

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

Role of fluids in the formation of Large Igneous Province revealed through Machine Learning

Zhiguo Cheng¹, Zhen Chen¹, Ruixuan Zhang², Zhaochong Zhang^{1*},
Richard Ernst^{3,4}, M. Santosh^{1,5}

1. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. School of Information Technology and Electrical Engineering, University of Queensland, Brisbane, Qld 4072, Australia;

3. Department of Earth Sciences, Carleton University, Ottawa, ON K1T 3Y2, Canada;

4. Faculty of Geology and Geophysics, Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia;

5. Department of Earth Sciences, University of Adelaide, SA 5005, Australia

Earth history is punctuated by voluminous magmatism and the formation of large igneous provinces (LIPs). Although anomalous mantle temperatures are known to have been involved in the formation of many LIPs, the potentially critical role played by fluids remains elusive. Here we apply machine learning methods to train models based on global datasets of basalts associated with different settings. The trained models predict that the flood basalts of Tarim LIP in northwestern China show a

spatial decrease in their island arc affinity from northeast to southwest, which can be correlated to fluids released into the overlying lithospheric mantle from earlier southward oceanic subduction. Temporally, the fluid activity declined from 290 Ma basalts to the younger 270 Ma mafic dykes, suggesting that the fusible components in the mantle source were waning over time. Our study provides new insights into the crucial role played by fluids, particularly those related to ancient subducted slabs, in the generation of LIPs.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 41772057; 42030302); 中央高校基本科研业务费优秀导师资助项目 (编号: 2652018118)

第一作者简介: 程志国 (1987-), 副教授, 研究方向: 矿物学, 岩石学, 矿床学研究. E-mail: zgcheng@cugb.edu.cn

*通信作者简介: 张招崇 (1965-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: zczhang@163.cugb.edu.cn

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

峨眉山大火成岩省苦橄岩及橄榄石的成因

徐荣, 刘勇胜*

中国地质大学(武汉), 北京 430074

尽管前人对于峨眉山大火成岩省的研究已经取得了丰富的成果,但是学术界对于苦橄岩的成因仍旧存在争议:例如源区岩性是辉石岩还是橄辉岩?橄辉石斑晶成分变化的原因是什么?地幔熔融的温压条件?由于源区如果存在辉石岩组分可能会影响我们对岩浆产率,温压条件,甚至是地表隆升(受热/成分浮力控制)的认识,因此准确可靠的鉴别大火成岩省苦橄岩的源区岩性是理解大火成岩省成因的重要前提。前人提出橄辉石斑晶中高 Ni 和 Fe/Mn 比值指示大火成岩省岩浆源区存在辉石岩组分的贡献,然而实验岩石学结果表明橄辉石中 Ni 和 Mn 等微量元素不仅受到源区矿物组成的控制,还会受到温压条件的影响。因此单纯利用橄辉石斑晶成分来限定源区是否存在辉石岩的贡献可能是不可靠的,还需要结合其他指标来综合判断。基于此,我们利用橄辉石 Zn/Mn 和 Zn/Fe 比值、橄辉石 Ni、Mn 和 Ca 含量以及全岩/熔体包裹体 Ca 含量及 FC3MS 值($\text{FeO}/\text{CaO}-3*\text{MgO}/\text{SiO}_2$)多种指标,限定了峨眉山大火成岩省地幔源区岩性为橄辉岩,并不需要有辉石岩的贡献。

我们进一步发现峨眉山高 Ti 和低 Ti 苦橄岩两类样品中含有不同成分的橄辉石:高 Ti 样品中的橄辉石具有高的 Ni 含量和低的 Mn 含量,类似于夏威夷和其他具有厚岩石圈的洋岛玄武岩,同时也与高压(3-4.5 GPa)实验橄辉岩熔体结晶的橄辉石成分类似;而低 Ti 苦橄岩具有相对低的 Ni 含量和高的 Mn 含量,类似于冰岛及其他具有薄岩石圈的洋岛玄武岩,同时也与低压(~1 GPa)实验橄辉岩熔体结晶的橄辉石类似。这说明两类苦橄岩及其中的两类橄辉石成分变化主要是受熔融压力(温度)的影响。这也与课题组(Xu & Liu, 2016)之前提出的橄辉石 Al 温度与 Ni 含量大致正相关可能反映熔融/结晶温压条件的变化是一致的。进一步的温压计算表明高 Ti 样品是橄辉岩在更深的石榴石稳定域发生相对较低程度熔融所形成,而低 Ti 样品是橄辉岩在更浅部的尖晶石稳定域内发生较高程度熔融所形成(图 2)。尽管前人研究表明地幔富水,但是峨眉山大火成岩省的形成仍然需要高温地幔柱模型来解释,并且地幔潜能温度(T_p)至少要高于 1560 度。

第一作者简介:徐荣(1987-),博士后,研究方向:地幔地球化学. E-mail: rongxu@cug.edu.cn

*通信作者简介:刘勇胜(1971-),教授,研究方向:地幔地球化学. E-mail: yshliu@cug.edu.cn

· 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 ·

与大火成岩省有关的成矿作用

张招崇*, 侯通, 程志国

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

大火成岩省 (LIPs) 不仅可导致全球性的环境变化并引起生物的大规模绝灭, 而且提供了巨量的金属和能量, 进而为大规模的金属成矿创造有利的条件。按照成矿作用与 LIPs 的关系, 将其划分为两种类型, 1) 成矿作用直接与 LIPs 直接相关, 即两者时间一致或者成矿作用稍晚, 成矿作用与 LIPs 有直接的联系; 2) 成矿作用与 LIPs 在时间上有明显的间断, 但 LIPs 为成矿作用有间接的联系。

1 与 LIPs 直接相关的成矿作用

成矿作用包括两种类型, 一是 LIPs 岩浆作用过程形成的岩浆矿床; 二是与 LIPs 有关的热液矿床。

岩浆矿床指的是在岩浆形成和演化过程中金属元素富集形成的矿床, 包括: 1) 与镁铁-超镁铁质岩体有关的氧化物矿床和铜镍硫化物 (\pm PGE) 矿床, 其中前者包括铬铁矿床和 V-Ti-Fe 矿床, 后者包括与大型镁铁-超镁铁质岩体有关的 PGE 矿床以及与小型岩体有关的铜镍硫化物 (\pm PGE) 矿床; 2) 与超基性熔岩有关的镍矿, 包括与太古宙科马提岩有关的镍矿和与岩浆管道系统上覆的铁质苦橄岩有关的镍矿; 3) 与碳酸岩有关的 REE-Nb-P 等矿床; 4) 与金伯利岩 (有时为钾镁煌斑岩和方解霞黄煌岩) 有关的金刚石矿床 (金刚石只是其中捕获的捕虏晶)。

热液矿床指的是 LIPs 形成过程中与岩浆作用和

变质作用有关的热液作用形成的矿床, 所以该类矿床又进而可分为两种亚类: 1) 与岩浆期后热液作用有关的矿床; 2) 与变质作用有关的热液矿床, 该类型主要是产在太古宙花岗岩-绿岩带内的脉状金矿床。

2 与 LIPs 间接相关的矿床

该类型矿床并非形成于 LIPs 时期, 但是 LIPs 可能为成矿作用提供了巨量的物质以及有利于成矿的环境和沉淀场所, 包括: 1) 风化壳型, 形成于热带地区, 矿床类型与源岩性质密切相关, 常见的有铝土矿、Ni-(Co)、Nb-Ta-REE 矿床、Nb-P 矿床等; 2) 热液改造型, LIPs 阶段已初步富集金属元素的岩石在后期的热液作用下进一步富集成矿, 包括玄武岩中的自然铜矿和卡林型金矿; 3) BIF 和锰矿, 前寒武纪 LIPs 巨量的海底火山作用为 BIF 和锰矿的形成提供了物质基础; 4) 与裂谷有关的以沉积岩为容矿围岩的层状矿床, 包括 MVT、SEDEX、沉积型 Cu-Co 和黑色岩系矿床; 5) 油气矿床。

总之, LIPs 为金属和能源矿床的形成提供了巨量的物质和能量基础, 并且随着研究的深入, 有越来越多的矿床被证明与 LIPs 有着直接和间接的联系。因此加强 LIPs 与成矿作用的关系研究不仅在成矿理论上有着重要的意义, 同时对于提升矿产资源的保障能力也有着现实的意义。

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

塔里木大火成岩方解霞黄煌岩中超镁铁质包体: 阿拉斯加型超镁铁质岩及俯冲作用的产物

刘凌寒¹, 张招崇¹, 程志国¹, M. Santosh^{1,2}, 刘秉翔¹, 李恒旭¹

1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 阿德莱德大学 地球科学系, 澳大利亚 5005

塔里木大火成岩省位于中国新疆塔里木盆地, 具有较其他大火成岩省持续时间更长以及岩石组合更复杂的特征, 其形成被认为与地幔柱-俯冲板片相互作用有关, 但缺乏支持该过程直接的岩浆作用证据。塔里木大火成岩省西北缘瓦吉里塔格地区形成于~300Ma 的方解霞黄煌岩被认为代表了塔里木大火成岩省最早期的岩浆活动。最近, 作者在方解霞黄煌岩中识别出一系列不同类型的超镁铁质岩包体, 其岩石类型包括纯橄岩、异剥橄榄岩、橄榄单斜辉石岩、单斜辉石岩、角闪单斜辉石岩、单斜辉石角闪岩、角闪石岩石, 这些岩石具有明显的堆晶结构, 说明其并非地幔岩的捕虏体, 而是岩浆分离结晶形成的。对这些包体的详细的岩相学观察发现, 它们具有相似的矿物学特征, 其主要组成矿物为橄榄石、单斜辉石、角闪石, 少量的金云母、铬铁矿、磁铁矿, 不含斜方辉石及斜长石。其岩石组合和矿物组合与阿拉斯加型超镁铁质岩石类型一致, 且区别于瓦吉里塔格地区的镁铁质-超镁铁质侵入体。包体的主要矿物(橄榄石、单

斜辉石、角闪石)和全岩主量、微量元素和矿物化学显示出连续的有规律的变化, 均表现出富集大离子亲石元素(U、Ba), 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti), 具有弧岩浆的特征。全岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 分别为 0.7035~0.7041、1.17~5.67, 源区较亏损。尖晶石 $\text{Mg}\#$ [$\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$] 和 $\text{Fe}^{3+\#}$ [$\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Al}+\text{Cr})$] 分别为 14.4~28.0、3.3~63.6, 与阿拉斯加型超镁铁质侵入体一致。单斜辉石中 Al_2O_3 随 $\text{Mg}\#$ 降低明显富集, 也与阿拉斯加型及弧岩浆单斜辉石变化趋势一致, 且与典型的低压非造山带火成岩省相反。综合对比, 方解霞黄煌岩中的超镁铁质包体属于阿拉斯加型超镁铁质岩。由于方解霞黄煌岩是塔里木大火成岩省最早期的岩浆岩, 所以其内的超镁铁质包体的形成应该早于 300Ma。结合区域地质特征, 这些超镁铁质岩包体可能代表了新元古代或早古生代大洋板块俯冲至塔里木板块之下的岩浆记录, 从而为塔里木大火成岩省的形成与地幔柱-俯冲板片相互作用的联系提供了直接的证据。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(4203000030; 41772057; 41702064; 41873034)

第一作者简介: 刘凌寒(1996-), 博士研究生, 研究方向: 岩浆作用与深部过程研究. E-mail: linghanliu@163.com

*通信作者简介: 张招崇(1965-), 教授, 博士生导师, 主要从事火成岩岩石学以及相关金属矿产的教学和研究. Email: zczhang@cugb.edu.cn

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

印度洋大火成岩省的演化序列

余星^{1,2}, 韩喜球^{1,2}, 党牛^{1,2}, 许绪成^{1,2}, 胡航^{1,2}

1. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012;

2. 自然资源部海底科学重点实验室, 杭州 310012

印度洋是大火成岩省分布密度最高的大洋, 在约 7200 万 km² 的海底面积中水深浅于 3000m 的大火成岩省面积约 600 万 km², 占比达 8.3%。印度洋中著名的大火成岩省包括凯尔盖朗海底高原、东经 90 度海岭、查戈斯-马尔代夫-拉卡代夫海脊、马斯克林海底高原、马达加斯加海底高原、莫桑比克海底高原、厄加勒斯海底高原、克罗泽海底高原、康拉德隆起、Broken 海脊等等, 其中凯尔盖朗海底高原是继太平洋翁通-爪哇(Ontong Java)海底高原之后的全球海底第二大大火成岩省, 面积达 120 万 km²。大火成岩省的成因一般认为与热点/地幔柱有关, 印度洋大火成岩省具有以下几个特点:

1、热点数量多。印度洋目前正在活动的热点包括留尼旺(Réunion)、马里昂(Marion)、克罗泽(Crozet)、布维(Bouvet)、科摩罗(Comoros)、凯尔盖朗(Kerguelen)和阿姆斯特丹-圣保罗(Amsterdam-St. Paul)等。

2、热点产物的多样性。印度洋中的大火成岩省可以表现为海底高原、海山链、海岭、海山群等多种

形式。比如凯尔盖朗海底高原、东经 90 度海岭、留尼旺-毛里求斯海山链、圣诞岛海山群。

3、热点活动时间长。一个热点的生命期很长, 比如留尼旺热点可能参与了一系列大火成岩省的建造, 从印度大陆上的德干高原(~65 Ma), 到查戈斯-马尔代夫-拉卡代夫海脊和马斯克林海底高原, 到罗德里格斯海脊, 直到毛里求斯岛, 目前热点正活跃于留尼旺岛。

4、印度洋大火成岩省的演化与印度洋扩张史密切相关。同一热点的产物往往被洋中脊扩张所割裂或分解。如东经 90 度海岭和 Broken 海脊与凯尔盖朗海底高原在 38 Ma 前后分离, 被东南印度洋中脊分隔, 分属于印度-澳大利亚板块和南极洲板块。查戈斯-马尔代夫-拉卡代夫海脊与马斯克林海底高原在 40 Ma 前后分离, 由西北印度洋中脊分隔而分属于印度-澳大利亚板块和非洲板块。马达加斯加海底高原和克罗泽海底高原在 60 Ma 前后被西南印度洋中脊分隔。

表 1 印度洋代表性大火成岩省的主要演化参数

大火成岩省	英文全名	面积 (万 km ²)	形成时间	周边洋壳年龄
凯尔盖朗海底高原	Kerguelen Plateau	120	118-0Ma	125-30
马达加斯加海底高原	Madagascar Plateau	39.9	~84 Ma?	>60 Ma
莫桑比克海底高原	Mozambique Plateau	30.1	140-122 Ma	>110 Ma
厄加勒斯海底高原	Agulhas Plateau	8.1	100-94 Ma	110-90 Ma
克罗泽海底高原	Crozet Plateau	7.0	54-0 Ma	~70 Ma
马斯克林海底高原	Mascarene Plateau	56.3	64-31Ma	~60Ma
Broken 海脊	Broken Ridge	38.9	88~62Ma	90~40Ma
东经 90 度海岭	Ninetyeast Ridge	39.6	82~36 Ma	82-30Ma
查戈斯-马尔代夫-拉卡代夫海脊	Chagos-Maldive-Laccadive Ridge	94.4	57-49Ma	60-30Ma
罗德里格斯海脊	Rodrigues Ridge	11.2	1.5Ma	35-10Ma

注: 部分海底高原的形成年龄早于周边洋壳, 指示并非简单的板内火山作用, 可能存在陆壳基底

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

峨眉山大火成岩省东部地区板内张性岩浆作用的识别: 来自锆石氧同位素的证据

朱江^{1,2}, 张招崇^{2*}, 谈树成¹, 金子梁²

1. 云南大学地球科学学院, 昆明 650550;

2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

地幔柱理论指出当地幔柱头部抵达岩石圈底部时, 其向上的热浮力会诱导广泛陆内拉分构造的产生, 还可能进一步演化形成大陆裂谷, 造成大陆的裂解 (Ernst, 2014)。无论这些陆内拉分构造系统最终能否演化形成大陆裂谷, 它们都是岩浆和热液运移的重要通道, 因此这些拉分构造被认为是岩浆和热液矿床的聚集区 (Ernst, 2014; Pirajno and Santosh, 2015)。峨眉山大火成岩省的攀枝花-西昌 (攀西) 地区是全球最大的钒钛磁铁矿产地, 其地球物理及岩石学证据表明该地区存在与峨眉山地幔柱活动同期的陆内拉分构造系统 (e.g., 从柏林, 1988)。然而, 该大火成岩省的其他地方是否存在类似的陆内拉分构造或裂谷, 目前仍然是不清楚的。

在低温或高温环境下导致的氧同位素分馏是识别上地壳岩石再循环的重要地球化学指标之一, 其反过来又可以指示构造演化过程 (e.g., Valley et al., 2005; Hammerli et al., 2018)。锆石蕴含丰富的地球化学信息, 其可用于 U-Pb 定年以及确定氧同位素的组成 (e.g., Valley, 2003; Hammerli et al., 2018)。本

次研究以峨眉山大火成岩省东部地区的凝灰岩为研究对象, 我们对其中的锆石开展了 SIMS U-Pb 定年和氧同位素组成的分析测试工作。结果显示与峨眉山岩浆活动同期的岩浆锆石具有明显低于地幔锆石 ($5.3\% \pm 0.3\%$; Valley et al., 1998) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 其最低值可至 $+2.94\%$ 。基于沉积学的证据, 前人认为在该大火成岩省东部地区存在 3 个主要的陆内拉分构造或裂谷 (He et al., 2006), 它们的位置与本次研究区是相邻的。综上所述, 我们认为该大火成岩省东部地区的低 $\delta^{18}\text{O}$ 值岩浆可能是源于在地幔柱所导致的陆内拉分环境下热液蚀变岩石的部分重熔。值得注意的是, 该大火成岩省东部地区的地幔岩浆具有低氧逸度的特点, 在岩浆分异过程中有利于亲硫元素富集在基性-超基性岩体中 (e.g., Hou et al., 2011; Zhu et al., 2020)。此外, 前人的区域地球化学调查结果显示本次研究区具有明显 Pt-Pd。因此, 该大火成岩省东部地区存在与峨眉山地幔柱活动同期的陆内拉分构造, 其可能是寻找勘探岩浆型硫化物矿床的远景区。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42002062, 41761134086); 中国博士后面上基金资助项目 (2020M673309), 国家重点研究开发计划资助项目 (2016YFC0600502)

第一作者简介: 朱江 (1986-), 高级工程师, 研究方向: 大火成岩省和地幔柱. E-mail: zhujiangcugb@126.com

*通讯作者简介: 张招崇 (1965-), 教授, 研究方向: 大火成岩省和地幔柱. E-mail: zczhang@cugb.edu.cn

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

峨眉山大火成岩省内带中酸性岩浆岩成因机制及其对 岩浆过程及地壳物质结构的启示

秦江锋¹, 张泽中^{1, 2}, 赖绍聪¹

1. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 地质学系, 陕西 西安 710069;

2. 中国长江三峡集团有限公司上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335

大火成岩省代表板内环境下、由于深部地幔物质上隆引发的快速 (1~5 Ma)、超大规模的 (超过 10^6 km^2) 玄武质岩浆喷发事件 (Chung et al., 1995; Ali et al., 2010), 形成规模巨大的大洋或大陆溢流玄武岩。大火成岩省形成的地质背景及岩浆源区性质历来是岩石学家关注的焦点问题, 不仅涉及地幔柱构造地质, 而且对深部地幔物质循环及部分熔融机理都有重要意义。二叠纪晚期是全球大火成岩省集中形成的时期, 包括俄罗斯的西伯利亚大火成岩省 (~251 Ma)、扬子地区西缘的峨眉山大火成岩省 (~260 Ma)、西北地区塔里木大火成岩省 (~208 Ma) 以及印度的 Panjal Traps (~289 Ma), 同时二叠纪晚期也是全球 Pangea 超大陆裂解 (Fu et al., 2021)、古特提斯洋闭合及全球生物大灭绝事件, 因此是否存在全球规模的超级地幔柱引发的多个次一级的地幔柱岩浆事件 (王焰等, 2017), 深刻影响全球的板块构造体制和生命、环境, 成为当前全球科学家共同关注的前沿科学问题。

在峨眉大火成岩省内带攀西-大理地区发育一套晚二叠世中性碱性岩-花岗岩-流纹岩组合, 被普遍认为是基性岩浆结晶分异的产物 (Shellnutt et al., 2009, 2011; 2014, 2020; Zhong et al., 2007, 2011), 而且在攀西地区过碱性花岗岩和正长岩脉中已经发现了相关的 Nb-Ta 矿化 (Wang et al., 2015)。因此从大火成岩省岩浆过程的视角, 通过这套晚二叠世中性碱性岩-花岗岩-流纹岩岩浆演化过程的精细研究, 完善大火成岩省岩浆演化过程, 对于探讨地幔柱背景下地壳物质的分异和增生机制, 以及伴生的金属元素成矿机理具有重要意义。

ELIP 内带晚二叠纪中酸性岩浆岩通常表现出 Eu 的负异常以及 Sr, Ti 等元素的强烈亏损。通过稀土元素模拟计算表明粗面岩可以由玄武质岩浆经过 80% 分离结晶作用 (辉石、斜长石和 Fe-Ti 氧化物等) 而形成 (徐义刚等, 2017)。在峨眉山大火成岩省晚期出现双峰式火山岩, 可能与地幔柱活动晚期岩浆供给少, 在地壳岩浆房中停留时间长, 岩浆发生强

烈分离结晶作用有关 (Li et al., 2010)。

为了进一步评估高 Ti 玄武质岩浆的分离结晶, 本次研究应用 MELTS 程序模拟该岩浆的演化过程 (Gualda and Ghiorso, 2015)。MELTS 是通过输入母岩浆主量元素的组成, 温压条件和氧逸度等参数, 结合设定的岩浆演化路径, 输出不同温度, 压力条件下演化岩浆与矿物相的比例及它们的化学成分 [张洪铭, 2015]。本次模拟使用相对较低的氧逸度值 $f\text{O}_2 = \text{QFM}-1.5$ (Hou et al., 2011), 考虑到峨眉山高 Ti 玄武岩来源于地幔橄榄石相的部分熔融, 我们选取了较高的起始温度 (1400 °C), 终止温度为 750 °C, 水含量为 0.5wt.%, 压力设为 1000 bars (~3 km)。高 Ti 玄武岩样品 (Ry-7, Xiao et al., 2004) 被用来作为本次模拟的初始岩浆成分。模拟结果显示峨眉山高 Ti 玄武质岩浆在 900 °C 左右, 经过 ~4% 橄榄石, ~11% 单斜辉石, ~11% 斜方辉石, ~40% 斜长石和 ~8% 氧化物的分离结晶, 就可以形成与米易地区猴子山角闪正长岩, 纪家湾正长岩和横山石英正长岩十分接近的岩浆成分。另外, 岩浆分异过程中的分离相, 例如辉长岩, 橄榄石辉长岩和氧化物矿物等在米易地区都有发现。通过计算锆石饱和温度得知, 猴子山正长岩的结晶温度在 ~850 °C, 纪家湾正长岩为 ~775 °C, 横山石英正长岩为 ~886 °C, 与 MELTS 模拟的也比较接近 (Zhang et al., 2019, 2021)。然而, 我们发现横山石英正长岩的 SiO_2 含量 (66.74 到 70.63 wt.%) 要略高于 MELTS 模拟的结果 (~63 wt.%)。较高的含量可能是由于岩浆演化后期有地壳物质的参与, 横山石英正长岩变化较大的 $\epsilon_{\text{HF}}(t)$ 值 (-5.4 ~ +1.3) 也证实了这一点, 地壳物质的参与也解释横山的正长岩相较于猴子山和纪家湾有更多的石英含量的原因。

参考文献:

- Ali, J.R., Fitton, J.G., Herzberg, C., 2010. Emeishan large igneous province (SW China) and the mantle-plume up-doming hypothesis. *Journal of the Geological Society* 167, 953-959.

- Chung, S.-L., Jahn, B.-m., 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary. *Geology* 23, 889-892.
- Fu, J.-N., Pirajno, F., Yang, F., Shivute, E., Sun, Y.-Z., Ai, N., Qiu, K.-F., 2021. Integration of zircon and apatite U - Pb geochronology and geochemical mapping of the Wude basalts (Emeishan large igneous province): A tool for a better understanding of the tectonothermal and geodynamic evolution of the Emeishan LIP. *Geoscience Frontiers* 12, 573-585.
- Shellnutt, J.G., 2014. The Emeishan large igneous province: A synthesis. *Geoscience Frontiers* 5, 369-394.
- Shellnutt, J.G., Denyszyn, S.W., Mundil, R., 2012. Precise age determination of mafic and felsic intrusive rocks from the Permian Emeishan large igneous province (SW China). *Gondwana Research* 22, 118-126.
- Shellnutt, J.G., Pham, T.T., Denyszyn, S.W., Yeh, M.-W., Tran, T.-A., 2020. Magmatic duration of the Emeishan large igneous province: Insight from northern Vietnam. *Geology* 48, 457-461.
- Xiao, L., Xu, Y.G., Mei, H.J., Zheng, Y.F., He, B., Pirajno, F., 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: implications for plume-lithosphere interaction. *Earth and Planetary Science Letters* 228, 525-546.
- Xu, Y.-G., Luo, Z.-Y., Huang, X.-L., He, B., Xiao, L., Xie, L.-W., Shi, Y.-R., 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72, 3084-3104.
- Zhang, Z., Qin, J., Lai, S., Long, X., Ju, Y., Wang, X., Zhu, Y., Zhang, F., 2019. Origin of Late Permian syenite and gabbro from the Panxi rift, SW China: The fractionation process of mafic magma in the inner zone of the Emeishan mantle plume. *Lithos* 346-347, 105160.
- Zhang, Z., Qin, J., Lai, S., Long, X., Ju, Y., Wang, X., Zhu, Y., Zhang, F., 2021. High-temperature melting of different crustal levels in the inner zone of the Emeishan large igneous province: Constraints from the Permian ferrosyenite and granite from the Panxi region. *Lithos*, 105979.
- Zhong, H., Campbell, I.H., Zhu, W.-G., Allen, C.M., Hu, R.-Z., Xie, L.-W., He, D.-F., 2011. Timing and source constraints on the relationship between mafic and felsic intrusions in the Emeishan large igneous province. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 75, 1374-1395.
- Zhong, H., Zhu, W.-G., Chu, Z.-Y., He, D.-F., Song, X.-Y., 2007. Shrimp U-Pb zircon geochronology, geochemistry, and Nd-Sr isotopic study of contrasting granites in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chemical Geology* 236, 112-133.
- 王焰, 王坤, 邢长明, 魏博, 董欢, 曹永华. 2017. 二叠纪峨眉山地幔柱岩浆成矿作用的多样性. *矿物岩石地球化学通报*, 36(03): 404-417.
- 徐义刚, 钟玉婷, 位荀, 陈军, 刘海泉, 颀炜, 罗震宇, 李洪颜, 何斌, 黄小龙, 王焰, 陈赟. 2017. 二叠纪地幔柱与地表系统演变. *矿物岩石地球化学通报*, 36(03): 359-373+358.

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

造山带玄武岩浆作用长时性与铜镍硫化物成矿 短时性-以黄山-镜儿泉成矿带为例

宋谢炎¹, 邓宇峰², 颀炜³

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230000;

3. 河海大学 海洋学院, 南京 210000

世界许多造山带都发现了具有经济价值的铜镍硫化物矿床。然而, 由于造山带形成与演化过程的不同阶段都会发生地幔部分熔融产生玄武岩浆, 究竟哪个阶段和哪些过程能够产生最有利于铜镍硫化物成矿的玄武岩浆并不清楚。众所周知, 中亚造山带是全球规模最大的显生宙增生型造山带, 其南缘是全球发现铜镍硫化物矿床最多的构造区域, 其中黄山-镜儿泉成矿带是铜镍硫化物矿床分布最为集中的地区。该成矿带含矿岩体的一个重要地质特征就是不同岩相之间广泛发育侵入接触关系; 尽管铜镍硫化物矿化也可以产于镁铁质岩相内部, 但更多地产于超镁铁质岩相的下部。因此, 同一个岩体不同岩相常获得不同的锆石 U-Pb 年龄, 以往大量的锆石 U-Pb 年龄数据说明该成矿带玄武岩浆活动从 380 Ma 延续到 270 Ma, 而如此长时间的玄武岩浆活动与哪些过程有关、究竟成矿作用发生在哪个时间段并不明确。针对这个问题, 本次研究对黄山-镜儿泉成矿带上的 11 个岩体的含矿岩相开展了系统的锆石 U-Pb 年代学研究, 其中包括 11 个含矿的超镁铁质岩相和 3 个含矿的镁铁质岩相。结合前人发表的数据, 发现含矿的镁铁质和超

镁铁质岩相的锆石 U-Pb 年龄集中分布在 285~280 Ma 区间, 而不含矿的镁铁质岩相的形成既可以早于 285 Ma, 也可以晚于 280 Ma (图 1)。结合区域构造演化和岩浆作用研究, 我们认为黄山-镜儿泉成矿带的玄武岩浆作用发生与俯冲-碰撞过程的不同阶段: 380~300 Ma 的俯冲阶段、285~280 Ma 的碰撞后早期阶段和 280 Ma 之后的碰撞后阶段, 铜镍硫化物成矿作用发生于碰撞后早期阶段。碰撞后早期阶段由于俯冲洋壳的断离诱发软流圈的强烈上涌, 导致软流圈本身的减压熔融以及含水地幔楔的熔融, 产生大量部分熔融程度较高的玄武岩浆, 发生 285~280 Ma 的大规模铜镍硫化物成矿, 准格尔地块向东运动导致的区域性左行走滑加剧了洋壳断离和软流圈上涌。当俯冲洋壳带入的水消耗殆尽之后, 部分熔融程度降低, 所产生的玄武岩浆不利于铜镍硫化物成矿; 而俯冲阶段由于没有软流圈的强烈上涌, 部分熔融程度较低, 也不利于成矿。因此, 造山带形成与演化过程中, 最有利于铜镍硫化物成矿的构造阶段是碰撞后早期阶段, 关键控制因素是俯冲洋壳的断离和软流圈的强烈上涌。

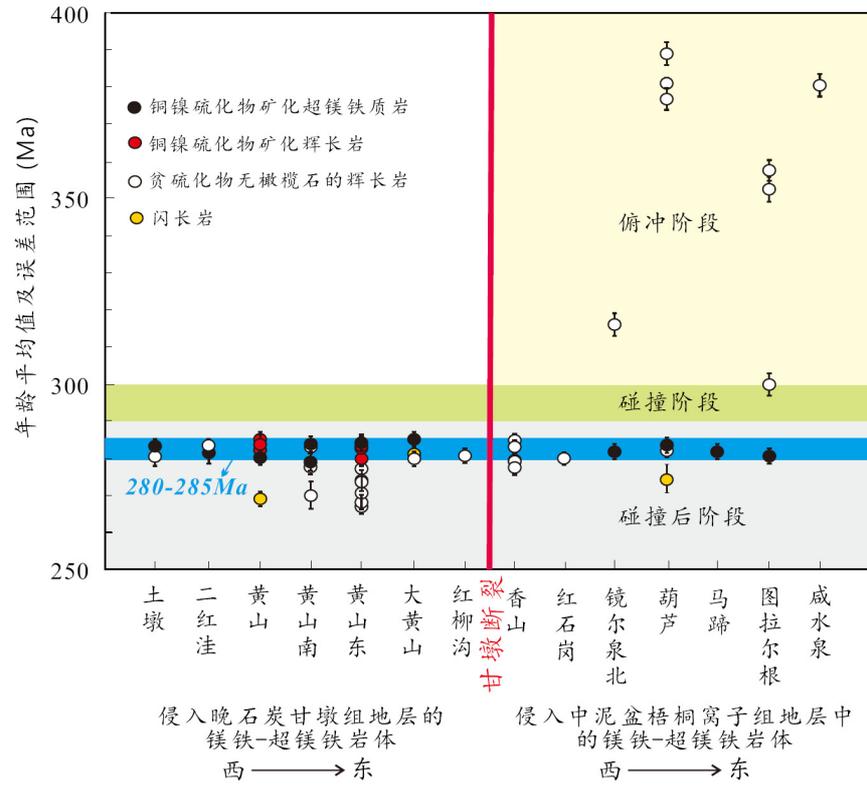


图 1 黄山-镜儿泉成矿带镁铁-超镁铁岩体锆石 U-Pb 年龄分布及其与俯冲-碰撞过程不同阶段的关系(具 Song et al., 2021)

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

峨眉山大火成岩省钒钛磁铁矿矿床：开放的岩浆系统

柏中杰^{1*}, 钟宏¹, 朱维光¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081

全球由地幔柱活动形成镁铁-超镁铁岩体的大火成岩省众多, 但只有少数产出了钒钛磁铁矿矿床。峨眉山大火成岩省是全球最大的钒钛磁铁矿矿集区, 其形成超大型钒钛磁铁矿矿床的母岩浆组成及源区性质如何是全球关注但未得到较好解决的关键科学问题。同时, 揭示在较小镁铁-超镁铁质层状岩体中产出超大型钒钛磁铁矿矿床的成因机制, 对于寻找类似的超大型钒钛磁铁矿矿床具有重要科学意义。通过对峨眉山大火成岩省中钒钛磁铁矿成矿岩体的详细研究, 发现成矿母岩浆的铁、钛含量, 实际上与普通峨眉山高钛玄武岩一致。通过与世界上不成矿岩体母岩浆铁钛含量的系统对比, 发现两种成分基本一致, 成矿岩体母岩浆并未表现出铁、钛的预富集特征。进一步研究显示, 成矿岩体形成于高氧逸度条件。通过热动力学模拟, 发现岩浆演化过程中, 高氧逸度可促使磁铁矿更早的从岩浆中饱和结晶。对比研究发现, 峨眉山成矿岩体磁铁矿的结晶明显早于全球其他岩体; 其氧逸度也显著高于全球其他岩体; 而且岩体的成矿强度, 随氧逸度升高而显著增加。因此, 高氧逸度导致的磁铁矿在母岩浆中的早期结晶, 是峨眉山大火成岩省钒钛磁铁矿大规模成矿的关键。进一步研究发现, 成矿母岩浆的高氧逸度是继承自氧化性地幔源区。同

位素证据表明, 峨眉山地幔柱上升过程中, 加入了俯冲的远洋沉积物 and 高温蚀变洋壳。地幔柱与俯冲洋壳相互作用过程中, 洋壳中氧化性物质的加入, 造成了峨眉山地幔源区岩浆氧逸度的升高, 为形成氧化性岩浆和钒钛磁铁矿大规模成矿奠定了重要基础。对比研究发现, 成矿岩体与母岩浆成分存在显著差别, 揭示早期结晶出磁铁矿的母岩浆并未完全保留在岩体中, 表明成矿岩体是一个开放的岩浆系统。矿区玄武岩比非矿区玄武岩明显亏损铁钛, 表明它们是在下部岩浆房结晶, 并卸载了大量磁铁矿后喷出地表的残余岩浆。通过对巨厚矿层的精细解剖, 发现含矿岩体的化学组成在剖面上具有周期性变化特点, 揭示了矿床形成过程中有大量岩浆多次补充叠加。在这些工作的基础上, 建立了钒钛磁铁矿矿床的岩浆通道成矿模式, 为解决超大型钒钛磁铁矿矿床的成因难题, 做出了实质性贡献。具体过程是: (1) 高氧逸度岩浆到达浅部岩浆房后, 钒钛磁铁矿结晶并因重力作用下沉堆积而成矿; (2) 低密度的硅酸盐矿物随残余岩浆转移到地表, 形成斑状玄武岩; (3) 岩浆多次补充、钒钛磁铁矿多次堆积, 最终形成巨厚的钒钛磁铁矿层。因此, 岩浆通道是形成巨厚高品位钒钛磁铁矿矿床重要条件, 亏损铁钛的玄武岩是在深部寻找钒钛磁铁矿矿床的重要标志。

基金项目: 矿床地球化学 (编号: 42122024)

第一作者简介: 柏中杰 (1983-), 研究员, 研究方向: 幔源基性岩浆成矿作用. E-mail: baizhongjie@vip.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 柏中杰 (1983-), 研究员, 研究方向: 幔源基性岩浆成矿作用. E-mail: baizhongjie@vip.gyig.ac.cn

· 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 ·

大火成岩省的沉积示踪

沈俊

1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074

地球深部演化过程对表层系统的影响是地球系统科学的核心问题之一。大规模火山活动是联系地球深部和表层系统的重要纽带, 其常常伴随着气候环境突变和生物演变异常事件(如生物大灭绝)。然而, 如何在记录生物和环境事件的沉积岩中开展高精度火山事件—环境波动—生物演变关联研究, 长期以来一直困扰着地学界。其主要研究瓶颈在于火山沉积记录的不完整性: 如火山活动的直接产物(碱性熔岩和火山灰黏土岩)通常只在靠近喷发口区域分布, 而在远离火山喷发中心的区域往往缺乏火山活动的直接记录。因此, 在缺失直接火山记录的沉

积地层中挖掘有效指示火山活动的替代指标, 是破解地质重大转折期火山活动对生命演化与环境扰动影响这一科学难题的关键。汞是唯一可以在大气中以气态单质形式存在并可进行长距离传输的有毒重金属。在地史时期, 火山活动是地球表层系统外来汞的主要来源, 大规模火山活动可以释放大量的汞至地球表层, 其通过大气传输, 引起地表陆地和海洋圈层大范围的异常沉积。本报告以二叠纪与三叠纪之交和三叠纪与侏罗纪之交两个关键转折期为研究实例, 探究汞示踪大火成岩省沉积记录的原理和存在的问题。

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41825003)

第一作者简介: 唐红梅(1992-), 助理研究员, 研究方向: 矿物表界面物理化学. E-mail: tanghongmei2018@163.com

*通信作者简介: 鲜海洋(1991-), 助理研究员, 研究方向: 矿物表界面物理化学. E-mail: xianhaiyang@gig.ac.cn

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

冈瓦纳大陆东北部寒武-奥陶纪平河硅质大火成岩省的识别

但卫^{1,2}, 王强^{1,2}, 唐功建^{1,2}, 张修政^{1,2}

1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院深地科学卓越创新中心, 广东 广州 510640

不同于以镁铁质岩石为主要组成的大火成岩省, 硅质大火成岩省以长英质火成岩为主, 通常是 I 型或 A 型花岗岩/火山岩。在冈瓦纳东北部(目前的青藏高原-三江-东南亚地区)分布有大量的寒武-奥陶纪岩浆岩, 前人提出了包括原特提斯洋的俯冲-碰撞造山、区域伸展、岩石圈拆沉及弧后伸展等在内的多种模型来解释其形成。通过对冈瓦纳大陆东北部的综合研究, 我们发现这些岩浆岩很可能构成了一个大火成岩省。这些岩浆岩的分布面积达 2.5 Mkm², 形成于 510-460 Ma 并可能具有多个岩浆峰期, 主要由 S 型花岗岩组成, 可命名为平河硅质大火成岩省。平河硅质大火成岩省与相邻的北澳大利

亚 Kalkarindji 大火成岩省(511 Ma)同期, 类似于早侏罗纪的 Chon Aike 硅质大火成岩省与 Karoo 大火成岩省的关系。平河硅质大火成岩省的识别可以合理解释冈瓦纳东北部寒武-奥陶纪的一系列地质现象(岩浆作用-地层不整合-变质作用), 特别是北美塘-华南陆块从冈瓦纳大陆的裂离和原羌塘洋在 500 Ma 的打开。对平河硅质大火成省的深入研究, 不仅能有效约束冈瓦纳东北部的古地理重建, 进一步揭示冈瓦纳东北部早古生代的构造演化历史细节, 还将能丰富硅质大火成岩省的概念和内涵、探讨硅质大火成岩省在微陆块裂解中的作用以及与寒武纪气候变化间的关联。

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

中-新元古代大火成岩省对华北克拉通岩石圈地幔演化的响应

苏向东^{1*}, 彭澎², 汤艳杰², 王高春¹

1. 郑州大学, 郑州 450001;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

大火成岩省指主要由具有板内属性的镁铁质岩石组成, 产状上表现为溢流玄武岩、水平岩床和垂直岩墙出露的大规模火成岩区 (> 0.1 Mkm³), 其深部岩浆活动强烈改造着岩石圈地幔的组成与结构。全球许多大火成岩省岩浆活动发生在古老克拉通地区, 其对认识克拉通岩石圈地幔的减薄、破坏和生长具有重要意义。华北克拉通形成于太古宙末期 (2.5 Ga), 之后在元古代发育了一系列裂谷系岩浆活动 (1.8-0.75 Ga), 部分被认为与大火成岩省岩浆作用有关。例如, 分布于华北克拉通东部 1.3 Ga 的燕辽大火成岩省和 0.92 Ga 的徐淮大火成岩省。其初始 Nd 同位素所指示的地幔源区比古老岩石圈地幔更亏损。微量元素模拟表明燕辽与徐淮大火成岩省岩浆的平衡压力为 ~3.5 GPa (深度约为 115 km), 这一岩浆活动在深度上与全球古老克拉通岩石圈地幔中的不连续层 (软弱层) 一致。最近我们发现,

这两期元古代大火成岩省岩浆活动在时间上与华北克拉通岩石圈地幔橄榄岩捕虏体 Re 亏损模式年龄和 <200 Ma 年轻镁铁质岩石 Nd 模式年龄记录的约 1.0 Ga 和 1.3 Ga 的热扰动事件相吻合, 指示了这些大火成岩省岩浆活动可能对克拉通岩石圈地幔在地质历史时期进行过改造。然而, 古生代金伯利岩中橄榄岩捕虏体记录的岩石圈地幔厚度依然约为 200 km, 表明华北克拉通岩石圈地幔可能在中-新元古代大火成岩省的作用下发生了减薄与再造。这一过程可能造成古老岩石圈的整体性和稳定性减弱, 削弱了岩石圈地幔的强度, 使得华北克拉通更容易受后期重大地质事件的影响, 如其东部陆块在中生代受到环形俯冲作用的情况下发生了大规模岩石圈地幔的减薄与破坏。我们的研究表明, 大火成岩省岩浆作用可能是影响古老克拉通岩石圈地幔稳定性的另一关键因素。

基金项目: 郑州大学科研启动项目 (32212437)

第一作者&通讯作者简介: 苏向东 (1991-), 讲师, 研究方向: 前寒武纪岩浆岩与大火成岩省. E-mail: xiangdongsu@zzu.edu.cn

• 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 •

金川新发现 3 号矿体的地质-地球化学特征及成因

康健^{1,2}, 宋谢炎^{1*}, 隆廷茂^{1,2}, 梁庆林¹

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

金川超大型 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床是世界上第三大在采岩浆硫化物矿床, 其成因研究备受瞩目。金川基性-超基性岩体位于华北克拉通西南缘龙首山隆起带中, 主要由东、西两个独立的岩体构成 (Song et al., 2012)。通常以断裂为界自西向东将其划分为 III、I、II、IV 四部分, 其中 I 和 III 两部分构成西岩体并赋存 24 号矿体, II 和 IV 两部分构成东岩体并赋存 1 号和 2 号矿体。新发现的 3 号矿体主要赋存于西岩体的 III 部分中, 其地质和地球化学特征有别于金川其他矿体。

3 号矿体主要由位于岩体下部的细粒硫化物纯橄岩中的稠密浸染状矿石和其上细粒二辉橄榄岩中的浸染状矿石组成, 边缘分布有薄层浸染状矿化的细粒橄榄辉石岩。矿体在 III 部分东边较厚, 往西逐渐变薄至尖灭; 其形态受岩体形态控制明显。薄层浸染状矿化的粗粒二辉橄榄岩穿插于细粒硫化物纯橄岩或细粒二辉橄榄岩中构成两者截然的接触关系, 结合两者间不同的橄榄石 Fo 值和全岩成分表明西岩体细粒岩相带形成早于粗粒岩相带。

岩相学观察和全岩氧化物成分分析表明 3 号矿体岩石中橄榄石构成主要的堆积相, 辉石呈粒间熔体相填充于堆晶橄榄石的间隙。全岩 S 含量正相关于 Ni, Cu, PGE 含量表明成矿元素主要分布于硫化物中。细粒浸染状矿石相较于其他矿体浸染状矿石较高的 PGE_{100} 和较低的 Cu/Pd 比值暗示形成 3 号矿体的母岩浆经历了较小的前期硫化物熔离作用 (Song et al., 2009; Chen et al., 2013)。稠密浸染状矿石中 Pd/Ru

比值与 Ru_{100} 间负相关以及与 Pd_{100} 间正相关关系暗示硫化物熔体经历了分离结晶作用。浸染状矿石中较小变化的 Pd/Ru 比值以及较高的 Ru_{100} 和 Pd_{100} 的含量表明硫化物熔体经历了与新鲜岩浆的反应。稠密浸染状矿石中变化较大的 Pt 含量可能指示了热液蚀变过程中 Pt 的迁移或含 Pt 矿物的溶解。

浸染状矿石和稠密浸染状矿石间截然的接触关系和突变的化学成分暗示它们经历了不同的过程。前者是细粒离散的硫化物珠滴在含橄榄石的岩浆中缓慢沉降所致, 硫化物珠滴不断与新鲜岩浆接触导致其具较高的 PGE_{100} 含量 (高 R 值)。而后者则是硫化物珠滴在重力作用下沿着堆晶橄榄石颗粒的孔隙自发向下渗透迁移并向上排挤出粒间硅酸盐熔体所致, 硫化物向下渗透迁移并与橄榄石发生 Fe-Ni 交换反应使其具较高的 Ni_{100} 和较低的 PGE_{100} 含量 (低 R 值)。虽然单阶段硫化物堆积的理论可以较好地解释矿石间成矿元素含量的变化, 但仍然不能很好地解释浸染状矿石与稠密浸染状矿石间截然的接触关系。相反, 另一种可能机制是硫化物与橄榄石形成聚合物从岩浆中沉降, 尽管聚合机理仍有待深入研究。当含硫化物和贫硫化物的岩浆依次流过岩浆通道时, 含硫化物的岩浆中硫化物润湿橄榄石并形成聚合物, 由于其较重的密度而发生快速沉降形成稠密浸染状矿层; 而贫硫化物的岩浆中硫化物则呈悬浮态发生缓慢的沉降形成浸染状矿层。这种硫化物就位的机制不仅可以解释矿石间成矿元素含量的差异, 也能形成两者间截然的接触关系 (Kang et al., 2022)。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 41630316, 41772067)

第一作者简介: 康健(1994-), 男, 博士研究生, 研究方向: 金川超大型 Ni-Cu-(PGE)矿床的成因. E-mail: kaingjian@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 宋谢炎(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 幔源岩浆及其成矿作用. E-mail: songxieyan@vip.gyig.ac.cn

· 专题 5: 大火成岩省及其成矿效应 ·

塔里木大火成岩省长英质岩浆活动与稀有金属成矿作用

朱圣柱^{1,2}, 黄小龙^{1,2*}, 于洋^{1,2}, 贺鹏丽^{1,2}, 杨帆², 李梦静^{1,2,3}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州) 广州 511458;

3. 中国科学院大学 北京 100049

地幔柱活动将大规模物质和能量从地球深部带到地表, 导致大火成岩省的形成, 并伴随钒、钛、铜、镍、铈、锆、稀土元素等战略资源的超常富集。因此, 开展大火成岩省岩浆活动与成矿作用的研究对理解战略矿产资源的形成有十分重要的意义。碱性长英质岩型稀有金属矿床是地幔柱成矿作用中非常重要的一类, 但目前仍缺少对该类矿床形成过程中稀有金属超常富集机制的系统性研究。

塔里木大火成岩省是我国境内获国际公认的第二个大火成岩省, 包括两大构造区域, 分别是塔里木克拉通及边缘构造域和中亚造山带构造域。塔里木大火成岩省两大构造域碱性长英质岩的地球化学特征和稀有金属成矿类型存在明显差别。塔里木克拉通及边缘碱性长英质岩多数显示典型 A1 型花岗岩的地球

化学特征, 赋存 Nb-Zr-REE 矿床; 而中亚造山带碱性长英质岩多数显示典型 A2 型花岗岩的地球化学特征, 赋存 Li-Be-Ta-Nb-W-Sn-Mo 矿床。

岩浆源区中再循环洋壳物质的加入导致塔里木克拉通及边缘碱性长英质岩富集 Nb、Zr、REE; 而中亚造山带碱性长英质岩岩浆源区因近期俯冲交代成因岩石圈物质的参与而富集 Li、Be、W、Sn、Mo 等流体活动元素。塔里木克拉通及边缘碱性长英质岩贫硅、钠质、过碱性的特征, 有利于熔体中 Nb、Zr、REE 的富集; 而中亚造山带碱性长英质岩具有富硅、钾质、过铝质的特征, 有利于 Ta、Li、W、Sn 的富集。塔里木大火成岩省两大构造域经历了不同的地幔柱-岩石圈相互作用过程, 其碱性长英质岩的岩浆源区不同, 并经历了不同的岩浆演化过程, 因此产生了不同的稀有金属成矿作用。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42021002、41625007)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB18000000)和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(GML2019ZD0202)

第一作者简介: 朱圣柱(1993-), 博士后, 研究方向: 岩浆作用过程与成矿. E-mail: zhushengzhu@gig.ac.cn

*通信作者简介: 黄小龙(1972-), 博士生导师, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: xlhuang@gig.ac.cn