

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

Peritectic Assemblage Entrainment (PAE) Model for the Petrogenesis of Neoproterozoic High-maficity I-type Granitoids in the Western Yangtze Block, South China

Yu Zhu (朱毓), Shaocong Lai* (赖绍聪)

大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系

Abstract: Under the condition of paucity of mantle-derived ferromagnesian components, peritectic assemblage entrainment (PAE) model can properly explain a large variation of Fe, Mg, Ti, and Ca contents as well as positive linear trends for Ti and Ca plotted against maficity (molar Fe + Mg) exhibited by more mafic I-type granitic melts. Herein we present a comprehensive study of zircon U–Pb–Hf isotopes, whole-rock major and trace elements, and Sr–Nd isotopes for newly identified Neoproterozoic high-maficity I-type granitoids collected from the Yonglang area in the western Yangtze Block, South China, in order to evaluate PAE process acting on the petrogenesis of these more mafic granitoids. Zircon U–Pb geochronological results show that the Yonglang granitoids, including the granodiorites, monzogranites, and biotite granites, yield the weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of ca. 850–825 Ma. They are geochemically characterized by high SiO_2 (64.63–72.62 wt.%) and K_2O (3.49–6.59 wt.%) contents as well as variable A/CNK (0.94–1.09) and molar Fe + Mg values (0.0452–0.1210), and display a negative correlation of A/CNK and Fe + Mg, indicating an I-type affinity. Isotopically, they

display negative whole-rock $\epsilon\text{Nd}(t)$ (–6.38 to –4.06) and highly evolved zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ values (–9.36 to +1.92) as well as old two-stage Nd model ages (1.69–1.85 Ga) and crustal Hf model ages (1608–2139 Ma), implying a crustal source. In comparison with the geochemical composition of fluid-absent experimental melts, the Yonglang I-type granitoids have Fe, Mg, Ti, and Ca contents that are too high to equilibrium with those of pure crustal melts, indicating the additional incorporation of a ferromagnesian, Ti-, and Ca-rich component into primary melts. Like the Cotoncello–Monte Capanne granitic complex in Elba Island and Verdenburg I-type granite in South Africa, the Yonglang I-type granitoids exhibit highly positive linear correlations for Ti vs. maficity and Ca vs. maficity as well as negative correlation for A/CNK vs. maficity, suggesting that these high-maficity I-type granitoids predominantly underwent the peritectic assemblage entrainment of Ca–Fe–Mg–Ti bearing minerals (e.g., clinopyroxene, plagioclase, ilmenite, etc.) during coupled melting of biotite and hornblende phases in crustal source. The process of peritectic assemblage entrainment thus play a vital role in moulding geochemical compositions of more mafic I-type granites.

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目 (41421002) 及国家自然科学基金面上项目 (41772052)

第一作者简介: 朱毓 (1993–), 博士后, 研究方向: 花岗岩岩石地球化学研究. E-mail: yuzhunwu@163.com

*通信作者简介: 赖绍聪 (1963–), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学及地球化学研究. E-mail: shaocong@nwu.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

High-K Calc-alkaline to Shoshonitic Intrusions in SE Tibet: Implications for Metasomatized Lithospheric Mantle Beneath an Active Continental Margin

Ren-zhi Zhu^{1*}, Ewa Słaby², Shao-cong Lai^{1*}, Li-hui Chen¹, Jiang-feng Qin¹,
Chao Zhang¹, Shao-wei Zhao³, Fang-yi Zhang¹, Wen-hang Liu², Mike Fowler⁴

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Institute of Geological Sciences, Research Centre in Warsaw Polish Academy of Sciences, Twarda 51/55, Warsaw, Poland;

3. School of Earth Science & Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

4. School of the Environment, Geography and Geosciences, University of Portsmouth, PO1 3QL, United Kingdom

Corresponding author: Shao-Cong Lai (shaocong@nwu.edu.cn); Ren-Zhi Zhu (renzhi@nwu.edu.cn)

High-K calc-alkaline to shoshonitic suites are widespread and generally volumetrically small but provide key information on magmatic mantle-crust interactions. Limited work has addressed the multi-stage formation of relatively high-volume high-K to shoshonitic rocks. A newly-identified, late Cretaceous to early Cenozoic high-volume high-K to shoshonitic association (ca. 28,000 km³) is described, from the southeastern Himalayan-Tibetan orogen. The mafic intrusions are shoshonitic (K₂O contents, ~3.3 wt.%), have high-Mg contents (~5.1 wt.%) with high-Mg# (57), LREE and LILEs with low Ba/Th, Ba/La, Sm/La (<0.3), Nb/Yb and ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb ratios but high Hf/Sm (>0.70), Th/Yb, Th/La (>0.2) and La/Sm, and lack an Eu anomaly. Their mafic minerals are hydrous, dominated by magnesio-hornblende (Mg#, ~0.69-0.73) and Mg- and K-biotite (MgO, 7.27-9.26 wt.%; K₂O, 9.65-10.1 wt.%). Such characteristics strongly suggest derivation from the

sub-continental lithospheric mantle (SCLM), metasomatized by sediment-derived melts/fluids. The associated felsic intrusions have high SiO₂, alkali content (Na₂O+K₂O contents up to 10.0 wt.%) and incompatible elements (e.g. K, Rb), with ferropargasite-hastingsite and ferrobiotite-siderophyllite as the mafic phases. These characteristics point to derivation from the continental crust enriched by fluids, likely those released from the contemporaneous mafic magmas crystallising at depth. In contrast to low-volume potassic magmatism from post-collision and earliest arc-rift settings, these high-volume high-K and shoshonitic intrusions define a mantle-to-upper crust pathway at an active continental margin. Alongside geophysical data, these observations are consistent with the contemporary subduction history, arising from subduction of the Neo-Tethyan ocean slab to initial collision of India-Asia, from steepening subduction to slab rollback and breakoff.

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

华南早古生代花岗岩钨、铜成矿能力制约因素剖析

宋振韬¹, 徐夕生^{1*}, 周美夫^{1,2}, 夏炎¹, 姜鼎盛¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院 内生金属矿床研究国家重点实验室, 南京, 210023;

2. 香港大学 地球科学系, 香港

在花岗岩的成矿能力和成矿专属性差异研究过程中, 源区和岩浆演化过程, 两者谁为主导控制因素, 长期存在广泛的争议 (e.g. Cao et al., 2018; Huang et al., 2017; Su and Jiang, 2017)。

华南地区是世界著名的钨、铜产地, 而且钨、铜成矿作用与花岗岩密切相关 (Ni et al., 2021)。华南花岗岩相关的大规模钨、铜成矿作用传统上一直被认为与晚中生代 (燕山期) 花岗岩有关, 而前燕山期华南花岗岩的钨、铜成矿能力研究相对薄弱, 比如早古生代花岗岩, 曾在过去相当长一段时间内被认为是不成矿的花岗岩 (Mao et al., 2019, 2021; Hua et al., 2013)。近年来的矿产勘查和研究工作表明, 华南早古生代花岗岩具有较大的钨、铜成矿潜力 (e.g. Chen et al., 2019; Zhu et al., 2020)。然而, 研究大多注重成岩成矿时代以及成矿花岗岩的厘定, 对关键控矿因素 (源区? 岩浆演化过程?) 和成矿规律 (什么样的花岗岩更具找矿潜力?) 的探究和总结仍是薄弱环节。

在汇总大量前人研究数据的基础上, 通过对华南早古生代钨、铜矿化花岗岩和无矿化花岗岩的岩浆分异演化程度、氧逸度和源区特征进行综合对比研究, 本次工作发现, 矿化花岗岩和无矿化花岗岩在岩浆分异程度和氧逸度方面均变化很大且并无明显区别, 高

分异演化程度和高氧逸度并不能绝对地控制花岗岩钨、铜成矿能力 (e.g. Bai et al., 2020; Dang et al., 2018, 2019; Li et al., 2017; Lu et al., 2019; Wang et al., 2019; Zhang et al., 2017)。同时我们注意到, 华南早古生代钨、铜矿化花岗岩均分布在郴州-临武断裂以西, 而断裂以东并无钨、铜矿化花岗岩被确认。因此, 岩浆源区应是控制华南早古生代花岗岩相关钨、铜成矿作用的最关键因素。与郴州-临武断裂以东早古生代无钨、铜矿化花岗岩相比, 该断裂以西的同时期钨、铜矿化花岗岩拥有更加富钨富铜的岩浆岩源区。具体而言, 钨矿化花岗岩主要起源于显示江南造山带基底亲缘性的富钨地壳物质的部分熔融, 这得到了花岗岩岩浆锆石和继承锆石特征的支持 (e.g. Shu et al., 2013; Zhang et al., 2014)。此外, 华南早古生代铜矿化花岗岩显示 Nd-Hf 同位素解耦的特征, 表明这些铜矿化花岗岩的源区有新元古代富铜岛弧物质的贡献 (Su and Jiang, 2017)。鉴于江南造山带前寒武基底的钨、铜含量远高于华夏地块基底, 本次研究认为在华南地区, 位于郴州-临武断裂以西华夏-扬子结合带的早古生代花岗岩比该断裂以东华夏地块的同时代花岗岩具有更大的钨、铜成矿潜力, 应是未来找矿勘查工作的重点。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41930214, 41430208)

第一作者简介: 宋振韬 (1996-), 博士研究生在读, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: DZ1729004@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 徐夕生 (1962-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: xsxu@nju.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

喜马拉雅早古生代花岗片麻岩对喜马拉雅造山带造山过程的限定

朱雪丽, 赵志丹*, 熊知秋, 石卿尚, 刘栋

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

喜马拉雅造山带, 作为世界上最年轻且仍在活动的陆-陆碰撞型造山带, 较完整地记录了与大陆深俯冲-快速折返等构造地质作用相关的变形、变质和岩浆作用的重要信息, 是研究碰撞造山带深部物质循环重要野外基地和检验造山作用理论天然实验室。但近年来研究也发现喜马拉雅造山带存在新生代之前的岩浆作用记录, 全面了解印度-欧亚大陆碰撞前喜马拉雅地体经历的构造-岩浆作用也具有重要的科学意义(高利娥等, 2015; 曾令森等, 2017)。

本研究选择特提斯喜马拉雅造山带波东拉岩体花岗片麻岩、高喜马拉雅结晶岩系汤嘎西木岩体眼球状花岗片麻岩样品, 通过对这些样品开展了系统的岩相学、全岩主微量与 Hf 同位素地球化学、锆石 U-Pb 年代学研究, 不仅完善了喜马拉雅造山带岩浆作用的时空格架, 还进一步确认了其古生代时期区域构造

事件之间的联系。获得以下进展: (1)波东拉岩体花岗片麻岩和汤嘎西木岩体眼球状花岗片麻岩的 U-Pb 年龄分别为 478 Ma 和 481 Ma, 在误差范围内是一致的, 表明两种岩石应为同时代岩浆作用的产物。(2)波东拉岩体花岗片麻岩和汤嘎西木岩体眼球状花岗片麻岩具有相似的锆石 Hf 同位素特征(-4.95~-0.22 和-3.32~-0.16), 表明其可能具有相同的源区物质组成; (3)波东拉岩体花岗片麻岩和汤嘎西木岩体眼球状花岗片麻岩 SiO₂ 含量为 70.66 wt. %~79.29 wt. %、A/CNK 为 1.01~1.20, 它们的稀土总量较高, 轻稀土富集, Eu 负异常, 富集大离子亲石元素 Rb, 相对亏损 Nb、Ta、P 和 Ti 等高场强元素。这些结果为深入了解早古生代花岗片麻岩在喜马拉雅新生代地壳深熔作用中扮演的角色, 识别喜马拉雅造山带构造演化过程等提供了新的岩石学和地球化学证据。

基金项目: 国家自然科学基金(42073035)

第一作者简介: 朱雪丽(1989-), 博士研究生, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: zhuxueli13@163.com

*通信作者简介: 赵志丹(1968-), 博士、教授, 岩石学和地球化学专业. E-mail: zdzhao@cugb.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

磷灰石原位微区地球化学：对中亚造山带东段花岗岩的岩石成因和地壳增生历史的意义

龙欣雨¹, 许文良^{1,2*}, 孙晨阳¹, 唐杰¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061;

2. 自然资源部 东北亚矿产资源评价重点实验室, 长春 130061

磷灰石是火成岩中一种常见的副矿物,许多元素可以通过替代作用进入磷灰石的晶格中,因此磷灰石含有较高的 REE、Fe、Mn、Sr、Y、Pb、Th 和 U 含量 (Piccoli and Candela, 2002; O'Sullivan et al., 2020)。近年来研究表明,磷灰石中微量元素含量和同位素组成可以指示母岩浆的成分和性质(如岩石类型、SiO₂ 含量、fO₂、ASI 值)、岩浆演化过程(如分离结晶和岩浆混合作用)以及晚期变质作用和热液作用的改造 (Bruand et al., 2017; Zafar et al., 2020; Zhang et al., 2020)。这些复杂的岩石成因信息往往无法利用全岩主微量元素数据鉴别出来。

本文对位于中亚造山带东段的松嫩地块和佳木斯地块上出露的 35 个代表性花岗质岩体中的磷灰石进行了原位微区主、微量元素和 Nd 同位素测试,结果表明不同类型的火成岩(包括长英质的 I/A-型花岗岩、镁铁质的 I/A-型花岗岩、过铝质花岗岩、埃达克岩和经历变质作用的火成岩)中的磷灰石具有明显不同的元素含量、元素比值和 REE 配分模式,主要受控于母岩浆的成分、其他富 REE 矿物的分离结晶以及磷灰石与硅酸岩熔体之间分配系数的变化。磷灰石中 Mn、Th、Sr 的含量, Eu 异常的强弱和 REE 的配分模式是示踪寄主岩浆的成分(如全岩 SiO₂ 和 Sr 含量)和分离结晶过程的重要指示剂。尤其是磷灰石中 Sr 的含量与寄主岩石和斜长石的 Sr 含量呈现

良好的线性关系,为反算它们各自的原始 Sr 含量提供了合理依据。而 LREE 含量异常低的磷灰石可能指示其结晶后经历了变质作用或交代作用的改造。同时,埃达克岩中的磷灰石很好地继承了母岩特殊的地球化学特征,这些磷灰石普遍具有高 Sr、低 HREY (Gd~Lu+Y) 含量,以及不明显的 Eu 异常,是鉴别埃达克质岩石的重要标志。

研究发现,磷灰石的一些异常地球化学信号可以为示踪花岗岩的原始岩浆演化过程和源区性质提供新的视野,比如:(1)全岩 REE 配分模式具有负的或不明显的 Eu 异常,但磷灰石具有 Eu 正异常;(2)磷灰石的 Sr 元素含量明显高于全岩 Sr 含量;(3)磷灰石的 REE 配分模式与全岩 ASI 值不匹配。这些特殊的地化组成可能指示了岩浆混合作用、岩浆源区的不均一性或者其他更复杂的岩浆演化过程。此外,本文对磷灰石 Nd 同位素与锆石 Hf 同位素之间协变关系的研究,为重建中亚造山带东段微陆块的地壳增生历史提供了新的证据。松嫩地块东缘和佳木斯地块西缘上出露的部分花岗质岩石呈现出磷灰石 Nd 同位素与锆石 Hf 同位素解耦的特点,可能是由于富 Nd 贫 Hf 的俯冲沉积物熔体对深部岩石圈地幔进行了改造,其熔融形成的基性岩浆上升侵位形成了下地壳,而具有 Nd-Hf 同位素解耦特征的花岗质岩石是这些基性下地壳再造的产物。

基金项目: 国家自然科学基金 (42072071, 41772047)

第一作者简介: 龙欣雨 (1995-), 博士研究生, 主要从事火成岩岩石学研究. E-mail: longxy18@mails.jlu.edu.cn

*通信作者简介: 许文良 (1959-), 教授, 主要从事火成岩成因与岩石圈动力学研究. E-mail: xuwl@jlu.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

花岗质岩浆过程的 Ba 同位素研究进展

邓庚辛¹, 南晓云¹, 姜鼎盛¹, 黄方^{1,2*}

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 合肥 230026;

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

花岗岩和陆壳的形成与演化密切相关, 花岗质岩浆演化过程伴随着矿物结晶、熔体提取和流体作用。尤其在岩浆演化晚期, 矿物分离结晶和流体作用对于形成高分异花岗岩以及成矿元素(Sn、Li、Rb 等)富集至关重要。在花岗岩体系中, Ba 是相容元素, 也是一种流体活动性元素。Ba 在矿物-熔体-流体三相中的成键环境差异可能导致明显的 Ba 同位素分馏, 因此花岗岩 Ba 同位素研究可以为花岗质岩浆的结晶演化和流体相互作用提供新的制约。

Nan 等 (2018) 对采自华南的三类花岗岩进行了 Ba 同位素测试, 并以此为基础制约了大陆上地壳 (UCC) 的 Ba 同位素组成 ($\delta^{138/134}\text{Ba}=0.00\pm 0.04\%$, $\delta^{138/134}\text{Ba}=[(^{138}\text{Ba}/^{134}\text{Ba})_{\text{样品}}/(^{138}\text{Ba}/^{134}\text{Ba})_{\text{SRM3104a}}-1]\times 1000(\%)$)。与 S 型花岗岩较为均一的 Ba 同位素组成相比, 高分异 I、A 型花岗岩具有明显更低的 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 。受限于样品情况, 本文并未深入探究具体分馏机理。随后, Deng 等 (2021) 对胶北地体中回里花岗岩的研究表明, 钾长石控制的晶体-熔体分离过程会使残余熔体的 Ba 同位素组成变重。作为残余晶粥体产物, 回里钾长石花岗岩中共存的含 Ba 矿物间并未处于 Ba 同位素平衡。结合微结构证据, 这应该反映了晶体-熔体分离过程中的晶体聚集和重新填充, 为识别中上地壳中代表残余晶粥体的花岗岩体提供了新的地球化学指标。这项研究还表明, Ba 同位素对于解释硅质侵入岩与喷出岩之间的成因联系具

有重要意义。

探究花岗质岩浆与流体之间的 Ba 同位素分馏机理是应用 Ba 同位素制约岩浆-热液相互作用对花岗岩成分变化和关键金属成矿作用的贡献的前提。Guo 等 (2020) 通过实验测定了花岗质岩浆与含水流体之间的 Ba 同位素分馏系数。结果显示, 平衡条件下, 含水流体相对于花岗质熔体优先富集轻 Ba 同位素。进一步计算表明, 虽然从花岗质岩浆中出溶的热液流体的 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 可以显著降低, 但是残余熔体的 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 基本不变。在此基础上, Huang 等 (2021) 利用 Ba 同位素制约了喜马拉雅淡色花岗岩形成过程中流体的影响和来源。结果显示, 来自康巴穹窿的淡色花岗岩的 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ (-1.32‰ ~ +0.28‰) 整体低于 UCC 平均值, 与华南 A 型花岗岩相似。排除源区过程和分离结晶的影响后, 这些样品的轻 Ba 同位素组成应该是岩浆-热液相互作用的结果。由于康巴淡色花岗岩主要以小体积岩脉形式产出, 需要有出溶自下部更大的岩浆储库的具有轻 Ba 同位素组成的热液流体参与反应。同时, 这些来自深部岩浆储库的热液流体还能为康巴淡色花岗岩较高的稀有金属资源潜力提供了物质来源。

现有工作表明 Ba 同位素在花岗质岩浆过程研究中具有广泛的应用潜力, 未来需要继续完善部分熔融、岩浆运移等过程的 Ba 同位素分馏机理, 开展更多应用性研究。

基金项目: 国家重点研发计划“变革性技术关键科学问题”重点专项“面向矿床学研究的变革性原位分析新技术”(2018YFA0702600)

第一作者简介: 邓庚辛 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 花岗岩金属稳定同位素研究. E-mail: denggx@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 黄方, 教授, 研究方向: 同位素地球化学。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

气体压滤作用形成基性微粒包体

许伟^{1,2}, 朱弟成^{2*}, 王青², Roberto F. Weinberg³, 李世民²

1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013;

2. 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;

3. School of Earth, Atmosphere and Environment, Monash University, Clayton, Vic. 3800, Australia

基性微粒包体 (MME) 常见于中酸性侵入体, 蕴含有地壳深部岩浆作用的信息, 可以为揭示地壳的形成和演化历史提供重要线索。MME 通常显示细粒火成结构, 并表现出与寄主岩石一致的矿物成分、结晶时代和放射性同位素组成, 明显不同于源区难熔残余物和基性围岩捕掳体, 但 MME 到底是基性与酸性岩浆的混杂物, 还是与寄主岩石有关的同源包体尚不清楚。造成这一争议的重要原因之一是研究区通常缺失与 MME 和寄主岩石相关、对限定 MME 成因具有重要作用的同时代基性岩浆。崔久火成杂岩 (~200 Ma) 位于西藏南部冈底斯岩弧东段, 出露多种岩性, 包括辉石角闪石岩、角闪石岩、角闪辉长岩、闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩, 是一套由幔源玄武岩岩浆经结晶分异作用形成的岩石组合 (Xu et al., 2019)。其中的闪长岩含有丰富的 MME, 这为揭示俯冲背景下 MME 的成因提供了极好的机会。本文对崔久火成杂岩中的 MME 和寄主闪长岩开展了野外和岩石学观察、锆石 U-Pb 定年、矿物和全岩地球化学等的测试分析。野外和岩相学观察 (石英和斜长石眼斑结构) 表明 MME 的确经历过机械混杂, 但这并不意味着大规模的基性和酸性岩浆的混杂, 更不能指定 MME 的成因。全岩和矿物地球化学数据分析结果表明 MME 既不能代表基性熔体, 也不是简单的基性

和酸性岩浆的混合物。此外, 地球化学扩散和反应也并未主导崔久 MME 的形成。MME 的 SiO₂ 含量为 ~52 wt.%, 且相对于寄主岩石富集相容元素和亏损不相容元素, 暗示其可能是与寄主岩石相关的堆晶岩。质量平衡模拟计算也支持这一结论。MME 的细粒结构和其内发育的针状磷灰石表明 MME 经历过快速冷凝。大多数学者将这一快速冷凝事件联系到热的基性岩浆与冷的酸性岩浆的接触。然而, 最近的实验岩石学证明快速冷凝也可以发生在上升的热岩浆与冷围岩的接触部位。结合崔久火成杂岩的两阶段分异过程 (Xu et al., 2019), 本文提出一种新的 MME 成因模式。幔源玄武岩岩浆在下地壳经历 50%~70% 的结晶分异形成安山质熔体和互补的堆晶岩。安山质岩浆随后在上升的过程中遇到冷的围岩, 并在两者的接触边界发生快速结晶并形成细粒的矿物集合体。随着结晶程度的升高, 水未饱和的安山质熔体变为水饱和的熔体并出溶流体和挥发分。边部和中心部位的压力和结晶度的差异趋使细粒矿物集合体中的粒间熔体向富熔体的中心运移, 从而实现晶体和熔体的分离。这一过程被统称为气体压滤作用。细粒矿物集合体在尚未完全固结前被后期上升的安山质熔体所捕获, 两者在一起运移的过程中发生机械混杂, 最终固结成被寄主闪长岩包裹的 MME。

基金项目: 国家自然科学基金 (42002063, 91755207, 42121002)

第一作者简介: 许伟 (1992-), 讲师, 研究方向: 岩浆岩地球化学. E-mail: xuweijlu@126.com

*通信作者简介: 朱弟成 (1972-), 教授, 博士生导师. E-mail: dchengzhu@163.com

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

弧岩浆深部结晶分异过程：来自中祁连西段盐池湾地区弧岩浆侵入杂岩体的年代学、地球化学和热力学模拟研究

孙晓奎, 王超*, 李航, 郝江波, 喻遵谱, 张帅, 武美云, 马得青, 李雪

大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 西安 710069

俯冲带弧岩浆分异是大陆地壳形成的基本过程, 对研究大陆地壳的演化与生长机制具有重要意义。本文对中祁连岛弧地体西段盐池湾地区的哈马尔达坂杂岩体进行地球化学, 年代学和热力学模拟研究。哈马尔达坂杂岩体主要存在两大岩石类型: 镁铁质-超镁铁质堆晶岩(包括辉石角闪石岩, 角闪辉长岩和角闪石岩)和闪长岩类(包括闪长岩、石英闪长岩)。锆石 U-Pb 定年结果揭示辉石角闪石岩的形成时代为 473 ± 1 Ma, 与相邻高钾岛弧玄武岩(HKSV)的形成时代一致。哈马尔达坂杂岩体与高钾岛弧玄武岩具有均一且亏损的全岩 Sr-Nd-Hf 同位素组成, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 比值在 0.703533-0.705302 之间, $\epsilon\text{Nd}(473\text{Ma}) = +3.88 \sim +5.08$, $\epsilon\text{Hf}(473\text{Ma}) = +10.75 \sim +13.08$, 表明它们来自同一岩浆源区。结合野外地质关系与岩石地球化学特征, 推测该侵入杂岩体的原始熔体为相邻的高钾玄武

质弧岩浆。岩石学和地球化学特征表明闪长岩类是在俯冲带环境下, 来源于受沉积物熔体交代的地幔楔部分熔融形成的原始玄武质熔体, 在中下地壳经历以角闪石为主的结晶分异形成的产物; 镁铁质-超镁铁质岩石具有堆晶岩的岩石学和地球化学特征, 代表分离结晶过程后残留的堆晶单元。利用热力学模拟计算与实验岩石学类比, 进一步限定哈马尔达坂杂岩体是含水的幔源玄武质熔体在中压(约 7 kbar)和氧逸度为 NNO+1 的条件下, 经历 50%~67% 的分离结晶的产物。闪长岩类与镁铁质-超镁铁质堆晶岩具有相似的矿物结晶顺序与全岩同位素组成, 代表分离结晶过程互补成分, 分别代表了相似幔源玄武质岩浆的衍生熔体和堆晶岩。本文进一步研究表明, 角闪石分异是弧岩浆分异的主要过程, 导致富含 SiO_2 的衍生熔体, 推动岩浆成分向富硅的方向演变, 从而产生安山质地壳。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672187, 42030307)和科技部大陆动力学国家重点实验室课题资助

第一作者简介: 孙晓奎(1997-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学, E-mail: 2484090229@qq.com

*第一/通信作者: 王超(1979-), 副研究员, 博士生导师, 主要从事岩石学与前寒武纪地质研究, E-mail: chaowang@nwu.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

B 同位素示踪水在地幔楔熔融过程中的作用

于洋^{1*}, 黄小龙¹, 孙敏², 马金龙¹

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;

2. 香港大学地球科学系

地幔楔熔融是俯冲带岩浆作用最重要的成因机制。实验岩石学表明水含量的增加可以有效地提高地幔橄榄岩的熔融程度。全球俯冲板片具有不同的热状态,其脱水或熔融过程会释放不同数量的水进入地幔楔。全球岛弧水通量的巨大差异应该造成地幔楔不同程度的熔融,但目前估算的全球岛弧水通量与岛弧玄武岩成分之间缺少相关性,因而对于水在地幔楔熔融过程中的作用仍存在疑问。B 与水在俯冲过程中具有相似的地球化学性质,均表现出强不相容性,可以示踪俯冲带水通量的变化。本次研究对阿尔泰山南缘哈巴河地区的一套与准噶尔洋俯冲过程有关的晚泥盆世-早石炭世基性岩墙进行了系统的 B 同位素研究,揭示水在地幔楔熔融过程中的作用。

哈巴河基性岩墙具有亏损的 Hf 同位素组成 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=+5.5\sim+15.4$)与低的 TiO_2/Yb 比(0.35~0.66),指示其均来自亏损地幔源区的熔融。哈巴河基性岩墙显示不同的微量元素特征及 Nd-B 同位素组成,可分为四类,反映其地幔源区包含多种俯冲组分。第一类基性岩墙富集 LREE、Th,显示低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (+3.5 ~ +3.9)、低 $\delta^{11}\text{B}$ (-6.9‰ ~ -5.0‰)和低 B/Nb (3.07 ~

7.39)的特征,表明其地幔源区受来自俯冲沉积物熔体的交代。第二类基性岩墙亏损 LREE 和 Th,但富集 Ba、Sr、Pb,并具有高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+6.5 ~ +8.1)和不同的 B/Nb 比(7.07~14.4)与 $\delta^{11}\text{B}$ 值(-7.8‰ ~ -2.7‰),这些地球化学特征指示其地幔源区包含来自俯冲沉积物和俯冲蛇纹岩的流体。第三类基性岩墙富集 LREE,具有高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+6.7 ~ +6.9)及低 B/Nb 比(2.10 ~ 3.93)与低 $\delta^{11}\text{B}$ 值(-7.7‰ ~ -5.9‰),反映其来源于受俯冲洋壳熔体再富集的亏损地幔源区部分熔融。第四类基性岩墙富集 LREE,并显示低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+0.7 ~ +1.0)和高 $\delta^{11}\text{B}$ 值(-2.9‰ ~ +3.5‰)、高 B/Nb 比(17.0 ~ 27.5)的特征,表明其地幔源区除包含来自俯冲沉积物熔体,还受到俯冲蛇纹岩产生的流体交代。哈巴河基性岩墙具有不同的 Zr/Yb (11.3 ~ 48.6)和 Nb/Yb (0.30 ~ 1.27)比,且与 B/Nb 比呈负相关关系,指示其地幔源区随着水含量的升高而发生了更程度的熔融。该现象同样发生在全球岛弧玄武岩中。除此之外,全球岛弧玄武岩的 B/Nb 与其地球化学成分具有良好的相关性,表明水通量对全球地幔楔熔融和岛弧玄武岩成分具有重要的控制作用。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

转熔矿物组合的选择性带入对花岗岩成分变化的影响： 以南秦岭宁陕岩体为例

王日香¹, 李小伟^{1*}, 管琪², 李睿哲¹, 谢沛伶¹, 吴斌斌¹, 夏文月¹

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 河北地质大学 地球科学学院, 石家庄 050031

南秦岭造山带发育大量的早中生代花岗质岩体群, 主要包括光头山(GTS)岩体群, 宁陕(NS)岩体群和五龙岩体群等, 它们是研究转熔矿物组合影响酸性侵入岩成分变化的良好候选对象。其中, NS岩体由胭脂坝、懒板凳、老城岩体组成, 其中胭脂坝岩体位于NS岩体的东部, 北侧与懒板凳岩体相连, 西侧为老城岩体。胭脂坝岩体主要由中粗粒的似斑状花岗闪长岩组成, 懒板凳岩体的主要岩性为二云母二长花岗岩, 老城岩体主要由石英闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩组成。

锆石 U-Pb 定年结果表明, NS 岩体的岩浆活动划分为 2 个期次: (1) 早期为懒板凳岩体的二长花岗岩, 形成时代约为 223~220 Ma; (2) 晚期为胭脂坝和老城岩体的石英闪长岩-花岗闪长岩, 形成时代约为 211~196 Ma。本次研究还对 NS 岩体进行了定年分析。同一块样品中, 得到的独居石 U-Pb 年龄均小于锆石 U-Pb 年龄, 可能不是岩浆降温过程中独居石结晶温度较低以及后期冷却作用的因素, 而是受晚期的流体活动的影响(陈旭等, 2009)。

NS 花岗岩的主量元素和微量元素(高 K_2O (>3.00 wt.%) 和 LREE, 以及低 CaO (1.13 wt.% ~ 3.00

wt.%), 以及 Sr-Nd 同位素数据 (Sr_i (0.703337~0.705483); $\epsilon_{Nd}(t)$ (-6.3 到 -1.8) 和中元古代的二阶模式年龄)表明其岩浆源区可能是由多种地壳源区混合演化形成。与无流体实验熔体的地球化学组分进行对比, 低镁铁值的 NS 花岗岩样品在地球化学组分上与壳源熔体成分(即泥质岩、火山碎杂砂岩和杂砂岩)最为匹配。此外, NS 岩体花岗岩的 Al_2O_3/TiO_2 比值为 30.9~102.6, 大部分样品的 Al_2O_3/TiO_2 比值在 30~90 之间, 表明岩浆源区主要为砂屑岩, 泥质岩比较少。NS 花岗岩显示出 Ti 与 Fe+Mg 值和 Ca 与 Fe+Mg 值的高度正相关性, 以及 A/CNK 与 Fe+Mg 值之间的负相关性, 表明 NS 花岗岩类的原始岩浆, 形成于含黑云母源区的非一致熔融, 上述原始岩浆上升过程中裹带了 Ca-、Fe-、Mg-、Ti-的转熔矿物组合(如 Cpx、Pl、Ilm、Zr、Ap 和 Sph)。

综上所述, NS 花岗岩是由含黑云母源区部分熔融形成的, 同时伴随着单斜辉石、斜长石, 以及副矿物(如钛铁矿、锆石 NS、磷灰石和榍石)等转熔矿物组合的裹带。因此, 转熔矿物裹带模型(PAE)是解释 NS 花岗岩成分变化的有效机制。

基金项目: 国家自然科学基金委重点项目(41730426)资助

第一作者简介: 王日香(1995-), 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事岩浆作用与深部过程研究. E-mail: 1270522920@qq.com

*通信作者简介: 李小伟(1985-), 副教授, 博士生导师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事成因矿物学与岩石学研究. E-mail: xwli@cugb.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

中国东部霞石岩记录俯冲物质的深部熔融过程

曾罡^{1*}, 陈立辉², Albrecht W. Hofmann³, 王小均²,
刘建强⁴, 俞恂⁵, 谢烈文⁶

1. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210023;
2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;
3. 德国马普化学研究所, 美因茨 D-55128;
4. 河海大学海洋学院, 南京 210098;
5. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;
6. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

霞石岩, 作为一种高度富碱的火山岩类型, 长期以来被认为起源于含金云母或角闪石的浅部岩石圈地幔。而本研究通过对中国东部的四座霞石质火山形成过程的深入探讨, 提出它们的初始熔融深度要远远超过之前的预期。我们发现, 这些霞石岩和世界上其它地区分布的霞石岩相类似, 具有极其低的 K/U 和 Ba/Th 比值, 但是它们的 Sr-Nd-Hf 同位素组成与该区域岩石圈地幔的同位素特征存在明显差异, 尤其它们还呈现出与海相碳酸盐类似的 Mg 同位素特征。我们认为这些地球化学与同位素的特征可以用再循环的含碳酸盐沉积物在地幔过渡带(410~660 km)的部分熔融来解释。而在地幔过渡带的深部熔融过程中, 高压矿物相钾锰钡矿(KAlSi₃O₈; 英文名: liebermannite/K-hollandite)是一个稳定的残余矿物相, 且 K、Ba、Rb 和 Pb 相比 Th、U 和轻稀土明显

更相容于该矿物, 因此, 低程度部分熔融释放的熔体就能呈现出霞石岩所具有的微量元素特征。同时, 我们发现 I 型金伯利岩和 HIMU 型洋岛玄武岩呈现出与霞石岩相类似的微量元素特征, 暗示三者的深部熔融过程可能存在相似性。

由于本次研究的霞石岩在 Mg-Sr 同位素、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd-MgO 和 $\delta^{26}\text{Mg-Ba/Th}$ 比上, 表现出较强的线性关系, 是两端元混合的典型特征, 因此, 我们采用两阶段模型来解释霞石岩的成因。首先, 含碳酸盐的沉积物在地幔过渡带深度发生低程度的部分熔融, 形成碳酸盐化的硅酸盐熔体(初始熔体)。随后, 此初始熔体在上升过程中与周围的橄榄岩发生反应, 部分初始熔体转变为反应熔体, 并最终与我们残余的初始熔体发生而混合, 形成我们的霞石岩。综上所述, 中国东部的霞石岩可以被看做是起源于地幔过渡带的熔体。

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

Meso-to Neoproterozoic Geodynamic Transition of the North China Craton Indicated by H₂O-in-zircon for TTG Suite

崔泽贤, 夏小平*, 张万峰, 黄小龙

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 511458

Tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) suites constitute nuclei of many ancient cratons, holding a key to reveal how continental crust formed and evolved in the early Earth. Archean to Paleo-Proterozoic TTG rocks are widely reported in the North China Craton (NCC), and have been widely used to infer continental crust growth and reworking. Previous whole-rock geochemical studies on these rocks had led to the proposal of Neoproterozoic subduction onset and the establishment of the Meso- to Neoproterozoic thermal state for this craton. However, whole-rock geochemical compositions can be modified by post-magmatic alteration or metamorphism. The content of water in zircon has the potential to characterize the hydrous state of magma (Meng et al.,

2021; Xia et al., 2021). Here, in order to track the NCC geodynamic evolution from the Mesoarchean to the Paleoproterozoic, we measured the H₂O-in-zircon content with a newly developed low background SIMS method for a Neoproterozoic- Paleoproterozoic (2.8–2.1 Ga) TTG suite in the central NCC. Our results show an abrupt zircon water content rise at the Paleoproterozoic-Neoproterozoic boundary (~2.5 Ga), from ~100 ppm for ~2.8 Ga TTG rocks to >1000 ppm for ~2.5 and ~2.1 Ga TTG rocks. In addition, zircon elemental ratios (e.g., U/Yb and Nb/Yb) also show a remarkable magmatic provenance change at the same time from MOR (mid-ocean-ridge)-type to arc-type. We link these changes to the initiation of plate subduction in the North China Craton.

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0702600)

第一作者简介: 崔泽贤 (1995–), 助理工程师 (硕士), 研究方向: 元素/同位素地球化学研究. E-mail: cuizexian@gig.ac.cn

*通信作者简介: 夏小平 (1977–), 正高级工程师 (博士), 研究方向: 微区原位地球化学分析实验方法开发与应用研究. E-mail: xpxia@gig.ac.cn

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

晚侏罗世与铜-铅-锌成矿作用相关的岩石成因研究——以湘南宝山矿床为例

胡天杨, 刘磊*, 周炜鉴, 邵拥军, 刘忠法

中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083

湘南宝山地区的花岗闪长斑岩、二长花岗岩以及煌斑岩在空间上和时间上明显相关, 本文旨在通过岩石学、地球化学和年代学研究, 探讨不同类型岩石共同发育的成因关系和构造机制。基于 LA-ICP-MS 的锆石 U-Pb 定年结果, 本次研究中的三种岩体的锆石 U-Pb 年龄均为 160 Ma。但是通过对宝山地区的单颗粒锆石年龄进行统计, 本文提出了以 160 Ma 和 180 Ma 为峰值的两期岩浆事件。在这三种岩石中, 相对较古老的锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相对均一 (-9.8 至 -6.2), 但是随着岩浆事件的持续进行, 二长花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值具有很宽的变化范围 (-25.8 至 -9.2)。这说明其源区的古老地壳中物质比例逐渐增多, 宝山地区应当具有一个至少双层的岩浆源区。三种岩石的岩浆源区都经历过

明显的俯冲作用影响 (Nb, Ta, Ti 的异常以及磷灰石、锆石氧逸度的约束)。通过地球化学以及岩石学的相关证据 (如 CMF-AMF 图解等), 推测花岗闪长斑岩来自地壳深部的熔融, 应当是新元古代镁铁质幔源新生地壳和长英质古老地壳成分的混合; 而二长花岗岩来自地壳稍浅部分的熔融, 原岩主要为变闪长岩; 煌斑岩则来自俯冲流体交代的石榴子石-尖晶石 1:1 的稳定场条件下含金云母相的二辉橄榄岩低程度部分熔融的产物。本研究认为, 晚侏罗世板块内地幔上涌和板块俯冲共同作用引起的由挤压向伸展转换的构造背景是造成岩浆上涌的控制因素。地幔上涌引起的裂谷和断层不断发展, 成为三种岩浆上升的通道, 导致宝山地区岩浆从不同深度的来源就位。

基金项目: 国家重点研发项目 (2018YFC0603901); 国家自然科学基金项目 (41972198)

第一作者简介: 胡天杨 (1996-), 在读博士研究生, 研究方向: 矿床地球化学研究. E-mail: hty960926@csu.edu.cn

*通信作者简介: 刘磊 (1984-), 中南大学教授, 研究方向: 古海洋化学演化, 前寒武纪地质与矿床, 矿床地球化学. E-mail: liu01@ustc.edu.cn

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

云南哀牢山构造带瑶山群新元古代变基性岩的识别及其地质意义

刘昊茹^{1,2}, 蔡永丰^{1,2*}

1. 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 广西 桂林 541004

已有的研究表明扬子地块西北缘和东南缘均广泛存在新元古代岩浆活动, 这些岩浆岩的形成时代主要集中在 840~740 Ma, 对它们的成因机制仍存在俯冲作用和地幔柱等不同观点。哀牢山构造带“瑶山群”位于扬子地块西南缘, 是连接扬子地块和印支地块的纽带, 其新元古代时期的岩浆作用特征和时空分布, 对揭示扬子地块甚至整个华南地区的大地构造演化特征都起着关键作用。本文选择哀牢山构造带“瑶山群”内的变基性岩进行了锆石 U-Pb 年代学和地球化学分析测试, 并获得了新元古代的年龄信息, 为首次确证了“瑶山群”内存在新元古代变基性岩, 这一研究为深入理解哀牢山构造带新元古代时期的构造格局和演化历史提供了新的重要证据。

哀牢山构造带内分布的“哀牢山群”和“瑶山群”由于受后期变质变形作用的强烈改造, 使地层层序难以恢复, 对它们的形成时代至今仍未取得一致的认识。本文对“瑶山群”变基性岩进行的高精度

LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年获得了 762 ± 10 Ma 的形成年龄, 表明哀牢山构造带存在新元古代中期的基性岩浆活动。由此推测哀牢山构造带可能是一个原岩复杂的构造混杂岩带, 它至少经历了新元古代、晚古生代-早中生代和新生代等多期岩浆-变质-变形作用, 其原岩至少包含新元古代中期和三叠纪的岩浆岩及其相关地层, 而不是前人认为的全部形成于古元古代, 前人命名的“哀牢山群”和“瑶山群”, 可能称之为“哀牢山杂岩”和“瑶山杂岩”更为合适。

元素地球化学研究结果表明, 变基性岩相对富集大离子亲石元素和稀土元素, 具有明显的 Nb、Ta 负异常, 其地球化学特征与典型的弧岩浆相似。此外, 它们的稀土配分模式及原始地幔标准化蛛网图的分布形式与 E-MORB 相似, 暗示其起源于 E-MORB 型地幔源区。综合研究认为, 哀牢山构造带“瑶山群”内分布的新元古代变基性岩形成于岛弧环境, 其形成与新元古代时期的俯冲事件有关。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41502180); 广西自然科学基金项目 (2018GXNSFBA281069)

第一作者简介: 刘昊茹 (1998-), 硕士研究生, 主要从事构造地球化学研究工作. Email: haoru0501@163.com

*通信作者简介: 蔡永丰 (1986-), 副教授, 主要从事构造地质学和岩石地球化学研究工作. Email: caiyongfeng@glut.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

福建永泰云山准铝质-过碱性流纹岩的成因联系： 来自全岩及磷灰石地球化学的制约

洪文涛^{1,2*}, 徐夕生¹, 赵凯¹

1. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210023;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016

过碱性流纹岩(包括其对应的火山碎屑岩)是一种罕见的硅过饱和的过碱性火山岩, 在世界上分布极少, 其特殊的矿物组合及岩浆演化过程长期受到人们关注, 但对共生的铝质及过碱性流纹岩是否存在成因联系, 却仍存在较大争议。福建永泰云山地区出露着华南地区仅有的一处晚白垩世过碱性流纹质火山岩, 并与较早喷发的铝质(准铝-弱过铝质)的流纹质火山岩共生, 对其成因联系开展研究可以帮助我们进一步理解大陆内部过碱性流纹质岩浆的形成及演化过程。

云山铝质流纹岩中造岩矿物主要由碱性长石、石英、黑云母及磁铁矿组成, 副矿物以磷灰石、锆石、独居石为主; 而过碱性流纹岩中造岩矿物主要为钠铁闪石+碱性长石+石英+磁铁矿, 副矿物则包括锆石、磷灰石、独居石、磷钇矿、硅钛铈矿及萤石。在地球化学组成上, 云山铝质及过碱性具有相似的 Nd 同位素组成, $\epsilon_{Nd}(t)$ 均变化于 -4~-2 之间, 暗示其源区可能均为新生的大陆地壳 (Li et al., 2017)。除了 Ba, Sr, Eu* 以外, 两类流纹岩的主、微量元素含量十分相似, 均具有高 SiO_2 (>74%)、Zr、Nb 以及低 Al_2O_3 , FeO, CaO、Ba、Sr 等特征。过碱性流纹岩极低的 Ba (<12 ppm)、Sr (<11 ppm)、Eu* (<0.06) 暗示其可能经

历了更多的长石分离结晶作用。但值得注意的是, 在主、微量元素协变图解上, 两类流纹岩分布范围往往相互重叠; 且随着全岩 Ba 或 Sr 的降低 (代表分异程度增加), 高场强元素之间并未表现出系统性变化, 表明两类岩浆并非是同源演化关系。

两类流纹岩中的磷灰石均为氟磷灰石, 具有相似的 CaO、 P_2O_5 含量以及 LREE₂O₃ 含量。但铝质流纹岩中的氟磷灰石 Cl (<0.20%)、Na 含量明显低于过碱性流纹岩中的氟磷灰石 (Cl 大多 >0.20%)。随着磷灰石 La 的降低, 两类流纹岩中磷灰石的 La/Sm 比值也具有截然不同的变化趋势, 暗示了不同的结晶分异过程。由于在流纹质岩浆的演化中, Cl 总是随着分异程度的升高而降低 (Webster et al., 2020)。因此, 不论全岩地球化学还是磷灰石的微量元素组成, 均不支持云山两类岩浆是同一母岩浆连续分异演化的产物同时。相反, 过碱性流纹岩中磷灰石高的 Cl 含量暗示其岩浆很可能是富 Cl 的流体参与下新生地壳部分熔融的结果 (Martin, 2006); 而准铝质流纹岩浆与同期东南沿海 A 型花岗岩基本一致的地球化学以及矿物组合则暗示其岩浆可能起源于贫水、高温环境下地壳物质的重熔。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

Early–Middle Jurassic Magmatic Rocks along the Coastal Region of Southeastern China: Petrogenesis and Implications for Paleo-Pacific Plate Subduction

Jiao-Long Zhao^{1*}, Liang Liu²

1. School of Earth Sciences, Key Laboratory of Mineral Resources in Western China (Gansu Province), Lanzhou University, Lanzhou 730000;
2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081.

The Mesozoic geology of Southeastern China is characterized by widespread granitoids and their volcanic equivalents with minor mafic rocks. Those with Jurassic and Triassic ages are mainly concentrated in the interior of Southeast China, whereas the other igneous rocks with Cretaceous ages mainly occur in the coastal region. The origins and tectonic implications of the Mesozoic magmatic rocks within Southeast China have been extensively studied, but the exact timing and geological effects of the Mesozoic tectonic transition from the Tethys orogenic regime to the Paleo-Pacific regime remain highly controversial. On the other hand, the sources and petrogenesis of these granitic rocks in the coastal area of southeast China still remain to be clarified. Particularly, the nature of the ancient basement materials in the coastal region of southeast China is key toward understanding the origins of the granitic rocks and placing constraints on the evolution and modification of the crust in this area. Unfortunately, the nature of ancient basement rocks in this area is unclear due to poor exposure and Mesozoic thermo-tectonic reworking. This study presents new zircon U–Pb ages and whole-rock geochemical data for the Fanyindong (FYD) and Jincheng (JC) granitoid intrusions in coastal Zhejiang and Fujian Provinces, respectively, southeast China, to investigate their petrogenesis and provide new constraints on the regional tectonic evolution and crustal growth. Zircon U–Pb ages indicate that the FYD and JC intrusions were emplaced at c. 170 Ma and 193 Ma, respectively.

Both granitoids belong to the high-K calc-alkaline series, and display arc-like trace element patterns, with enrichment of large ion lithophile elements and Nb-Ta depletion. The FYD granitoids show adakitic geochemical characteristics, with high radiogenic Sr isotope ratios, and the most enriched bulk-rock Nd and zircon Hf isotopic compositions (crustal Nd–Hf model ages=ca. 2.35–2.75 Ga) ever reported in the Mesozoic granitoids within southeast China. Geochemical characteristics suggest that the FYD granitoids were generated by partial melting of mostly Paleoproterozoic basement rocks in a thickened lower crust. However, whole-rock Sr–Nd and zircon Hf isotopes of the JC granites show depleted source signatures. Geochemical signatures suggest the JC granites originated from the partial melting of a mixed source, consisting of the pre-existing, ancient, lower crust and juvenile, mantle-derived, basaltic rocks. The data from this study, in conjunction with previously published data, indicates that there exists a NE-trending, Early–Middle Jurassic, arc-related, magmatic rock belt along the southeast coast of China, and the Paleo-Pacific Plate subduction most likely started at c. 200 Ma. The early stage subduction of the Paleo-Pacific plate and the induced reactivation and extension of pre-existing E–W striking faults in the Nanling region of southeastern China gave rise to the generation of the JC granites. Ongoing subduction of the Paleo-Pacific plate resulted in a thickening of the continental margin, and subsequent crustal anatexis of basement materials produced the FYD granitoids.

基金项目：国家自然科学基金项目（41702048）；内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室开放基金项目（2017-LAMD-K08）；第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0704）

*第一/通信作者简介：赵蛟龙（1988–），讲师，研究方向：主要从事火成岩研究。E-mail: jlz@lzu.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

壳-幔多源区岩浆相互作用与演化—以松潘-甘孜构造带可尔因和太阳河岩体为例

胡方泂^{1,4*}, 杨雷², 吴福元^{3,4}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029;

2. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

4. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

松潘-甘孜构造带内发育广泛的三叠纪岩浆作用, 并且该期岩浆作用被认为与同期伟晶岩型稀有金属成矿作用相关。但是, 目前关于区域内岩浆的形成、演化及其与同期伟晶岩的关系仍有争议。SIMS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 太阳河岩体内黑云母闪长岩形成时代为 212~211 Ma, 二长闪长岩-二长花岗岩的形成时代为 210 Ma, 可尔因岩体似斑状黑云母花岗岩形成时代为 211~210 Ma, 中细粒二云母花岗岩的形成时代为 203~202 Ma。太阳河黑云母闪长岩具有低硅, 高镁, 富集大离子亲石元素 (LILEs) 及轻稀土元素, 亏损高场强元素 (HFSEs) 和重稀土元素的特征, 结合其同位素组成特征, 应为富集岩石圈地幔部分熔融的产物。太阳河二长闪长岩-二长花岗岩具有低-高硅, 显著的低镁富铁, 整体富集 LILEs, 亏损 HFSEs 的特征, 值得注意的是这些样品强烈富集轻稀土元素以及 Ba、Th 和 Zr 等元素, 结合其同位素特

征, 其可能形成于下地壳高温部分熔融, 并经历岩浆分离结晶和混染。可尔因似斑状黑云母花岗岩和中细粒二云母花岗岩具有高硅, 低镁, 整体富集 LILEs 且亏损 HFSEs 的特征, 同时亏损 Ba 和 Sr 等元素, 且具有明显 Eu 负异常, 结合其同位素特征, 它们应形成于变质沉积岩的部分熔融。结合它们的野外接触关系、形成时代与成因, 可以得知, 幔源岩浆侵位时间较早, 幔源岩浆的侵位以及可能的软流圈地幔上涌导致了下地壳的部分熔融, 该时期也是松潘-甘孜构造带内 A 型花岗岩形成的主要时期 (Zhang et al., 2007), 随后发生中-上地壳变质沉积岩熔融。这一过程反映了多阶段-多源区的岩浆相互作用与演化过程。区域内含锂辉石伟晶岩脉的铌钽矿和锡石形成时代为 211 Ma (Fei et al., 2020), 而同期黑云母闪长岩具有较高的 Li 含量, 可能指示早期幔源岩浆与区域稀有金属成矿有关。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

海南岛古元古代片麻岩和变沉积岩的识别及其地质意义

杜宇晶¹, 周云^{1*}, 冯佐海^{1,2}

1. 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中, 广西 桂林 541004

现今的华南大陆由扬子地块和华夏地块组成, 它们多被认为于新元古代时期沿江南造山带拼贴形成统一的华南大陆。扬子和华夏地块具有明显不同的前寒武纪结晶基底组成, 已有的研究显示, 扬子地块发育有以崆岭群 (也有学者称为“崆岭杂岩”) 为代表的太古代结晶基底, 而华夏地块目前识别的最古老结晶基底为古元古代, 以八都群 (也有学者称为“八都杂岩”) 为典型代表。海南岛位于华南大陆最南缘, 岛内保存有一些特色的地质记录, 如发育~1.4 Ga 的花岗质岩石和变基性岩、大量与古特提斯演化相关的泥盆纪-三叠纪岩浆岩、岛北喷发有大规模新生代玄武岩等。前人对这些地质记录展开了大量的研究, 并取得

了丰富的成果。然而, 由于受到后期构造热事件的强烈改造和较厚的植被覆盖, 对于海南岛是否发育古元古代岩浆活动信息, 目前仍缺少精细的年代学证据。

近年来在海南岛的地质调查过程中, 我们对海南岛抱板群的片麻岩和变沉积岩展开了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究。研究结果显示, 片麻岩的形成时代为 1.8~1.7 Ga, 变沉积岩给出的最小年龄峰值为 ~1.7 Ga, 据此, 推测海南岛可能存在古元古代结晶基底, 记录了 Columbia/Nuna 超大陆的聚合过程, 海南岛抱板群实质为一套混杂岩。这一初步认识为理解海南岛甚至整个华南地区前寒武纪结晶基底的物质组成、形成时代和构造演化历史提供了新的依据。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41502180, 42072259), 广西自然科学基金项目 (2020GXNSFGA297003)

第一作者简介: 杜宇晶 (1996-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物岩石学. E-mail: 1102068901@qq.com

*通信作者简介: 周云 (1988-), 副教授, 博士, 主要从事岩石地球化学研究. E-mail: zhouyun@glut.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

浙东南望州山 A 型火山-侵入杂岩成因: 锆石 U-Pb 年代学、同位素以及岩石地球化学的制约

张志¹, 徐夕生^{1*}, 赵凯¹, 褚平利²

1. 南京大学地球科学与工程学院 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210023;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016

浙东南望州山破火山机构位于中国东南沿海晚中生代火山-侵入杂岩带中部, 其火山-侵入杂岩研究程度较为薄弱。该破火山机构大致呈圆形, 由五个火山岩性段和一个中央侵入体组成。五个火山岩性段岩性分别为流纹质晶屑强熔结凝灰岩、流纹岩、流纹质熔结凝灰岩、双峰式火山岩和自碎流纹岩, 其中第二岩性段流纹岩以发育球粒结构为特点; 第四岩性段以发育基性岩脉、酸性集块与基性集块共存的集块角砾凝灰岩以及流纹岩为特点, 构成双峰式火山岩组合; 第五岩性段火山岩为典型的侵出相自碎流纹岩。中央侵入体主要由等粒碱性花岗岩构成, 含有典型的碱性铁镁矿物(钠铁闪石和霓石)。系统的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究表明, 望州山火山岩的形成年龄跨度为 95 ± 1 Ma 至 89 ± 1 Ma; 碱性花岗岩的形成年龄为 91 ± 1 Ma 至 89 ± 1 Ma, 表明望州山火山岩和侵入岩具有相近的形成年龄, 为晚白垩世早期产物。

望州山酸性火山岩具有变化较大的 SiO_2 (70.9wt%~79.1wt%) 和全碱 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7.70$ wt%~9.34 wt%) 含量、高的 FeO^*/MgO 比值(6.3~48.1)、Ga/Al 比值和 Zr+Nb+Ce+Y 含量。碱性花岗岩具有高的、相对均一的 SiO_2 (76.9wt%~77.9wt%) 和全碱 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7.80$ wt%~8.51wt%) 含量、高的 $\text{FeO}^*/$

MgO 比值(21.3~65.0)、Ga/Al 比值和 Zr+Nb+Ce+Y 含量。酸性火山岩和碱性花岗岩具有富硅、碱, 铁质, 富集 Zr、Nb、Ce、Y、Ga 等高场强元素和 Rb、Th 等大离子亲石元素以及高的锆饱和温度等特征, 都具有 A 型花岗质岩浆的地球化学特征。全岩 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素显示各火山岩性段酸性火山岩与碱性花岗岩的全岩 Nd 和锆石 Hf 组成基本一致($\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-4.8\sim-2.9$; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-7.3\sim-4.1$), 反映它们具有相同的岩浆源区, 主要起源于地壳物质的部分熔融, 受壳幔相互作用的影响, 有少量新生幔源物质的参与。因此, 望州山酸性火山岩和碱性花岗岩构成一套“时、空、源”一致的 A 型火山-侵入杂岩。

望州山酸性火山岩具有 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.11\sim 0.52$), 较高且变化大的 Rb/Sr 和 Zr/Hf 比值($\text{Rb}/\text{Sr}=0.27\sim 23.50$; $\text{Zr}/\text{Hf}=28.8\sim 41.4$), 而碱性花岗岩同样具有明显的 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.15\sim 0.21$), 较高且变化大的 Rb/Sr 和 Zr/Hf 比值($\text{Rb}/\text{Sr}=14.8\sim 144.8$; $\text{Zr}/\text{Hf}=28.0\sim 30.8$)。在锆石微量元素上, 望州山酸性火山岩与碱性花岗岩具有相似的锆石微量元素组成, 但后者具有更高的 Hf 含量以及低的 Ti 含量、Zr/Hf、Eu/Eu* 和 Sm/Yb 比值。因此, 浙东南望州山 A 型酸性火山岩和碱性花岗岩具密切的成因联系, 但成因过程复杂。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41930214)

第一作者简介: 张志(1997-), 博士研究生在读, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: DZ1929009@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 徐夕生(1962-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: xsxu@nju.edu.cn

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

熔体-晶粥体反应导致大陆拉斑-碱性玄武岩的转变

王军^{1*}, 王强¹, 欧权², 但卫¹, 杨阳², 曾纪鹏¹, 陈怡伟¹, 韦刚健¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所;
2. 成都理工大学

大陆和大洋板内环境的碱性玄武岩已经被广泛用来示踪地幔岩性和化学的不均一性,但是幔源岩浆不可避免地受到壳内分异过程的影响,比如通常考虑的富熔体的岩浆房中分离结晶过程。但是最近的研究表明壳内岩浆储库是以富晶体的晶粥体形式存在,其岩浆分异的方式是以渗透的粒间熔体和晶粥体之间的反应为主,而熔体-晶粥体反应导致的主微量演化趋势远远偏离了分离结晶所预测的趋势,因此,我们需要重新评估岩浆储库的演化对板内玄武岩成分多样性的贡献。本次研究通过对青藏高原一套共生的镁铁质堆晶岩和岩墙的矿物学的工作,得出了以下新的认识:中地壳压力下(~5.5 kbar)贫水、氧化物不饱和的拉斑质岩浆通过更热的橄榄石和斜长石构成的晶粥体(50%~60%晶体含量)时,发生了高温(1207~

1060°C)熔体-晶粥体反应,该反应涉及橄榄石、斜长石和单斜辉石的溶解和再沉淀。晚期结晶的高钛辉石和钛闪石表明初始的拉斑质岩浆已经转变为了碱性镁铁质岩浆。相比之下,相同的拉斑质岩浆沿着断裂侵入到冷的沉积岩中,发生了铁钛氧化物和钠质斜长石的结晶,最后形成了富硅的残余熔体。通过熔体-晶粥体反应生成的碱性镁铁质岩浆具有比初始拉斑质岩浆更富集的不相容元素含量(如 REE 和 Ti)和比值(如 Ce/Y),但具有相似的镁含量,这种演化趋势不能通过简单的分离结晶来实现。因此,我们认为壳内岩浆储库中的拉斑质熔体-晶粥体反应是一个形成大陆碱性玄武岩的新机制,也就是说大陆拉斑-碱性玄武岩的转变可能不是地幔源区不均一性或熔融过程导致的。

*Email: wangjuncug@qq.com

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

阳山金矿含矿岩脉与不含矿岩脉特征对比分析

李小宇, 梁金龙*

成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

甘肃省文县阳山金矿位于川陕甘交界地带, 在大地构造位置上处于扬子板块以北、中朝板块以南、松藩-甘孜褶皱系以东的三角区内, 属西秦岭南亚带(秦艳, 2009)。阳山超大型金矿床是中国乃至亚洲发现的首个金资源量超过 300t 的矿床, 该矿床的形成与矿区花岗岩脉关系密切(刘远华, 2010)。区内普遍发育一些细小岩脉, 呈零星分布且较广泛, 无大规模岩体出露。该矿床构造-岩浆活动非常发育, 与之相关的金成矿作用出现复杂的叠加与复合, 形成复杂的矿床成因类型。矿区内岩脉可分为两种不同类型, 一种为富矿岩脉, 呈墨绿色-灰白色具蚀变残余斑状结构, 斑晶主要由斜长石组成, 基质主要由微晶石英与云母组成。蚀变作用较强烈, 发育碳酸盐化和硅化, 其次有绢云母化、高岭土化、褐铁矿化等(肖倩茹, 2018)。 $\omega(\text{SiO}_2)$

为 71.15%~76.85%, 平均为 72.89%; $\sum\text{REE}$ 为 51.13~86.33 $\times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 5.95~14.4, 岩脉呈酸性分馏程度较高的特征。另一种为贫矿岩脉, 呈粉红色具蚀变残余斑状结构, 斑晶主要为斜长石、石英, 基质为绢云母、文象长石等。蚀变作用明显, 主要发育绢云母化与硅化等。 $\omega(\text{SiO}_2)$ 为 69.41%~74.36%, 平均为 71.31%; $\sum\text{REE}$ 为 55.80~93.08 $\times 10^{-6}$; LREE/HREE=7.01~18.05。稀土配分模式表现为轻稀土元素强烈富集的右倾模式, 基本无明显的 Ce 异常和明显的铕负异常。稀土元素蛛网特征分析普遍显示出 Nb、Ta、P、Ti 的亏损, 暗示岩浆重熔中有岩浆成因的岩石加入(刘虎, 2013)。结合刘红杰等(2008)的研究成果, 反映了岩浆温度较高, 起源较深, 源区物质具有壳源的性质, 形成于碰撞造山环境加厚地壳的部分熔融作用。

表 1 阳山金矿主量元素 (%) 含量

样品编号	金品位分析	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	K	La	Ce	Pr	Sr	P
AB-YM-1	0.010	142.5	763	4.11	2.54	5.7	0.52	2.77	13.2	25.1	2.78	117.0	350
AB-YM-7	0.042	173.0	264	6.71	3.43	9.4	1.14	2.77	11.0	22.1	2.45	103.5	280
2020Ysh-AB-305	2.15	98.5	425	6.99	3.56	6.9	0.8	1.74	17.7	34.8	3.95	55.7	410
T4CM19N2-2-11	5.43	178.5	284	6.29	5.83	10.1	1.18	2.39	9.6	19.4	2.29	63.7	310
XG-YM-1	0.006	97.6	162.0	3.19	1.82	4.3	0.44	2.15	12.4	25.4	2.99	375	390
GTW-YM-1	0.090	181.5	612	8.28	3.56	7.0	0.72	2.79	19.5	39.4	4.34	115.5	370
GTW-YM-5	0.206(含毒砂)	178.5	318	7.99	4.37	8.1	1.08	2.98	20.0	38.5	4.38	108.0	390
GTW-YM-6	0.005	134.0	633	7.24	2.87	5.8	0.54	2.72	17.9	34.0	3.81	151.0	340
GTW-YM-8	0.102	153.5	436	7.46	3.94	7.6	0.78	2.67	18.7	36.8	3.94	205	310

第一作者简介: 李小宇 (1999-), 硕士, 研究方向: 矿物学、矿床学、岩石学研究. E-mail: 1178966174@qq.com

*通信作者简介: 梁金龙, 博士, 教授, Email: richardlj104@aliyun.com

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

浙东半山富晶体凝灰岩的岩浆系统演化

颜丽丽^{1,2*}, 贺振宇³

1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;
2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
3. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083

酸性岩浆活动对大陆地壳的形成、分异和再造具有重要意义, 阐明酸性岩浆系统及其演化过程, 是当前岩浆作用研究的前沿科学问题。晶体含量是硅质火山岩的重要特征之一, 是穿地壳岩浆系统的演化过程的直接反映。中国东南沿海地区白垩纪巨量火山喷发形成了大规模酸性火山-侵入杂岩带。富晶体火山岩(晶体含量 30–50 vol%) 是其中的一个重要和特征的火山作用产物类型, 一般位于火山构造的中心部位, 呈穹窿状产出, 厚度可达 1000 m, 岩性均一, 为英安质或流纹质, 斑晶发育特征的再生珠边结构和熔蚀结构, 以往的区域地质研究上一般描述为“碎斑熔岩”, 记录了岩浆存储状态和晶粥再活化过程的重要信息。

本文研究的富晶体流纹质凝灰岩位于浙东半山火山穹窿, 出露面积大约 260 km², 岩性单一, 以发育粗大的石英和长石晶屑为野外识别特征。并且局部发育含石榴石富晶体流纹质凝灰岩。含石榴石富晶体流纹质凝灰岩中石榴石以富锰(MnO = 30.48–35.82 wt%) 为特征, 粒径约 0.2–0.8 mm, 普遍被熔蚀, 并与石英和少量黑云母共生, 一同被碱性长石包裹, 未见单独出现的石榴石颗粒。系统的 SIMS 和 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年代学研究揭示了富晶体凝灰岩形成于中国东南部白垩纪下岩系火山活动的晚期(~114–112 Ma)。

富晶体流纹质凝灰岩具有富集的锆石 Hf 同位

素组成[$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -10.9 - -4.2$, $T_{\text{DMC}} = 2.18 - 1.68 \text{ Ga}$], 表明它们的岩浆由幔源岩浆与东华夏地块古元古代地壳来源岩浆混合形成。此外, 他们还具有低于地幔值的锆石 O 同位素组成($\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = 4.39 - 5.36\%$), 我们认为这反映了火山喷发之后, 破火山的塌陷引发了高温水岩反应, 形成了具有低氧同位素特征的围岩, 火山岩浆受到了经历高温热液蚀变的围岩的混染。富锰石榴石、钾长石、石英等晶体粗大并普遍被熔蚀, 以及钾长石和斜长石的环带及不平衡的结构等岩相学特征, 暗示了形成富晶体凝灰岩的岩浆曾达到接近固结的高结晶程度(晶体含量 >90%)。石榴石晶体以富 Mn 为特征, 石榴石高的 MnO 含量, 以及稀土配分曲线类似于伟晶岩中的石榴石, 表明石榴石是岩浆分异演化晚期在相对低温低压和富流体的条件下结晶形成的。之后由于补给岩浆带来的热量和挥发分扰动导致晶粥的重熔作用, 以及晶体与熔体的混合, 形成可喷发的富晶体流纹质火山岩岩浆。富晶体火山岩在下岩系广泛发育, 而在上岩系较少发育, 反映了下岩系火山岩的岩浆中挥发分含量较高, 形成于古太平洋俯冲作用的地球动力学背景。该研究首次报道了中国沿海地区白垩纪含石榴石流纹质火山岩, 在中国东南沿海白垩纪大规模流纹质火山岩浆活动过程和规律等研究方面取得了新的进展, 同时也为深化中国东南部白垩纪构造演化过程研究提供了新的证据。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

岩浆-热液进程中锆石 Hf 同位素行为： 以华南侏罗纪雅山岩体为例

王艳¹, 高彭^{1*}, 孙国超², 张健¹, 尹常青¹, 钱加慧¹

1. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室 中山大学地球科学与工程学院, 广州 510275;

2. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026

锆石是花岗岩中常见的副矿物。锆石 Hf 同位素组成被广泛用于陆壳演化和花岗岩岩石成因研究。然而, 前人的研究发现, 在与流体相互作用过程中, 锆石的物理结构和化学组成(如主微量元素、U-Pb 同位素、O 同位素)都会受到影响, 而锆石 Hf 同位素是否也会受到流体的影响, 目前尚不清楚。针对这一问题, 我们对江西宜春雅山花岗岩岩体中的锆石进行了主微量元素、U-Pb 和 Lu-Hf 同位素分析。根据锆石的显微结构和主微量元素组成, 将锆石分为岩浆锆石、蚀变锆石和热液锆石三种类型。岩浆锆石在 CL 图像上具有典型的振荡环带特征, 其主量元素含量高(SiO₂ 含量为 32.5 wt.%, ZrO₂ 含量为 61.6 wt.%), 显示从 La 到 Lu 急剧递增的稀土配分模式, 同时具有显著的 Ce 正异常。蚀变锆石在 BSE 图像中显示向内穿透的不规则暗区, 并含有较多缝隙, 其轻稀土含量较高, Ce 正异常弱, 暗示受到流体影响。热液锆石可根据其次生结构分为四种结构域: 热液结晶结构域、含大量包裹体的多孔结构域、不规则暗区结构域、以及同时含大量孔隙和不规则暗区的结构域。结果表明, 热液锆石 U-Pb 年龄受

到扰动, 并且具有相对岩浆锆石更低的主量元素含量和更高的微量元素含量, 它们由直接从流体中结晶、溶解-再沉淀耦合机制和扩散-反应机制所形成。结果显示, 岩浆锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围很大(以 150 Ma 计算), 为-10.5 至 -1.9 (均值为-7.2), 第一和第三四分位值(Q1 和 Q3)分别为-8.1 和-6.5。这类锆石 Hf 同位素组成的变化可能与不均一源区来源的不同批次岩浆脉冲式侵位有关。蚀变锆石具有相对低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 为-11.7 至 -1.5 (均值为-8.1), Q1 和 Q3 值分别为-9 和-7.1。这类锆石的 Hf 同位素组成受到来自岩浆储库其他部位来源的、具有低 Hf 同位素比值的热液流体的影响。不同花岗岩样品中热液锆石的 Hf 同位素组成也不均一, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为-9.4 至-3.7 和-12.2 至 1.34, 表明即使岩浆演化晚期出溶的流体富含 F, 使得 Hf 的迁移能力增强, 但形成的锆石 Hf 同位素组成也并没有如前人所认为的那样会发生均一化。我们认为, 流体的规模、流体循环的尺度和时间、锆石的初始 Hf 同位素组成以及络合剂的种类或含量都对岩浆演化晚期 Hf 同位素的行为有重要影响。

基金项目: 国家自然科学基金(41973025, 92155306, 42025204)

第一作者简介: 王艳, 硕士研究生, 研究方向: 花岗岩地球化学. E-mail: wangy2275@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者简介: 高彭, 副教授, 研究方向: 花岗岩地球化学. E-mail: gaop8@mail.sysu.edu.cn

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

花岗岩可否分离结晶，有堆晶花岗岩吗？

张旗

中国科学院地质与地球物理研究所，北京 100029

花岗岩能否分离结晶？世界上有没有堆晶花岗岩？这是学术界长期争论的问题。最近有一些迹象显示，上述争论的焦点不在国际学术界，而转移到中国了，中国成了国际花岗岩研究的焦点，这是笔者想不到的。国际学术界一直坚持花岗岩能够分离结晶，笔者一直持反对意见。最近，关于堆晶花岗岩的说法突然盛行起来，这个说法是新鲜的，前沿的？还是陈旧的，没落的？什么是堆晶岩？堆晶与堆积是一回事吗？斜长石是堆晶矿物吗？这些问题都是需要认真讨论的。众所周知，玄武岩有堆晶岩，花岗岩则主要呈晶粥状态出现，这是两种岩浆粘性不同的表现。花岗岩由于粘性大，晶出的矿物不能下沉，故与其晶出的岩浆一起构成类似粥状的面貌，故称为“晶粥”。

玄武岩粘性低，晶出的矿物可以下沉离开其结晶

的部位在岩浆房底部堆积形成堆晶岩，故玄武岩不形成晶粥。花岗岩形成晶粥后，由于冷却、固结而不可能再次升温熔融造成“晶”与“粥”分离的可能。因此，关于上有高分异花岗岩（或流纹岩），下有堆晶的花岗岩的说法是不可能成立的。堆晶岩，堆晶结构等，统统是外国人创造的。毋庸置疑，外国人对花岗岩研究有很大的贡献，现今花岗岩理论的成果基本上都是外国人提出来的，没有中国人什么贡献，我们只是在学习、仿效和跟踪。但是，花岗岩研究中也许多错误的理论、模型、假说，毫无疑问也是外国人的问题。面对上述情况，我们只有一个办法：独立思考。学习外国是必须的，但是，要批判地学，要仔细地鉴别，取其精华，去其糟粕。这样，我们才能更快地进步，才能不至于跟着外国人犯错误。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

藏南喜马拉雅造山带错那洞地区淡色花岗岩的年代学与地球化学

熊知秋, 赵志丹*, 石卿尚, 刘栋

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

藏南错那洞地区位于特提斯喜马拉雅和高喜马拉雅分界线以北, 临近藏南拆离系(STDS)。错那洞穹隆记录了早期近 S-N 向伸展变形和晚期近 E-W 向伸展变形两期韧性伸展变形, 淡色花岗岩多出露于穹隆核部(付建刚, 2018, 地球科学), 黄春梅等(2018, 地学前缘)对错那洞穹隆研究表明这是一个具有多期次岩浆作用的中新世复式岩体。本研究对错那洞穹隆淡色花岗岩进行了岩相学、锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年代学和微量元素、岩石主、微量元素和矿物化学研究, 试图进一步揭示错那洞淡色花岗岩的形成时代和岩石成因。

错那洞淡色花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $18.68 \pm 0.13 \text{Ma}$, 属于中新世。锆石多具有较高 U 和 Th 值, 普遍出现蜕晶化现象, 也可能代表了热液对淡色花岗岩中锆石的改造。锆石 Th-Pb 图、 $(\text{Nd}/\text{Pb})_N$ -Eu/Eu* 图投点均落入 S 型花岗岩区域, 锆石稀土元素图呈现 Eu 和 Pr 负异常, 也符合 S 型花岗岩特征(Wang, 2011, Lithos), 含石榴石花岗岩中锆石微量出现“石榴石现象”, 代表了所含石榴石为最新一期岩浆活动同期形成。错那洞二云母花岗岩和含石

榴石花岗岩均富 SiO_2 (73.02%~74.99%)、富 Al_2O_3 (14.88%~15.36%)、富 K_2O (3.8%~5.38%)、铝饱和指数(A/CNK)为 1.1~1.2, 属高钾钙碱性系列的强过铝质花岗岩。两类淡色花岗岩均富集 Rb、Pb、U 等大离子亲石元素、亏损 Nb、Ti、Zr 等高场强元素, 富集轻稀土元素、亏损 Ba 和重稀土元素 Y, 具有 Eu 和 Nd 负异常, 轻重稀土元素存在分异(LREE/HREE = 1.1~4.7)。二云母花岗岩轻重稀土元素分异更加明显($(\text{La}/\text{Yb})_N = 12.7\text{-}23.7$), 而含石榴石花岗岩具更显著的 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.24\text{-}0.27$)。二云母花岗岩具有高 Rb/Sr 值(4.6~5.8)和较低的 TiO_2 含量(0.06~0.08%), 表明它可能是由泥质变质岩中的白云母脱水熔融形成; 含石榴石花岗岩具有较高的 Rb/Sr 值(18.6~24.6), 岩石含有较多的钠长石、钾长石和石英, 石榴石为无环带结构的锰铁榴石, 亦多见于岩浆分异程度高的岩石中, 因此该类岩石可能是通过母岩浆高度分异演化形成的。错那洞两类淡色花岗岩的时空分布与藏南拆离系(STDS)密切相关, 可能与 STDS 构造运动造成减压作用造成的, 这也为错那洞地区的构造活动在 18Ma 为以伸展运动为主提供了证据。

基金项目: 国家自然科学基金(42073035)

第一作者简介: 熊知秋(1996-), 女, 博士研究生, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: 798348390@qq.com

*通信作者简介: 赵志丹(1968-), 男, 博士, 教授, 岩石学和地球化学专业. E-mail: zdzhao@cugb.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

单斜辉石的晶体生长机制

周金胜¹, 王强¹, 邢长明², 马林¹, 郝露露¹

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. 中国科学院广州地球化学研究所 矿物与成矿重点实验室, 广州 510640

矿物晶体的生长类似于树木年轮, 即从核部向边部逐层生长, 这是矿物学、岩石学和矿床研究的基础理论。然而, 在某些条件下, 矿物并非呈现树木年轮式生长, 而是首先生长出树枝状的格架, 然后按照不同的结晶方向回填成熟, 最终形成自形的晶体。在该情况下, 矿物的核部有可能比边部晚形成。这对传统的晶体生长模型以及在岩石学、矿床学中的应用研究造成了冲击。因此, 查明矿物在天然岩浆系统中, 在何种条件下以何种方式生长, 至关重要。针对这一科学问题, 我们对青藏高原南部赛利普钾质超钾质火山岩中的单斜辉石, 进行了系统的研究。首先在晶体模型的基础上, 通过详细的结构研究, 限定了矿物的结晶学方向和生长规律, 包括沿着 c 轴的沙漏扇 $\{-111\}$ 和平行于 c 轴的棱柱扇 $\{100\}$ 、 $\{110\}$ 和 $\{010\}$ 扇, 即 $\{hk0\}$ 扇。然后对不同结构的晶体和晶体中不同结晶方向进行了系统的定量分析以及元素面扫描, 查明了

晶体结构和结晶方向对元素分布的控制规律, 相对于 $\{hk0\}$ 扇, 大部分的 $\{-111\}$ 扇是富集 Si、Mg 但亏损 Ti、Al、Na 和 Cr, 但也同时存在富含 Al 的 $\{-111\}$ 扇。大部分的 $\{-111\}$ 扇具有更低的结晶温度、压力和水含量, 但也存在反向规律的晶体。

基于以上分析, 并结合实验岩石学资料, 我们提出一种新的综合的辉石晶体生长模型, 即: 岩浆中单斜辉石的生长过程取决于过冷度, 在非常低的过冷度下, 也就是近液相线条件, 矿物呈现传统的树木年轮式生长, 不同晶面成分相似; 低过冷度下, 单斜辉石所有晶面同步生长, 但不同晶面会呈现成分差异, 形成近平衡的富 Si-Mg 的 $\{-111\}$ 扇和不平衡的富 Al-Ti 的 $\{hk0\}$ 扇; 在高过冷度下, 单斜辉石首先形成树枝状的格架, 再快速回填形成近平衡的漏斗状 $\{hk0\}$ 扇, 漏斗状晶体港湾中, 由于存在富 Al 的扩散边界层, 因而最终通过回填形成不平衡的富 Al 的 $\{-111\}$ 扇。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

水在硅酸盐熔体中扩散机制的第一性原理研究

王辉辉¹, 李云国^{1,*}, 郭璇¹, 张力¹, 倪怀玮^{1,*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

水是岩浆中最主要和最重要的挥发分, 以 H_2O 分子和 OH 两种稳定形式存在。水在硅酸盐熔体中的扩散是控制岩浆去气和爆发式火山喷发的关键过程。基于硅酸盐熔体中水扩散系数变化规律的实验数据, 一般认为 H_2O 分子扩散对于熔体中的水扩散起主导作用。然而, 这种基于宏观性质变化规律的认识属于间接推断。由于硅酸盐熔体中的水扩散伴随着水种型的动态转化, 传统的模拟计算方法也难以明确解析扩散机制。我们借助新的受限分子动力学方法, 开展基

于第一性原理的计算模拟, 在 3000 - 5000 K 温度下实现了对硅酸盐熔体中水扩散种型的全面分析, 获得了水各扩散种型的比例和本征扩散系数随温度和水含量的变化关系, 解析了 H_2O 分子、 OH 和跳跃质子三种扩散机制的贡献。我们发现, 跳跃质子始终主导水的扩散, 而且在越低的温度下对于水扩散的贡献越高。我们对水在硅酸盐熔体中的扩散机制提出了新的认识, 这也为理解水对熔体黏度和电导率等其他输运性质的效应提供了新的视角。

基金项目: 超临界地质流体的性质和效应(2018YFA0702700)

第一作者简介: 王辉辉 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 计算矿物学与地球化学. E-mail: redward@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 李云国 (1985-), 研究员, 研究方向: 计算矿物学与地球化学. E-mail: liyunguo@ustc.edu.cn;

倪怀玮 (1981-), 教授, 研究方向: 高温高压岩石学. E-mail: hwni@ustc.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

壳内岩浆储库演化过程与火成岩多样性的成因： 以东昆仑三叠纪镁铁质-长英质岩体为例

熊富浩^{1,2*}, 马昌前³, 侯明才²

1. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059;

2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059;

3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

探究火成岩多样性的成因机制是认识地壳生长演化与壳幔相互作用等深部动力过程的关键内容。本研究以岩石类型丰富的东昆仑白日其利镁铁质-长英质岩体为研究对象, 通过野外地质学、年代学、矿物学、全岩元素地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素等综合研究, 探讨晶粥状态下壳内岩浆储库演化过程与火成岩岩石学和地球化学多样性的耦合关系。白日其利岩体由长英质岩类(二长花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩和石英闪长岩)和镁铁质岩类(斜长岩、橄榄辉长岩、苏长岩和角闪辉长岩)组成, 且花岗岩类不同程度发育暗色微粒包体。长英质岩类、镁铁质岩类和包体具有相似的结晶年龄, 均集中在 250Ma 左右。岩石成因分析揭示, 镁铁质岩浆起源于受俯冲流体改造的地幔楔混合物熔融(俯冲沉积物+MORB 型地幔), 而长英质岩浆则起源于中元古代下地壳变质杂砂岩类的部分熔融。矿物温压计研究表明, 镁铁质岩浆房主要储存于 16-22km 的中下地壳尺度, 并首先发生了橄榄石+斜长石+单斜辉石的堆晶作用, 于岩浆储库底部形成了堆晶成因的斜长岩、橄榄辉长岩和苏长岩(Mg# = 69 ~ 79、 Σ REE = 1.85 ~ 18.46 ppm,

δ Eu = 1.24 ~ 5.33)。随后, 发生斜方辉石和角闪石等矿物的分离结晶, 形成了演化的镁铁质熔体, 即非堆晶成因角闪辉长岩的母岩浆(Mg# = 48~68、 Σ REE = 26.16 ~ 178.99 ppm, δ Eu 均值位 0.91)。镁铁质岩浆储库的角闪石分离结晶显著控制了同源岩浆的 Nb/Ta 分异, 暗示流体的富集可能是影响 Nb/Ta 储库分异的重要机制。不平衡矿物结构和突变的矿物成分则表明壳幔岩浆混合作用对长英质岩成因的重要控制作用。岩浆过程分析表明, 伴随着演化的镁铁质熔体的上升侵位, 13-16km 深度的壳源长英质岩浆储库发生晶粥活化, 导致熔体聚集与上移, 并在长英质岩浆储库上部的贫晶体部位发生显著的壳幔混合作用。壳-幔岩浆端元以不同比例和不同方式发生机械和化学混合等相互作用, 从而形成包体、石英闪长岩、英云闪长岩和花岗闪长岩等多种岩石类型。本研究揭示, 玄武质岩浆储库的镁铁质矿物堆晶与分离结晶、玄武质岩浆底侵与长英质晶粥岩浆储库的活化、再循环晶的机械混合及壳-幔岩浆的化学混合作用是控制东昆仑镁铁质-长英质火成岩多样性和大陆地壳生长演化的重要方式。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

岩浆-热液进程中锆石 Hf 同位素行为： 以华南侏罗纪雅山岩体为例

王艳¹, 高彭^{1*}, 孙国超², 张健¹, 尹常青¹, 钱加慧¹

1. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室 中山大学地球科学与工程学院, 广州 510275;

2. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026

锆石是花岗岩中常见的副矿物。锆石 Hf 同位素组成被广泛用于陆壳演化和花岗岩岩石成因研究。然而, 前人的研究发现, 在与流体相互作用过程中, 锆石的物理结构和化学组成(如主微量元素、U-Pb 同位素、O 同位素)都会受到影响, 而锆石 Hf 同位素是否也会受到流体的影响, 目前尚不清楚。针对这一问题, 我们对江西宜春雅山花岗岩岩体中的锆石进行了主微量元素、U-Pb 和 Lu-Hf 同位素分析。根据锆石的显微结构和主微量元素组成, 将锆石分为岩浆锆石、蚀变锆石和热液锆石三种类型。岩浆锆石在 CL 图像上具有典型的振荡环带特征, 其主量元素含量高(SiO₂ 含量为 32.5 wt.%, ZrO₂ 含量为 61.6 wt.%), 显示从 La 到 Lu 急剧递增的稀土配分模式, 同时具有显著的 Ce 正异常。蚀变锆石在 BSE 图像中显示向内穿透的不规则暗区, 并含有较多缝隙, 其轻稀土含量较高, Ce 正异常弱, 暗示受到流体影响。热液锆石可根据其次生结构分为四种结构域: 热液结晶结构域、含大量包裹体的多孔结构域、不规则暗区结构域、以及同时含大量孔隙和不规则暗区的结构域。结果表明, 热液锆石 U-Pb 年龄受

到扰动, 并且具有相对岩浆锆石更低的主量元素含量和更高的微量元素含量, 它们由直接从流体中结晶、溶解-再沉淀耦合机制和扩散-反应机制所形成。结果显示, 岩浆锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围很大(以 150 Ma 计算), 为-10.5 至-1.9 (均值为-7.2), 第一和第三四分位值(Q1 和 Q3)分别为-8.1 和-6.5。这类锆石 Hf 同位素组成的变化可能与不均一源区来源的不同批次岩浆脉冲式侵位有关。蚀变锆石具有相对低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 为-11.7 至-1.5 (均值为-8.1), Q1 和 Q3 值分别为-9 和-7.1。这类锆石的 Hf 同位素组成受到来自岩浆储库其他部位来源的、具有低 Hf 同位素比值的热液流体的影响。不同花岗岩样品中热液锆石的 Hf 同位素组成也不均一, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为-9.4 至-3.7 和-12.2 至 1.34, 表明即使岩浆演化晚期出溶的流体富含 F, 使得 Hf 的迁移能力增强, 但形成的锆石 Hf 同位素组成也并没有如前人认为的那样会发生均一化。我们认为, 流体的规模、流体循环的尺度和时间、锆石的初始 Hf 同位素组成以及络合剂的种类或含量都对岩浆演化晚期 Hf 同位素的行为有重要影响。

基金项目: 国家自然科学基金(41973025, 92155306, 42025204)

第一作者简介: 王艳, 硕士研究生, 研究方向: 花岗岩地球化学. E-mail: wangy2275@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者简介: 高彭, 副教授, 研究方向: 花岗岩地球化学. E-mail: gaop8@mail.sysu.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

安徽铜陵白芒山辉石闪长岩岩浆起源和演化

金林森, 徐晓春*, 余文, 夏彩莲, 谢巧勤

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230001)

安徽铜陵矿集区是长江中下游成矿带的重要组成部分, 区内中生代岩浆作用强烈, 形成的侵入岩广泛出露。近些年来, 高精度同位素地质年代学研究准确厘定了其成岩时代为晚中生代早白垩世, 而对于其岩浆起源、深部过程等岩石成因问题, 虽然研究众多, 但仍存在争议。尤其是, 对于区内发育的辉石闪长岩而言, 以往的研究或在区域上归入长江中下游成矿带, 或从岩性上归为中酸性侵入岩类, 明显不足或不妥。本文以区内白芒山辉石闪长岩为研究对象, 着重开展锆石晶体特征及同位素地球化学研究, 旨在探讨其岩浆起源和演化。

白芒山辉石闪长岩中的新生锆石具有较为特殊的晶体特征, 即绝大多数呈现熔蚀港湾状。这种特征暗示锆石自岩浆中晶出后曾发生了强烈的熔蚀作用, 这表明岩浆演化过程中曾有大量高温、基性岩浆的注入或混合到早期已经发生锆石结晶的酸性或中酸性岩浆中, 由于温度升高以及岩浆熔体由硅酸饱和状态转化为不饱和状态, 已晶出的锆石发生熔蚀且不再继续结晶。

白芒山辉石闪长岩中的锆石普遍发育继承锆石核, 其 U-Pb 年龄介于 800Ma~1000Ma 之间, 与江南造山带新元古代岩浆岩锆石基本一致, 指示新元古

代新生地壳物质是其岩浆的重要物质来源。白芒山辉石闪长岩中锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -9.9~-3.3 之间, 平均为 -6.4; $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 8.26~10.36‰ 之间, 平均为 9.42‰。锆石 Hf-O 同位素组成也与邻区江南造山带新元古代岩浆岩基本一致, 同样指示新元古代岩浆岩是重要的岩浆源区物质。

白芒山辉石闪长岩岩浆源区中的这种高 $\delta^{18}\text{O}$ 值的组分可能是经受低温热液蚀变作用的俯冲洋壳上层玄武岩和沉积物。但是深海沉积物中通常含有大量不同时代的古老碎屑锆石, 它的加入会导致全岩两阶段 Nd 模式年龄和锆石两阶段 Hf 模式年龄解耦, 而白芒山辉石闪长岩全岩两阶段 Nd 模式年龄为 1522Ma~1627Ma, 锆石两阶段 Hf 模式年龄为 1398Ma~1811Ma, 并未出现明显的解耦现象, 因此深海沉积物不是该岩浆的主要物质来源。由此推断, 白芒山辉石闪长岩异常高的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值继承自俯冲板片上层受低温热液蚀变作用的玄武岩, 初始岩浆主要由蚀变洋壳玄武岩熔融形成, 可能含少量俯冲沉积物。这部分物质以新元古代俯冲板块残片的形式残留在岩石圈地幔中, 并在中生代古太平洋板块俯冲的动力学机制下活化形成酸性或中酸性初始岩浆, 而后与中生代幔源基性岩浆混合, 再侵位、结晶形成中基性辉石闪长岩。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (编号: 42030801)

第一作者简介: 金林森 (1998-), 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: 1287881919@qq.com

*通讯作者简介: 徐晓春 (1961-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, 主要从事岩浆岩岩石学和矿床学教学和研究. E-mail: xuxiaochun@sina.com

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

磷灰石微区地球化学对碱性火山-侵入杂岩成因的制约

周宝全^{1,2}, 杨进辉^{1,2*}, 孙金凤², 王浩¹, 朱昱升¹, 吴亚东¹, 许蕾¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

花岗岩是大陆地壳最重要的组成部分, A 型花岗岩作为一类重要的花岗岩, 具有伸展构造和稀有金属成矿指示意义。自 A 型花岗岩提出以来, 其特征和成因等研究已取得重要进展。A 型花岗岩通常与碱性火山岩共生形成一系列火山-侵入杂岩体, 是揭示火山-侵入岩共生的成因机制和浅部岩浆房形成与演化的窗口。本文对华北克拉通东北部燕山地区的后石湖山环状碱性火山-侵入杂岩体进行了详细的磷灰石微区地球化学和 Sr-Nd 同位素研究, 以揭示 A 型花岗岩与火山岩的成因联系。

后石湖山岩体是华北东部典型的早白垩世 (120Ma) 火山-侵入杂岩体, 岩石类型包括粗面岩、正长岩、碱性角闪石花岗岩和碱流岩。粗面岩中的磷灰石呈自形-半自形, 主要包裹于长石斑晶内, 其较高的 Sr 含量和轻、重稀土比值以及弱 Eu 负异常表明它们结晶于岩浆演化早期, 可揭示粗面岩岩石圈地幔源区的同位素组成, 即 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7048 ~ 0.7052) 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-21.9 ~ -17.6), 明显区别于全岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7114$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -18.6$)。正长岩中的磷灰石呈自形-半自形, 包裹于钾长石、碱性角闪石内或与一些铁钛

氧化物共生, 形成于岩浆演化的早期和晚期。其不均匀的地球化学特征, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.7084 ~ 0.7175) 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-16.0 ~ -12.7) 及其与全岩 Sr 同位素的差异表明正长岩是两种不同的岩浆逐渐混合、分离结晶和之后的晶体堆积形成。碱性角闪石花岗岩中的磷灰石呈自形-半自形, 其极低的 Sr、Ba 含量和强烈的 Eu 负异常表明钾长石分离结晶。碱流岩中的它形磷灰石发育熔蚀结构, 其极低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-31.3 ~ -27.9) 明显区别于全岩 (-12.2), 因此, 我们认为这些磷灰石是从围岩中捕获的。

结合全岩地球化学, 磷灰石的微区地球化学和 Sr-Nd 同位素组成, 我们提出后石湖山环状碱性火山-侵入杂岩体的成因模型: 浅部岩浆房内, 底侵的镁铁质岩浆和长英质岩浆混合, 发生分离结晶, 晶体堆积在岩浆房边部形成正长岩, 而富硅熔体在核部侵位形成碱性角闪石花岗岩。侵入岩被快速抬升剥蚀至地表, 同时, 高温幔源岩浆的注入促进了岩浆房内残余富硅熔体的抽离。这些幔源岩浆和残余熔体直接喷发至地表, 在过渡带分别形成粗面岩和碱流岩, 形成环状杂岩。

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42288201)

第一作者简介: 周宝全 (1996-), 博士生, 研究方向: 岩石学. E-mail: zhoubaoquan19@mail.iggcas.ac.cn

*通讯作者简介: 杨进辉 (1971-), 研究员, 研究方向: 岩石学与地球化学. E-mail: jinhui@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

安徽铜陵矿集区中生代中酸性侵入岩成因： 来自锆石和磷灰石地球化学证据

余文，徐晓春*，金林森，夏彩莲，谢巧勤

合肥工业大学资源与环境工程学院，安徽 合肥 230001

安徽铜陵矿集区广泛发育中生代中酸性侵入岩，且其与区内铜金多金属成矿关系密切。关于其成因已有大量研究成果发表，但仍存在极大争议。本文选择区内铜官山和冬瓜山石英闪长岩体以及凤凰山和胡村花岗闪长岩体为研究对象，在主微量元素和全岩 Sr-Nd 同位素研究基础上开展锆石 Hf-O 同位素以及磷灰石主微量元素地球化学研究，以进一步探讨其成因机制。

铜陵矿集区中酸性侵入岩主微量元素、稀土元素和同位素组成特征基本一致，反映其成因具有一致性。岩石属高钾钙碱性岩石系列，具有岛弧型岩浆岩的微量元素和稀土元素组成和富集的 Sr-Nd 同位素组成，岩石常发育镁铁质微粒包体 (MME) 以及斜长石和角闪石反环带结构，这些特征均指示其岩浆来源于壳源岩浆与幔源岩浆的混合。

铜陵矿集区中酸性侵入岩富集 LILE 和强亏损 Nb-Ta 指示其原始岩浆来自于富集岩石圈地幔，磷灰石较高的卤族元素 Cl 含量 (平均为 0.3wt%) 以及较高的 Cl/F 比值指示其寄主岩浆来自于受俯冲板片析出流体/熔体交代的含水富集地幔源区。锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -20.5 ~ -5.1 之间，两阶段 Hf 模式年龄与江南造山带新元古代花岗岩锆石两阶段 Hf 模式年龄相似；锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 5.93‰ ~ 8.85‰ 之间，部分较高的

$\delta^{18}\text{O}$ 值接近江南造山带新元古代花岗岩锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (8.4‰~12.0‰)，指示新元古代新生地壳在岩浆形成及演化过程中扮演了重要角色。铜陵矿集区中酸性侵入岩锆石发育较多的继承锆石核，其 U-Pb 年龄分别集中于 1.0~0.8Ga 和 2.4~2.0Ga，进一步指示有新元古代新生地壳物质以及更古老 (古元古代) 的地壳物质的贡献。

作者对前人不同岩石成因观点进行了深入分析和讨论，进而结合区域构造演化提出了自己的认识，新元古代早期 (1000~860 Ma)，华夏洋向扬子地块之下俯冲，不仅形成了受沉积物部分熔融和俯冲洋壳脱水产生的熔/流体交代的含水富集地幔，还形成同时期新元古代新生弧地壳。晚侏罗世-早白垩世 (165±5~145 Ma)，古太平洋板块西俯冲和西北俯冲产生弧后伸展环境，使得长江中下游地区岩石圈地幔发生拉张/拆沉减薄，软流圈地幔上涌加热诱发富沃的岩石圈地幔发生部分熔融，其含水玄武岩浆经历一定演化过程形成了偏基性岩石端元，岩石圈地幔岩浆上涌和加热和加厚岩石圈减压熔融的双重机制，使得新元古代新生弧地壳发生熔融，壳源岩浆和玄武质幔源岩浆发生岩浆混合作用，在上升过程中可能混入了少量的古元古代地壳物质，最终形成了铜陵矿集区中酸性侵入岩。

基金项目：国家自然科学基金重点项目 (编号：42030801)

第一作者简介：余文 (1996-)，硕士研究生，矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: 976311857@qq.com

*通讯作者简介：徐晓春 (1961-)，教授，博士生导师，主要从事岩浆岩岩石学和矿床学教学和研究. E-mail: xuxiaochun@sina.com

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

浙东小雄火山-侵入杂岩岩浆演化的地球化学示踪

王学颖 徐夕生

南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210023

中国东南部小雄破火山口在晚白垩世经历了三阶段岩浆活动并形成大量火成岩。为认识小雄破火山杂岩的岩浆演化过程, 我们对代表性样品进行岩石学、地球化学及同位素分析, 以期揭示火山岩与侵入岩之间的联系。

第一阶段流纹岩表现出富集的 Nd-Hf 同位素特征, 表明其母岩浆可能起源于先存地壳的部分熔融。第二阶段流纹岩和花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄和 Nd-Hf 同位素组成一致, 表明它们可能具有共同的岩浆起源。第三阶段流纹岩、石英粗面岩和正长斑岩表现出相似的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (-2.98~-4.00), 表明它们来自同一岩浆源区。第三阶段流纹岩和石英粗面岩表现出明显的 Eu 负异常和 Ba、Sr 的亏损, 正长斑岩则表现出互补的地球化学特征, 如 Eu 不显著负异常、部分样品 Eu 正异常, Ba 正异常等。瑞利分异模拟表明流纹岩、石英粗面岩和正长斑岩可以由分离结晶矿物组合“钾长石+斜长石+石英+黑云母+磁铁矿+角闪石”匹配并联系起来。因此, 流纹岩和石英粗面岩代表从“晶粥”中提取的贫晶体熔体, 正

长斑岩则由堆积体和晶间熔体形成, 三者由发生在浅部岩浆房的分离结晶作用和晶体-熔体分离作用所制约。三个阶段的火成岩呈现出由早到晚 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值升高的趋势, 表明这一时期的壳幔相互作用较为频繁且强度渐进, 岩浆形成过程中幔源岩浆的贡献逐渐增多。

此外, 通过分析小雄火山岩-侵入杂岩代表性样品的全岩和含钾矿物的 K 同位素组成, 对岩浆分异过程中 K 同位素的分馏机制进行制约。钾长石 $\delta^{41}K$ 值为 -0.51~-0.38‰, 与全岩 K 同位素组成 (-0.53~-0.34‰) 相近, 其中 4 件流纹岩样品的 $\delta^{41}K$ 值较低。斜长石显示较高的 $\delta^{41}K$ 值 (-0.17‰~-0.03‰), 且全岩 $\delta^{41}K$ 值与指示斜长石结晶的地球化学指标具有明显的相关性。在岩浆分异程度较高时, “晶粥”中富斜长石堆晶的岩浆具有较高的 $\delta^{41}K$, 而贫晶体熔体具有较低的 $\delta^{41}K$ 值。因此, 在堆晶结构的岩石学证据较为薄弱的情况下, 钾同位素可以成为揭示岩浆结晶分异和晶体-熔体分离过程的隐性地球化学标志, 有助于揭示深成岩体与共生火山岩的关系。

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

东秦岭八里坪黑云二长花岗岩的地球化学特征及年代学研究

朱津蕊, 汪双双, 魏小燕, 王烨

中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710119

东秦岭八里坪花岗岩体位于户县八里坪至长安黄羊坝一带, 沿商丹断裂带北侧分布, 岩体南侧边缘糜棱岩化, 向北则逐渐过渡为未明显变形变质的花岗岩。本文对东秦岭八里坪片理化黑云二长花岗岩的定年结果显示, 其锆石 U-Pb 年龄为 $202 \pm 1\text{Ma}$ 。黑云二长花岗岩的地球化学分析结果显示, 其具有高 Si ($\text{SiO}_2=74.1\text{wt.}\% \sim 77.0\text{wt.}\%$)、准铝质 ($A/\text{CNK}=0.94 \sim 0.97$, $A/\text{NK}=1.08 \sim 1.26$) 的特征, 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解上落于高钾钙碱性系列。在球粒陨石标准化稀土配分图解上, 样品曲线呈右倾 ($(\text{La}/\text{Yb})\text{N}=1.70 \sim 6.81$), 具不同程度的 δEu 负异常 ($0.49 \sim$

0.95), 整体表现为较为平坦的海鸥型, 轻重稀土分馏不明显。在原始地幔标准化微量元素配分图解上, 样品表现为富集大离子亲石元素 Rb、K、Th、U 等, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti、P 等, 同时 Ba 表现为负异常, Sr、Eu 的异常不明显。以上表明八里坪黑云二长花岗岩的结晶分异作用不明显, 且具有部分岛弧火山岩的特征, 形成于早期岩浆岩的部分熔融, 并有部分大洋物质的加入, 或直接由岛弧岩浆岩部分熔融形成。结合区域构造背景, 东秦岭八里坪黑云二长花岗岩于晚三叠世形成于同碰撞或后碰撞拉伸环境。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41502036)

第一作者简介: 朱津蕊 (1989-), 助理工程师, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: 347290358@qq.com

*通信作者简介: 汪双双 (1984-), 高级工程师, 研究方向: 同位素地球化学与年代学. E-mail: sharonwang84@sina.com

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

贫硅石榴辉石岩和壳源硅不饱和碱性岩浆

刘鹏雷*, 金振民, 章军锋, Hans-Joachim Massonne

中国地质大学(武汉)地球科学学院 武汉市 430074

一般认为硅不饱和的碱性岩浆主要起源于地幔岩部分熔融, 而地壳岩石部分熔融普遍形成硅过饱和的长英质熔体。因此, 地壳岩石部分熔融能否形成硅不饱和的碱性岩浆是一个值得探讨的前瞻性科学问题。本研究对挪威西片麻岩区超高压变质域内一类贫硅的石榴单斜辉石岩进行了详细的变质演化研究。研究发现, 该石榴单斜辉石岩由超高压榴辉岩转变而来, 超高压变质温压条件为 800 °C 和 3.5 GPa 左右。岩石折返到加厚下地壳后经历了高压麻粒岩相变质作用的叠加, 由此形成现在的石榴单斜辉石岩, 该阶段的变质温压条件为 870 °C 和 1.75 GPa 左右。在该高温高压变质条件下, 岩石中的黝帘石和黑云母发生脱水分解, 诱发岩石发生低程度部分熔融, 熔融反应为 $Zo + Bt + Amp + Ca\text{-poor Grt} + Na\text{-rich Cpx} \pm Ky$

$\rightarrow melt + Ca\text{-rich Grt} + Na\text{-poor Cpx} + Pl \pm Opx \pm Spr \pm Sp$ 。部分熔融形成的熔体最终冷却结晶形成矿物组合斜长石+钾长石+方沸石, 恢复的熔体成分落在钠长石-硬玉-钾长石三角区域内, 整体为响岩质成分。进一步的相关系分析表明, 因高压下石榴石-辉石热障的存在, 贫硅的石榴辉石岩部分熔融形成硅不饱和的碱性熔体是一种必然结果。贫硅的石榴辉石岩是造山带加厚下地壳的一种常见岩石类型。本研究证明, 在有足够热源供给以及含水矿物和/或自由流体存在的情况下, 其可以部分熔融形成批量的硅不饱和和碱性熔体, 由此可以解释部分造山带硅不饱和碱性岩浆岩的产出。除此以外, 本研究的意义还体现在第一次在超高压变质岩中记录了黝帘石和黑云母脱水熔融的原位结构证据, 验证并补充了已有的实验研究结果。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

微量元素识别锆石类型和晶体-熔体分离

陈绍蓉¹, 朱弟成^{1*}, Roberto F. Weinberg², 王青¹

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室和中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083

2. School of Earth, Atmosphere and Environment, Monash University, Melbourne, VIC 3800, Australia

通常, 锆石相似的结构特征、U-Pb 年龄和同位素组成将导致难以准确区分岩浆岩中锆石的类型, 使得在利用锆石数据分析岩浆结晶历史时出现偏差。利用锆石微量元素特征, 尤其是对岩浆作用条件和过程非常敏感的、具有相似离子半径和价态的元素对(如 Yb-Dy 和 Th-U), 可以更好地识别不同岩浆岩中锆石的类型(如自形晶与循环晶)及其经历的演化过程。结晶自封闭体系的锆石在这些元素对之间应显示出相对简单的趋势和较高的相关性(R^2)。但许多因素都可以降低 R^2 值, 包括: (1) 结晶矿物相或其结晶速率的显著变化; (2) 岩浆混合或同化所导致熔体成分的变化; (3) 不同来源的锆石混合。本文以藏南冈底斯带泽当地区~65 Ma 中-酸性侵入岩为研究对象, 根据角闪石的比例和形态, 将该区域花岗闪长岩分为两类: 角闪石含量低且自形程度低的组 1 和角闪石含量高且自形的组 2。组 1 花岗闪长岩中的锆石较组 2 具

有更亏损的 Lu-Hf 同位素、更高的(Dy/Yb)_N 值和 Ti 温度、更低的 Eu/Eu* 值和 ΔFMQ 值等特征, 显示出两组岩石具有不同的性质和演化过程。更重要的是, 相较于传统的锆石微量元素比值, 利用锆石微量元素对的二元图解, 不仅可以标定系统中最初结晶的锆石及结晶过程中锆石成分变化趋势, 还可以利用元素对趋势的 R^2 值区分简单和复杂的锆石组成, 从而识别复杂的岩浆结晶历史。结合元素对的特征, 本研究在高硅花岗岩中辨识出了来自花岗闪长岩的循环晶, 这表明高硅熔体是从花岗闪长质晶粥体(mush)中抽离而来。此外, 通过对比本文岩浆锆石与研究区南部 70-60 Ma 碎屑锆石的元素特征发现, 碎屑锆石主要来自于较远端的岩体, 意味着利用锆石微量元素可以更精细地识别沉积物源区。本研究表明锆石微量元素对的斜率和 R^2 值可以有效识别锆石类型和晶体-熔体分离过程。

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体项目(42121002), 国家自然科学基金委重大研究计划(91755207), 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0702), “111”项目(B18048)。

第一作者简介: 陈绍蓉(1989-), 女, 博士研究生, 研究方向: 副矿物示踪地球深部过程和地壳演化. E-mail: shaorong_chen@163.com

*通信作者简介: 朱弟成(1972-), 男, 教授, 研究方向: 岩浆作用与特提斯演化. E-mail: dchengzhu@163.com

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

东北亚地区侏罗纪火山活动的时空分布特征 及其大地构造意义

郭建芳¹, 马强^{1*}, 徐义刚², 郑建平¹, 邹祖阳², 马亮², 白秀娟³

1. 中国地质大学(武汉), 地球科学学院 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 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

3. 中国地质大学(武汉), 资源学院, 湖北武汉 430074

东北亚地区中生代岩浆、构造及成矿作用强烈, 其主要驱动因素是古太平洋板块俯冲还是蒙古-鄂霍次克洋的闭合或者两者叠合作用, 学界一直没有形成统一认识。为了解决这一问题, 我们测定并综合分析了华北北部及周边地区侏罗纪火山岩的时空分布特征, 结合白垩纪火山岩的年代学数据, 重建了东北亚中生代火山活动的迁移规律。华北髻髻山组主要是中酸性、钙碱性的火山岩, 火山活动从 165Ma 持续到 143Ma, 在辽西、承德-滦平、京西-宣化到蔚县喷发时代依次为 165-153Ma、162-152Ma、155-149Ma、156-143Ma, 具有自东向西变年轻的趋势, 与同时期

的古太平洋板块俯冲方向一致。东北亚中晚侏罗世火山岩还具有从华北克拉通北部、大兴安岭南部到大兴安岭北部-额尔古纳地区、自南向北变年轻的规律, 说明它们可能是与古太平洋板块俯冲作用相关, 并没有明显受到蒙古鄂霍茨克洋俯冲闭合的叠加作用影响。在此基础上, 我们重建了东北亚中生代火山岩的时空演变规律, 发现它们侏罗纪自东向西、白垩纪自西向东迁移的规律, 确定了东北亚中生代地质演化主要受古太平洋板块俯冲-后撤控制, 而蒙古鄂霍次克构造洋闭合的影响主要局限于大兴安岭北部及其以北地区。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41973050, 41688103)

第一作者简介: 郭建芳(1996-), 学生, 研究方向: 岩浆作用与大陆演化. E-mail: 2519407392@qq.com

*通信作者简介: 马强(1985-), 特任教授, 研究方向: 岩浆作用与大陆演化. E-mail: maqiang@cug.edu.cn.

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

晶粥在斑岩体系中的角色定位

尹烁^{1*}, 马昌前²

1. 东华理工大学, 南昌 330013;

2. 中国地质大学(武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

过去十多年间, 国内外学者在岩浆储库动力学方面达成一致共识, 即酸性岩浆房在绝大多数情况都是晶体占据着主导地位, 晶体间充斥着粒间熔体, 处于一种近乎亚固相的“低温”、“冷藏”的物理状态, 故而用“晶粥”一词来描述; 当有更加基性的熔体重新注入进来时, 晶体在挥发分、热量传递等因素的影响下发生部分或完全溶解, 重新回归熔体状态, 进而形成岩浆房中熔体为主的格局, 通常称之为晶粥的重新活化, 且常常伴随着强烈的火山活动或岩浆-热液的成矿响应 (Cashman et al., 2017)。斑岩体系一般包括蚀变斑岩体及其顶部的(次)火山岩与底部的侵入岩, 常常伴生矽卡岩化与浅成低温矿化等多种热液蚀变类型 (Sillitoe, 2010)。基于新的岩浆储库动力学模型, 斑岩体系中纵向上的一系列变化, 如结构、成分与矿化上的多样性, 显然不能用传统的结晶分异、岩浆混合等过程来解释, 亟需新建立新的模型来刻画上述岩浆演化过程。

位于东昆仑造山带的白石崖矽卡岩型铁矿, 是一处适用于该研究的天然实验室。矿区出露有一套完整的斑岩体系组合, 包括与矿化相关的斑岩体、上覆次火山岩、底部侵入岩及与矿化无关的斑岩岩墙。首先, 基于野外接触关系划分岩浆侵位次序, 且得到 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年数据的支持, 依次为斑岩体 (229Ma)、底部侵入岩 (227Ma)、上覆次火山岩 (226Ma) 与斑岩岩墙 (224Ma)。其次, 利用全岩 Pb 同位素与微区原位 Sr 同位素特征, 在斑岩体中成功识别了钾长石再循环晶 (antecryst), 认为其代表了早期的“冷藏”晶粥储库。最后, 通过全岩与钾长石地球化学特征, 建立了如下岩浆动力学过程:

最早期存在一个流纹质的晶粥储库, 充斥着大量的堆晶, 随着底部基性熔体的加入, 基性熔体中的挥发分与热量被逐渐传递给冷藏的岩浆房, 在浮力的作用下挥发分及其携带的金属元素聚集到了岩浆房的顶部, 形成了局部富流体的地质环境; 随着基性熔体的

周期性注入, 上覆岩浆房也会被动产生对应的热循环, 即温度的震荡变化, 在富流体的环境下, 温度的震荡变化直接导致了钾长石晶体的粗粒化 (Johnson and Glazner, 2010), 当钾长石晶体过大的时候, 就会在重力的作用下沉入岩浆房底部, 同时与上涌的熔体发生反应, 进而形成环斑结构, 即斜长石包裹着钾长石; 当基性熔体的注入逐渐衰竭时, 温度下降驱动着晶体结晶, 同时诱发了顶部热液流体的出溶; 随着温度的进一步下降, 斑岩与底部的侵入岩最终固结, 并且为新一代的岩浆储库提供了围岩; 不同之处在于, 东昆仑的构造环境发生了改变, 构造应力从挤压往伸展转变, 造成了强烈的火山活动, 丢失了大量的挥发分, 从而只能留下一个“贫瘠”的岩浆房, 无法产生矿化, 这些残留的熔体沿着构造断裂上升, 最终侵位形成了斑岩岩墙。

本文揭示, 1) 斑岩体中高 Sr 低 Y 的特征来源于钾长石晶体的再循环过程, 显著不同于传统观点, 如角闪石的分离结晶; 2) 当深部来源的富挥发分与金属元素的基性岩浆熔体注入到上地壳的晶粥储库中的时候, 冷藏的岩浆房一方面能起到冷却池的效果, 用以压制火山作用, 保留挥发分, 另一方面能在其顶部接受、传递、聚集挥发分与金属元素, 最终决定了流体的出溶。

参考文献

- [1] Cashman, K.V., Sparks, R.S.J., Blundy, J.D., 2017. Vertically extensive and unstable magmatic systems: a unified view of igneous processes. *Science*, 355(6331): eaag3055.
- [2] Johnson, B.R., Glazner, A.F., 2010. Formation of K-feldspar megacrysts in granodioritic plutons by thermal cycling and late-stage textural coarsening. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159(5): 599-619.
- [3] Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3-41

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

长英质岩浆演化：来自晶体-熔体分离、岩浆补给和晶粥再活化的启示

夏炎^{*}, 徐夕生, 石弘阳, 赵思狄, 何建强, 谭竹

南京大学 地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210023

越来越多的研究表明,可喷发的以熔体为主的长英质岩浆在地壳中存留时间很短。岩浆储库中晶体往往占据主导地位,晶体间充斥着粒间熔体。随着结晶度的升高,长英质岩浆会形成一种近乎亚固相的“晶粥”。地壳浅部的晶粥可以通过晶体-熔体分离抽取高硅的可喷发熔体,但可喷发状态能够维持多久尚存在争议。通常持续的岩浆补给可以增加岩浆储库的温度和其中熔体比例,另外先结晶的晶体会发生部分或完全熔融,重新回归熔体状态,进而形成熔体为主重新具有喷发能力的岩浆,即晶粥的重新活化。在晶粥模型和穿地壳岩浆系统这一新的范式下,晶体-熔体分离和晶粥再活化过程可能是控制长英质岩浆上升和演化的重要因素。

为了研究晶体-熔体的分离对长英质岩浆演化的影响,我们选取了浙江武义大莱火山-侵入杂岩(100-99 Ma)开展了细致的岩石成因研究。研究显示,大莱高 Sr/Y 的中央侵入相石英二长闪长岩和低 Sr/Y 的朝川组流纹英安质凝灰岩形成时间一致,空间上紧密联系,相似的 Sr-Nd-Hf 同位素组成指示二者很可能起源于共同的浅部地壳岩浆储库。进一步的岩相学和 TIMA 相图观察显示,侵入岩中斜长石成叠瓦状堆积,部分颗粒显示韧性变形,石英成低二面角充填于斜长石间的空隙中,指示大莱火山-侵入杂岩在浅地壳晶粥中经历了以斜长石堆晶主导的晶体-熔体分离过程。模拟计算结果表明,高 Sr/Y 的石英二长闪长岩由堆晶相和未抽离的 30%的残余粒间熔体组成,堆晶相主要为斜长石,另外还有单斜辉石、斜方辉石、黑云母,少量磁铁矿、钛铁矿、磷灰石等矿物。中高结晶度下的机械压实和粘性压实是大莱火山-侵入杂岩晶体-熔体分离的主要机制。斜长石堆晶显著升高了大莱石英二长闪长岩的 Sr 含量和 Sr/Y 比值。我们的研究显示斜长石堆晶是高 Sr/Y 中酸性侵入岩的重要成因,因此在使用 Sr/Y 比值来估算古地壳厚度时应注意排除斜长石堆晶等因素所带来的干扰。

事实上,长英质岩浆能发生充分的晶体-熔体分离,高硅熔体能最终喷发,都离不开深部岩浆的持续补给。这种岩浆补给作用通常会在侵入岩中留下印记。浙江东北沿海的大衢山岩体(~100 Ma)主体由发育暗色微粒包体(MME)的低硅似斑状钾长花岗岩和不含 MME 的高硅似斑状晶洞花岗岩组成,岩体局部可见中-基性岩脉和二长岩出露。大衢山钾长花岗岩中可见斜长石、钾长石聚晶,与大衢山晶洞花岗岩及周边高硅花岗岩具有 Ba、Sr、P 等微量元素“互补”的地球化学特征。钾长花岗岩和 MME 中的斜长石具有核-幔-边结构,核部(钾长花岗岩 27~36、MME 25~41,后同)与边部(17~32、18~26) An 值较低,幔部 An 值(28~57、27~65)相对较高,指示岩浆混合作用。进一步研究显示,二长岩和中性岩脉是幔源镁铁质岩浆与长英质岩浆发生均匀混合的产物,而 MME 为两种岩浆机械混合的产物。对 MME 和二长岩中角闪石开展全铝压力计计算,结果显示 MME 的形成深度为 1.8~3.0 km,而二长岩中角闪石发育核-幔-边结构,核部和幔部形成深度为 17.0~21.2 km,边部形成深度 1.9~4.5 km。这一结果指示了不同深度相互连通的两个岩浆储库均受到了岩浆的再补给。补给的镁铁质岩浆在 17~21 km 深度较高温的岩浆储库与长英质发生均匀混合形成中性岩浆,并进一步上升侵入浅部岩浆储库,形成二长岩与中性岩墙。当 2~3 km 深度较低温岩浆储库注入高温的镁铁质岩浆时,难以混合均一,形成钾长花岗岩中的 MME。

岩浆补给作用不仅可以延长晶粥的寿命,有利于充分的晶体-熔体分离,还可造成晶粥活化和富晶体火山岩的喷发。但晶粥活化的精细过程和持续的时间仍需进一步研究。东南沿海花岗质火山-侵入杂岩带发育一种特殊的富晶体火山岩-碎斑熔岩。这些碎斑熔岩主要成侵出相出露于火山构造中心,富含斑晶,平均可达 40%左右,其中相山碎斑熔岩的斑晶含量尤高,可达 50-60%,是研究晶粥活化的绝佳对象。相

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41930214); 国家自然科学基金面上项目(42172052)。

第一作者/通讯作者简介: 夏炎(1988-), 副教授, 研究方向: 火成岩岩石学. E-mail: xiayan@nju.edu.cn

山火山-侵入杂岩 (135-133 Ma) 由第一旋回的流纹英安岩, 第二旋回的晶屑凝灰岩、富晶体碎斑熔岩、花岗斑岩和石英二长斑岩组成。Sr-Nd-Pb-Hf 同位素特征显示它们主要为地壳起源的中酸性岩浆。流纹英安岩、碎斑熔岩和花岗斑岩具有相似的锆石 Hf-O 同位素和全岩 Nd 同位素组成, 指示相山的长英质岩浆起源于新元古代新生地壳和太古代-古元古代古老地壳的混合源区, 晶屑凝灰岩更低的 $\epsilon_{Nd}(t)$, $\epsilon_{Hf}(t)$, $\delta^{18}O$ 值指示更古老的镁铁质围岩的混染, 显示研究区大陆地壳的不均一性。富晶体的碎斑熔岩和花岗斑岩中石英斑晶的阴极发光图像显示石英颗粒从核部至边部, 亮-暗交替变化数次。进一步的电子探针成分分析结

果显示, 石英的 CL 亮度受控于 Ti 含量, 多次升高的 CL 亮度和 Ti 含量指示温度的多次上升, 表明岩浆储库受到多次的岩浆补给。石英中 Ti 的扩散时间计算结果显示, 相山富晶体碎斑熔岩和花岗斑岩是富晶体的晶粥在数千年到 1.5 万年中, 经历至少 7 次明显的岩浆补给和升温, 发生再活化后的产物。单次岩浆补给一般持续数十年到数千年不等。

综上, 长英质岩浆主要以晶粥的形式赋存于不同深度相互连通的岩浆储库组成的穿地壳岩浆系统中, 在晶体-熔体分离、岩浆补给和晶粥再活化等作用的控制下, 形成目前观察到的成分多样的花岗质岩类。

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

潘吉亚拼合末期（三叠纪）造山过程中的花岗质岩浆作用

李舫^{1*}, 王涛², 肖文交¹, 侯泉林¹

1. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100049

造山带是板块汇聚作用的产物, 造山作用诱发的岩浆是“地球血液”, 为大陆增生提供了主要物质。建立岩浆作用、造山过程与大陆增生的内在关联, 是大地构造学领域经久不衰的研究主题。潘吉亚是距离我们最近的一个超级大陆, 奠定了现代大陆的根基, 由多块体汇聚拼贴形成。超大陆聚合过程中花岗质岩浆成因演化研究, 成为认识造山带增生-碰撞过程的关键“窗口”, 也是深化造山带岩浆作用理论的重要基础。三叠纪是潘吉亚大陆拼合几近完成的末期, 同时也是构造过程最复杂的阶段, 如俯冲与碰撞共存、前陆褶冲与弧后伸展相互交替叠置等。特别是沿潘吉亚大陆东亚汇聚边缘的不同构造段落, 表现明显差异的构造过程, 有的是大块体汇聚拼合(如青藏碰撞造山带)、有的表现为多岛洋闭合(如中亚增生造山带)。潘吉亚三叠纪造山过程所引发的岩浆作用同样多样化: 有陆缘弧岩浆作用、岛弧岩浆作用、增生弧岩浆作用, 还有与碰撞有关的岩浆活动。伴随潘吉亚大陆最后拼合, 沿东亚汇

聚边缘的亚洲大陆是如何增生拼合的? 岩浆作用记录如何?

针对这个科学问题, 本文以潘吉亚拼合末期(三叠纪)造山过程中的岩浆作用为重点研究目标, 选择多块体多向聚合的古特提斯造山带(松潘-甘孜造山带)、全球规模最大的显生宙增生型造山带(中亚造山带)以及多岛洋型和多板块叠合造山带(东南亚特提斯造山带)为研究对象, 探索潘吉亚拼合末期(三叠纪)造山过程中的花岗质岩浆作用特征及其与大陆增生的内在关联机制。取得以下主要认识: (1) 发现松潘-甘孜造山带三叠纪不同“类型”花岗岩物源中均含沉积物, 建立了造山作用沉积物卷入中-下地壳, 造成后碰撞花岗岩类多样性的成因模式。(2) 厘定中亚增生造山带三叠纪古大洋闭合期间碰撞型花岗岩, 为解剖岩浆作用与造山过程的内在关联提供典型范例。(3) 发现东南亚特提斯花岗岩中从三叠纪开始发育三期新生地壳物质, 提出后撤型增生造山造成地壳幕式增生的形成模型。

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

华北克拉通阴山地块太古代 TTG 年代学和地球化学特征

张一帆, 宋述光

北京大学 北京 100871

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一, 位于其西北部的阴山地块是华北克拉通西部陆块太古宙基底出露最完整的地区, 其中出露的花岗质岩石以 TTG 为主体。TTG 是大陆地壳的重要组成部分, 因此 TTG 质岩石对研究早期陆壳的形成和演化有着重要的作用。

为探讨华北克拉通阴山地块 TTG 岩石的形成时代、岩石成因及构造环境, 我们对其进行了锆石 U-Pb 年代学和全岩地球化学分析。结果表明, 该地区 TTG

的岩浆年龄为 $2520 \pm 13\text{Ma}$ - $2537 \pm 6\text{Ma}$ 。

SiO_2 (64.70%-85.73%)和 $\text{Na}(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.10-0.68)$ 较高; 拉斑系列-钙碱性系列, 准铝质-过铝质; 轻重稀土分馏明显, 为右倾型模式, Eu 弱负异常至正异常, 大离子亲石元素(Rb、Ba)富集, 高场强元素(Nb、Ta、Ti)相对亏损; 具有较高的 Sr/Y 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值。以上特征表明, 阴山地块太古代 TTG 与新生代埃达克岩特征相近。结合当地区域地质背景, 我们认为 TTG 形成于俯冲相关的岛弧环境。

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

华北克拉通始太古代陆壳演化——来自冀东杂岩的制约

王浩^{*}, 杨进辉

中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

由于地幔潜能温度的持续降低, 地球自形成以来经历了单向不可逆的演化, 这包括地球外层构造从原始的岩浆海阶段, 经历停滞盖层阶段, 最终转化为现今板块构造阶段。现今板块构造于何时以何种方式出现是固体地球科学领域最重要的科学问题之一。大陆地壳因其独特的成分特征被认为是板块俯冲作用的产物, 因此记录了现今板块构造的启动过程。现今板块构造以具有全球联动的板块边界为特征, 因此任何判定地球早期存在现今样式板块构造的地质/地球化学指标都应该具有全球同时性。前人的研究表明, 很多古老的克拉通都在始太古代时期经历了显著的地球化学特征变化, 这包括大量出现的 TTG 质大陆地壳以及锆石 O-Hf 同位素的陡然正漂移等。这也被认为是现代板块构造体制开始运行的体现。

华北克拉通是世界上仅存的几个具有>38 亿年古老陆核的克拉通之一。揭示华北克拉通在始太古代的陆壳演化方式与过程对探究始太古代是否存在现今样式的板块构造具有重要意义。本研究通过对华北克拉通冀东杂岩开展详细研究并结合前人研究成果发现, 冀东曹庄石英岩是世界上最古老的长英质碎屑沉积岩之一。其源区可能来自鞍山杂岩或附近卢龙始太古代片麻岩。华北克拉通始太古代碎屑锆石记录的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、锆石 Ti 温度、氧逸度、Eu/Eu*, Th/Nb 比和寄主岩石 SiO_2 含量等并未显示明显的随时间变化, 这与 Yilgarn 和 Singhbhum 等克拉通明显不同, 指示在始太古代时地球动力学转化机制缺乏全球同时性, 不支持此时存在全球意义的现代板块构造。O-Hf 同位素揭示华北克拉通始太古代陆壳形成自低温热液蚀变基性岩的重熔。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

变压结晶分异控制弧岩浆壳内分异过程： 以狼山石炭纪侵入杂岩为例

刘敏¹，赖绍聪^{1*}，张达²

1. 西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室，西安 710069；

2. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院，北京 100083

陆缘弧系统中幔源初始玄武质熔体在其穿地壳演化过程中不断向着富长英质的成分分异是大陆地壳形成和演化的核心机制。但目前对于深部（高压）和浅部（低压）分异在这一过程中的相对贡献仍不清晰。鉴于此，本文对中亚造山带南部狼山弧中的一套石炭纪侵入杂岩开展了岩相学、年代学、全岩和矿物地球化学分析以及地球化学模拟综合研究。该套杂岩由镁铁质-超镁铁质堆晶岩和镁铁质-长英质非堆晶侵入岩两部分构成。锆石 U-Pb 定年结果表明，这些不同岩性单元虽然显示相对较宽泛的结晶年龄范围（319~341 Ma），但其记录的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄连续且高度重叠，同时，堆晶岩组合与非堆晶岩组合显示相似的全岩 Sr-Nd-Pb 和锆石 Hf 同位素组成，这些信息暗示了该侵入杂岩中的不同岩性单元实为一期持续较长时间的弧岩浆同源演化的产物。全岩地球化学组成方面，堆晶岩和非堆晶岩的多项全岩地化指标和变化趋势与实验岩石学中模拟不同地壳深度下的弧岩浆结晶分异所产生的堆晶岩和熔体成分表现出一定关联性，但值得注意的是，英云闪长岩明显不是中性岩进一步结晶分异的产物，中性岩类低 Al_2O_3 且高 TiO_2 和 P_2O_5 的特征更符合低压实验岩石学的 LLD 趋势。根据不同岩石类型中角闪石的成分变化，估算出的结

晶温压条件显示出了明显的双峰分布特型，暗示深部分异和浅部分异（变压）均在该侵入杂岩的形成过程中起了关键作用。此外，堆晶橄榄岩中的角闪石计算出岩浆水含量为 3.2 - 5.3 wt.%，并且各岩性单元中角闪石均计算得出了较高的 $f\text{O}_2$ 值（大多在 ΔNNO 之上），指示了其母岩浆富水且高度氧化的成分特性。与此同时，我们运用质量平衡原理建立了一个两阶段变压结晶分异模型来模拟潮格石炭纪侵入杂岩中不同成分端元的形成过程。模拟结果显示，我们的两阶段变压结晶分异模型能够生成该杂岩体中大部分的岩浆成分，其中低硅辉长岩可由初始玄武质岩浆经过~53.4%的高压结晶分异生成，英云闪长岩可由这一阶段获得的演化玄武质熔体再经 76%的高压结晶分异过程形成。但不同的是，对中性岩而言，闪长岩和英云闪长岩需由这一演化玄武质熔体经过进一步的不同的低压结晶分异过程生成，分异程度分别为~32.0%和~52.0%。以上两阶段模拟结果也得到了稀土元素 REE 两阶段模拟的支持。以上信息可以看出，狼山石炭纪侵入杂岩的形成明显受控于变压结晶分异过程，初始弧岩浆不同压力条件下（高压+低压）的 LLDs 深刻影响着弧岩浆中中-酸性岩浆的形成。

基金项目：华北北缘西段狼山地区早石炭世基性-超基性岩的矿物化学研究（41902049）

第一作者简介：刘敏（1991-），讲师，研究方向：造山带岩浆作用过程. E-mail: liumin6364@163.com

*通信作者简介：赖绍聪（1963-），教授，研究方向：岩浆岩岩石学. E-mail: shaocong@nwu.edu.cn

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

赣-杭带早白垩世 A 型花岗岩成因： 浅部地壳岩浆储库活化的产物

陈璟元^{1*}，杨志国¹

1. 长安大学 地球科学与资源学院，西安 721000

A 型花岗岩是根据地球化学特征和矿物学特征划分出来的一种特殊类型的花岗岩，一般认为其由高温、碱性和无水的岩浆所形成，产出于造山后或者非造山的构造环境。针对 A 型花岗岩，前人提出了多种成因模型，然而其成因仍然存在很大争议。我国华南赣-杭带发育有大量的花岗质岩石，其中有大量的岩体被前人判别为 A 型花岗岩。这些 A 型花岗岩与同期广泛发育的火山-侵入杂岩和硅质火山岩是华南晚中生代硅质岩浆岩省的重要组成部分。虽然前人做了大量的研究工作，但是侵入岩和喷出岩常常被认为是不同的岩浆过程所形成。然而，对于赣-杭带广泛发育的火山-侵入杂岩，火山岩和侵入岩（例如，玉华山火山-侵入杂岩）之间存在成分间断，这与世界范围内连续喷发的火山岩地层内部的成分间断类似，最新的研究均认为其形成过程与高硅熔体从富含晶体的岩浆储库抽离有关。本文总结了赣-杭带早白垩世 A 型花岗岩及相关岩石的数据(年代学、地球化学、同位素)，试图建立不同相带花岗岩之间的

成因联系，从而限定这些 A 型花岗岩的成因。根据岩石结构特征，赣-杭带白垩世早期花岗岩类岩石可以分为斑状-似斑状花岗岩和等粒花岗岩，二者形成时代一致，且具有相似的矿物组成和 Sr-Nd-Hf 同位素组成，表明它们从同一个岩浆储库演化而来。斑状-似斑状花岗岩以低 SiO₂ 和 Rb/Sr 比值以及高 Sr、Ba 含量和 Eu/Eu* 值为特征，由岩浆储库内的堆晶过程所形成。等粒花岗岩具有 A 型花岗岩特征，并且具有极高的 SiO₂ 和 Rb/Sr 比值以及极低的 Sr、Ba 含量以及 Eu/Eu* 比值，表明它们是从岩浆储库中抽提出的高硅熔体。幔源镁铁质岩浆的注入和粒间熔体中挥发份（或流体）的释放促使先前存在的岩浆储库活化，随后岩浆储库内的压实作用导致了高硅熔体抽离岩浆储库并向上迁移，地壳浅部后形成了高硅 A 型花岗岩，残余堆晶在岩浆储库底部结晶形成了斑状-似斑状花岗岩。最后，我们的研究表明，A 型花岗岩可以通过浅部岩浆储库中的晶体-熔体分离过程形成。

基金项目：地球化学（42073033）

第一作者简介：陈璟元（1985-），副教授，研究方向：花岗岩类岩石成因。E-mail: chenjingyuan999@foxmail.com

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

鲁西地区邹平辉长闪长岩 Sr-Pb 与 Nd-Hf 同位素解耦： 对华北岩石圈地幔多阶段改造的启示

郭军^{1,2}, 黄小龙^{1,2*}, 钟军伟³

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 深地科学卓越创新中心, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458;
3. 昆明理工大学, 国土资源工程学院, 云南 昆明 650000

再循环地壳物质在改造上覆大陆岩石圈地幔的物理性质和化学组成上起着重要作用(e.g., Zhang et al., 2002; Gao et al., 2004, 2008; Niu, 2005; Huang et al., 2016)。俯冲板块在弧前和弧下深度经历广泛的变质脱水甚至部分熔融, 产生的富水流体和含水熔体会携带大量的活动性元素迁移交代上覆地幔楔橄榄岩, 形成岩石学和地球化学特征不均一的地幔交代岩(e.g., Zheng, 2012; Zheng et al., 2020)。华北克拉通东部地区在中生代经历了显著地岩石圈减薄和构造活化, 伴随广泛发育的伸展构造、岩浆作用和多金属成矿作用, 表明其克拉通属性已经丧失(e.g., Xu, 2001; Niu, 2005; Wu et al., 2014; Zheng et al., 2018; Zhu and Xu, 2019; Yang et al., 2021)。在晚古生代-早中生代时期, 华北克拉通岩石圈可能依次受到了北向俯冲的古特提斯洋壳及其牵引的扬子陆壳的影响(e.g., Zheng et al., 2013; Guo et al., 2021)。在侏罗纪-白垩纪时期, 古太平洋板块向西俯冲到东亚大陆边缘之下(e.g., Maruyama et al., 1997; Zheng et al., 2013), 变质脱水和部分熔融产生的富水流体和含水熔体也可能改造上覆华北克拉通岩石圈地幔。因此, 华北克拉通在显生宙经历了复杂的构造演化, 其岩石圈地幔可能受到了不同大洋和大陆俯冲板块来源的流体和熔体的多阶段交代改造。然而, 目前学界对华北克拉通岩石圈地幔中的交代介质的性质和来源仍存在争议。

本文对华北克拉通东部内陆鲁西地区的邹平辉

长岩闪长岩进行了锆石 U-Pb 定年、全岩微量元素和放射成因 Sr-Nd-Hf-Pb 同位素研究, 结果表明邹平辉长岩闪长岩的侵位时代为白垩纪(127 ± 1 Ma), 具有富集 LREE 和 LILE, 亏损 HREE 和 HFSE, 富集放射成因 Sr-Nd-Hf-Pb 同位素的地球化学特征。邹平辉长岩闪长岩的 Sr-Pb 同位素与 Nd-Hf 同位素组成之间没有相关性, 表明它们之间存在显著的同位素解耦。邹平辉长岩闪长岩的 Nd-Hf 同位素组成与大别-苏鲁造山带三叠纪榴辉岩相似, 表明其地幔源可能受到了大别-苏鲁造山带榴辉岩来源的长英质熔体的交代作用。因此, 扬子地块北缘在三叠纪时期已经深俯冲到达华北克拉通东部内陆鲁西地区的下方。另外, 邹平辉长岩闪长岩具有显著变化的 Pb 同位素组成, 并且与 Ba/La 和 Ba/Th 比值之间表现出相关性, 表明其地幔源中可能存在两类具有不同 Pb 同位素组成的富水流体, 其中一类具有高 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值, 可能来源于古太平洋俯冲板块的变质脱水, 而另一类则表现出低 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值, 可能来源于深俯冲扬子陆壳的变质脱水。因此, 华北克拉通东部陆下岩石圈地幔中不仅存在三叠纪扬子陆壳来源的物质贡献, 而且还受到了侏罗纪-白垩纪古太平洋俯冲板块释放的富水流体的交代作用。这些深部地质过程不仅形成了具有不同放射性成因 Sr-Nd-Hf-Pb 同位素组成的各类地幔交代岩, 而且显著降低了上覆华北克拉通岩石圈地幔的黏度和强度, 成为华北克拉通东部中生代岩石圈减薄破坏的关键因素。

基金项目: 国家自然科学基金(42021002, 41625007)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: 郭军(1991-), 博士后, 研究方向: 岩石地球化学及同位素地球化学. E-mail: guojun@gig.ac.cn

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

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

造山带的地壳生长与再造：以额尔古纳、松嫩地块和多宝山岛弧为例

唐杰^{1*}，许文良^{1,2}，龙欣雨¹，孙晨阳¹

1. 吉林大学地球科学学院，长春 130061；

2. 自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室，长春 130061

大陆地壳作为地球形成和演化的重要档案库，其生长、保存和消亡过程一直是固体地球科学研究的前沿与热点问题。以往关于全球大陆地壳生长模式的研究大多是基于不同克拉通地区的样品所建立的。然而，地球的大陆地壳组成应包括克拉通和造山带两部分，目前对造山带的地壳生长与再造过程的研究相对薄弱。中亚造山带作为全球最大的增生型造山带，是解决上述问题的理想地区。花岗岩作为大陆地壳的重要组成部分，是了解地壳演化的重要研究对象。额尔古纳和松嫩地块以及多宝山地块作为中亚造山带东段的代表性微陆块和陆块间造山带，其上广泛分布的花岗质岩石的元素-同位素研究为揭示造山带地壳生长与再造过程提供了可能。

额尔古纳地块上 34 个和松嫩地块上 64 个花岗质岩石的锆石 U-Pb 定年结果显示其形成时代为元古代-白垩纪。额尔古纳和松嫩地块花岗质岩石中锆石 Hf 同位素模式年龄随形成时代变新而逐渐降低，说明了该区花岗岩的形成随时代经历了从古老陆壳物质部分熔融到新增生陆壳物质部分熔融的变化过程。此外，两个地块均表现出随纬度的升高，锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值逐渐降低，对应二阶段模式年龄逐渐升高，表明额

尔古纳和松嫩地块的古老陆壳成分自南向北不断增加，指示了深部陆壳的横向不均一性。根据这些花岗质岩石的结晶年龄和锆石 Hf 同位素模式年龄，建立了额尔古纳和松嫩地块的生长和再造曲线。地壳生长曲线揭示微陆块地壳的初始生长发生在晚太古代，主体地壳生长发生在古元古代-新元古代。阶梯状的生长曲线暗示额尔古纳和松嫩地块在地壳演化过程中的幕式生长特征，并与超大陆的演化历史密切相关：超大陆的俯冲汇聚阶段是新地壳产生的重要时期，地壳生长速率较高；在陆-陆碰撞的造山期，地壳的重熔再造过程占据主导地位，地壳生长速率较低。而陆块间造山带——多宝山岛弧的地壳生长主要发生在新元古代和显生宙，与微陆块的地壳生长曲线具有明显的区别。地壳再造曲线显示额尔古纳和松嫩地块的地壳再造主要发生在新元古代-早白垩世，超大陆循环和显生宙以来多重构造体系的演化是引发该区地壳重熔的重要原因，再造过程使陆壳物质的同位素体系被不断重置，进一步导致了微陆块深部陆壳的不均一性。

综上所述，本文认为幕式生长可能是中亚造山带微陆块普遍具有的地壳生长模式，而地壳生长速率的变化是对超大陆不同演化阶段的响应。

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

板片熔融、TTG 成因与太古宙地壳生长

黄波^{1,2}, 付冬^{1,3}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院全球大地构造中心, 武汉 430074;
2. 中国地质大学(武汉)湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 武汉 430074;
3. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

太古宙是大陆地壳生长的关键期, 尽管目前太古宙地壳体积出露不到现今地壳的 25%, 但大量地壳生长模型认为现今陆壳体积的 60 - 80% 陆壳可能已在太古宙末期形成。太古宙地壳主要由 TTG (英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩) 片麻岩和绿岩带 (火山沉积岩/表壳岩) 组成。然而, 关于 TTG 的形成机制和地球动力学背景仍然存在较大争议, 主要有两种代表性观点: 1) 一种认为 TTG 岩浆与板块俯冲相关, 由俯冲板片 (或俯冲的岛弧玄武岩、俯冲的洋底高原玄武岩) 或加厚岛弧下地壳部分熔融形成; 2) 一种认为 TTG 岩浆形成于非板块构造体制下, 如加厚下地壳、拆沉下地壳, 或地幔柱/洋底高原底部玄武岩部分熔融。其中, 经典的观点认为 TTG 组合与显生宙埃达克质岩石组合类似, 由年轻的、热的俯冲大洋板片 (MORB 为主) 部分熔融而成 (板片熔融模型)。然而, 近期大量地球化学和相平衡-微量元素模拟研究认为板片熔融难以形成轻稀土和大离子亲石元素富集的 TTG 地球化学特征, 进而提出了俯冲大洋高

原玄武岩、俯冲岛弧玄武岩、加厚岛弧地壳底部、大洋高原底部部分熔融等各类模型。针对这一经典问题, 我们选取华北克拉通南部太古宙末期 TTG 和绿岩带开展了地球化学和相平衡-微量元素模拟研究。结果表明, 高压 TTG 和同时代埃达克质火山岩组合可以由俯冲板片 (太古宙 MORB 型玄武岩) 经历部分熔融及随后的分离结晶而成; 相反岛弧型玄武岩在不同温压条件下部分熔融其轻稀土和大离子亲石元素总是过于富集。模拟计算显示 MORB 型玄武岩部分熔融温压条件为 760-810 °C/1.6-1.8 GPa, 表明该俯冲带拥有较高的地热梯度 (~440-470 °C/GPa), 其与显生宙暖俯冲带一致。我们的结果表明热/暖俯冲带地热梯度下 MORB 型洋壳俯冲导致的板片熔融和随即的分离结晶作用是形成大量 TTG 并造成 TTG 地球化学多样性的有效机制。该研究也表明太古宙暖 (热) 俯冲作用和板片熔融可能在太古宙地壳生长、壳幔物质循环和地幔散热等过程中扮演了重要角色。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

高分异花岗岩岩浆-热液的转换过程：来自黑云母的证据

王志强^{1,2*}, 笪昊翔^{1,2}, 袁峰^{1,2}, 陶耐³, 张军³

1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 合肥 230009;

3. 安徽省勘查技术院, 合肥 230031

高分异花岗岩与稀有金属成矿作用密切相关,但其异常地球化学特征(如低 Nb/Ta 比值)以及稀有金属极端富集的机制仍存在很大争议。是否存在出溶流体及其作用是争论的关键问题。本次研究中,我们利用黑云母来示踪江南造山带东部中生代伏岭岩体的岩浆-热液转换过程。伏岭岩体由粗粒黑云二长花岗岩-正长花岗岩、中细粒斑状黑云正长花岗岩和细粒黑云正长花岗岩组成,其中黑云母分别为 BT-I、BT-II 和 BT-III。BT-I 显示出高 TiO₂、MgO、Cl、V 和 Ba 以及低稀有金属含量特征。岩石学、地球化学和微量元素模拟表明,分离结晶是 BT-I 成分变化的主要控制因素。相反, BT-III 显示出非常低的 TiO₂、MgO、Cl、V 和 Ba 以及极高的稀有金属含量,这不能用

分离结晶来解释,因为需要极高程度的分离结晶(>95%)。此外,我们使用相容元素(Sc、Mn 与 V、Ba)的流体流动性差异来区分热液过程和岩浆过程,结果清晰地表明 BT-III 主要由出溶的流体形成。这一假设得到了近固相线形成温度、F/Cl 比值的突然增加以及 BT-III 沿裂隙分布的特征的支持。虽然 BT-II 显示过渡成分特征,但仍具有典型的岩浆成因的岩相学特征,表明可能形成于富含流体的残余熔体。鉴于 BT-III 非常低的 Nb/Ta 比值和极高的稀有金属含量,我们认为尽管分离结晶在岩浆演化过程中起着重要作用,但流体出溶是高分异花岗岩形成特殊地球化学特征及稀有金属元素的超常富集的关键。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

蒙古山弯构造形成演化的岩浆响应

令佳琪^{1,2,3}, 李鹏飞^{1,2*}, 袁超^{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;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

山弯构造指的是原始线性的造山带沿着铅直轴发生弯曲所形成的弧形造山带, 其在全球造山带中广泛发育。该项研究聚焦中亚蒙古山弯构造, 其形成演化涉及到蒙古鄂霍茨克洋的俯冲消亡及近 3000 km 俯冲体系的大规模弯曲, 是探究俯冲带弯曲与岩浆弧演化相互作用机制的理想对象。论文作者围绕蒙古山弯构造弯曲程度最大的区域(即: 山弯构造转折端), 开展了岩浆岩年代学和地球化学分析工作, 发现该区花岗岩类岩石属于典型的弧岩浆岩, 主要形成于二叠纪至三叠纪, 并具有由西向东逐渐年轻的趋势, 可能

与蒙古-鄂霍茨克洋俯冲板片向东的后撤有关, 而全岩微量元素特征显示, 上覆造山带地壳厚度却在逐渐增厚。综合蒙古山弯构造运动学演化方面的结果, 我们推测蒙古鄂霍茨克俯冲带大规模弯曲过程中, 其转折端处于压缩环境导致上覆造山带加宽增厚, 并迫使海沟不断被动后退, 以致于岩浆前锋向着海沟方向迁移, 而弧岩浆也向着富硅和富钾的方向演化。该项研究显示, 俯冲带的大规模弯曲不仅影响着俯冲板片及上覆造山带的三维结构, 还控制着弧岩浆的时空演化。

第一作者简介: 令佳琪 (1995-), 男, 博士生, 构造地质学专业. E-mail: 2728930347@qq.com

*通信作者简介: 李鹏飞 (1983-), 男, 研究员, 主要从事造山带大地构造学研究. E-mail: pengfeili@gig.ac.cn

· 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 ·

冈底斯后碰撞埃达克质岩不同的岩浆分异过程： 来自锆石微量元素的证据

陆天宇, 贺振宇

北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083

印度-亚洲碰撞以来西藏南部广泛发育的埃达克质岩通常被解释为来自拉萨加厚下地壳的部分熔融, 并且由于它们与斑岩铜矿具有成因联系, 因此在过去的几十年里引起了地学界的极大兴趣。这些大陆地壳来源的后碰撞埃达克质岩对于解读青藏高原的演化和成矿, 尤其是与碰撞相关的矿床至关重要。此外, 最近有研究提出了一种新的花岗岩分类方案, 根据不同的分异程度将花岗岩分为原生型、分异型、堆晶型三类(吴福元等, 2017)。因此, 考虑到一些埃达克质岩的形成被认为与斜长石堆晶或晶体分馏有关, 这种分类方法是否适用于埃达克质岩也是值得检验的。目前, 对于冈底斯后碰撞埃达克质岩的研究大多集中在岩浆来源和构造环境上, 然而对于这些埃达克质熔体形成后的岩浆分异过程关注较少, 也限制了对于其成矿能力的约束。

锆石是酸性岩浆岩中一种常见的副矿物, 具有高的 Th、U、Ti、Hf、REE 等微量元素浓度, 提供了关于熔体成分、温度以及相关演化过程的各种定性和定量信息。在此, 我们利用锆石微量元素地球化学数

据, 深入了解藏南尼木地区两期后碰撞埃达克质岩浆的岩浆分异过程和相关成矿作用。尼木埃达克质二长花岗岩中升高的锆石 U/Yb、Yb/Gd、Eu/Eu*值反映了富稀土矿物(如榍石)的分离结晶, 而埃达克质花岗闪长岩中锆石 Th/U 的增加和 Yb/Gd 的减少暗示了平衡结晶的过程。此外, 二长花岗岩逐渐降低的氧逸度表明其形成过程中可能存在磁铁矿的共同结晶, 进而导致了硫化物的偏析, 降低了熔体中硫和亲铜元素(如镍、铜)的含量。这些岩浆分异过程也得到了热力学模拟的支持, 模拟结果显示在中上大陆地壳相对较深的岩浆房内(约 400~475 MPa)晶体-熔体的分离受到了限制, 埃达克质熔体经历了弱分异(熔体分数高达~70%)形成了二长花岗岩, 或平衡结晶形成了花岗闪长岩。

综上所述, 尽管下地壳富铜堆积物的重熔导致了冈底斯岩浆带后碰撞斑岩铜矿的形成, 但中上地壳内磁铁矿的分馏改变了氧逸度条件并导致岩浆中 Cu 含量的降低, 形成冈底斯岩浆带中一些贫铜的后碰撞埃达克质岩。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

高产热花岗岩超固相线时限的影响因素与钨锡成矿作用

刘向冲¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

钨矿和锡矿是我国优势和战略矿产资源,其成因常与高分异花岗岩有密切联系。世界级钨锡矿床(如湖南柿竹园超大型钨多金属矿、云南个旧锡矿集区、英国 Cornubian 锡钨矿集区、德国与捷克交界的 Erzgebirge 钨锡矿集区等)相关的高分异花岗岩有较高含量的 U、Th、K, 其放射性生热率大多超过 $5 \mu\text{W m}^{-3}$, 属于高产热花岗岩。然而, 放射性生热在多大程度延长花岗岩超固相线时限以及如何影响后期热液钨锡成矿作用争议较大, 高产热花岗岩与大型、超大型钨锡矿床共存是偶然还是必然也缺乏深入研究。通过有限元方法模拟花岗质岩浆固相线以上的冷却过程及钨、锡自硅酸盐熔体向热液的扩散过程, 得到如下认识 (Liu et al., 2023, GCA):

1. 钨、锡自硅酸盐熔体向热液的扩散比 H_2O 慢几个数量级, 因而在岩浆-热液过渡阶段钨、锡在硅

酸盐熔体与热液的平衡分配难以实验, 钨、锡成矿作用是速率控制的 (即与时间相关), 因而岩浆超固相线时限至关重要。

2. 花岗岩超固相线时限与放射性生热率、岩浆垂向厚度成正比, 与固相线温度、围岩热传导速率成反比;

3. 平均放射性生热率达到 $5-10 \mu\text{W m}^{-3}$ 、随岩浆演化逐渐降低固相线温度、中等的热传导速率可使高产热花岗岩的超固相线时限延长 $49-427 \text{ ka}$ ($1 \text{ Ma} = 1000 \text{ ka}$), 比同尺寸但只有正常放射性生热率 ($2 \mu\text{W m}^{-3}$) 的花岗岩超固相线时限多 $11-85 \%$; 相应地, 钨、锡自硅酸盐熔体向热液的扩散总量提高 $17-95 \%$ 。在这种高热花岗岩固结前, 热液从成矿母岩提取金属的总量大幅增加, 这将提高钨、锡成矿 (尤其是成大矿) 的概率。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

中国东南部新生代火山岩单斜辉石斑晶成因及 岩浆演化探究-熔融包裹体证据

孟乾坤, 张贵山*, 彭仁, 常旺, 王亮

长安大学地球科学与资源学院, 西安, 710054

中国东南部沿海新生代火山岩是环太平洋火山岩带的重要组成部分, 该地区有着复杂的地质历史背景和构造演化过程, 备受国内外学者的关注, 关于火山岩的岩石成因、大地构造背景、岩岩浆演化等仍存在一定分歧。福建省是中国东南部新生代火山岩的重要分布地区, 位于闽东北白琳镇的新生代火山岩中发育的单斜辉石斑晶具有独特反应边结构, 并且辉石和橄榄石中发育有大量的原生熔融包裹体。因此, 本文以闽东北新生代火山岩中的单斜辉石和熔融包裹体为主要研究对象, 中国东部新生代火山岩的岩浆演化过程进行探究。

使用电子探针对火山岩斑晶中的单斜辉石和橄榄石进行了主量元素分析, 使用 LA-ICP-MS 对单斜辉石进行了微量元素分析, 对熔融包裹体采用激光拉曼光谱进行熔融包裹体挥发份分析, 并使用电子探针分析了熔融包裹体的主量元素成份。分析结果显示, 单斜辉石斑晶可达巨晶尺寸, 为岩浆成因, 并发育有呈紫色外壳状的透辉石反应边, 无橄榄石、磁铁矿、玻璃质等物质夹杂, 核部、反应边均与玄武岩熔体平衡, 且其消光位与辉石核部一致, 不同于中国东部辉石斑晶或巨晶周围常见的白色反应边结构。辉石斑晶的主量元素特征显示, 火山岩为板内裂谷成因, 从单斜辉石的核部至边部, SiO_2 、 MgO 等含量以及 $\text{Mg}^\#$ 明显降低, CaO 、 Al_2O_3 、 FeO 、 TiO_2 增加, 总体具有高镁、高硅贫铁, 富 TiO_2 的特征。基于单斜辉石组分计算出的结晶温度和压力显示, 核部的平均温度为 1110.7°C , 压力为 16.1 kbar , 结晶深度最大为 77.1 km , 平均为 52.96 km , 边部的平均结晶温度、压力和深度分别为 895.5°C , 8.9 kbar , 结晶深度最大为 40.7 km , 平均为 30.9 km , 辉石斑晶的初始结晶深度应位于上地幔, 由核部至边部辉石斑晶的结晶压力和温度逐渐降低, 温度的降低幅度明显高于压力的, 且 $\text{Al}^{\text{VI}}/\text{Al}^{\text{IV}}$ 比值表明辉石斑晶结晶倾向于由核部的“榴辉岩相”

的高压区域向边部“火山岩”区域的过渡, 单斜辉石边部可能遭受了强烈的减压熔融作用, 基于 $\text{Mg}^\#$ 所计算的 Fe-Mg 分系数表明单斜辉石斑晶的核部、边部均与玄武岩熔体平衡。熔融包裹体和激光拉曼分析结果显示, 被辉石包裹的橄榄石中 (I 型橄榄石) 熔融包裹体数量较少, 熔融包裹体中子矿物发育, 橄榄斑晶中 (II 型橄榄石) 熔融包裹体数量较多, 主要为含气相结晶质包裹体和含气相玻璃质包裹体, 辉石中熔融包裹体主要分布在幔部, 核部少量发育, 边部不发育, 核部向外由玻璃质、子晶矿物共存类型的包裹体逐渐变化为含气相及玻璃质为主的包裹体, 熔融包裹体数量和玻璃质占比远大于橄榄石斑晶中的; 辉石斑晶和橄榄石斑晶中熔融包裹体中挥发份组分主要为 CO_2 、 CH_4 及少量的 H_2O , 橄榄石中挥发份含量具有极大的不均匀性, II 型橄榄石中熔融包裹体挥发份含量和强度高于 I 型橄榄石, 辉石斑晶熔融包裹体中挥发份含量核部向边部呈增加趋势, 含挥发份的熔融包裹体数量和挥发份相对含量也远高于橄榄石中的, 熔融包裹体数量和挥发份含量表现出与矿物种类和部位具有密切联系的趋势性变化。熔融包裹体主量元素分析显示出亚碱性和碱性系列共存的特征, 单斜辉石微量元素分析也表明, 单斜辉石边部相比核部富集 LREE, 并具有与核部相似的微量和稀土元素标准化配分曲线形态, 具有 OIB 的地球化学特征, 说明边部和核部的熔体为同一来源或相似源区。单斜辉石边部的 SiO_2 含量明显低于核部, Zr/Y 比值则显示出边部高于核部, 这些特征表明形成单斜辉石边部熔体部分熔融程度低于核部, 熔融深度大于核部。同时, 辉石斑晶边部较核部 Rb、Ba、K、Pb 等流体活动性元素亏损, 说明单斜辉石边部可能遭受了交代作用。该时期中国东南部岩石圈的减薄和大规模伸展作用, 改变了岩浆上涌的方式, 岩浆演化过程中物理化学条件的变化使早期结晶的辉石发生减压重熔、重结晶。

基金项目: 国家自然科学基金 (批准号: 41173026) 和部委省级项目 (211427220555, 211427210484) 资助的成果。

作者简介: 孟乾坤(1994-), 男, 硕士研究生, 从事岩石、矿床地球化学研究。E-mail: mkuneric@163.com

通讯作者: 张贵山(1971-), 男, 教授, 从事岩石、矿床地球化学研究。E-mail: zygszh@chd.edu.cn。

基于以上对单斜辉石、橄榄石和熔融包裹体的分析结果,认为闽东北白琳镇的新生代火山岩岩浆的演化经历了同一或相似源区不同深度和熔融程度岩浆的混合作用,并且在板内裂谷的构造环境下,岩浆演化过程经历了挥发份贫瘠向富挥发份演化的过程,挥发份的大量出熔和逃逸使岩浆体系的

物理化学条件和喷发速率发生改变,使结晶于高压环境的单斜辉石斑晶核部发生自交代重熔作用,单斜辉石斑晶的边部是由辉石斑晶发生自交代作用形成的“逆反应边”,是辉石斑晶减压重熔、重结晶的产物。这为中国东南部沿海新生代火山岩成因研究提供新的制约。

• 专题 10: 岩浆的形成、演化与地球系统演变 •

岩浆补给过程对火山岩-侵入岩联系的遮蔽效应

赵凯¹, 徐夕生¹, 贺振宇², 夏炎¹

1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083

当前对火山岩和侵入岩之间联系性的争议主要集中在有效的晶体-熔体分离是否主导了晶粥的演化过程从而产生演化的、贫晶体流纹岩以及相应的堆晶残余物。然而, 晶粥的演化不可避免的受到其他动力学过程(如岩浆补给)的影响。本研究利用华南钦州湾地区出露的印支期过铝质、贫晶体流纹岩(<19 vol%)以及富晶体次火山花岗斑岩(28-54 vol%)探究过铝质火山-侵入岩之间的联系。尽管流纹岩和花岗斑岩之间存在密切的时空联系, 但这些岩石单元在哈克图解上并不遵循分离结晶的演化趋势, 也不具有相同的同位素组成, 因此, 不是典型的“时、空、源”一致的火山-侵入杂岩。利用岩石结构分析、矿物和熔体包裹体成分, 并结合石英 Ti 温压计、锆石 Ti 温度计和热力学模拟, 追溯了岩浆动力学过程, 以进一步探讨其他可能的成因联系。对于流纹岩单元, 石英广泛变化的 Ti 含量结合石英 Ti 温压计结果表明岩浆储存于多个地壳水平(图 1), 包括中地壳(>600±80 MPa)和上地壳储库(~150±40 MPa 和~60±20 MPa)。石英 Fe 含量的变化以及准铝质、富 Cl 熔体包裹体表明中、上地壳岩浆储库均发生了与准铝质岩浆的混合过程。特别地, 结晶于浅部(~60±20 MPa)的石英具有更高的铁含量, 这可能是由于补给岩浆直接注入到浅部岩浆储库所致。流纹岩全岩成分变化偏离熔体包裹体所记录的熔体演化趋势则指示了岩浆混合和

晶体-熔体分离过程的综合效应。进一步模拟结果表明从结晶度 50-60%的晶粥抽离的熔体与区域上出露的英安岩的混合趋势可以较好的符合流纹岩全岩成分。对于次火山花岗斑岩, 石英 Ti 含量揭示岩浆同样储存于不同的地壳水平, 包括中地壳(>450±70 MPa 至>550±40 MPa)和上地壳储库(~110±20 MPa 至~140±20 MPa)。斜长石小幅度的震荡环带(~5-50 μm 间距和~5-7 mol%钙长石含量变化)、石英和碱性长石广泛的熔蚀结构以及过铝质镁铁质包体的出现表明, 斑岩岩浆经历 S-型岩浆的补给过程及随后晶粥储库再活化、对流、上升并在超浅成(~2km)环境下侵位。考虑到流纹岩和斑岩岩浆通道系统的相似性, 斑岩可能代表流纹质熔体抽离之后的堆晶残余, 但是其全岩元素和同位素成分已经被改变, 因此导致了斑岩和流纹岩之间的隐性联系。另一种可能是斑岩和流纹岩岩浆的通道系统在水平方向上是独立的, 他们不同的全岩成分可能反应了源区的不均一性和不同岩浆的补给, 但这种情况与石英微量元素的变化趋势不符合。

该研究表明全岩成分可能记录了复杂岩浆过程的混合信息, 当利用全岩成分去提取单一过程的信息时应当非常谨慎, 应当采取多学科方法评估复杂岩浆过程对熔体-堆晶记录的改造程度, 而基于全岩地球化学的大数据分析应该更加谨慎对待以避免错误的理解。