al., 2019. “Petit Spot” Rejuvenated Volcanism Superimposed on Plume-Derived Samoan Shield Volcanoes: Evidence from a 645-m Drill Core from Tutuila Island, American Samoa. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(3): 1485–1507. <https://doi.org/10.1029/2018gc007985>
- Ritter, X., Sanchez-Valle, C., Sator, N., et al., 2020. Density of Hydrous Carbonate Melts under Pressure, Compressibility of Volatiles and Implications for Carbonate Melt Mobility in the Upper Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 533: 116043. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.116043>
- Rohrbach, A., Schmidt, M. W., 2011. Redox Freezing and Melting in the Earth's Deep Mantle Resulting from Carbon - Iron Redox Coupling. *Nature*, 472(7342): 209–212. <https://doi.org/10.1038/nature09899>
- Russell, J. B., Gaherty, J. B., Lin, P. Y. P., et al., 2019. High-Resolution Constraints on Pacific Upper Mantle Petrofabric Inferred from Surface - Wave Anisotropy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(1): 631–657. <https://doi.org/10.1029/2018jb016598>
- Rychert, C. A., Shearer, P. M., 2011. Imaging the Lithosphere-Asthenosphere Boundary Beneath the Pacific Using SS Waveform Modeling. *Journal of Geophysical Research*



- search Atmospheres*, 116(B7): B07307. <https://doi.org/10.1029/2010jb008070>
- Sakamaki, T., Suzuki, A., Ohtani, E., et al., 2013. Ponded Melt at the Boundary between the Lithosphere and Asthenosphere. *Nature Geoscience*, 6(12): 1041–1044. <https://doi.org/10.1038/ngeo1982>
- Sato, Y., Hirano, N., Machida, S., et al., 2018. Direct Ascent to the Surface of Asthenospheric Magma in a Region of Convex Lithospheric Flexure. *International Geology Review*, 60(10): 1231–1243. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1379912>
- Schmerr, N., 2012. The Gutenberg Discontinuity: Melt at the Lithosphere-Asthenosphere Boundary. *Science*, 335(6075): 1480–1483. <https://doi.org/10.1126/science.1215433>
- Sifré, D., Gardés, E., Massuyeau, M., et al., 2014. Electrical Conductivity during Incipient Melting in the Oceanic Low - Velocity Zone. *Nature*, 509(7498): 81–85. <https://doi.org/10.1038/nature13245>
- Stagno, V., Ojwang, D. O., McCammon, C. A., et al., 2013. The Oxidation State of the Mantle and the Extraction of Carbon from Earth's Interior. *Nature*, 493(7430): 84–88. <https://doi.org/10.1038/nature11679>
- Stern, T. A., Henrys, S. A., Okaya, D., et al., 2015. A Seismic Reflection Image for the Base of a Tectonic Plate. *Nature*, 518(7537): 85–88. <https://doi.org/10.1038/nature14146>
- Tan, Y., Helmberger, D. V., 2007. Trans-Pacific Upper Mantle Shear Velocity Structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B8): B08301. <https://doi.org/10.1029/2006JB004853>
- Taneja, R., O'Neill, C., Lackie, M., et al., 2015.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology and the Paleoposition of Christmas Island (Australia), Northeast Indian Ocean. *Gondwana Research*, 28(1): 391–406. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.04.004>
- Valentine, G. A., Hirano, N., 2010. Mechanisms of Low-Flux Intraplate Volcanic Fields—Basin and Range (North America) and Northwest Pacific Ocean. *Geology*, 38(1): 55–58. <https://doi.org/10.1130/g30427.1>
- Wessel, P., Sandwell, D., Kim, S. S., 2010. The Global Seamount Census. *Oceanography*, 23(1): 24–33. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2010.60>
- Wyllie, P. J., 1988. Magma Genesis, Plate Tectonics, and Chemical Differentiation of the Earth. *Reviews of Geophysics*, 26(3): 370–404. <https://doi.org/10.1029/RG026i003p00370>
- Yamamoto, J., Korenaga, J., Hirano, N., et al., 2014. Melt-Rich Lithosphere-Asthenosphere Boundary Inferred from Petit-Spot Volcanoes. *Geology*, 42(11): 967–970. <https://doi.org/10.1130/g35944.1>
- Yang, J., Faccenda, M., 2020. Intraplate Volcanism Originating from Upwelling Hydrous Mantle Transition Zone. *Nature*, 579(7797): 88–91. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2045-y>
- Yesson, C., Clark, M. R., Taylor, M. L., et al., 2011. The Global Distribution of Seamounts Based on 30 Arc Seconds Bathymetry Data. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58(4): 442–453. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.02.004>
- Zhang, F., Lin, J., Zhou, Z. Y., et al., 2018. Intra- and Intertrench Variations in Flexural Bending of the Manila, Mariana and Global Trenches: Implications on Plate Weakening in Controlling Trench Dynamics. *Geophysical Journal International*, 212(2): 1429–1449. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx488>
- Zhou, Z. Y., Lin, J., 2018. Elasto-Plastic Deformation and Plate Weakening Due to Normal Faulting in the Subducting Plate along the Mariana Trench. *Tectonophysics*, 734/735: 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.04.008>

#### 附中文参考文献

- 马超, 汤艳杰, 英基丰, 2019. 俯冲带岩浆作用与大陆地壳生长. *地球科学*, 44(4): 1128–1142.
- 莫宣学, 2019. 岩浆作用与地球深部过程. *地球科学*, 44(5): 1487–1493.