

# 硅质大火成岩省的形成机制及其与资源环境的关系\*

薄弘泽 张招崇\*\*

BO HongZe and ZHANG ZhaoChong\*\*

中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2020-02-02 收稿, 2020-05-15 改回.

**Bo HZ and Zhang ZC. 2020. Genesis of Silicic Large Igneous Provinces and effects of resources and environment. *Acta Petrologica Sinica*, 36(7):1973–1985, doi:10.18654/1000-0569/2020.07.03**

**Abstract** Silicic Large Igneous Provinces (S-LIPs) are magmatic formations with areal extents greater than  $10^5 \text{ km}^2$ , volumes greater than  $2.5 \times 10^5 \text{ km}^3$ , and more than 80vol. % are composed of rhyolitic ignimbrites. Most of the S-LIPs are located along the continental margins, which may be related to the breakup of super-continent and adjacent Mafic Large Igneous Provinces (M-LIPs). Their life span is relatively long ( $\sim 40 \text{ Myr}$ ) compared with M-LIPs. The igneous rocks from S-LIPs usually belong to calc-alkaline series, and contain hydrous phenocrysts such as biotite and amphibole, and they show transitional geochemical features from I-type to A-type granitoids. Based on previous studies, we compile whole-rock geochemical data from five S-LIPs, and propose that the remelting of the subduction-related hydrous lower crust triggered by magma underplating (or mantle plume) and followed different degrees of fractional crystallization is the possible main mechanism for the formation of S-LIPs. Because the upper silicic magmas act like density barrier and the magma conduit cannot be easily formed in hydrous crust, these mafic magmas are unable to erupt through the crust. However, they do transfer large amounts of  $\text{SO}_2$  gas upward. Thus, the S-LIPs can also be considered as the presence of “hidden” M-LIPs. On the one hand, the large-scale silicic magmatism could inject these  $\text{SO}_2$  aerosols into the stratosphere, on the other hand, it could prompt the photosynthetic conversion of  $\text{CO}_2$  to organic carbon by iron fertilization of ocean, and both of them could cause global cooling. Furthermore, S-LIPs could also be considered as one large-scale hydrothermal mineralization system, forming extensive low-sulfur epithermal precious metal deposits, which are of great economic significance.

**Key words** Silicic Large Igneous Provinces; magma underplating; crustal remelting

**摘要** 硅质大火成岩省是以流纹质熔结凝灰岩为主体的( $>80 \text{ vol. \%}$ ),覆盖面积大于  $10^5 \text{ km}^2$ 、体积大于  $2.5 \times 10^5 \text{ km}^3$  的巨型岩浆岩建造,多呈条带状产出在大陆边缘,可能与大陆裂解和相邻镁铁质大火成岩省密切相关;其形成时间相对镁铁质大火成岩省较长,可达 $\sim 40 \text{ Myr}$ 。岩石中有黑云母、角闪石等含水斑晶,多为钙碱性系列,具有从I型向A型花岗岩质过渡的地球化学特征。本文在前人工作的基础上,整理了五个主要硅质大火成岩省的样品数据,综合研究认为其形成是玄武质岩浆底侵(或地幔柱上升),使得前期由于俯冲形成的富水地壳重熔后经历不同程度分离结晶的结果。硅质大火成岩省的形成暗示深部有“隐伏的镁铁质大火成岩省”,因为上部硅质岩浆的阻碍和富水地壳不易形成岩浆运移通道所以未能喷出,但这些镁铁质岩浆向上输送了大量的  $\text{SO}_2$  气体。大规模的硅质岩浆活动一方面能够将这些  $\text{SO}_2$  气溶胶送入平流层吸收太阳辐射,另一方面能够使海洋富铁后通过光合作用吸收大气中的  $\text{CO}_2$ ,从而导致全球降温。此外,硅质大火成岩省还是一个大型的热液成矿系统,形成大量的低硫化型贵金属浅成低温热液矿床,具有重要的经济意义。

**关键词** 硅质大火成岩省;岩浆底侵;地壳重熔

**中图法分类号** P581

\* 本文受国家自然科学基金项目(41772057)资助。

第一作者简介:薄弘泽,男,1997年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail:bohongze@qq.com

\*\* 通讯作者:张招崇,男,1965年生,教授,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail:zozhang@cugb.edu.cn

大火成岩省 (Large Igneous Provinces) 的概念最早由 Coffin and Eldholm (1994) 提出,用以描述由镁铁质-超镁铁质火山岩及其伴生侵入岩组成的、巨量喷发形成的岩浆建造,其覆盖面积大于  $10^5 \text{ km}^2$ , 体积大于  $10^5 \text{ km}^3$ , 其中 75% 以上的体积在短时间内 ( $1 \sim 5 \text{ Myr}$ ) 形成 (Bryan and Ernst, 2008), 这类大火成岩省一般被称为镁铁质大火成岩省 (Mafic Large Igneous Provinces)。Bryan *et al.* (2002) 正式提出了硅质大火成岩省 (Silicic Large Igneous Provinces) 的概念,其体积和覆盖面积与镁铁质大火成岩省类似 ( $> 10^5 \text{ km}^2$ ,  $> 10^5 \text{ km}^3$ ), 但 80vol. % 以上的岩浆岩为长英质岩石,如熔结凝灰岩、流纹岩、英安岩、花岗岩,具有从 I 型向 A 型花岗质岩石过渡的特点,此外,其形成时间相对较长,可达  $\sim 40 \text{ Myr}$ , 多呈条带状产出在板块边缘 (Bryan, 2007; Bryan and Ernst, 2008; Bryan and Ferrari, 2013)。王德滋和周金城 (2005) 在国内最早引入了这一概念,将其称作长英质大火成岩省,并对其主要特征、岩石组合、分布范围等做了详细论述,首次提出了我国东南地区浙、闽、赣三省的白垩纪中酸性火山岩以及与之有成因联系的花岗岩可能构成了一个长英质大火成岩省,并认为中酸性岩浆的形成很可能是与玄武质岩浆底侵作用导致的地壳大规模熔融有关。

大火成岩省代表了地球演化历史中最大的火山作用,多数学者认为其形成与地幔柱活动和超大陆的裂解密切相关,记录了巨量物质与能量从核-幔边界或上-下地幔边界向地表转移的过程,是了解深部地质过程的重要窗口 (Morgan, 1971; Griffiths and Campbell, 1990; Campbell and Griffiths, 1990; Courtillot *et al.*, 1999; 徐义刚, 2002; 王德滋和周金城, 2005; Campbell, 2007; Xia *et al.*, 2013)。同时,大火成岩省形成过程中可以使得大量气溶胶通过火山作用喷射进入大气对流层和平流层,对气候环境造成显著影响,有些学者认为这可能是生物大灭绝事件的重要诱因 (Robock, 2000; Wignall, 2001, 2005)。此外,大火成岩省独有的巨量岩浆活动,有利于成矿物质的聚集和能量的交换,其本身就是一个大成矿系统,有岩浆硫化物型、氧化物型、热液型等多种矿床产出 (肖龙等, 2007; Bryan and Ernst, 2008; Bryan and Ferrari, 2013), 甚至卡林型金矿也和其存在着间接的联系 (Tassara *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2020)。

因此,近几十年来,大火成岩省的成因和深部动力学过程一直是学术界所聚焦的热点问题,但多数研究都集中在镁铁质大火成岩省,硅质大火成岩省则未受到广泛的关注。近年来的研究表明,硅质大火成岩省可具有比部分镁铁质大火成岩省更大的体积和覆盖面积,记录了大规模的地壳重熔和再循环的演化过程 (Bryan and Ferrari, 2013); 由于喷射高度能够到达平流层,硅质大火成岩省对气候的影响可能比镁铁质大火成岩省更为显著;同时,硅质大火成岩省还与浅成低温热液型矿床的形成密切相关。鉴于硅质大火成岩省具有上述重要地质意义,而目前国内对其研究较少,本文概述了硅质大火成岩省的特点,收集整理了世界上五个硅质大火成

岩省的全岩地球化学数据,在前人工作的基础上对其形成机制、与资源和环境的关系进行了综述和探讨,旨在为硅质大火成岩省的进一步研究提供信息。

## 1 硅质大火成岩省的分布与特点

### 1.1 硅质大火成岩省的分布、规模与形成时间

目前世界上已知的硅质大火成岩省数量少于镁铁质大火成岩省,其中被学术界广泛承认也是规模最大的硅质大火成岩省有三个:墨西哥西部的 Sierra Madre Occidental (Ferrari *et al.*, 2002, 2018; Aguirre-Díaz and Labarthe-Hernández, 2003)、南美洲南部和南极洲西部的 Chon Alike (Pankhurst *et al.*, 1998, 2000; Riley *et al.*, 2001)、澳大利亚东部的 Whitsunday (Ewart *et al.*, 1992; Bryan *et al.*, 1997, 2000), 其覆盖面积、体积、形成时间见表 1。此外,中国华南 (South China) 可能存在一个或数个硅质大火成岩省 (王德滋和周金城, 2005; 张旗, 2013; Wang *et al.*, 2016), 印度 Malani 和澳大利亚 Kennedy-Connors-Auburn 也被认为可能是硅质大火成岩省 (Sharma, 2005; Bryan, 2007; de Wall *et al.*, 2018)。需要注意的是,由于目前对硅质大火成岩省的研究相对较少,可能还有一些硅质大火成岩省尚未被识别。

与镁铁质大火成岩省多产出在大陆内部不同,硅质大火成岩省多位于大陆边缘,在聚敛边界后缘的位置呈条带状分布 (图 1), 并常伴有大型岩墙群出露,这些十分陡倾的岩墙群甚至可沿其走向蔓延上千千米 (Kennedy-Connors-Auburn, Bryan, 2007 及其所引参考文献), 前人研究表明,硅质大火成岩省多出于伸展的构造背景中,其形成可能在时空上与洋盆开裂和大陆裂解密切相关 (Bryan and Ernst, 2008; Bryan and Ferrari, 2013), 还可能与镁铁质大火成岩省有关联,如在重建的  $\sim 200 \text{ Ma}$  的 Gondwana 大陆上,Chon Alike 硅质大火成岩省被 Karoo-Ferrar 镁铁质大火成岩省包围 (Dalziel, 1992; Dalziel *et al.*, 2000; Bryan and Ernst, 2008)。

硅质大火成岩省的体积多大于  $2 \times 10^5 \text{ km}^3$ , 如果将火山碎屑沉积物也折算在内,Whitsunday 的体积甚至可达  $2.2 \times 10^6 \text{ km}^3$  (Bryan *et al.*, 2000); 硅质大火成岩省覆盖面积多大于  $5 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 最高可达  $3 \times 10^6 \text{ km}^2$  (Chon Alike), 其规模和镁铁质大火成岩省类似,远远高于此前被认为代表了地球历史上最大硅质岩浆活动的位于新西兰的 Taupo Volcanic Zone (体积约  $2 \times 10^4 \text{ km}^3$ , 覆盖面积  $300 \text{ km} \times 600 \text{ km}$ ; Wilson *et al.*, 1995; Houghton *et al.*, 1995), 因此硅质大火成岩省的形成代表了地球上最大规模的硅质岩浆作用事件。

硅质大火成岩省产出的时代跨度较大 (从元古宙至今), 目前已识别的硅质大火成岩省多数在近  $300 \text{ Ma}$  形成, 受后期地质作用改造较弱,如 Sierra Madre Occidental 在始新世至中新世形成,是目前年代最新、保存最为完好的硅质大火成岩省之一; Chon Alike 形成于侏罗纪; Whitsunday 形成于白垩纪 (表 1); 位于澳大利亚东北部的 Kennedy-Connors-Auburn 硅

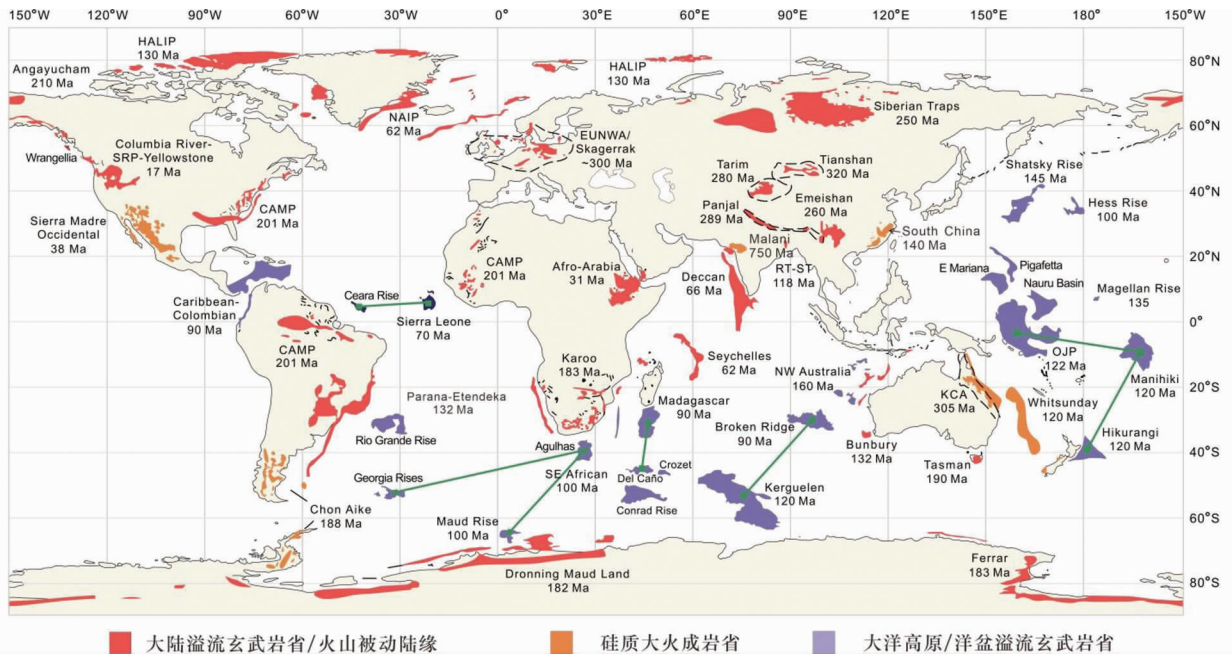


图1 世界主要大火成岩省分布图(据 Bryan and Ferrari, 2013 修改)

Fig.1 Global distribution of main Large Igneous Provinces (modified after Bryan and Ferrari, 2013)

表1 世界上5个主要硅质大火成岩省的位置、规模与形成时间

Table 1 The location, scale and age of five main S-LIPs

名称	面积(km)	体积(km <sup>3</sup> )	位置	形成时间(Ma)	岩浆主要活动年限(Ma)
Sierra Madre Occidental	>2000 × 2 ~ 500	>3.9 × 10 <sup>5</sup>	墨西哥西部	38 ~ 20	32 ~ 28, 24 ~ 20
Chon Alike	>3000 × 1000	>2.3 × 10 <sup>5</sup>	南美洲南部与 南极洲西部	188 ~ 153	188 ~ 178, 172 ~ 162, 157 ~ 153
Whitsunday	>2500 × 200	>2.2 × 10 <sup>6</sup>	澳洲东部	132 ~ 95	118 ~ 113, 110 ~ 105
South China	>100000	>1.5 × 10 <sup>5</sup>	中国东南部	168 ~ 88	149, 128 ~ 111, 101 ~ 100
Malani	>55000	/	印度西北部	770 ~ 750	~770, ~766, ~752

注:数据来源于 Bryan, 2007; Ferrari *et al.*, 2002; Aguirre-Díaz and Labarthe-Hernández, 2003; Pankhurst *et al.*, 1998, 2000; Bryan *et al.*, 1997, 2000; Wang *et al.*, 2016; 王德滋和周金城, 2005; de Wall *et al.*, 2018

质大火成岩省,在石炭纪至二叠纪形成(320 ~ 280Ma)。同时,一些研究表明,元古宙同样有硅质大火成岩省形成,如位于印度的 Malani 形成于 ~750Ma (Sharma, 2005; de Wall *et al.*, 2018),位于澳大利亚南部的 Gawler Range-Hiltaba 形成于 ~1590Ma (Creaser and White, 1991),这些年龄较老的硅质大火成岩省受构造运动、风化剥蚀等地质作用改造明显,因此世界上可能存在我们至今尚未识别的时代较早的硅质大火成岩省 (Bryan and Ferrari, 2013)。

## 1.2 岩石学特征

硅质大火成岩省主要由流纹质熔结凝灰岩及与之有成因联系的花岗岩组成,还常包括玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩等一系列熔岩。镁铁质大火成岩省中的酸性岩浆岩通常斑晶含量较少 (<20vol. %),无含水矿物斑晶 (Bryan and

Ernst, 2008);而硅质大火成岩省中凝灰岩的晶屑含量变化明显,大致可分为 <10vol. % 和 >50vol. % 两类,主要由长石(斜长石为主)、石英、钛铁氧化物、辉石组成,并常含有黑云母、角闪石等含水矿物 (Cameron *et al.*, 1980; Ewart *et al.*, 1992; Bryan, 2007; Bryan and Ferrari, 2013)。这些长英质岩石多为钙碱性系列,具有从聚敛板块边界向板内、从 I 型向 A 型花岗质岩石过渡的地球化学特征 (Bryan, 2007; Bryan and Ferrari, 2013)。镁铁质大火成岩省中心区域中常见苦橄质岩石出露(如峨眉山大火成岩省),指示高温的地幔柱 (~1600°C) 在干的条件下使得地幔部分熔融,代表着无水、高温、缺少挥发分的形成条件 (Zhang *et al.*, 2006);而硅质大火成岩省仅有少量玄武质岩石出露,几乎无苦橄质熔岩,取而代之的是(橄榄)粗安岩和赞岐岩 (Whitsunday, 中国东部; Bryan *et al.*, 2000; 王德滋等, 1996; 张旗, 2013),与长

英质岩石的含水矿物一起,指示了硅质大火成岩省形成于含水、富含挥发分的环境(Wark, 1991; Ewart *et al.*, 1992; 张旗, 2013)。

### 1.3 喷发机制

硅质大火成岩省中大部分地区主要出露火山碎屑岩(如 Chon Alike, Sierra Madre Occidental),但也有部分地区以长英质熔岩为主(如 Gawler)。

硅质大火成岩省中巨量熔结凝灰岩的形成,可能与破火山机构密切相关(Ewart *et al.*, 1992; Bryan *et al.*, 2000; Swanson *et al.*, 2006; Bryan, 2007)。破火山口是在拉伸构造背景下,大量火山灰涌出后岩浆房顶部塌陷所形成,其直径多为 10~40km,Chon Alike 大火成岩省中甚至有直径达到 100km 的破火山口(Riley *et al.*, 2001),当数个几百平方千米的破火山口叠置在一起时,其喷发的凝灰岩体积就可以达到构成大火成岩省的数量级(Fisher and Schmincke, 1984; 王德滋和周金城, 2005)。然而,虽然将破火山机构作为熔结凝灰岩主要喷发来源的观点受到了广泛的认可,但在硅质大火成岩省中,相较于它们所产出的庞大的凝灰岩体积,发现和识别的破火山口的数量还很少,如 Sierra Madre Occidental 硅质大火成岩省至今识别的破火山口不足 20 个(Swanson and McDowell, 1984; Aguirre-Díaz and Labarthe-Hernández, 2003; Swanson *et al.*, 2006),而 Whitsunday 硅质大火成岩省只识别出 5 个破火山机构(Ewart *et al.*, 1992; Bryan *et al.*, 2000),这可能与后期构造变形、剥蚀的影响有关,但真正的原因仍需进一步研究。

部分硅质大火成岩省中大面积流纹质熔岩流的形成,可能与其源区的水含量和 F 含量密切相关。这是因为熔体中低的水含量可以降低岩浆的泡沫化,从而降低其爆发性,而熔体中高的 F 含量可以起到解聚作用使得岩浆粘度降低(Dingwell and Mysen, 1985; Dingwell, 1996; Giordano *et al.*, 2008)。Agangi *et al.* (2012)研究认为 Gawler 中巨量的流纹质熔岩的形成与水不饱和、富 F 的岩浆密切相关。然而,这一解释与目前受广泛认可的富水地壳重熔的模式相矛盾(Bryan *et al.*, 2002; Bryan, 2007),如何调和这一矛盾仍需进一步的研究。

相比于镁铁质大火成岩省 75% 以上的体积都在 1~5Myr 形成,硅质大火成岩省形成的时间跨度较长,可达 ~40Myr,表现为多期次多阶段的岩浆活动规律,可能具有多个岩浆活动的主峰期,是一个长期积累、随机形成的过程(Bryan and Ernst, 2008)。事实上,无论是哪种类型的大火成岩省,虽然都代表着较短时间内岩浆的巨量喷发,但其源区部分熔融形成岩浆的过程仍需较长时间的积累,在岩石圈底部与 MORB 进行充分的物质交换,当岩浆积累到一定程度,使得上覆岩石在压力作用下破裂,就形成了岩浆的运移通道(张旗, 2013)。不同于镁铁质大火成岩省由岩石圈底部的玄武质岩浆房直接喷发形成,硅质大火成岩省可能是由岩浆

底侵或地幔柱上升烘烤下地壳使其部分熔融形成的,其形成的时间跨度取决于为之提供热源的地幔物质能够在地壳底部停留的时间,随着烘烤下地壳热源的变化,熔融一部分,喷发一部分,因此硅质大火成岩省的岩浆作用的持续时间往往较长,可达几十个百万年。

## 2 硅质大火成岩省形成机制

为综合对比和探讨硅质大火成岩省的成因及构造背景,本文收集了世界上五个典型硅质大火成岩省:Sierra Madre Occidental(Wark, 1991; Albrecht and Goldstein, 2000; Ferrari *et al.*, 2007)、Whitsunday(Ewart *et al.*, 1992; Bryan *et al.*, 2000)、Chon Alike(其中南极洲 Peninsula 数据来自 Riley *et al.*, 2001; 南美洲 Patagonia 数据来自 Pankhurst and Rapela, 1995)、Malani(Van Lente *et al.*, 2009; de Wall *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018)、South China(Wang *et al.*, 2016)的岩浆岩主微量元素数据(共 229 件)和 Sr-Nd 同位素数据(共 162 件)。少量样品的稀土元素(REE)有部分缺失,数据处理时采取插值法进行了补充。

### 2.1 地质特征和岩石组合

下面介绍上述 5 个典型硅质大火成岩省的地质特征和岩石组合,其空间位置见图 1。

Sierra Madre Occidental 硅质大火成岩省位于墨西哥西部,沿东太平洋呈北西-南东向条带状分布,体积高达  $3.9 \times 10^5 \text{ km}^3$ ,大规模的硅质(到双峰式)岩浆活动发生在 38~20Ma 之间,其形成与加利福尼亚湾的裂谷作用密切相关,岩石组合以流纹质熔结凝灰岩为主,夹有 5%~10% 的基性-酸性的熔岩(Cameron *et al.*, 1980; Ferrari *et al.*, 2018)。

Chon Alike 硅质大火成岩省由南美洲南部的 Patagonia 和南极洲西部的 Peninsula 组成,是目前覆盖面积最大的硅质大火成岩省( $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ ),其体积高达  $2.3 \times 10^5 \text{ km}^3$ ,它由 Chon Alike、Marifil、Bajo Pobre、Lonco Trapial 四个建造构成,其形成年代有所重叠,在 180~140Ma 形成,岩石组合以流纹质熔结凝灰岩为主,夹有玄武岩,还有部分镁铁质熔岩、英安质熔结凝灰岩(Pankhurst *et al.*, 1998; Riley *et al.*, 2001)。

Whitsunday 硅质大火成岩省位于澳大利亚东部,在西太平洋呈北西-南东向条带状分布,是目前体积最大的硅质大火成岩省,高达  $2.2 \times 10^6 \text{ km}^3$ ,在 132~95Ma 形成,其形成与冈瓦纳大陆东部的裂解密切相关,岩石组合以英安质-流纹质岩屑凝灰岩为主,被宽度可达 50m 的辉长岩/辉绿岩-流纹岩岩脉及伴生的花岗岩后期侵入(Ewart *et al.*, 1992; Bryan *et al.*, 2000)。

Malani 硅质大火成岩省位于印度西北部,其面积大于  $55000 \text{ km}^2$ ,是目前为数不多的元古宙硅质大火成岩省,形成于  $760 \pm 10 \text{ Ma}$ ,其岩石组合具有双峰式的特点,但以硅质岩石为主,还有较多伴生的花岗质岩石和镁铁质与长英质岩脉

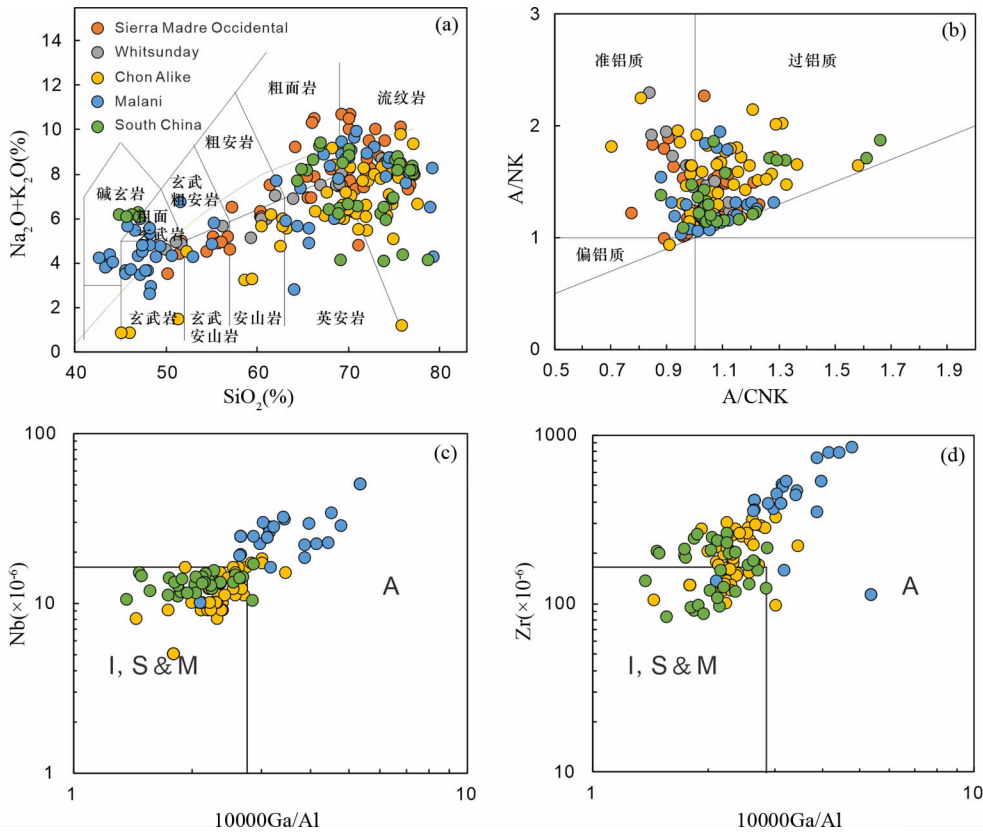


图2 五个硅质大火成岩省岩浆岩地球化学判别图解

(a) TAS 图解(底图据 Le Bas *et al.*, 1986); 中酸性岩浆岩( $\text{SiO}_2 > 60\%$ ) A/CNK-A/NK 图解(b, 底图据 Maniar and Piccoli, 1989)、10000Ga/Al-Nb 判别图(c, 底图据 Whalen *et al.*, 1987) 和 10000Ga/Al-Zr 判别图(d, 底图据 Whalen *et al.*, 1987). A-A 型花岗质岩石; I-I 型花岗质岩石; S-S 型花岗质岩石; M-M 型花岗质岩石. 数据来源: Sierra Madre Occidental (Wark, 1991; Albrecht and Goldstein, 2000; Ferrari *et al.*, 2007)、Whitsunday (Ewart *et al.*, 1992; Bryan *et al.*, 2000)、Chon Alike (其中南极洲 Peninsula 数据来自 Riley *et al.*, 2001; 南美洲 Patagonia 数据来自 Pankhurst and Rapela, 1995)、Malani (Van Lente *et al.*, 2009; de Wall *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018)、South China (Wang *et al.*, 2016). 后图数据来源和图例同此图

Fig. 2 Geochemical discrimination diagrams for igneous rock samples from five S-LIPs

(a) TAS diagram for igneous rock samples from five S-LIPs (after Le Bas *et al.*, 1986); (b) A/CNK vs. A/NK diagram (after Maniar and Piccoli, 1989); (c) 10000Ga/Al vs. Nb diagram (after Whalen *et al.*, 1987); (d) 10000Ga/Al vs. Zr diagram (after Whalen *et al.*, 1987). A-A-type granitoid; I-I-type granitoid; S-S-type granitoid; M-M-type granitoid. Data source: Sierra Madre Occidental (Wark, 1991; Albrecht and Goldstein, 2000; Ferrari *et al.*, 2007), Whitsunday (Ewart *et al.*, 1992; Bryan *et al.*, 2000), Chon Alike (Peninsula from Riley *et al.*, 2001; Patagonia from Pankhurst and Rapela, 1995), Malani (Van Lente *et al.*, 2009; de Wall *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018), South China (Wang *et al.*, 2016). Data source and symbols are listed in this figure

侵入体(de Wall *et al.*, 2018)。

South China 硅质大火成岩省主要分布在中国东南沿海的浙江、福建、江西、广东一带,其分布面积  $10^5 \text{ km}^2$  以上,如果将与其有成因联系的花岗岩考虑在内,其体积在  $1.5 \times 10^5 \text{ km}^3$  以上,岩石组合由流纹质熔结凝灰岩、流纹岩-玄武岩双峰式组合构成(王德滋和周金城, 2005; Wang *et al.*, 2016)。

## 2.2 岩石主微量元素组成

在 TAS 图解上,可见硅质大火成岩省从成分上由基性岩到酸性岩均有产出,包括玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩一系列熔岩以及不同成分的火山碎屑岩,其中又以  $\text{SiO}_2 > 60\%$  的

中酸性岩石为主(图 2a),大量产出的流纹质凝灰岩是构成硅质大火成岩省的主体,这些岩石多为钙碱性系列(图 2a),显示在准铝质和过铝质之间过渡的性质(图 2b)。硅质大火成岩省中钙碱性的中酸性岩浆岩多具有斜长石、碱性长石、石英、黑云母、角闪石斑晶,具有 I 型花岗质岩石的特点,而 10000Ga/Al 的值指示了其从 I 型向 A 型花岗质岩石过渡的特点(图 2c, d)。不同大火成岩省的岩浆岩样品在  $\text{SiO}_2$  与  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  的哈克图解上显示出了十分相似的演化趋势(图 3);同时,在球粒陨石标准化稀土元素配分型式图和原始地幔标准化微量元素蛛网图上,这些样品也展现出了趋势相似、配分曲线大致平行的特点,均具有不同程度的 Nb、Ta 的负异常及 Ba、Eu、Sr、Ti、P 的亏损(图 4);这

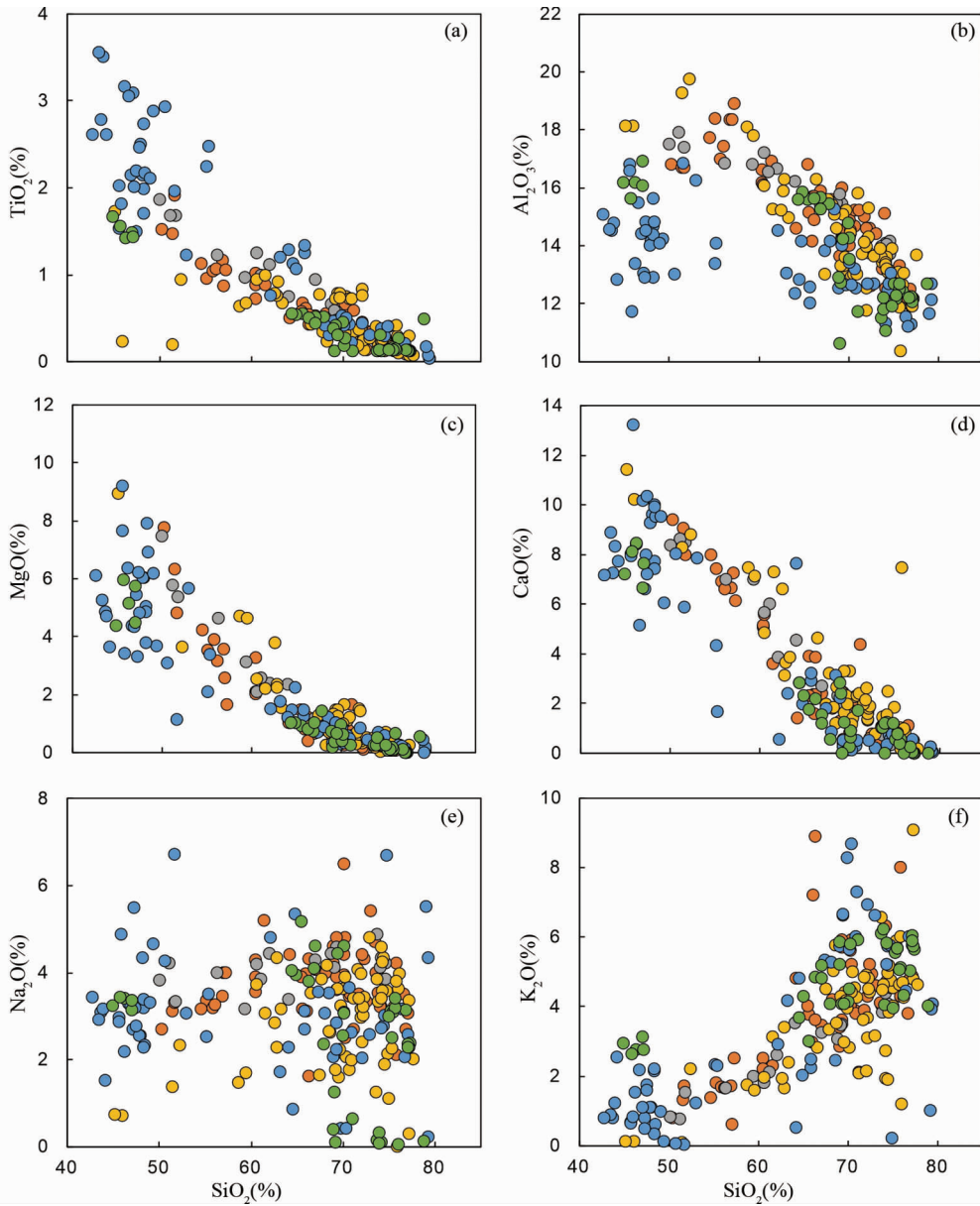


图3 五个硅质大火成岩省岩浆岩样品的哈克图解

SiO<sub>2</sub> 对 TiO<sub>2</sub> (a)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b)、MgO (c)、CaO (d)、Na<sub>2</sub>O (e) 和 K<sub>2</sub>O (f) 图解

Fig. 3 Harker diagrams for igneous rock samples from five S-LIPs

SiO<sub>2</sub> against TiO<sub>2</sub> (a), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b), MgO (c), CaO (d), Na<sub>2</sub>O (e) and K<sub>2</sub>O (f) diagrams

说明世界上不同地区、不同年代的硅质大火成岩省可能是在类似的环境下形成的,这类巨量中酸性岩石所构成的大火成岩省可能具有相似的形成机制(Bryan and Ernst, 2008)。

### 2.3 大规模长英质岩浆成因

流纹质岩浆可以主要由以下两种机制形成:地壳部分熔融,或者中基性岩浆发生高程度分离结晶作用。Riley *et al.* (2001) 认为 Chon Alike 的酸性岩石由地壳部分熔融形成,而 Pankhurst *et al.* (1998) 虽然认可由底侵岩浆导致地壳熔融形成酸性岩浆的机制,但同时指出 Chon Alike 大火成岩省中

有大量的流纹质岩石的化学组成,同样也都可以通过中基性岩浆分离结晶模型模拟得到,所以不一定全部都是地壳部分熔融形成。在二十世纪八九十年代,Cameron 及其合作者(Cameron *et al.*, 1980)通过一系列的研究认为 Sierra Madre Occidental 的硅质岩浆主要来源于幔源镁铁质岩浆的分离结晶,并且几乎没有受到地壳混染的影响,但 Bryan and Ernst (2008) 的研究表明,Sierra Madre Occidental 中锆石 U-Pb 测年的年龄普遍大于斜长石或黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 测年的年龄,因此他们推测这些锆石是源于早期形成的深成岩体的继承锆石,反应了早期岩浆底侵地壳加厚,和随后地壳重熔生成硅

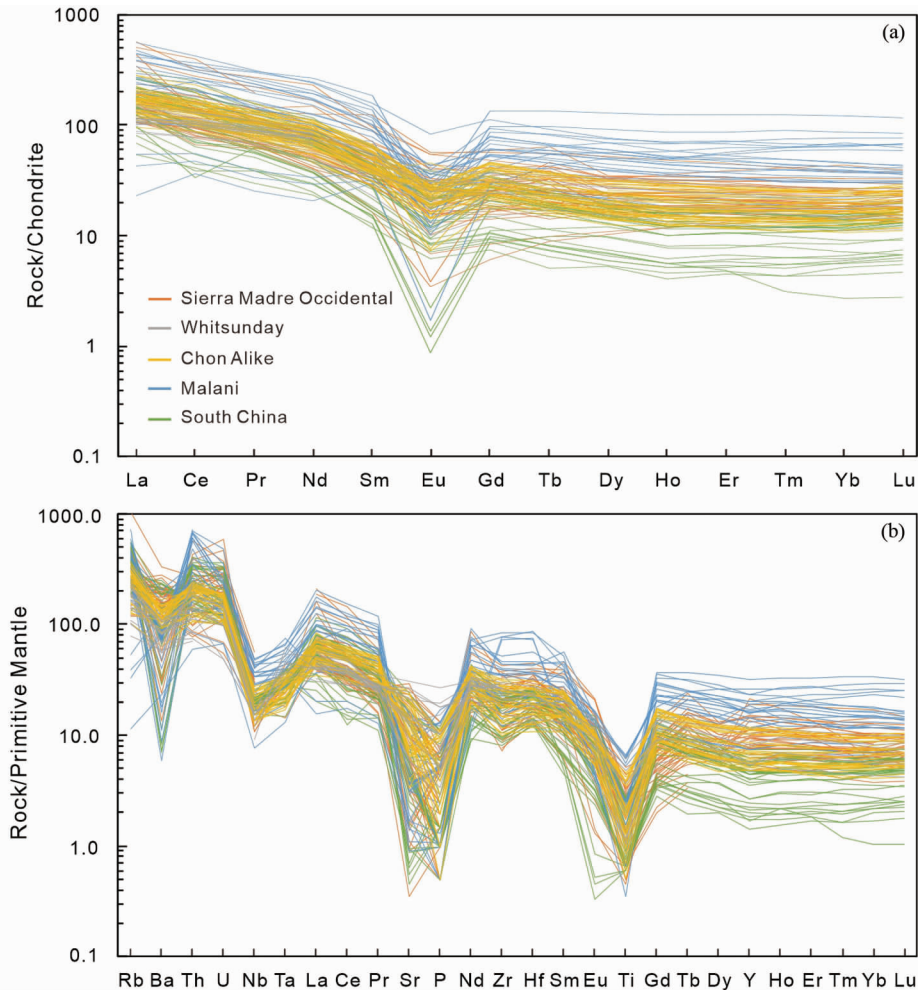


图4 五个硅质大火成岩省中酸性岩浆岩 ( $\text{SiO}_2 > 60\%$ ) 球粒陨石标准化稀土元素配分型式图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b) (标准化值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b) for intermediate-felsic igneous rocks ( $\text{SiO}_2 > 60\%$ ) from five S-LIPs (normalized values from McDonough and Sun, 1995)

质岩浆的过程。Ewart *et al.* (1992) 认为 Whitsunday 的中酸性岩石是幔源岩浆和新生下地壳重熔形成的流纹质岩浆混合后,再经历了不同程度分离结晶的产物。

如上所述,尽管对硅质大火成岩省长英质岩石的成因仍有争议,但多数学者还是倾向于大规模长英质岩浆是由地壳部分熔融形成 (Riley *et al.*, 2001; Bryan, 2007; Bryan and Ernst, 2008), 因为玄武质岩浆通过分离结晶通常只能形成约 5vol. % 的流纹质岩浆,而如果要完全通过分离结晶作用形成大火成岩省规模的酸性岩浆 ( $> 10^5 \text{ km}^3$ ), 则意味着至少在深部存在数十倍于大火成岩省体积的堆晶,这几乎是不可能的 (王德滋和周金城, 2005)。

地壳部分熔融能否形成大规模长英质岩浆取决于两个关键因素: (1) 地壳的含水量及组成; (2) 地幔能否提供足够的热量 (Bryan *et al.*, 2002; Bryan and Ferrari, 2013)。

前人通过实验岩石学的方法模拟含水玄武岩、变玄武

岩、角闪岩在不同物理化学的条件下的部分熔融 (Helz, 1976; Spulber and Rutherford, 1983; Beard and Lofgren, 1989, 1991), 结果表明其熔体中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量主要受水含量影响, 氧逸度和起始组分为次要因素。因为较高的水压 ( $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ) 可以缩小斜长石和石英的稳定范围, 因此  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  越高, 这些长英质矿物就越容易熔融, 熔体中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量就越高 (Spulber and Rutherford, 1983; Conrad *et al.*, 1988)。Thy *et al.* (1990) 的研究表明冰岛流纹岩落在  $P_{\text{H}_2\text{O}} < 1 \text{ kbar}$  的范围内, 因此认为这些流纹岩源于地壳的部分熔融。而在图 5 中, 五个硅质大火成岩省的中酸性岩石与冰岛流纹岩类似, 均落入  $P_{\text{H}_2\text{O}} < 1 \text{ kbar}$  的范围内, 指示其可能为富水下地壳熔融的产物。此外, 区别于镁铁质大火成岩省岩石无含水矿物, 硅质大火成岩省中的长英质岩石多以具有角闪石、黑云母等含水斑晶为特征, 同样指示其来自富水的源区 (Bryan, 2007)。

地壳发生大规模的熔融需要其底部有足够的热量进行

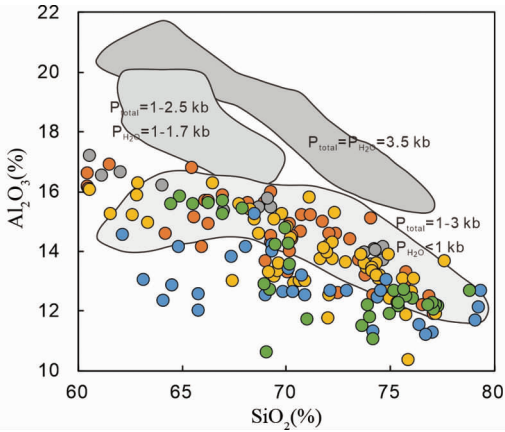


图5 含水玄武质地壳在不同  $P_{H_2O}$  下熔融形成熔体中  $SiO_2$  与  $Al_2O_3$  协变图(据 Thy *et al.*, 1990 修改, 实验岩石学数据来自 Helz, 1976; Spulber and Rutherford, 1983; Beard and Lofgren, 1989)

岩石样品为来自 5 个不同硅质大火成岩省的中酸性岩浆岩 ( $SiO_2 > 60\%$ )

Fig. 5  $SiO_2$  vs.  $Al_2O_3$  in the melts produced by partial melting of hydrous basaltic crust under different  $P_{H_2O}$  (after Thy *et al.*, 1990, experimental petrology data from Helz, 1976; Spulber and Rutherford, 1983; Beard and Lofgren, 1989)

The rock samples are intermediate-felsic igneous rocks ( $SiO_2 > 60\%$ ) from five S-LIPs

加热, 前人的研究通常将其解释为底侵的玄武质岩浆烘烤下地壳, 如 Sierra Madre Occidental (Bryan and Ferrari, 2013); 而这一热源也可能是地幔柱, 如 Chon Alike 就被认为是 Gondwana 大陆裂解时, 形成 Karoo 镁铁质大火成岩省的地幔柱加热下地壳部分熔融的产物 (Riley *et al.*, 2001; Bryan, 2007)。从能量守恒的角度出发, 如果地壳熔融形成了大火成岩省规模的酸性岩浆, 那么为之提供热量的热源 (镁铁质岩浆) 的体积应当同样至少有大火成岩省的规模。Ernst (2014) 提出每个硅质大火成岩省实际上都可以被认为是“隐伏的镁铁质大火成岩省”, 即在地壳深部存在大火成岩省体积的镁铁质岩体。镁铁质大火成岩省一般出现在古老的、几乎不含水的地壳内, 这是因为当地幔柱向上移动时, 由于含水量低而“较脆”的地壳的拉张减薄, 易于形成岩浆运移通道, 岩浆房中的镁铁质岩浆能够沿通道喷出形成镁铁质大火成岩省。而硅质大火成岩省的地壳通常含水量较高, 难以形成深而狭长的岩浆通道将大量镁铁质岩浆运移至地表, 同时, 地壳大规模熔融形成的大量硅质岩浆, 在上方构成了天然的屏障, 进一步阻碍了下部镁铁质岩浆的喷发 (Bryan, 2007; Turner and Campbell, 1986)。Huang *et al.* (2015) 通过地震波纵波反演的方法证实了在 Yellowstone 的上地壳 (5 ~ 10km) 处存在一个流纹质岩浆房, 并且在下地壳 (20 ~ 50km)

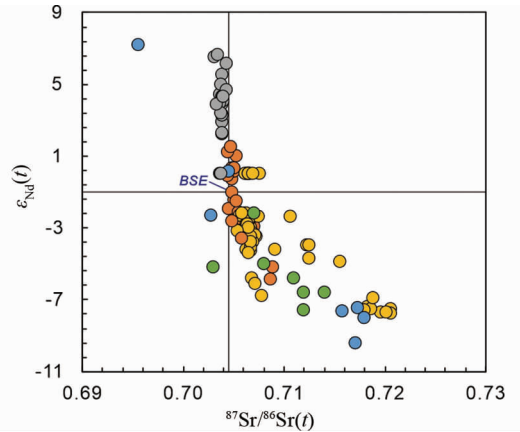


图6 五个硅质大火成岩省中酸性岩浆岩 ( $SiO_2 > 60\%$ ) 的  $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ - $\epsilon_{Nd}(t)$  图解

Fig. 6  $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$  vs.  $\epsilon_{Nd}(t)$  diagram for intermediate-felsic igneous rocks ( $SiO_2 > 60\%$ ) from five S-LIPs

处还存在一个是其体积 4.5 倍的玄武质岩浆岩体, 它提供的热量使得上部地壳能够部分熔融形成流纹质岩浆岩。这一研究为硅质大火成岩省所在区域深部存在隐伏的镁铁质大火成岩省的设想提供了证据。

此外, 这些中酸性岩石具有不同程度的 Ba、Eu、Sr、Ti、P 的负异常 (图 4b), 暗示其在岩浆演化过程中经历了不同程度的长石、钛铁氧化物、磷灰石等分离结晶作用, 而大量的分离结晶作用会加大这些微量元素的负异常, 使残余熔体中  $SiO_2$  含量不断升高 ( $> 75\%$ ), 从而使硅质大火成岩省中的岩石显示出从 I 型向 A 型花岗岩岩石过渡的特点。

## 2.4 源区性质

不同硅质大火成岩省的 Sr-Nd 同位素组成具有较大的区别 (图 6), Whitsunday 的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值最高, 多数在  $+2 \sim +7$  之间,  $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$  比值在 0.7040 左右, 其 Nd 模式年龄 ( $t_{DM}$ ) 为 250 ~ 600Ma; Sierra Madre Occidental 的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值稍低, 主要在  $-1 \sim +4$  之间,  $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$  比值主要集中在 0.7040 ~ 0.7060; Chon Alike 多数样品的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值与 Sierra Madre Occidental 大致相似,  $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$  比值主要集中在 0.7040 ~ 0.7080,  $t_{DM}$  年龄主要为 1 ~ 1.2Ga, 少数样品具有小于  $-7$  的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值和大于 0.7160 的  $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$  比值; Malani 多数样品的  $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$  比值大于 0.7140,  $\epsilon_{Nd}(t)$  值在  $-11 \sim -7$  之间, 个别样品具有高的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值和小于 0.704 的  $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$  比值; 我国华南的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值在  $-7 \sim -2$  之间, 其  $t_{DM2}$  年龄多数大于 1.4Ga。

各硅质大火成岩省中酸性岩浆岩的 Sr-Nd 同位素差别可能反应了地壳性质的差别。Ewart *et al.* (1992) 认为 Whitsunday 较高的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值、低  $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$  比值, 及年轻的  $t_{DM}$  年龄指示其可能是古生代至中生代新生地壳熔融的产



物; Bryan and Ernst (2008) 综合考虑 Sierra Madre Occidental 的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和岩石中继承锆石的特征, 认为其形成可能与早期俯冲有关的下地壳中火成岩的重熔关系密切; Pankhurst *et al.* (1998) 和 Riley *et al.* (2001) 的研究认为 Chon Alike 多数样品中等的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和较老的  $t_{\text{DM}}$  年龄, 反应了元古代地壳的熔融, 而少数具有极低的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和极高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  比值的样品则可能是沉积岩熔融的产物; de Wall *et al.* (2018) 和 Wang *et al.* (2018) 认为 Malani 中具有低的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值和高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  比值的样品可能与其较老的形成时间 (~750Ma) 有关, 指示了地幔上涌使得古老下地壳熔融的成岩过程, 而少量具有较为原始的同位素特征的样品则可能是幔源玄武质岩浆分离结晶或壳幔岩浆混合的结果; Wang *et al.* (2016) 的研究认为我国华南中等的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值是岩浆底侵形成的新生地壳和古老地壳熔融后混合的结果。

如上所述, 虽然同位素组成有差异, 但前人对这些大火成岩省的研究都表明先前形成的地壳的年代和性质决定了硅质大火成岩省产出的中酸性岩石的地球化学特征。而几乎所有硅质大火成岩省均靠近大陆边缘, 产出的岩石多含有角闪石、黑云母等含水斑晶 (Bryan, 2007), 同时, 在其微量元素蛛网图上具有明显的 Nb、Ta、Ti 的负异常 (图 4b), 这些证据均指示硅质大火成岩省的中酸性岩石的源区受到了早期俯冲流体交代的影响。早期的俯冲流体交代地幔楔, 伴随着岩浆底侵和地壳垂向生长, 逐渐在下地壳处形成了大量富集的、含水的物质 (Tamura and Tatsumi, 2002; Clemens *et al.*, 2011; Bryan and Ferrari, 2013), 而随着玄武质岩浆底侵 (或地幔柱) 从地幔向地壳输送大量的热量, 使得先前形成的富水的下地壳发生大规模的重熔和再循环, 从而形成了构成硅质大火成岩省的巨量酸性岩浆。因此这些中酸性岩石继承了与俯冲有关的地球化学特征, 在 Pearce *et al.* (1984) 提出的 Nb-Y 的花岗质岩石判别图解上, 来自五个硅质大火成岩省的样品均展现出了一致的、由汇聚板块边界向板内环境过渡的特点 (图 7)。

## 2.5 形成机制

目前世界上主要的硅质大火成岩省几乎都在板块边缘呈带状分布, 其形成被认为与俯冲作用有关 (Bryan, 2007), 但需要注意的是, 多数学者的研究表明, 硅质大火成岩省并不是在俯冲的环境中形成的, 而是在后期拉伸的板内环境中形成的 (Sierra Madre Occidental; Ferrari *et al.*, 2018; Bryan and Ferrari, 2013), 因此往往与大陆裂解在时空上关系密切。早期的俯冲一方面在下地壳处形成了大量富集、富水的物质, 为大规模长英质岩浆的形成提供了物质来源; 另一方面, 俯冲作用带来的流体交代使得地壳含水量升高, 使其固相线下降, 从而使得地壳的大规模熔融成为可能。

综上所述, 硅质大火成岩省的形成机制可归纳为: 早期持续的俯冲交代使得地壳垂向生长, 形成了富水的地壳, 随着俯冲结束, 构造环境由汇聚的板块边界向板内伸展环境转

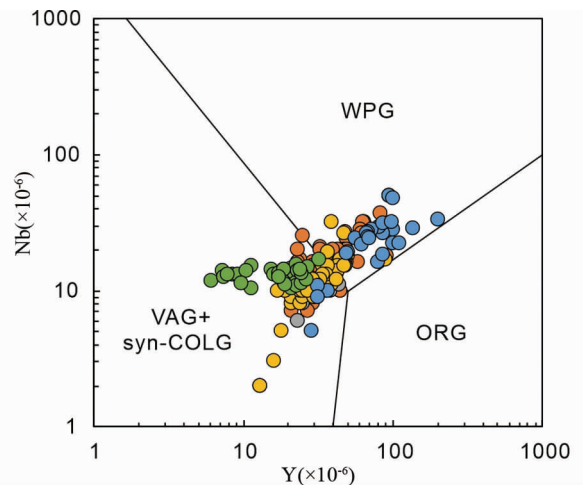


图 7 五个硅质大火成岩省中酸性岩浆岩 ( $\text{SiO}_2 > 60\%$ ) Nb-Y 构造判别图解 (底图据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 7 Nb vs. Y diagram for tectonic discrimination for intermediate-felsic igneous rocks ( $\text{SiO}_2 > 60\%$ ) from five S-LIPs (after Pearce *et al.*, 1984)

变, 有大火成岩省规模的玄武质岩浆向上底侵至壳幔边界或侵入下地壳形成深成岩体 (也可能是地幔柱上升至壳幔边界), 这一过程将巨大的热量从地幔输送至地壳, 并触发了大规模的地壳熔融, 形成了巨量的酸性岩浆, 这些位于上部的酸性岩浆密度小, 阻碍了下部玄武质岩浆的上涌, 并在拉张的环境下由破火山机构喷出地表, 形成了巨厚堆积的流纹质熔结凝灰岩, 在地表形成了硅质大火成岩省。同时, 大量未能喷发的玄武质岩浆在地壳深部形成了“隐伏的镁铁质大火成岩省”。

## 3 硅质大火成岩省与环境

在镁铁质大火成岩省形成过程中, 火山作用释放大量气溶胶, 可能以两种方式对全球气候产生影响: 一种是玄武质岩浆喷发时伴随着大量的二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ ), 在大气中形成了大量的硫酸盐 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 气溶胶, 这些气溶胶吸收太阳辐射, 从而导致全球降温 (Self *et al.*, 2005); 另一种是岩浆喷发伴随着大量二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 的释放, 导致了温室效应和海洋的酸化 (Wignall, 2001, 2005)。由镁铁质大火成岩省所引起的气候变化也被认为可能是生物大灭绝的重要诱因 (Wignall, 2001)。然而, 要引起全球范围内的气候变化有一个重要的前提: 伴随岩浆喷发形成的气溶胶必须能够穿过对流层, 进入平流层。这是因为对流层中的气溶胶很容易被大气降水所带走, 无法在大气中长时间停留造成全球性的影响 (Thordarson *et al.*, 2009; Black *et al.*, 2012)。然而, 镁铁质大火成岩省熔岩喷溢 (熔岩喷泉) 的高度不可能达到平流层, 所以虽然其具有较大的体积, 但是否影响全球气候环境造

成急剧变化仍有较大争议。

近年来的研究表明,硅质大火成岩省的岩浆活动,能够对全球气候造成更大规模的影响。这是因为相比于镁铁质大火成岩省中溢流玄武岩只有 <5km 的喷发高度,只能将气溶胶喷射入对流层中 (Self *et al.*, 1997),硅质大火成岩省的火山作用能够将 SO<sub>2</sub> 气溶胶和火山灰送入更高的平流层,参与全球的大气对流,更显著的引发全球气候变冷 (Bryan, 2007)。此外,大规模硅质岩浆喷发所形成的火山灰能够使海洋富铁,促进浮游生物的繁殖和光合作用,将大气中的 CO<sub>2</sub> 气体转变为有机碳,从而导致全球降温 (Cather *et al.*, 2009)。

现代通过卫星测算的与俯冲相关的安山岩-英安岩喷发时所释放的 SO<sub>2</sub> 量,比通过岩石学手段计算出的这些中酸性岩浆所溶解的 S 含量高出了一到两个数量级,而现代板内玄武质岩浆的形成过程中却并未出现类似的情况 (Westrich and Gerlach, 1992; Sharma, 2004),这说明在硅质大火成岩省形成过程中,可能有大量的单独以气相存在的 SO<sub>2</sub> 在喷发前已经释放 (Wallace, 2001; Bryan, 2006),因此硅质大火成岩省对气候的影响可能被大大低估了。前人研究表明 S 为岩浆成因 (Wallace, 2001),但硅质岩浆仅能溶解少量的 S,而富 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-S 气体的镁铁质岩浆则是 SO<sub>2</sub> 的重要来源,硅质大火成岩省的形成又意味着区域深部存在巨量的镁铁质岩浆 (即隐伏的硅质大火成岩省) (Ernst, 2014),因此推测硅质大火成岩省喷发前释放的大量 SO<sub>2</sub> 气体可能源于下方为地壳熔融提供热源的镁铁质岩浆。

## 4 硅质大火成岩省与矿产资源

由于巨量的岩浆活动极大促进了地幔到地壳之间的物质和能量交换,以及早期的俯冲作用使得地壳富水,使得硅质大火成岩省具备形成热液矿床的条件,如在 Sierra Madre Occidental 约 0.5 × 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> 区域内分布了近 800 个贵金属浅成低温热液矿床 (Camprubí *et al.*, 2003; Murray and Busby, 2015),因此具有重要的经济意义。

硅质大火成岩省中的矿床以低硫化型 Au-Ag 浅成低温热液矿床为主,如 Sierra Madre Occidental 的 Guanajuato、La Guitarra 矿床 (Camprubí *et al.*, 2003),Chon Alike 的 Cerro Vanguardia、La Josefina 矿床 (Schalamuk *et al.*, 1997; Moreira and Fernández, 2015),以及中国华南的水口山地区的 Au-Ag-Pb-Zn 矿床 (华仁民等, 2005)。此外,也有少量的高硫化型和斑岩型 Cu-Au 矿床和火山型块状硫化物矿床 (Staude and Barton, 2001; Zaw *et al.*, 2003)。Bryan (2007) 提出硅质大火成岩省中的热液成矿系统的形成与火山塌陷构造、破火山机构周边断层和沿地堑的伸展性断层关系密切,这些断裂和断层为热液的运移提供了通道。这些矿床成矿的时代 (如 La Guitarra; 23 ~ 18Ma; Cerro Vanguardia; 153 ~ 138Ma) 通常对应各硅质大火成岩省中岩浆活动主峰期的最后阶段 (表 1),

指示热液成矿作用主要发生在硅质大火成岩省形成的末期,即岩浆活动的强度在中-上地壳达到峰值的时期 (Bryan, 2007)。

## 5 我国硅质大火成岩省展望

通过上述对比研究,我们归纳总结了硅质大火成岩省的几个识别依据: (1) 中酸性火山碎屑岩或熔岩覆盖面积在 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup> 以上,且持续时间基本在 40Myr 之内,并具有一个或多个峰期; (2) 板块边缘有大量火山机构 (破火山口) 发育的地区; (3) 镁铁质大火成岩省附近的地区 (尤其是有相对较多长英质岩石产出的镁铁质大火成岩省)。根据这些识别依据,我国境内很可能存在不止一个硅质大火成岩省。

东南沿海地区分布有大量的晚中生代中酸性岩浆岩。王德滋和周金城 (2005) 在国内最早指出浙江、福建、江西一带广泛分布的白垩纪中-酸性火山岩及与之有成因联系的花岗岩,其总面积超过 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,体积可达 1.5 × 10<sup>5</sup> km<sup>3</sup>,构成了一个长英质大火成岩省。他们进一步指出其中的火山岩具有钙碱性和高钾钙碱性系列的特点,认为其成岩物质来源可能具有壳幔混源的性质,中酸性火山岩的形成可能与基性岩浆底侵导致的地壳发生大规模部分熔融有关。张旗 (2013) 将中国东部燕山期岩浆岩划分为 4 个长英质大火成岩省,他将王德滋和周金城 (2005) 划分的大火成岩省范围进一步扩大到广东省,命名为东南沿海大火成岩省,认为其形成年龄为 130 ~ 110Ma,面积约为 3.5 × 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,并指出巨量长英质岩浆的形成可能与地幔柱直接抵达下地壳导致下地壳发生熔融有关。最近, Wang *et al.* (2016) 将分布在浙江、福建和广东的晚中生代岩浆岩命名为华南-沿海硅质大火成岩省 (South China Block-Coastal Region, SCB-CR SLIP),其分布面积约为 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup>,他们将岩浆活动划分为 4 个期次,年龄跨度为 149 ~ 100Ma,但主要集中在 128 ~ 110Ma,认为其形成与板块俯冲以及随后的俯冲板片回撤导致的弧后伸展作用有关。由此可见,多数学者认为我国东南沿海地区可能构成一个硅质大火成岩省,但是其分布范围和活动时间以及成因还远没有达成一致认识。

此外,在我国境内的中亚造山带有大量的早二叠世 (~280Ma) 岩浆岩产出,如准噶尔地区,有大量形成年龄为 276.0 ~ 279.8Ma 的流纹岩及相应的花岗岩,并显示出由 I 型向 A 型花岗岩岩石过渡的特征 (Li *et al.*, 2014); 在天山造山带,有大量形成于 273 ~ 304Ma (峰值在 ~280Ma) 的钾长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩产出,多具有 I 型花岗岩的特征 (黄河等, 2011),相应的火山岩比较少,可能与剥蚀程度有关;除了长英质岩石之外,在阿尔泰-准噶尔以及天山-北山等地区还有一些同时代的镁铁质-超镁铁质侵入岩,并且这些侵入岩常产出有铜镍硫化物矿床。同时,近年来的研究表明,在紧邻准噶尔和天山造山带的塔里木大火成岩省中,也发育有巨量的长英质岩石 (~20vol. %),分布面积可达 0.48

$\times 10^5 \text{ km}^2$  (程志国等, 2019), 主要岩性为粗面英安岩、安山岩、流纹岩、正长岩和火山碎屑岩, 形成年代在 280 ~ 300Ma 之间 (Xu *et al.*, 2014); 因此, 我们推测存在一个与塔里木大火成岩省有密切联系的硅质大火成岩省, 并可能为硅质和镁铁质大火成岩省并存的形成机制提供难得的例证。当然, 这只是基于前人年代学和岩石学工作提出的猜想, 仍需大量的数据进行证实。

## 6 结论

(1) 硅质大火成岩省主要由流纹质熔结凝灰岩构成, 具有和镁铁质大火成岩省类似的体积和面积, 其形成时间相对较长 (~40Myr), 多产出在大陆边缘, 可能与大陆裂解和镁铁质大火成岩省的形成有关。

(2) 硅质大火成岩省的形成可归结于: 前期的俯冲交代地幔楔, 伴随着地壳的垂向生长在下地壳处形成了大量富集、富水的物质, 在拉张的板内环境下大量玄武质岩浆底侵, 烘烤富水的下地壳使其发生大规模熔融形成巨量的中酸性岩浆。

(3) 硅质大火成岩省下方的镁铁质岩浆向上输送了大量  $\text{SO}_2$  气体, 并随着大规模的硅质岩浆活动形成气溶胶喷射进入平流层, 同时, 大量的火山灰可能使得海洋富铁, 通过生物光合作用吸收大气  $\text{CO}_2$ , 从而导致全球气候变冷。

(4) 硅质大火成岩省中有大量低硫化型 Au-Ag 浅成低温热液矿床产出, 具有重要的经济价值。

(5) 在我国的华南地区、中亚造山带及其南部的塔里木克拉通, 可能存在硅质大火成岩省, 后者可能是当今镁铁质大火成岩省和硅质大火成岩省并存的典型例证。

**致谢** 感谢终审主编和各位审稿人对本文提出的宝贵意见和建议, 感谢本刊编辑部老师对本文的指导和细致修改, 对提高本文的质量起到了重要的作用。

## References

Angangi A, Kamenetsky VS and McPhie J. 2012. Evolution and emplacement of high fluorine rhyolites in the Mesoproterozoic Gawler silicic large Igneous Province, South Australia. *Precambrian Research*, 208 - 211; 124 - 144

Aguirre-Díaz G and Labarthe-Hernández G. 2003. Fissure ignimbrites: Fissure-source origin for voluminous ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and its relationship with Basin and Range faulting. *Geology*, 31(9): 773 - 776

Albrecht A and Goldstein SL. 2000. Effects of basement composition and age on silicic magmas across an accreted terrane-Precambrian crust boundary, Sierra Madre Occidental, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 13(3): 255 - 273

Beard JS and Lofgren GE. 1989. Effect of water on the composition of partial melts of greenstone and amphibolite. *Science*, 244(4901): 195 - 197

Beard JS and Lofgren GE. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1,

3, and 6.9kb. *Journal of Petrology*, 32(2): 365 - 401

Black BA, Elkins-Tanton LT, Rowe MC and Peate IU. 2012. Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps. *Earth and Planetary Science Letters*, 317 - 318; 363 - 373

Bryan SE, Constantine AE, Stephens CJ, Ewart A, Schön RW and Parianos J. 1997. Early Cretaceous volcano-sedimentary successions along the eastern Australian continental margin: Implications for the break-up of eastern Gondwana. *Earth and Planetary Science Letters*, 153(1 - 2): 85 - 102

Bryan SE, Ewart A, Stephens CJ, Parianos J and Downes PJ. 2000. The Whitsunday Volcanic Province, Central Queensland, Australia: Lithological and stratigraphic investigations of a silicic-dominated large igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 99(1 - 4): 55 - 78

Bryan SE, Riley TR, Jerram DA, Leat PT and Stephens CJ. 2002. Silicic volcanism: An under-valued component of Large Igneous Provinces and volcanic rifted margins. In: Menzies MA, Klemperer SL, Ebinger CJ and Baker J (eds.). *Magmatic Rifted Margins*. Geological Society of America Special Paper, 99 - 120

Bryan SE. 2006. Petrology and geochemistry of the quaternary caldera-forming, Phonolitic Granadilla Eruption, Tenerife (Canary Islands). *Journal of Petrology*, 47(8): 1557 - 1589

Bryan SE. 2007. Silicic Large Igneous Provinces. *Episodes*, 30(1): 20 - 31

Bryan SE and Ernst RE. 2008. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs). *Earth-Science Reviews*, 86(1 - 4): 175 - 202

Bryan SE and Ferrari L. 2013. Large igneous provinces and silicic large igneous provinces: Progress in our understanding over the last 25 years. *GSA Bulletin*, 125(7 - 8): 1053 - 1078

Cameron KL, Cameron M, Bagby WC, Moll EJ and Drake RE. 1980. Petrologic characteristics of mid-Tertiary volcanic suites, Chihuahua, Mexico. *Geology*, 8(2): 87 - 91

Campbell IH and Griffiths RW. 1990. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 99(1 - 2): 79 - 93

Campbell IH. 2007. Testing the plume theory. *Chemical Geology*, 241(3 - 4): 153 - 176

Camprubí A, Ferrari L, Cosca MA, Cardellach E and Canals À. 2003. Ages of epithermal deposits in Mexico: Regional significance and links with the evolution of tertiary volcanism. *Economic Geology*, 98(5): 1029 - 1037

Cather SM, Dunbar NW, McDowell FW, McIntosh WC and Scholle PA. 2009. Climate forcing by iron fertilization from repeated ignimbrite eruptions: The icehouse-silicic large igneous province (SLIP) hypothesis. *Geosphere*, 5(3): 315 - 324

Cheng ZG, Zhang ZC, Wang ZC, Stantosh M, Wang FY, Mao Q and Xu LJ. 2019. Genesis of perilitic rocks in Tarim igneous province: Contribution from remelting of hydrous crust. In: *The 17<sup>th</sup> Annual Conference of the Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. Hangzhou: Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 317 - 318 (in Chinese)

Clemens JD, Stevens G and Farina F. 2011. The enigmatic sources of I-type granites: The peritectic connexion. *Lithos*, 126(3 - 4): 174 - 181

Coffin MF and Eldholm O. 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences. *Reviews of Geophysics*, 32(1): 1 - 36

Conrad WK, Nicholls IA and Wall VJ. 1988. Water-saturated and -undersaturated melting of metaluminous and peraluminous crustal compositions at 10kb: Evidence for the origin of silicic magmas in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand, and other occurrences. *Journal of Petrology*, 29(4): 765 - 803

Courtillot V, Jaupart C, Manighetti I, Tapponnier P and Besse J. 1999. On causal links between flood basalts and continental breakup. *Earth and Planetary Science Letters*, 166(3 - 4): 177 - 195

Creaser RA and White AJR. 1991. Yardea dacite: Large-volume, high-temperature felsic volcanism from the Middle Proterozoic of South Australia. *Geology*, 19(1): 48 - 51

- Dalziel IWD. 1992. Antarctica; A tale of two supercontinents? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 20; 501–526
- Dalziel IWD, Lawver LA and Murphy JB. 2000. Plumes, orogenesis, and supercontinental fragmentation. *Earth and Planetary Science Letters*, 178(1–2); 1–11
- de Wall H, Pandit MK, Donhauser I, Schöbel S, Wang W and Sharma KK. 2018. Evolution and tectonic setting of the Malani-Nagarparkar Igneous Suite: A neoproterozoic silicic-dominated Large Igneous Province in NW India-SE Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160; 136–158
- Dingwell DB and Mysen BO. 1985. Effects of water and fluorine on the viscosity of albite melt at high pressure: A preliminary investigation. *Earth and Planetary Science Letters*, 74(2–3); 266–274
- Dingwell DB. 1996. Volcanic dilemma-flow or blow? *Science*, 273(5278); 1054–1055
- Ernst RE. 2014. *Large Igneous Provinces*. Cambridge; Cambridge University Press, 1–653
- Ewart A, Schon RW and Chappell BW. 1992. The Cretaceous volcanic-plutonic province of the central Queensland (Australia) coast: A rift related ‘calc-alkaline’ province. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1–2); 327–345
- Ferrari L, López-Martínez M and Rosas-Elguera J. 2002. Ignimbrite flare-up and deformation in the southern Sierra Madre Occidental, western Mexico; Implications for the late subduction history of the Farallon plate. *Tectonics*, 21(4); 17-1-17-24
- Ferrari L, Valencia-Moreno MN and Bryan SE. 2007. Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relation with the evolution of the western margin of North America. In: Alaniz-álvarez SA and Nieto-Samaniego áF (eds.). *Geology of Mexico: Celebrating the Centenary of the Geological Society of Mexico*. Geological Society of America, 1–39
- Ferrari L, Orozco-Esquivel T, Bryan SE, López-Martínez M and Silva-Fragoso A. 2018. Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews*, 183; 115–152
- Fisher RV and Schmincke HU. 1984. *Pyroclastic Rocks*. Berlin; Springer, 1–472
- Giordano D, Russell JK and Dingwell DB. 2008. Viscosity of magmatic liquids: A model. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1–4); 123–134
- Griffiths RW and Campbell IH. 1990. Stirring and structure in mantle starting plumes. *Earth and Planetary Science Letters*, 99(1–2); 66–78
- Helz RT. 1976. Phase relations of basalts in their melting ranges at  $P_{H_2O} = 5\text{ kb}$ . Part II. Melt compositions. *Journal of Petrology*, 17(2); 139–193
- Houghton BF, Wilson CJN, McWilliams MO, Lanphere MA, Weaver SD, Briggs RM and Pringle MS. 1995. Chronology and dynamics of a large silicic magmatic system; Central Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geology*, 23(1); 13–16
- Hua RM, Chen PR, Zhang WL, Yao JM, Lin JF, Zhang ZS and Gu SY. 2005. Metallogenesis and their geodynamic settings related to mesozoic granitoids in the Nanling Range. *Geological Journal of China Universities*, 11(3); 291–304 (in Chinese with English abstract)
- Huang H, Zhang ZC, Zhang DY, Du HX, Ma LT, Kang JL and Xue CJ. 2011. Petrogenesis of Late Carboniferous to Early Permian granitoid plutons in the Chinese South Tianshan; Implications for crustal accretion. *Acta Geologica Sinica*, 85(8); 1305–1333 (in Chinese with English abstract)
- Huang HH, Lin FC, Schmandt B, Farrell J, Smith RB and Tsai VC. 2015. The Yellowstone magmatic system from the mantle plume to the upper crust. *Science*, 348(6236); 773–776
- Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeis A and Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3); 745–750
- Li D, He DF, Santosh M and Tang JY. 2014. Petrogenesis of Late Paleozoic volcanics from the Zhaheba depression, East Junggar: Insights into collisional event in an accretionary orogen of Central Asia. *Lithos*, 184–187; 167–193
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *GSA Bulletin*, 101(5); 635–643
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3–4); 223–253
- Moreira P and Fernández RR. 2015. La Josefina Au-Ag deposit (Patagonia, Argentina): A Jurassic epithermal deposit formed in a hot spring environment. *Ore Geology Reviews*, 67; 297–313
- Morgan WJ. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230(5288); 42–43
- Murray BP and Busby CJ. 2015. Epithermal mineralization controlled by synextensional magmatism in the Guazapares Mining District of the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 58; 54–71
- Pankhurst RJ and Rapela CR. 1995. Production of Jurassic rhyolite by anatexis of the lower crust of Patagonia. *Earth and Planetary Science Letters*, 134(1–2); 23–36
- Pankhurst RJ, Leat PT, Sruoga P, Rapela CW, Márquez M, Storey BC and Riley TR. 1998. The Chon Aike province of Patagonia and related rocks in West Antarctica: A silicic large igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 81(1–2); 113–136
- Pankhurst RJ, Riley TR, Fanning CM and Kelley SP. 2000. Episodic silicic volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of magmatism associated with the break-up of gondwana. *Journal of Petrology*, 41(5); 605–625
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4); 956–983
- Riley TR, Leat PT, Pankhurst RJ and Harris C. 2001. Origins of large volume rhyolitic volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting. *Journal of Petrology*, 42(6); 1043–1065
- Robock A. 2000. Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38(2); 191–219
- Schalamuk IB, Zubia M, Genini A and Fernandez RR. 1997. Jurassic epithermal Au-Ag deposits of Patagonia, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 12(3); 173–186
- Self S, Thordarson T and Keszthelyi L. 1997. Emplacement of continental flood basalt lava flows. In: Mahoney JJ and Coffin MF (eds.). *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*. Washington; AGU, 381–410
- Self S, Thordarson T and Widdowson M. 2005. Gas fluxes from flood basalt eruptions. *Elements*, 1(5); 283–287
- Sharma KK. 2004. The Neoproterozoic Malani magmatism of the northwestern Indian shield; Implications for crust-building processes. *Journal of Earth System Science*, 113(4); 795–807
- Sharma KK. 2005. Malani magmatism; An extensional lithospheric tectonic origin. In: Foulger GR, Natland JH, Presnall DC and Anderson DL (eds.). *Plates, Plumes and Paradigms*. Geological Society of America, 463–476
- Spulber SD and Rutherford MJ. 1983. The origin of rhyolite and plagiogranite in oceanic crust: An experimental study. *Journal of Petrology*, 24(1); 1–25
- Staudé JMG and Barton MD. 2001. Jurassic to Holocene tectonics, magmatism, and metallogeny of northwestern Mexico. *GSA Bulletin*, 113(10); 1357–1374
- Swanson ER and McDowell FW. 1984. Calderas of the Sierra Madre Occidental Volcanic Field western Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B10); 8787–8799
- Swanson ER, Kempton KA, McDowell FW and McIntosh WC. 2006. Major ignimbrites and volcanic centers of the Copper Canyon area; A view into the core of Mexico’s Sierra Madre Occidental. *Geosphere*, 2(3); 125–141
- Tamura Y and Tatsumi Y. 2002. Remelting of an Andesitic crust as a possible origin for rhyolitic magma in oceanic arcs: An example from

- the Izu-Bonin Arc. *Journal of Petrology*, 43(6): 1029–1047
- Tassara S, González-Jiménez JM, Reich M, Schilling ME, Morata D, Begg G, Saunders E, Griffin WL, O'Reilly SY, Grégoire M, Barra F and Corgne A. 2017. Plume-subduction interaction forms large auriferous provinces. *Nature Communications*, 8(1): <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00821-z>
- Thordarson T, Rampino M, Keszthelyi LP and Self S. 2009. Effects of megascale eruptions on Earth and Mars. In: Chapman MG and Keszthelyi LP (eds.). *Preservation of Random Megascale Events on Mars and Earth; Influence on Geologic History*. Geological Society of America, 37–55
- Thy P, Beard JS and Lofgren GE. 1990. Experimental constraints on the origin of Icelandic rhyolites. *The Journal of Geology*, 98(3): 417–421
- Turner JS and Campbell IH. 1986. Convection and mixing in magma chambers. *Earth-Science Reviews*, 23(4): 255–352
- Van Lente B, Ashwal LD, Pandit MK, Bowring SA and Torsvik TH. 2009. Neoproterozoic hydrothermally altered basaltic rocks from Rajasthan, Northwest India: Implications for Late Precambrian tectonic evolution of the Aravalli Craton. *Precambrian Research*, 170(3–4): 202–222
- Wallace PJ. 2001. Volcanic SO<sub>2</sub> emissions and the abundance and distribution of exsolved gas in magma bodies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108(1–4): 85–106
- Wang DZ, Ren QJ, Qiu JS, Chen KR, Xu ZW and Zeng JH. 1996. Characteristics of volcanic rocks in the shoshonite province, eastern China, and their metallogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 70(1): 23–24 (in Chinese with English abstract)
- Wang DZ and Zhou JC. 2005. New progress in studying the large igneous provinces. *Geological Journal of China Universities*, 11(1): 1–8 (in Chinese with English abstract)
- Wang GG, Ni P, Zhao C, Wang XL, Li PF, Chen H, Zhu AD and Li L. 2016. Spatiotemporal reconstruction of Late Mesozoic silicic large igneous province and related epithermal mineralization in South China: Insights from the Zhilongou volcanic-intrusive complex. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(11): 7903–7928
- Wang W, Pandit MK, Zhao JH, Chen WT and Zheng JP. 2018. Slab break-off triggered lithosphere-asthenosphere interaction at a convergent margin: The Neoproterozoic bimodal magmatism in NW India. *Lithos*, 296–299: 281–296
- Wark DA. 1991. Oligocene ash flow volcanism, northern Sierra Madre Occidental: Role of mafic and intermediate-composition magmas in rhyolite genesis. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B8): 13389–13411
- Westrich HR and Gerlach TM. 1992. Magmatic gas source for the stratospheric SO<sub>2</sub> cloud from the June 15, 1991, eruption of Mount Pinatubo. *Geology*, 20(10): 867–870
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- Wignall PB. 2001. Large igneous provinces and mass extinctions. *Earth-Science Reviews*, 53(1–2): 1–33
- Wignall PB. 2005. The link between large igneous province eruptions and mass extinctions. *Elements*, 1(5): 293–297
- Wilson CJN, Houghton BF, McWilliams MO, Lanphere MA, Weaver SD and Briggs RM. 1995. Volcanic and structural evolution of Taupo Volcanic Zone, New Zealand: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 68(1–3): 1–28
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM and Ma ZP. 2013. Late Paleoproterozoic rift-related magmatic rocks in the North China Craton: Geological records of rifting in the Columbia supercontinent. *Earth-Science Reviews*, 125: 69–86
- Xiao L, Pirajno F and He Q. 2007. A preliminary discussion on large igneous provinces and associated ore deposits. *Geological Journal of China Universities*, 13(2): 148–160 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG. 2002. Mantle plumes, large igneous provinces and their geologic consequences. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 341–353 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, Wei X, Luo ZY, Liu HQ and Cao J. 2014. The Early Permian Tarim Large Igneous Province: Main characteristics and a plume incubation model. *Lithos*, 204: 20–35
- Zaw K, Hunns SR, Large RR, Gemmel JB, Ryan CG and Mernagh TP. 2003. Microthermometry and chemical composition of fluid inclusions from the Mt Chalmers volcanic-hosted massive sulfide deposits, central Queensland, Australia: Implications for ore genesis. *Chemical Geology*, 194(1–3): 225–244
- Zhang Q. 2013. A discussion on Mesozoic large scale magmatism and felsic large igneous province in eastern China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(4): 557–564 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC, Mahoney JJ, Mao JW and Wang FS. 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the Western Emeishan Flood Basalt Province, China. *Journal of Petrology*, 47(10): 1997–2019
- Zhu J, Zhang ZC, Santosh M and Jin ZL. 2020. Carlin-style gold province linked to the extinct Emeishan plume. *Earth and Planetary Science Letters*, 530: 115940

#### 附中文参考文献

- 程志国, 张招崇, 王振朝, Santosh M, 汪方跃, 毛骞, 徐丽娟. 2019. 塔里木大火成岩省长英质岩石成因: 来自富水地下水重熔的贡献. 见: 中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会论文摘要集. 杭州: 中国矿物岩石地球化学学会, 317–318
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 姚军明, 林锦富, 张展适, 顾晟彦. 2005. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景. *高校地质学报*, 11(3): 291–304
- 黄河, 张招崇, 张东阳, 杜红星, 马乐天, 康建丽, 薛春纪. 2011. 中国南天山晚石炭世-早二叠世花岗质侵入岩的岩石成因与地壳增生. *地质学报*, 85(8): 1305–1333
- 王德滋, 任启江, 邱检生, 陈克荣, 徐兆文, 曾家湖. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. *地质学报*, 70(1): 23–34
- 王德滋, 周金城. 2005. 大火成岩省研新进展. *高校地质学报*, 11(1): 1–8
- 肖龙, Pirajno F, 何琦. 2007. 试论大火成岩省与成矿作用. *高校地质学报*, 13(2): 148–160
- 徐义刚. 2002. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应. *地学前缘*, 9(4): 341–353
- 张旗. 2013. 中国东部中生代大规模岩浆活动与长英质大火成岩省问题. *岩石矿物学杂志*, 32(4): 557–564