

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

阿尔金地区~740Ma 基性岩墙群的发现及其对 Rodinia 超大陆裂解的制约

李艳广^{1,2,3}, 宋述光⁴, 赵子福^{3*}, 张辉善^{1,2,3}, 周宁超^{1,2}, 周辰傲⁴, 吴珍珠⁴

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054;

2. 西北地质科技创新中心, 西安 710054;

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

4. 教育部造山带与地壳演化重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

以往的工作已对阿尔金地区的大地构造格局进行了较为清晰的刻画, 对其物质组成也进行了比较详细的调查研究。近些年来, 不少学者在该地区相继报道出元古宙岩浆作用, 详细的年代学和元素、同位素地球化学指示其形成于复杂的大地构造背景。然而由于缺乏确切的裂谷相关岩浆岩的报道, 阿尔金地块是否参与了 Rodinia 超大陆旋回的问题一直没有定论。针对本次在阿尔金地区发现的基性岩墙群, 本文进行了锆石和斜锆石 U-Pb 定年研究、矿物化学、全岩主量、微量元素及 Sr-Nd 同位素研究。结果显示: 基性岩墙群的锆石和斜锆石 U-Pb 年龄分别为 (739 ± 15) Ma 和 742 ± 19 Ma; 岩石化学属性归于拉班玄武岩, 具有高含量的 Ti 元素 (2.78%~5.73% wt.), Zr/Sm 比

值为 27~37, Zr/Y 比值为 4.4~5.6, 显示出板内玄武岩的元素特征; 全岩主量、微量元素及 Sr、Nd 同位素测试结果显示该岩墙群源于软流圈地幔 3%~5% 程度的部分熔融, 源区贫石榴石 (<1%), 岩浆在上侵过程中经受了不同程度的地壳混染。这些特征, 结合野外观察和矿物化学属性, 指示本次在阿尔金地区发现的岩墙群形成于可能由新元古代地幔柱诱发的大陆裂谷环境。根据前人研究, 澳大利亚、华南、塞舌尔、劳伦古陆和塔里木地区均发现有与 Rodinia 超大陆裂解相关的基性岩墙群, 且与本次报道的阿尔金基性岩墙群年龄相近、岩石属性类似。因此, 我们认为, 位于中国西北地区的阿尔金地块参与了 Rodinia 超大陆旋回。

基金项目: 中科院战略性先导科技专项 (XDB41000000)

第一作者简介: 李艳广 (1984-), 高级工程师, 博士在读, 研究方向: 同位素地质年代学. E-mail: liyanguangok@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 赵子福 (1973-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 地球化学. E-mail: zfzhao@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

辽东-胶东半岛三叠纪镁铁质岩浆岩: 记录从洋壳俯冲到大陆碰撞的构造转换

戴立群^{1,2}, 方伟¹, 赵子福^{1,2}

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

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

大陆碰撞造山带中出露的镁铁质岩浆岩,特别是形成于洋陆转换和大陆碰撞关键时期的镁铁质岩浆岩,对理解从大洋俯冲到大陆碰撞化学地球动力学过程的转变,以及发展板块构造理论具有重要意义。通过对苏鲁造山带和华北东南缘(胶东和辽东地区)三叠纪镁铁质岩浆岩同位素年代学和地球化学的系统总结,我们概括出从大洋俯冲到大陆碰撞过程中古洋壳和大陆地壳物质再循环的岩石地球化学记录。早中三叠世洋岛型镁铁质岩浆岩属于同碰撞岩浆岩,具有

洋岛型微量元素特征和弱富集的放射成因同位素组成,记录了先前俯冲古特提斯洋壳来源的熔体与上覆地幔楔橄榄岩的相互作用;晚三叠世岛弧型镁铁质岩浆岩属于同折返岩浆岩,具有弧型微量元素特征和相对富集的放射成因同位素组成,记录了随后俯冲的华南陆壳来源的熔体与上覆华北岩石圈地幔之间的相互作用。因此,辽东-胶东半岛三叠纪镁铁质岩浆岩记录了大陆俯冲带不同类型的壳幔相互作用及其形成的化学动力学过程。

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

Provenance evolution during passive- to active-margin transition unraveled from an accretionary complex from the Bangong-Nujiang suture zone: Insights into Early Mesozoic Meso-Tethys subduction and source-area tectonics

LI Chen-wei¹, ZENG Min^{2, 3}, CHEN Si¹, JIN Xiao-yu¹, Cheng Wen-bin¹

1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, China;

3. Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny, Resources Exploration & Utilization, Ministry of Natural Resources, Kunming 650051, China

Abstract: The South Qiangtang terrane (SQT), the Tibetan representative of the Cimmerian continent, is bounded in the south by the Bangong-Nujiang suture zone (BNSZ). The BNSZ is geologically manifested by the Muganggri Group (MG) accretionary complexes developed during northward Meso-Tethyan subduction, whose timing and processes are, however, contentious. Herein, we conducted provenance analysis on the MG trench deposits, via petrography, whole-rock geochemistry and detrital-zircon geochronology. The results reveal a complete picture of provenance evolution during passive- to active-margin transition (from subduction initiation through fringing oceanic-arc, to continental-arc developments) at the SQT margin. In particular, the earliest trench deposits (subunit *Trma*; ~222 Ma), which contain olistostromes with blocks of oolitic limestone shed from the destructing SQT passive margin, mark the subduction initiation. A second subunit (*Trmb*; ~210 Ma) has periodically elevated

volcanogenic components. Conglomerates of subunit *Trmb* have abundant basaltic clasts of intra-oceanic arc geochemical affinities, which were likely derived from an intra-oceanic arc fringing the SQT. The youngest subunit (*Jmd*; ~190 Ma) exhibits enriched ferromagnesian elements and a major youngest detrital-zircon age peak, indicating a continental-arc provenance. Moreover, detrital-zircon age spectra suggest that, at ~210 Ma, the central Qiangtang metamorphic belt became an important source area, and the North Qiangtang terrane (NQT) replaced SQT as the main provenance. This is best explained by that the SQT underthrust beneath the NQT and was downwarped to form a foreland basin. Our findings confirm that the initial subduction of Meso-Tethys beneath SQT was coeval to other Cimmerian terranes, likely a uniform response to the Paleo-Tethys closure and collision between Eurasia (NQT) and Cimmeria (SQT).

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

俯冲带流体活动和性质的多同位素体系联合制约

陈伊翔*, 郑永飞

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

俯冲带是地球内部圈层与外部圈层之间进行物质循环和能量交换的关键地带。俯冲带发生的一系列地质过程都与流体活动密切相关, 因此对俯冲带流体的来源、性质以及流体-岩石相互作用的研究, 是理解壳幔相互作用、制约地球壳幔系统地球化学演化的关键所在。然而, 示踪俯冲带深部流体来源与性质存在巨大挑战。这主要是因为俯冲带中岩石类型复杂、流体活动受温度压力影响大, 同时复杂的流体-岩石相互作用也会改变流体本身的地球化学组成。

西阿尔卑斯造山带是世界上最经典的超高压变质带之一, 是现代地质学的摇篮, 有超过 200 年的研究历史。尤其是 Dora Maira 地体, 它是人类第一次在大陆碰撞带表壳变质岩(白片岩)中发现柯石英这个超高压变质矿物的地方, 开启了研究大陆深俯冲和超高压变质的序幕。该研究区出露白片岩、硬玉石英岩等典型超高压变质岩石。前人针对这个区域的岩石学、同位素年代学和地球化学以及大地构造演化等基础方面进行了较多研究, 为有效应用多同位素地球化学方法(如 Fe-Mg-O 同位素)示踪俯冲带流体活动与性质奠定了基础。

我们对西阿尔卑斯 Dora Maira 地体中超高压变

质白片岩、硬玉石英岩、围岩花岗片麻岩进行了系统的锆石学和全岩地球化学(特别是 Mg-Fe-O 同位素)分析。研究结果厘清了白片岩和硬玉石英岩的原岩属性和流体交代成因这个长期争论的问题; 揭示了形成白片岩的交代流体来自蛇纹岩脱水释放的高 $\delta^{26}\text{Mg}$ 还原性流体, 并且流体中 Fe 以 Fe(II)-Cl 和 Fe(II)-S 复合物的形式迁移; 查明形成硬玉石英岩的流体来自白片岩在超高压变质的变质脱水, 流体为含大量溶质(50~60%)、具有较高 Mg 和 Fe 含量的超临界流体。结合对东阿尔卑斯造山带的研究, 发现弧前深度蛇纹岩、含碳酸盐沉积物的脱水释放了 Mg 同位素组成具有巨大差异的两种流体。我们还把工作进一步拓展到岛弧岩浆岩的研究中, 发现其源区也可能受到蛇纹岩来源流体的显著影响。

我们的系列工作充分展示了结合金属稳定同位素和气体稳定同位素的各自优势在示踪俯冲带复杂流体来源和活动特征上的巨大潜力。同时, 在西阿尔卑斯造山带经典地区取得了创新成果, 推动了西阿尔卑斯造山带岩石成因和构造演化的新认识。以西阿尔卑斯造山带为典型对象, 剖析了俯冲带深部的流体来源、性质及多期流体-岩石相互作用过程。

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

大陆碰撞造山带同折返花岗岩的 熔体组成及其控制因素：苏鲁造山带的制约

马赫志, 陈伊翔*, 周琨, 高彭, 郑永飞

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

大陆碰撞过程中, 深俯冲大陆板片的部分熔融会对大陆地壳的地球化学分异和碰撞造山带构造演化产生极大的影响。然而很难确定地壳熔体的地球化学成分从深部到浅层侵位的变化。中国东部的大别-苏鲁造山带是一个典型的大陆造山带, 尽管前人在这个造山带发现了很多部分熔融的证据, 但这些证据主要集中于中小尺度的混合岩化现象。对大陆碰撞过程中是否发生更大规模部分熔融、熔体组成是怎样的以及熔体经历了怎样的地球化学分异特征等问题仍了解有限。为了解决这些问题, 我们对苏鲁造山带的同折返花岗岩进行了全岩 Sr-Nd-Fe 同位素、全岩石主微量元素、矿物 O 同位素、锆石 U-Pb 定年和微量元素组成的综合研究。在这个典型的大陆碰撞造山带中, 我们新发现了较大规模的三叠纪晚期花岗岩岩体, 总面积约为 10 km²。这表明在大陆碰撞末期俯冲地壳发生了大规模的部分熔融。野外观察表明, 这些花岗岩几乎没有变形结构。花岗岩具有高 K 钙碱性特征, 在微量元素上 LILE 和 LREE 富集、HFSE 亏损。样品中锆石含有残留核和增生边。锆石核部具有陡峭的 HREE 配分模式、强烈的 Eu 负异常和新元古代中期年龄, 这与大

别-苏鲁造山带超高压(UHP)变质岩的原岩特征一致。锆石边部显示出明显的振荡环带, 具有三叠纪晚期(210~216 Ma)年龄、较低的 LREE 含量和陡峭的 HREE 配分模式, 并具有明显的 Eu 负异常, 表明它们结晶自深俯冲大陆地壳折返时形成的花岗质熔体中。花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较低, 为 0.3‰~4.4‰。结合花岗岩的新元古代原岩年龄, 表明它们的原岩是扬子陆块深俯冲大陆地壳。我们首次在花岗岩的深熔锆石中发现了柯石英包裹体, 表明存在形成于超高压条件下的初始熔体, 深度大于 80 km。全岩的 SiO₂ 含量与大部分主微量元素具有很好的相关性, 表明花岗岩熔体在岩浆演化过程中受到黑云母、斜长石和钛铁矿结晶分异的影响。全岩的 Sr-Nd 同位素显示该地区花岗岩原岩一致。此外, 花岗岩的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值变化很大, 为 0.05‰~0.30‰, 且与 Fe³⁺/ΣFe, SiO₂, Al₂O₃, Nb/Ta 和 Eu/Eu* 具有显著的相关性。这表明主要是黑云母和钛铁矿的分离结晶控制了 Fe 同位素的变化。我们的工作发现了苏鲁造山带较大规模的深俯冲大陆板片的部分熔融特征和熔体组成及其控制因素, 这对理解大陆碰撞造山带构造演化以及陆壳地球化学分异具有重要意义。

基金项目: 板块构造体制下关键挥发性元素循环的过程和机理(XDB41020503)

第一作者简介: 马赫志(1995-), 博士研究生, 研究方向: 大陆碰撞造山带元素及同位素演化研究. E-mail: hzma01@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈伊翔(1983-), 教授, 研究方向: 俯冲带熔/流体地球化学研究. E-mail: yxchen07@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

变质作用对锆石 Zr 同位素的影响: 来自大别山 超高压榴辉岩中锆石的制约

陈铁男, 陈仁旭*, 郑永飞

中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 合肥 230026

高精度 Zr 同位素测试在近几年十分火热, 前人的工作主要聚焦在岩浆过程中 Zr 同位素的分馏行为, 但是其在高级变质岩中变质效应的研究仍是一片空白。我们对大别山碧溪岭超高压榴辉岩中锆石的不同区域进行了配套的 U-Pb 年龄、微量元素组成、Hf 同位素和 Zr 同位素分析, 来查明变质作用对锆石 Zr 同位素的影响。

碧溪岭榴辉岩中的锆石具有明显的核边结构: 核部 CL 图像黑暗并且富集重稀土, 明显是岩浆成因锆石的残留; 边部 CL 图像明亮, 重稀土相对平坦, 具有变质锆石的典型特征。一系列研究表明, 不同成因的锆石在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, Hf 含量, 初始 Hf 同位素组成和 Zr 同位素组成等方面具有明显的差异。与年龄较老的继承核部分相比, 年轻的变质增生边具有低的 Th/U、Zr/Hf、Lu/Hf、高的 Hf 含量、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\delta^{94}\text{Zr}$ 值。不同成因锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与 $\delta^{94}\text{Zr}$ 值存在明显的耦合: 继承核具有相对较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-2.9\sim-3.2$) 和 $\delta^{94}\text{Zr}$ ($-7.73\text{‰}\sim-0.34\text{‰}$), 而变质边具有相对较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($3.5\sim 11.3$) 和 $\delta^{94}\text{Zr}$ ($-0.55\text{‰}\sim 0.24\text{‰}$)。这表明变质作用对锆石的 Lu-Hf 同位素体

系和 Zr 同位素体系具有相似的影响。新生长的锆石变质边是矿物反应的产物, 在这个过程中, 石榴石、绿辉石、角闪石和磷灰石等其他矿物提供了放射性成因 Hf 同位素和重的 Zr 同位素, 导致锆石的变质增生边具有升高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和 $\delta^{94}\text{Zr}$ 值。因此, 高的 Zr 同位素组成可以作为一个全新的变质锆石鉴定特征。但是在应用变质岩中锆石 Zr-Hf 同位素体系进行源区示踪时, 需要排除变质效应的影响。此外, 锆石核部的 $\delta^{94}\text{Zr}$ 值均小于 0, 加权平均值为 -1.52‰ , 显著低于地幔值 (0.04‰), 并且观察到目前已知最低的 $\delta^{94}\text{Zr}$ 值 (-7.73‰)。前人的模拟研究发现, 矿物分离结晶导致的 Zr 同位素分馏很小, Zr 最主要的寄主矿物锆石发生分离结晶引起的分馏在 700°C 时仅为 -0.081‰ , 影响最大的钛铁矿 700°C 时引发的分馏也不超过 0.5‰ ; 尽管第一性原理计算结果显示扩散会产生较大的 Zr 同位素分馏, 但是锆石继承核的 Zr 同位素组成全部在地幔值以下, 说明扩散前的初始值并非为地幔值。对于锆石核部的 Zr 同位素研究表明作为碧溪岭榴辉岩原岩的镁铁质堆晶岩可能来自于显著亏损重 Zr 同位素的源区。

基金项目: 国家重点研发专项 (2018YFA0702700), 中科院先导项目 (XDB41020503, XDB18020303)

第一作者简介: 陈铁男 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 俯冲带流体地球化学. E-mail: tn0816@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈仁旭 (1981-), 教授, 研究方向: 化学地球动力学. E-mail: chenrx@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

俯冲陆壳部分熔融过程中副矿物和同位素行为

于永杰, 陈仁旭*, 郑永飞

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

了解地壳岩石在部分熔融过程中副矿物和同位素行为, 对于利用副矿物和同位素来进行岩浆岩的原岩形成时代恢复和源区示踪具有重要意义。我们在详细岩相学观察的基础上, 对北大别落儿岭混合岩进行了系统的岩石学和地球化学研究, 对这些岩石在部分熔融过程中榍石和独居石的行为和 Sr-Nd 同位素行为进行了探讨。

北大别落儿岭混合岩中浅色体主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母、铁氧化物组成, 还有少量的绿帘石、锆石、榍石、独居石和磷灰石。深色体主要由角闪石、斜长石、黑云母、单斜辉石、石英和铁氧化物组成, 还有少量锆石、榍石、磷灰石、绿泥石和金红石。深色体中角闪石含云母、长石和石英包体。Al-in-Amp 压力计和 Pl-Amp 温度计给出的温压条件为 5.6 ± 0.2 kbar 和 688 ± 25 °C。这些观察指示, 落儿岭混合岩是黑云母加水熔融成因。较粗浅色体中独居石发育核边结构。核部含锆石、磷灰石、钛铁矿和多相包体 Qz+Or、Qz+Or+Bt 和 An+Qz。边部不含包体, 具有相对核部较高的 Th 且与造岩矿物平衡接触。这些观察指示独居石核部为转熔成因, 边部为熔体结晶成因。较细浅色体中独居石含锆石、石英、磷灰石和钾长石包体, 微量元素上 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}} < 500$, $\text{Eu}/\text{Eu}^* < 0.2$, $\text{Th}/\text{U} > 20$ 且与造岩矿物平衡接触, 指示熔体结晶成因。较粗浅色体中榍石发育核边结构: 核部含较高 REE 含量 ($4895 \sim 8046 \times 10^{-6}$)、微弱的正 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.8 \sim 1.97$)、低 Th/U 比值 (0.2~0.4) 且不含包体; 边部含较低的 REE 含量 ($2066 \sim 4129 \times 10^{-6}$)、显著的正 Eu 异常 (2.6~4.1)、低且离散的 Th/U 比值

(0.2~1.5) 且含斜长石、石英和钾长石包体。前者指示变质成因, 而后者指示转熔成因。深色体中榍石含斜长石、石英和钾长石包体, 低且离散的 Th/U 比值 (0.2~3.6) 以及显著的正 Eu 异常 (1.5~5.4), 指示转熔成因。独居石、榍石 U-Pb 定年均给出 120~130 Ma 的早白垩世年龄, 指示它们为碰撞后深熔事件的产物。

深色体和浅色体之间表现为 Sr 和 Nd 同位素的不平衡, 浅色体相对深色体具有更富集的 Sr-Nd 同位素组成 ($I_{\text{Sr}}: 0.708 \sim 0.7086$ vs. $0.7063 \sim 0.7079$; $\epsilon_{\text{Nd}}(t): -20.4 \sim -17.5$ vs. $-17.1 \sim -13.7$)。浅色体中的独居石和榍石的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 达到平衡。深色体中榍石 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 具有极大的离散程度且低于全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值。独居石和榍石各自的核边之间都达到了 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的平衡。较粗的浅色体中独居石、榍石和全岩的 Sm-Nd 等时线给出 169 ± 50 Ma (MSWD = 3.8) 的年龄, 在误差内与 U-Pb 定年结果一致, 指示在深熔过程中熔体的副矿物与全岩达到了 Nd 同位素的平衡。深色体中榍石离散的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值指示, 深熔过程中残余体的副矿物间、以及与全岩间都没有达到 Nd 同位素的平衡。残余体中副矿物离散的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值既表明熔融前的高温变质作用不会造成手标本尺度上的 Nd 同位素再平衡, 也暗示不同批次熔融出来的熔体具有不同的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值。粗、细浅色体间差异明显的 Nd 同位素组成 ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = \sim 3$) 支持这一点。假设原岩侵位时各矿物间, 以及与全岩之间都达到了 Nd 同位素的平衡。后期 600-700Ma 的时间能使得不同 Sm/Nd 比值的矿物提供足够范围的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, 形成相应 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 离散程度的独居石和榍石。

*通信作者简介: 陈仁旭 (1981-), 教授, 研究方向: 化学地球动力学. E-mail: chenrx@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

造山带镁铁质岩浆岩 Mo 同位素: 记录从弧下到后弧深度的板片-地幔相互作用

方伟, 戴立群*, 郑永飞, 赵子福

中国科学技术大学地球和空间科学学院 合肥 230026

Mo 稳定同位素体系近年来被不断应用于示踪俯冲带地球化学传输过程。目前观察到, 岛弧火山岩普遍具有重的 Mo 同位素组成。但是, 轻 Mo 同位素组成的俯冲带镁铁质岩发现很少, 并且岩浆岩轻 Mo 同位素的来源目前还并不清楚。太平洋板块在中-新生代持续俯冲到华北板块之下, 导致华北陆块东部发育不同时代和不同类型的镁铁质岩浆岩。俯冲太平洋板块在不同时期所释放的熔流体性质的差异导致了中-新生代镁铁质岩地球化学组成的变化。我们对华北陆块东部中-新生代镁铁质岩展开了 Mo 同位素对比研究, 结果对大洋俯冲过程不同深度下的 Mo 同位素循环提供启示。

华北东部与古太平洋俯冲相关的中生代镁铁质岩具有岛弧型特征, 富集大离子亲石元素 (LILE) 和轻稀土元素 (LREE)、亏损高场强元素 (HFSE) 和重稀土元素 (HREE)。这些镁铁质岩具有重的 Mo 同位素组成, $\delta^{98}\text{Mo}$ 值为 $-0.15 \sim 0.09\text{‰}$, 高于正常地幔值 $-0.20 \pm 0.01\text{‰}$ 。同时具有低的 Mo/Ce 比值 $0.013 \sim 0.023$ 。

与之相对, 华北克拉通东部出露的新生代镁铁质岩普遍具有洋岛型特征, 表现为富集 LILE 和 LREE、不亏损 HFSE。这些镁铁质岩的 $\delta^{98}\text{Mo}$ 值为 $-0.53 \sim -0.19\text{‰}$, 大部分低于正常地幔值。同时具有高的 Mo/Ce 比值 $0.030 \sim 0.050$ 。中-新生代镁铁质岩 Mo 同位素组成和 Mo/Ce 比值的系统性变化指示, 俯冲太平洋板块来源物质随时间演变以不同形式加入到华北地幔楔之中。中生代俯冲太平洋板片产生重 Mo 同位素组成和低 Mo 含量的流体, 加入华北板块之下的弧下地幔, 贡献了中生代岛弧型基性岩的地球化学组成。随着太平洋板块进一步俯冲, 俯冲洋壳在后弧深度部分熔融 (金红石发生分解) 产生低 Mo 同位素组成和高 Mo 含量的长英质熔体, 加入华北板块之下的后弧地幔, 贡献了新生代洋岛型基性岩的地球化学组成。

上述研究结果指示, Mo 同位素在大洋板块从弧下到后弧深度的连续俯冲过程中会发生明显分馏。这一转变过程从 Mo 同位素角度解释了太平洋板块俯冲过程中不同深度的板片-地幔相互作用。

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

苏门答腊岛北部晚侏罗世火山岩的年代学、地球化学特征及其对中特提斯洋演化的响应

徐畅^{1,2}, 王岳军^{1,2*}, 钱鑫^{1,2}, 张玉芝^{1,2}, 余小清^{1,2}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 珠海 519082;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082

苏门答腊岛位于印度尼西亚最西端, 地处马来半岛以南、印度洋以东, 该岛也位于环南海和特提斯两大构造域的交汇部位, 长期被认为是探讨板块构造和超大陆重建的关键地区 (Hall, 2012)。前人的研究认为, 苏门答腊岛中生代的构造-岩浆作用受控于特提斯洋演化 (Metcalfe, 2005; 张海坤等, 2017; Zhang et al., 2019; Zhang et al., 2020)。因此, 为了厘定苏门答腊岛中特提斯洋构造演化过程, 查明中生代时期火成岩的形成时代、岩石成因和构造背景, 我们在苏门答腊岛北部 Glebruk 地区开展了野外调查, 并识别出了一套中生代的玄武-安山岩组合。并系统开展了岩相学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学和矿物化学、锆石原位 Hf 同位素地球化学、以及全岩主微量和 Sr-Nd 同位素地球化学研究。

研究表明, 该套火山岩中玄武岩及玄武安山岩的锆石 U-Pb 年龄均为 146 ± 4 Ma (MSWD = 0.54) 和 146 ± 3 Ma (MSWD = 0.21), 为晚侏罗世。该套

火山岩具有典型的岛弧型地球化学特征, 富集 Rb、Th、U、Sr 等大离子亲石元素, 亏损高场强元素。样品具有较低的初始($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值 (0.7038~0.7048) 和正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+6.4~+7.5)。锆石原位 Hf 同位素同样呈现出较为亏损的特征, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +4.8~+13.2。地球化学研究表明该套中-基性火山岩是由板片熔体交代亏损的地幔楔源区部分熔融的产物, 形成于大陆边缘弧背景。

已有的研究表明, 苏门答腊岛和其外侧的 Woyla 弧之间存在一个有限洋盆, 被称之为 Woyla 洋 (Metcalfe, 2005; Barber and Crow, 2009; Zhang et al., 2019)。部分学者认为 Woyla 洋可能代表了班公-怒江中特提斯洋的南延 (Metcalfe, 2005)。我们的研究表明该套晚侏罗世火山岩是 Woyla 洋向苏门答腊俯冲的弧岩浆作用的产物。通过和与中特提斯洋相关的弧岩浆岩作用的对比, 我们认为中特提斯洋的俯冲作用从青藏高原的班公-怒江地区经过西缅甸, 最终南延进苏门答腊北部。

基金项目: 国家自然科学基金 (41830211, U1701641, 42072256), 广东省基础与应用基础研究基金 (2018B030312007, 2019B1515120019)

第一作者简介: 徐畅 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 岩石地球化学和岩石大地构造研究. E-mail: xuch33@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者简介: 王岳军 (1969-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学和岩石大地构造研究. E-mail: wangyuejun@mail.sysu.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

华北中部太岳地区古元古代低 $\delta^{18}\text{O}$ 岩浆岩成因及其区域构造意义

王玺¹, 朱文斌¹, 郑永飞²

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 210093;

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

华北中部太岳杂岩同时记录了~2.3 Ga 和~2.2-2.1 Ga 两期岩浆活动, 以后者为主导, 包括 2.18~2.16 Ga 的富钾花岗岩、2.18~2.17 Ga 的闪长岩和 (2.17~2.11) Ga 的基性岩堆晶, 这些岩石侵入到 2.34~2.31 Ga 的花岗岩和闪长岩中。两期花岗岩多为高温富铁的 A 型花岗岩。闪长岩、基性岩堆晶, 与区域上 2.2~2.1 Ga 的基性岩墙具有连续变化的化学成分, 都具有岛弧型微量元素分布特征, 且锆石 Hf 和全岩 Nd 同位素组成一致, 属于同一岩浆演化序列。2.18~2.16 Ga 的花岗岩也具有与之一致的 Hf-Nd 同位素组成, 很可能是其岩浆分异的产物。

~2.3 Ga 的花岗岩和闪长岩相对于 2.2~2.1 Ga 岩石具有略富集的锆石 Hf 同位素组成, 说明岩浆成分中含有太古宙基底物质的贡献。2.31 Ga 花岗岩中的锆石具有不均匀低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的特征, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 3.44‰~5.53‰, 平均为 $4.67\pm 0.32\%$, 说明在锆石结晶之前岩浆源区地壳曾发生高温热液蚀变作用。高温热液蚀变最有可能发生在早古元古代大陆张裂环境。陆壳快速拉张所产生的大量脆性断裂, 使大气水可以渗透至地壳深部 10~15 km, 同时为岩浆的上升提供了有利通道。大陆张裂产生的高热梯度促使地壳在 10~15 km 深度发生不均匀的高温热液蚀变作用, 而大陆张裂的

扩张则使这些地壳随后被埋深发生部分熔融。所产生的不同批次的熔体具有不同的氧同位素组成和锆石饱和程度, 它们在浅部迅速聚集最终形成在手标本尺度不均匀低 $\delta^{18}\text{O}$ 的锆石。

在 2.18 Ga 的富钾花岗岩中, 少量锆石也具有低 $\delta^{18}\text{O}$ 值, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 3.64‰~5.95‰, 平均为 $5.06\pm 0.27\%$ 。同期中基性岩则总体上具有地幔氧同位素组成。虽然在位置上相互毗邻, 但是 2.2~2.1 Ga 岩石中的锆石无论在 $\delta^{18}\text{O}$ 颗粒的数量或者亏损 ^{18}O 的程度上都明显弱于~2.3 Ga 岩石, 说明研究区很可能只经历了早古元古代这一期高温热液蚀变作用, 而 2.2~2.1 Ga 岩浆岩中的低 $\delta^{18}\text{O}$ 信号仅来源于被深埋的~2.3 Ga 岩石。

锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素特征表明, 华北中部在早古元古代~2.3 Ga 很可能为大陆张裂, 裂谷规模至少从华北南缘延伸至太岳地区。2.2~2.1 Ga 时期虽然有大量指示地壳伸展的证据, 却未发现高温热液蚀变的证据, 低 ^{18}O 特征反映的是对早期蚀变地壳氧同位素特征的继承。太岳地区 2.2~2.1 Ga 的岩石组合具有大陆弧地壳特征, 说明这时期的伸展可能是大陆弧背景下的地壳拉张。华北中部 2.3~2.1 Ga 很可能经历了由裂谷向俯冲的转变。

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

南祁连蛇绿岩和岛弧火山岩中的碳酸岩包体： 俯冲带参与碳循环的佐证

温涛，宋述光*

北京大学 北京 100871

前人研究表明碳酸岩浆来源于地幔柱影响或俯冲板片交代的岩石圈地幔。我们在南祁连拉脊山寒武纪蛇绿岩和奥陶纪岛弧火山岩中发现了一些碳酸岩包体，这对俯冲带碳循环的研究具有积极作用，同时对更好理解洋壳俯冲过程具有重要意义。

南祁连造山带主要由寒武纪（525~500 Ma）地幔柱型蛇绿岩和奥陶纪（450Ma）洋内岛弧火山岩组成。在蛇绿岩中的枕状玄武岩中存在一些粒径达 1~2mm 的碳酸岩包体，在岛弧火山岩组合中的高铝安山岩和富辉橄玄岩中也发现有长度 100~2500 μm 大小不一的碳酸岩包体。碳酸岩均由较为纯净的方解石组成，部分包体中具有磷灰石、褐帘石、榍石等副矿物。这些碳酸岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$ 值分布在 0.70405~0.70698，集中在 0.705 左右，具有 EM I 地幔端元的特征，并受到一定海水或俯冲流体的影响。C 同位素呈现由地幔特征向沉积特征演变的趋势（ $^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -9.008 \sim -0.979$ ），可能是分离结晶或脱气等过程导致的。落在火成碳酸岩范围内。

由于全岩微量元素显示 Pb 和 Sr 没有异常，故认为本文中枕状玄武岩几乎没有遭受海水蚀变，结合玄武岩中碳酸岩包体的 Sr-C-O 同位素和微量元素的特征，可推测碳酸盐化的岩浆（或流体）来源于岩浆源区，随地幔柱上升至近地表，随着压力的降低发生液态不混溶作用，呈包体状喷出地表。富辉橄玄岩中的

碳酸岩包体 REE 总量很低，这与一些学者认为的由地幔派生的初始碳酸岩熔体具有低 REE 含量相符；HREE 含量相对偏高，这可能与方解石结晶过程中 HREE 的分配系数高于 LREE 有关。高铝安山岩中的碳酸岩包体稀土配分模式多变，但大致显示出轻稀土富集，重稀土亏损的特征，并出现了褐帘石等稀土矿物，表明碳酸岩浆经历了一定程度的后期演化而造成 REE 富集和轻重稀土分异，并可能经历了一定程度的俯冲板片流体交代，导致 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$ 略微提高；根据瑞利分馏模型，岛弧火山岩中的碳酸岩包体的 C-O 同位素特征符合方解石分离结晶的演化模式。此外，前人研究表明拉脊山富辉橄玄岩和高铝安山岩为一套岩浆序列的不同演化阶段的产物，其中富辉橄玄岩更接近原始岩浆，这与本文中碳酸岩的演化特征是相符的。

南祁连增生杂岩带的形成与特殊的洋底高原阻塞构造有关。我们推测，在寒武纪（525~500Ma）期间地幔柱携带着古老洋壳俯冲（或拆沉）形成的 EM I 特征的碳酸岩浆（或流体）上升形成了拉脊山地幔柱型蛇绿岩中的碳酸岩包体。在此期间，部分中上地幔被地幔柱中的 EM I 组分影响，新俯冲形成后受板片流体交代，在奥陶纪（约 450Ma）形成大规模 IBM 型岛弧火山岩浆，以包体的形式携带这些 EM I 特征的不同演化程度的碳酸岩浆（或流体）上升至地表，形成独特的岛弧区碳酸岩。

第一作者简介：温涛，博士研究生，研究方向：岩石与大地构造. wentao1996@pku.edu.cn

*通信作者简介：宋述光，教授，研究方向：岩石与大地构造. sgsong@pku.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

埃达克质岩浆成因的新制约

肖媛媛^{1,2*}

1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 青岛 266061

最初认为埃达克质岩浆源于俯冲的年轻洋壳部分熔融, 然而对其成因的深入理解却仍存在较大争议。所以, 本研究对比分析了北祁连造山带一套具有埃达克质特征(曲目山岩体)和一套不具有埃达克质特征(宝积山岩体)的花岗岩类岩石和其中铁镁质暗色包体(MME)。通过系统分析各组成矿物的主、微量元素, 揭示了同碰撞花岗岩类及其暗色包体中各微量元素的主要赋存矿物, 发现了榍石、磷灰石等副矿物和主要造岩矿物一样, 可以具有很强的元素赋存能力。鉴于花岗岩类与所含暗色包体中的矿物种类和矿物成分相似、但矿物含量不同, 从矿物学的角度验证了暗色包体与花岗岩类都源于俯冲洋壳的部分熔融, 而前

者是早期堆晶的产物, 验证了“大陆碰撞带为陆壳增长主要场所”这一假说。而曲目山岩体和宝积山岩体虽然同为同时期、同构造背景下形成的同碰撞花岗岩类, 但二者矿物组合不同, ——前者普遍含有榍石; 并具有不同的地球化学特征, ——曲目山岩体特有埃达克质岩类特征(高 Sr/Y、La/Yb 比值)。结合原始岩浆成分模拟, 揭示了曲目山岩体不同于宝积山、高 Sr/Y、La/Yb 比值的特征是由于母岩浆高 Sr/Y 和 La/Yb 比值的成分与榍石等矿物结晶分异共同作用的结果。从而提出, 埃达克质岩浆的形成受控于母岩浆成分和其所引起的不同矿物的结晶分异过程, 而决定二者的最终原因是俯冲洋壳成分的不均一性。

基金项目: 玻安岩成因研究及其地球动力学意义——以塞浦路斯 Troodos 地区、北祁连山大盆大坂地区及 Bonin 弧前 Hahajima 海山玻安岩为例(41776069)

*通信作者简介: 肖媛媛(1983-), 研究员, 研究方向: 俯冲带化学地球动力学. E-mail: yuanyuan.xiao@qdio.ac.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

印尼北苏拉威西岛晚中新世闪长岩的地球化学特征、岩石成因及其构造启示

卢向红¹, 钱鑫^{1,2*}, 王岳军^{1,2}, 甘成势¹, 张玉芝^{1,2}, 吴赛男¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 珠海 519082;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082

苏拉威西岛位于印度尼西亚群岛的东侧, 在大地构造位置上处于欧亚、印澳和太平洋三大板块的交汇之处。该地区自中生代以来遭受了陆块裂离、板片俯冲、增生和碰撞等多期构造事件, 是研究俯冲带岩浆活动的天然实验室。北苏拉威西岛目前受到了西里伯斯板片南向和马鲁古板片西向的双重俯冲, 保存了大量新生代的岩浆作用, 一般认为该地区不存在中生代及之前的古老陆壳基底岩石。但目前关于北苏拉威西岩浆岩的年代学、地球化学和岩石成因等的研究较为匮乏, 已有的研究也都集中于少量的 K-Ar 年龄。最近, 我们在北苏拉威西哥伦打洛省中部蒂拉穆塔地区识别出了出露完好的闪长岩组合, 并系统开展了岩相学、年代学及地球化学研究, 进而阐明其岩石成因及构造意义。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学结果显示其形成年

龄为(9.9~10.3)Ma, 为晚中新世早期, 与区域 M.Polve 等报道的 K-Ar 年龄数据相一致 (M. Polve et al., 1997)。它们的 SiO₂ 含量变化范围为 53.81 wt%~59.90 wt%, MgO 含量变化范围为 3.27 wt%~4.27 wt%, 并富集大离子亲石元素和轻稀土元素而亏损高场强元素, 具显著的 Nb、Ta 和 Ti 负异常, 其 Nb/La (0.30~0.39)、Nb/U (3.42~9.44) 和 Ce/Pb (1.45~3.34) 的比值均较低, 具有与岛弧岩浆岩相类似的地球化学组成特征。该套闪长岩的初始(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值较低为 0.704981~0.705094, 其 εNd(t) 值为 +5.4~+5.6, 锆石原位 εHf(t) 值介于 +10.4 与 +16.9 之间, 显示其源区具有亏损地幔的同位素组成特征。元素-同位素地球化学特征表明, 北苏拉威西中部这套闪长岩可能是来自亏损地幔源区并受俯冲流体交代的新生性地壳发生部分熔融的产物, 形成于与西里伯斯板片俯冲后撤相关的伸展背景。

基金项目: 国家自然科学基金(41830211, U1701641, 42072256); 广东省基础与应用基础研究基金(2018B030312007, 2019B1515120019)

第一作者简介: 卢向红(1997-), 博士研究生在读, 研究方向: 地球化学和岩石大地构造. E-mail: luxh9@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者简介: 钱鑫(1988-), 副教授, 研究方向: 岩石大地构造. E-mail: qianx3@mail.sysu.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

大陆俯冲带非生物成因甲烷的形成：来自毛屋造山带橄榄岩中甲烷包裹体的制约

苏懿¹, 李姝宁^{1,*}, 陈仁旭², 郑永飞^{1,2}

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院 北京 100871;

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

甲烷的非生物成因机制对于地球和类地行星早期生命的起源与演化具有指示性意义。俯冲带中非生物成因甲烷, 可以通过蛇纹石化或还原性流体与富铁碳酸盐反应形成, 但并不局限于这两种方式。我们在大别毛屋造山带橄榄岩的交代成因菱镁矿中发现具有负晶形的原生甲烷+石墨包裹体, 提出俯冲板片释放的含碳流体对地幔楔的交代作用及其过程中流体的演化, 可以成为俯冲带非生物生烃的新机制。

作为典型的幔源造山带橄榄岩, 毛屋造山带橄榄岩普遍发育厘米尺度平行条带状的交代结构, 其成分依次为: 纯橄岩-斜方辉石岩脉-单斜辉石岩脉-菱镁矿脉。四种岩性分带间含碳量依次增加, 斜方辉石 $Mg^{\#}$ 从纯橄岩边界至单斜辉石岩脉边界连续性降低, 说明含碳流体对纯橄岩交代过程中元素发生了分化迁移。交代矿物钛斜硅镁石和菱镁矿彼此共生。白云石的缺失表明交代作用发生在超高压条件。钛斜硅镁石氢同位素及菱镁矿团簇同位素均指示其应为高温下橄榄石与含 $CO_3^{2-}-H_2O$ 流/熔体作用的产物。

橄榄石和钛斜硅镁石中析出的针状磁铁矿和钛铁矿及石榴石颗粒中富铬环带, 均指示了原岩中变价金属因流体的氧化导致的价态升高, 这促进了流体中水的还原和 H_2 的释放, 从而可将菱镁矿原位还原形成甲烷和石墨。菱镁矿全碳(含甲烷+石墨包裹体)同位素除了一颗含包裹体较多的菱镁矿 $\delta^{13}C = -7.97 (\pm 0.1, 2\sigma)\%$, 全碳 $\delta^{13}C$ 平均值在 $-2.89 \pm 0.69\%$ (此处为外精度, $n = 7$)。这说明菱镁矿中甲烷包裹体的碳同位素差异不大, 可以排除甲烷在浅表位置后期被包裹的可能。毛屋橄榄岩中交代锆石的 U-Pb 年龄在 $205 \sim 308 \pm 5 Ma$, 其中发育菱镁矿+辉石包裹体的锆石 U-Pb 年龄为 $226 \sim 220 \pm 6 Ma$, 表明含碳流/熔体交代时间为深俯冲大陆板片峰期变质时期或折返初期。

本研究表明, 深俯冲大陆板片释放的含碳流体的交代作用可以改变地幔楔的物质组成及氧化还原状态; 同时, 碳质流体自身的演化可以形成非生物甲烷, 这将深化对于大陆俯冲带深部碳活动性及形态的认识。

基金项目: 国家自然科学基金面上: 大别-苏鲁造山带橄榄岩中微量碳含量和碳氧同位素地球化学研究(4187030153)

第一作者简介: 苏懿(1997-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学. E-mail: suyi@pku.edu.cn

*通信作者简介: 李姝宁(1986-), 助理研究员, 研究方向: 同位素地球化学. E-mail: shuningli@pku.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

富铁锰硅质岩：俯冲带主要氧化剂及其地幔贡献

宋述光^{1*}, 叶诗婷¹, Mark B. Allen², Yaoling Niu², 孙卫东³, 张立飞¹

1. 北京大学地空学院, 北京 100871;

2. Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK;

3. Center of Deep Sea Research, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

连接地球表面和深部的板块俯冲带对重塑地幔的氧化还原状态起关键作用。普遍认为俯冲带之上的地幔楔及其岛弧火山岩具有比其他构造背景更高的氧逸度, 但其原因具有强烈争论。现代和古大洋均沉积岩通过祁连山高压变质带中富锰硅质岩的变质作用研究, 我们展示了远洋沉积岩在进化变质过程是一个还原反应的过程, 通过变质反应形成锰铝榴石、蔷薇辉石、红帘石/锰帘石、硬玉/霓石等高压相变质矿物, 是富锰硅质岩原岩中 Mn (4+) 形成 Mn (2+),

从而释放出大量 O 和 H₂O。在全球范围内, 通过俯冲带全球 Mn 通量计算, 富铁锰远洋沉积岩沿俯冲带进化变质过程的氧化还原反应可以每年产生氧气为 ($\sim 1.27 \times 10^{12} \text{ g year}^{-1}$), 如此高的氧通量能够使地幔楔和岛弧火山岩的氧逸度远高于大洋地幔源区。但是, 在俯冲带氧化还原过程中, Fe 基本上保持 Fe(3+) 不变, 形成霓石、赤铁矿等至少在 100km 深度的稳定矿物, 对浅部俯冲带氧化的贡献有限, 但可以通过俯冲带将把 Fe (3+) 携带到深部地幔。

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

蚌埠五河地区白垩纪花岗岩地球化学特征及其与成矿关系

李超, 闫峻*

合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009;

蚌埠隆起位于华北克拉通东南缘, 东侧以郟庐断裂带为界, 向南距离大别造山带约 150 km。中生代期间, 郟庐断裂带发生的两次左行平移将苏鲁-大别造山带错开了约 400km (Zhao et al., 2016; Zhu et al., 2018), 因此蚌埠隆起和胶北隆起在三叠纪之前可能属于同一构造位置 (朱光, 1999)。随着本地区众多金矿床 (如荣渡、江山、河口等金矿) 的陆续发现, 很多学者认为蚌埠-五河金成矿带是招远-掖县金成矿带在郟庐断裂带的西延 (朱光, 1999; Chen et al., 2020), 暗示蚌埠隆起区的金成矿作用与岩浆活动密

不可分。

笔者对相关金矿床进行了野外勘查及钻孔编录发现, 金矿体与同期或稍早形成的岩浆岩具有密切的时空关系, 局部甚至可见金矿体侵入到花岗质岩石中。然而, 前人对于此阶段花岗岩的研究仅停留在岩石成因层面, 对于不同类型花岗岩的成矿性研究尚为空白。由于本阶段岩浆活动强烈, 各种类型的花岗岩分布广泛, 因此识别出与成矿相关花岗岩并阐明其与金矿化的关系对于未来的矿产勘查具有重要意义。

表 1 蚌埠-五河成矿带早白垩世花岗岩成岩年龄统计

位置	岩性	性质	年龄 (Ma)	方法	来源
荆山岩体	花岗闪长岩	埃达克质	123±4	SHRIMP	Liu et al. (2012)
淮光岩体	花岗闪长岩	埃达克质	118±3	LA-ICP-MS	Liu et al. (2012)
女山岩体	正长花岗岩	埃达克质	130±3	LA-ICP-MS	Yang et al. (2010)
九华山岩体	花岗闪长岩	埃达克质	115±3	LA-ICP-MS	本文
江山金矿	花岗斑岩	埃达克质	117±2	LA-ICP-MS	本文
曹山岩体	二长花岗岩	钙碱性	109±3	LA-ICP-MS	本文
锥山岩体	二长花岗岩	钙碱性	112±1	SIMS	Liu et al. (2012)
	二长花岗岩	钙碱性	114±0.8	LA-ICP-MS	本文
	花岗斑岩	钙碱性	114±0.9	LA-ICP-MS	本文
东芦山岩体	闪长玢岩	钙碱性	113±0.7	LA-ICP-MS	本文
	钾长花岗岩	钙碱性	113±0.8	LA-ICP-MS	本文

本次研究总共从蚌埠-五河成矿带采集了 32 个白垩纪花岗岩样品, 包括九华山和淮光花岗闪长岩, 锥山和曹山二长花岗岩, 东芦山闪长玢岩、钾长花岗岩、二长花岗岩、花岗斑岩, 以及大巩山和江山花岗斑岩。根据成岩时代、地球化学特征、以及同位素组成的差异, 上述样品被划分为了钙碱性花岗岩和埃达克质花岗岩两种类型。其中钙碱性花岗岩主要形成于 109~114 Ma, 广泛分布于研究区中, 但在野外未见其与金矿体有紧密空间关系。地球化学数据显示, 钙碱性花岗岩具有低的 Sr/Y (6.0~40.5)、La_N/Yb_N

(6.8~24.7)、Dy_N/Yb_N (0.90~1.28) 比值, 并显示负 Eu 异常, 还具有相对均一且低的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素组成 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (t)= 0.7082~0.7085; ε_{Nd} (t)= -22.7~-17.7; ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (t)= 16.69~16.71; 锆石 ε_{Hf} (t)= -24.9~-19.0), 上述特征表明它们起源于华北克拉通的中下地壳, 而不是加厚地壳。而蚌埠埃达克质花岗岩形成于 115~130Ma, 钻孔观察显示其与金矿体具有密切的时空关系。其富集轻稀土、亏损重稀土 (La_N/Yb_N = 30.5~66.2)、未显示 Eu 异常, 并且其具有高 Sr、低 Y 和 Yb 含量、低的 Mg#值

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: JZ2022HGQB0215); 中国博士后科学基金 (批准号: 2022M710994)

第一作者简介: 李超 (1992-), 男, 博士, 研究方向: 燕山期岩浆作用及成矿. E-mail: hanliule@163.com

*通信作者简介: 闫峻 (1966-), 男, 教授, 研究方向: 燕山期岩浆作用及成矿. E-mail: jyan-hut@163.com

(38~42)、具有变化范围较大的 Sr–Nd–Pb–Hf 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (t) = 0.7083\sim 0.7111$; $\epsilon_{\text{Nd}} (t) = -22.2 \sim -14.9$; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} (t) = 17.22\sim 18.01$; 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}} (t) = -21.0 \sim -12.3$), 表明蚌埠埃达克质花岗岩起源于华南或/和华北板块加厚下地壳。此外, 与钙碱性花岗岩相比, 蚌埠埃达克质花岗岩具有更高的锆石 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 比值和磷灰石 SO_3 含量、具有更低的磷灰

石 MnO 含量以及更高的磷灰石 molar OH/F 和 molar Cl/F 比值, 这些矿物学特征表明埃达克岩浆比钙碱性岩浆具有更高的挥发分含量和氧化性, 这种特点有利于金等成矿物质的运输与富集。综上所述, 通过野外观察和地球化学数据分析, 本文认为具有俯冲华南板块物质属性的埃达克质花岗岩为蚌埠五河地区的成矿相关岩浆岩。

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

弧后盆地从初始裂解到海底扩张的转变：来自中国中部 秦岭造山带古生代基性岩浆岩的制约

常欢, 胡畔, 吴元保*

中国地质大学(武汉)地球科学学院 武汉 430074

弧后盆地从初始裂解到形成扩张洋盆的过程, 对于重建俯冲的演化历史、制约构造转换的时限以及理解地壳的生长演化规律具有重要意义。然而在经历后期造山作用的改造和叠置后, 这种转化过程在古老岛弧体系中很难被制约。秦岭-桐柏造山带是东亚最重要的造山带之一, 在早古生代发育与原特提斯洋俯冲有关的沟-弧-盆体系, 其中二郎坪作为其中较为典型的弧后盆地, 记录了从岛弧向弧后盆地的转化。为了查明二郎坪弧后盆地的构造演化过程, 本文以二郎坪单元中的基性岩脉为研究对象, 进行系统的全岩地球化学和锆石 U-Pb-Hf-O 同位素分析。原位 SIMS 锆石 U-Pb 定年结果表明基性岩脉的形成时间为 454 ± 2 Ma。基性岩脉具有钙碱性的全岩组分, 显示高的 K_2O 含量(1.16–3.16 wt.%), 并以富集大离子亲石元素(LILE), 亏损高场强元素(HFSE), 相对高的初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ (0.7049–0.7059) 比值, 略微亏损的 Nd-Hf 同位素组成以及类似正常地幔锆石的 $\delta^{18}O$ 值 ($5.0 \pm$

0.1‰) 为特征。这些地球化学特征显示基性岩脉是由俯冲板片流体交代上覆地幔楔发生部分熔融形成的。根据已报道的结果, 二郎坪单元中出露的 ca. 440 Ma 辉长岩具有拉斑玄武质的全岩组分, 与基性岩脉相比, LILE 的富集程度较低, HFSE 的亏损程度较低, 具有更加亏损的 Nd-Hf 同位素组成, 这些地球化学特征显示辉长岩来源于更加亏损的地幔源区, 并且表现出较为典型的弧后盆地玄武岩(BABB)的特征, 代表二郎坪弧后盆地打开过程中地幔源区有软流圈物质以及少量俯冲组分加入。从基性岩脉到辉长岩, 它们的地球化学性质显示出从岛弧玄武岩(IAB)到 BABB 的系统转变, 类似的演化规律与经典的弧后盆地如 Lau Basin、Mariana Trough 等类似。因此我们认为 454 Ma 的基性岩脉记录了二郎坪弧后初始裂解阶段, 随后 ca. 440 Ma 辉长岩记录了弧后盆地扩张阶段, 这为研究其他增生造山带中弧后盆地的演化提供了范例。

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

蛇纹岩的 Mo 同位素组成

代富强^{1*}, 陈伊翔², 陈仁旭², 赵子福², 李杰³, 王煜³

1. 河海大学 海洋学院, 南京 210098;

2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

3. 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

岛弧玄武岩富集流体活动性元素, 这些流体活动性元素的来源还具有争议。传统观点认为这些流体来自俯冲洋壳, 然而越来越多的研究表明俯冲蛇纹岩才是主要流体来源, 但是如何识别这些流体来源面临着诸多挑战。Mo 同位素的发展为解决这一问题提供了新的工具。地幔源区受到流体交代强烈的岛弧玄武质熔岩通常具有重 Mo 同位素, 俯冲洋壳在弧前深度脱去重 Mo 同位素, 俯冲洋壳在弧下深度脱出流体无法解释岛弧玄武质熔岩的重 Mo 同位素。蛇纹岩可以含有相当多含量的 Mo 元素和挥发分, 是岛弧玄武质熔岩重 Mo 同位素的可能来源。但是目前对蛇纹岩的 Mo 同位素组成还知之甚少。因此我们分析了 South Sandwich 海沟-转换断层接触带洋底蛇纹岩、阿尔卑

斯造山带变蛇纹岩高压脉体和变橄辉岩的 Mo 含量和 Mo 同位素组成。这些样品大部分具有重 Mo 同位素组成 ($\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{NIST3134}}$ 从 -0.23‰ 到 1.84‰) 和低 Ce/Mo、Ce/Pb 比值, 与榴辉岩相变玄武岩和变泥质岩的 Mo 同位素组成和 Ce/Mo、Ce/Pb 比值具有明显差别。这些结果表明蛇纹岩和蛇纹岩来源流体是岛弧玄武质熔岩重 Mo 同位素的主要来源。结合 Mo 同位素、Ce/Mo 和 Ce/Pb 比值, 蛇纹岩在弧下深度脱出重 Mo 流体或者底劈上升熔融能解释岛弧玄武质熔岩的重 Mo 同位素特征。我们进一步认为, 俯冲蛇纹岩的重 Mo 同位素与俯冲洋壳的轻 Mo 同位素相抵消, 才能保证 35 亿年以来地幔的 Mo 同位素组成基本保持不变。

*第一作者与通讯作者简介: 代富强 (1989-), 讲师, 研究方向: 地球化学. E-mail: fqdai@hhu.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

古大洋俯冲带镁铁质岩浆岩: 记录不同深度、不同性质壳幔相互作用

戴立群^{1,2*}, 方伟¹, 赵子福^{1,2}

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

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

自从板块构造理论建立以来, 国际上对俯冲带壳幔相互作用的研究主要集中在现代大洋俯冲带, 如环太平洋俯冲带。大洋俯冲带岛弧岩浆作用记录了俯冲洋壳物质再循环。相对于现代大洋俯冲带, 人们对古大洋俯冲带壳幔相互作用的研究相对薄弱。在古老造山带的形成过程中, 涉及到从洋壳俯冲到陆壳碰撞等一系列的造山作用过程, 与此同时也会产生大量的长英质和镁铁质岩浆岩, 它们是我们研究古俯冲带壳幔相互作用的理想对象。因此, 我们需要理解地质历史时期古洋壳和古大陆地壳再循环过程和机制是怎样的? 我们需要识别和区分古大洋俯冲带不同深度、不同性质熔流体交代作用?

我们通过对典型古老造山带中出露的不同性质的镁铁质岩浆岩进行了系统的岩石地球化学分析, 包括全岩主微量元素、放射性成因同位素和金属稳定同

位素(Li-Mg-Mo)分析, 识别和区分出古洋壳来源的不同深度的壳幔相互作用, 包括: (1) 利用岛弧型的微量元素特征和重 Mo 同位素组成, 结合微量元素和同位素模拟计算, 识别出弧下深度古洋壳物质再循环; (2) 利用洋岛型微量元素特征和轻 Mo 同位素组成, 识别出弧下深度古洋壳物质再循环。此外, 我们还进一步识别和区分出不同性质壳幔相互作用, 包括: (1) 利用全岩放射性成因同位素、Li 同位素、锆石 Hf-O 同位素, 并结合微量元素和同位素定量模拟, 可以区分出玄武质洋壳流体 vs. 沉积物流体交代作用; (2) 利用全岩主微量、特别是放射性成因 Sr-Nd-Hf 同位素和 O 同位素, 可以区分出玄武质洋壳熔体 vs. 沉积物熔体交代作用; (3) 结合岩相学特征、全岩主微量以及 Mg-Li 同位素, 可以有效识别和区分硅酸盐熔体 vs. 碳酸盐熔体交代作用。

基金项目: 造山带镁铁质岩浆作用 (41822302)。

第一作者简介: 戴立群 (1986-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: lqdai@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 戴立群 (1986-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: lqdai@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

华北克拉通深部过程与胶东巨量金成矿

汪在聪^{1*}, 杨进辉², 王焰³, 宗克清¹, 程怀¹, 汪翔¹, 许喆¹,
蔡亚春², 郭敬辉², 刘艳红², 马亮³

1. 中国地质大学(武汉), 地球科学学院, 武汉, 430074;

2. 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;

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广州, 510640

华北东部在早白垩世爆发性(120 Ma)地形成了大规模金矿床, 仅胶东矿集区就已探明 5000 余吨黄金储量, 中国科学家将此总结为克拉通破坏型金矿床或交代地幔活化成矿, 认为受到多期次俯冲交代的华北克拉通岩石圈地幔提供了金和迁移金的挥发分。胶东金成矿可能是世界上阐明交代岩石圈地幔控制巨量金矿床理论的最佳实例之一。然而, 受到强烈交代的岩石圈地幔是否富含金, 以及交代岩石圈地幔对金成矿贡献的具体机制仍然不清楚。另一方面, 也有不少学者认为胶东金矿的金主要来源于前寒武地壳变质基底或中生代幔源底侵岩浆, 而与交代地幔无关。针对这些亟待解决的重要科学问题, 我们开发了低本底高精度准确测试金含量的方法, 通过剖析华北克拉通地壳和地幔长期演化如何控制胶东巨量金成矿, 来完善交代岩石圈地幔控制巨量金成矿的前沿理论。

胶东地区前寒武变质基底均含有极低的金含量, 证实了华北克拉通前寒武高级变质作用已使地壳基底极度亏损金, 难以作为胶东中生代金矿的主要金来源。成矿前的玲珑花岗岩和郭家岭花岗闪长岩也具有

非常低的铜银金和硫含量, 进一步证明其主要源区(胶东古老下地壳)也高度亏损金。此外, 郭家岭花岗闪长岩包裹的同期镁铁质包体不含硫化物, 极度亏损金和硫等成矿元素, 反映了受中生代幔源岩浆底侵的胶东深部地壳并未发生硫化物和金的预富集。因此, 胶东地壳在长期演化过程中并未出现金的显著富集, 难以作为胶东金矿的主要金来源。

我们进一步从时间演变和空间变化的角度系统研究了华北岩石圈地幔橄榄包体和中生代幔源岩浆岩, 发现华北岩石圈地幔并未因长期交代而异常富集金, 从太古代到新生代的地幔橄榄岩金含量与世界其他地区的地幔都没有显著区别。幔源岩浆岩的金含量也不高(整体 1-4 ng/g)。结合胶东金矿床中成矿流体具有明显的地幔挥发分贡献, 我们提出金在交代岩石圈地幔以及幔源初始岩浆中的异常富集并不是形成大规模金矿床的关键因素, 其中交代来源的挥发分起着关键作用。这些工作促进了对克拉通壳幔长期演化控制巨量金成矿机制的认识, 丰富了交代岩石圈地幔控制巨量金成矿理论。

基金项目: 深地资源勘查开采国家重点研发计划子课题(No. 2016YFC0600103); 国家自然科学基金项目(No. 41722302, 41673027)

第一作者简介: 汪在聪(1985年-), 男, 教授, 研究方向: 亲铁亲铜元素地球化学; 行星增生演化与壳幔相互作用. E-mail: zaicongwang@cug.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

不均一的造山带岩石圈地幔：祁连陆块早古生代镁铁质 岩浆岩全岩和矿物原位地球化学证据

陈启¹, 戴立群^{1*}, 赵子福^{1*}, 周尧¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

俯冲带是地壳和地幔物质能量交换的重要场所。伴随大洋地壳的俯冲, 洋壳析出的流体和部分熔融产生的熔体会交代上覆地幔楔, 造成其地球化学特征的不均一。大洋弧和大陆弧岩浆岩作为交代地幔的产物, 承载了其不均一的地球化学信息, 是我们研究壳幔相互作用的理想对象。不均一的地幔源区部分熔融形成的镁铁质熔体在上升侵位过程中有可能发生分离结晶、同化混染、岩浆补给和岩浆混合等过程, 这可以被全岩成分和矿物环带所记录, 并最终造成弧岩浆岩的成分多样性。因此, 在研究俯冲带镁铁质岩浆岩成因以及成分多样性时, 需要综合考虑全岩和矿物地球化学成分特征。

祁连造山带记录了柴达木陆块-祁连陆块-阿拉善陆块间从洋壳俯冲到大陆碰撞的汇聚过程。祁连陆块早古生代岩浆岩是柴达木陆块和祁连陆块之间的南祁连洋俯冲的响应。祁地块东部出露的早古生代幔源镁铁质岩浆岩是研究大陆弧岩浆作用的理想对象。

我们的研究发现, 祁连陆块东部金源和积石山地区的镁铁质岩浆岩具有一致的早古生代锆石 U-Pb 年龄 (448-450 Ma), 指示它们是大洋俯冲带同俯冲时期形成的岩浆岩。这些镁铁质岩浆岩具有岛

弧型微量元素特征、相对亏损的 Sr-Nd-Hf 同位素组成 ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$: 0.7028 ~ 0.7050、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$: 1.0 ~ 4.2、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$: 4.8 ~ 10.4), 以及较高且变化的锆石 ^{18}O 值: 5.2 ~ 7.8‰。金源镁铁质岩浆岩具有比积石山镁铁质岩浆岩亏损程度更低的 Sr-Nd-Hf 同位素组成和更高的锆石 ^{18}O 值。这些元素和同位素特征表明, 金源和积石山早古生代镁铁质岩浆岩来自不同地壳物质改造的不均一的交代地幔。模拟计算结果表明, 地幔源区的不均一性是不同比例的俯冲原特提斯洋壳流体和沉积物熔体与地幔楔橄榄岩反应的结果。我们在金源镁铁质岩中发现辉石和角闪石具有复杂的元素-同位素环带, 这表明不均一的地幔发生部分熔融产生了多批次地球化学组成不同的熔体, 导致岩体就位前发生岩浆补给和混合过程。这些过程不仅被全岩地球化学信息记录, 同时也被复杂的单斜辉石和角闪石环带所记录。

通过我们的研究, 我们认为古大洋俯冲带交代地幔的不均一性不仅被全岩的地球化学特征记录, 也被矿物原位的地球化学特征所记录。我们的研究也为揭示古俯冲带交代地幔不均一性、俯冲带镁铁质岩浆岩成因及其相关的岩浆演化过程提供了新的认识。

第一作者简介: 陈启, 博后, 研究方向: 岩石矿物地球化学, E-mail: cq1031@mail.ustc.edu.cn.

*通信作者简介: 戴立群, 教授, E-mail: lqdai@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 赵子福, 教授, E-mail: zfzhao@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

马来半岛晚古生代-早中生代岩浆作用 及其古特提斯构造意义

余永琪¹, 钱鑫^{1,2,*}, Khairul Azlan Mustapha³, Thomas C. Sheldrick⁴,
甘成势^{1,2}, 张玉芝^{1,2}, 王岳军^{1,2}

1. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 珠海 510275;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519082;

3. 马来西亚大学 地质学院, 马来西亚 吉隆坡 50603;

4. 莱斯特大学 地理地质与环境学院, 英国 莱斯特 LE1 7RH

东南亚地区保存了大量与古特提斯有关的晚古生代-中生代岩浆岩, 它们系统记录了古特提斯洋打开、俯冲及碰撞闭合的演化过程。其中, 位于巽他古陆核心的马来半岛隶属于东古特提斯构造域, 开展马来半岛岩浆作用的研究对于限定东古特提斯的构造演化具有重要意义。我们在马来半岛东部哥打丁宜至登嘉楼地区新识别出一套花岗岩和花岗闪长岩组合, 并对它们进行了系统的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学以及 Sr-Nd-Pb-Hf 多组同位素研究, 进而阐明它们的岩石成因及其构造意义, 恢复东马来古特提斯构造演化格局。根据实验及前人的数据可知, 东马来二叠纪至晚三叠世花岗质岩可以分为三组: 第一组 289-270Ma I 型花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为-6.6 至-2.6, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-7.1 至+4.9, 第二组 289-270Ma S 型花岗岩显示出较富集的同位素特征, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

值分别为-10.1 和-23.1 ~ +1.5。第三组 254-244 Ma 花岗质岩具有 A 型特征, 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为-7.3 ~ -3.8 和-8.9 ~ +2.2。这三组样品的 Pb 同位素较为一致, 其中 $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 18.71-19.43$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.66-15.71$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 38.27-39.43$ 。基于样品的元素-同位素特征, 我们认为第一组花岗质岩来源于变火成岩源区另有年轻基性组分加入, 第二组来源于变沉积岩。第三组具有一个混合源区, 包含古老的变基性岩和年轻的基性组分。综合东南亚区域火成岩数据, 本研究认为马来半岛东部 289-244Ma 花岗质岩形成于古特提斯俯冲环境, 并且俯冲至板块折返的构造转换发生于~270Ma。东马来俯冲成因的花岗岩向北可与缅甸东部大其力和中国西南部景洪花岗岩相联系, 向南可延伸至西婆罗洲。

基金项目: 国家自然科学基金 (41830211, 42072256), 广东省基础与应用基础研究基金 (2018B030312007, 2019B1515120019)

第一作者简介: 余永琪 (1997-), 女, 博士研究生, 研究方向: 地球化学. E-mail: yuyq8@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者简介: 钱鑫 (1988-), 男, 副教授, 研究方向: 东南亚大地构造研究. E-mail: qianx3@mail.sysu.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

古特提斯俯冲带与峨眉山地幔柱相互作用研究

徐健^{1,2*}, 夏小平^{1,2}, 王强^{1,2}, 何斌^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

2. 中国科学院深地科学卓越创新中心, 广州 510640

板块构造和地幔柱构造是固体地球科学的两大支柱理论, 两者通常被认为是彼此独立地控制和影响着地球系统的演化。近年来, 越来越多的地球物理观察和实验室模拟结果均暗示俯冲的大洋岩石圈与地幔柱之间存在不同程度的相互作用。俯冲带与地幔柱相互作用已经成为地球系统科学问题, 对于认识地球深部过程及其动力学机制具有重要意义, 是地球科学的研究前沿和热点。然而, 研究前新生代的板片俯冲与地幔柱相互作用是比较困难的, 研究难点主要在于缺乏地球物理资料, 而且地质记录难以保存和识别, 因此存在巨大的争议。峨眉山大火成岩省已被国际学术界所公认, 晚二叠世发生了一系列与峨眉山地幔柱有关的事件, 包括地球深部系统的大规模火山作用和大规模成矿作用以及地球表层系统的生物灭绝事件等。此外, 在峨眉山大火成岩省的西缘还发育有一条古特提斯(金沙江-哀牢山-松马洋)的缝合带, 这使

得华南成为研究前新生代俯冲带与地幔柱相互作用理想天然实验室! 本研究通过对华南西南缘古特提斯哀牢山构造带及其邻区出露的二叠纪-三叠纪地层和岩浆岩进行系统的野外地质考察和室内研究, 并取得以下两个主要研究进展: (1) 厘定了古特提斯洋北向俯冲的沉积记录和岛弧残留, 提出了古特提斯洋双向俯冲的构造模型; (2) 发现了一套大洋俯冲与地幔柱相互作用的特殊岩石组合(晚二叠世富 Nb 玄武岩和低 $\delta^{18}\text{O}$ A-型花岗岩), 揭示了古特提斯洋俯冲与峨眉山地幔柱相互作用过程, 即晚二叠世古特提斯洋北向俯冲于华南板块之下, 板块后撤引起软流圈流动(地幔角流), 使峨眉山地幔柱物质向俯冲带迁移, 与弧后地幔物质混合, 继而部分熔融形成富 Nb 玄武岩; 另一方面, 俯冲的热液蚀变洋壳被地幔柱捕获, 再循环至俯冲带发生减压熔融, 从而形成低 $\delta^{18}\text{O}$ A 型花岗岩。

基金项目: 本研究受国家自然科学基金(42202051), 国家重点研发计划项目(2016YFC0600407)和第二次青藏高原科学考察项目(2019QZKK0702)资助

第一作者和通讯作者简介: 徐健(1989-), 男, 博士后, 研究方向: 主要从事俯冲带物质循环及其与地幔柱相互作用过程研究. E-mail: xujian@gig.ac.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

橄榄岩蛇纹石化过程中的元素迁移和 Mg 同位素分馏

赵梅善¹, 陈伊翔^{1,2*}, 熊家伟¹, 郑永飞^{1,2}, 查向平¹, 黄方^{1,2}

1. 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研究中心, 合肥, 230026

橄榄岩蛇纹石化过程广泛出现在海底大洋岩石圈和弧前地幔楔中。所形成的富 Mg、富水的蛇纹岩, 对大洋岩石圈流变学等物理特征及大洋俯冲带物质迁移和元素循环等过程具有重要影响。然而, 目前对这一过程中元素迁移和 Mg 同位素的分馏还不清楚。针对这个问题, 我们选取西藏日喀则蛇绿岩中的橄榄岩和蛇纹岩作为研究对象, 对全岩主微量元素和 Mg-O 同位素进行了详细分析。研究发现, 橄榄岩蛇纹石化的温度发生在 200–300°C。蛇纹岩中没有发现任何风化矿物的存在, 并且蛇纹岩具有较轻的 O 同位素组成, 与化学风化作用产物完全不符。这些证据都指示, 橄榄岩只是经历了蛇纹石化过程, 未受到显著的化学风化影响。橄榄岩和蛇纹岩的微量元素组成表明, 在蛇纹石化过程中, 部分大离子亲石元素发生了迁移, 而稀土元素组成没有改变。在 MgO/SiO₂ vs. Al₂O₃/SiO₂ 图解上, 考虑扣除滑石脉体的影响, 蛇纹岩组成仍然明显低于橄榄岩和地幔演化线, 表明蛇纹石化过程中有显著的 Mg 元素的丢失。在 Mg 同位素组成上, 橄榄岩与地幔值 ($\delta^{26}\text{Mg} = -0.25 \pm 0.03\%$,

2SD, n = 6)接近, 而蛇纹岩具有更重的 Mg 同位素组成($\delta^{26}\text{Mg} = -0.16 \pm 0.09\%$, 2SD, N=8)。这个差异不受富集重 Mg 同位素的滑石存在的影响, 并且与化学风化指数之间没有相关性, 表明蛇纹石化过程中确实发生了明显的 Mg 同位素分馏。瑞利分馏过程模拟得到蛇纹石化过程中流体与蛇纹岩之间 Mg 同位素的分馏系数 α ($^{26}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$) 值为 0.997–0.999。这个值与前人理论计算结果一致, 表明低温蛇纹石化过程中利蛇纹石形成时会优先从流体中吸收重的 Mg 同位素, 而蛇纹石化流体具有极轻的 Mg 同位素组成特征。在近等化学情况下, 根据质量平衡计算出 Mg 元素的丢失量和蛇纹石化过程中总的流体 Mg 同位素组成–1.9‰左右, 显著低于现今海水的 Mg 同位素组成, 该过程会对海水的 Mg 同位素组成造成显著影响。同时, 海底蛇纹石化会形成具有重 Mg 同位素组成的蛇纹岩, 这些蛇纹岩随着大洋岩石圈俯冲进入地幔会引发地幔 Mg 同位素组成的不均一性, 并可能使相关岩浆岩产生重 Mg 同位素组成的信号。

基金项目: 板块构造体制下关键挥发性元素循环的过程和机理 (批准号: XDB41020503)

第一作者简介: 赵梅善 (1992–), 女, 博士后, 研究方向: 蛇绿岩的形成和演化研究. E-mail: zhaoms@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈伊翔 (1983–), 男, 教授, 研究方向: 俯冲带熔/流体地球化学研究 E-mail: yxchen07@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

非均质富集大陆岩石圈地幔的岩浆混合与安山岩成因

王淞杰¹, Michael Brown^{2*}

1. 山东科技大学, 青岛 266590;

2. 美国马里兰大学, 马里兰 20742-4211

造山带安山岩记录了汇聚板块边缘壳幔相互作用的证据, 并且是地球分异过程的重要标志, 但其成因机制仍存在较大争议。本研究对苏鲁造山带内产出的一套早白垩世安山岩进行了斜长石和单斜辉石斑晶的原位主量、微量和 Sr 同位素分析, 以期为安山岩成因提供新的见解。

斜长石斑晶主要为中长石, 具有大离子亲石元素富集、高场强元素亏损以及富集 Sr 同位素的特征。相对而言, 单斜辉石斑晶可分为反环带单斜辉石 (type I) 和均质单斜辉石 (type II); 根据化学成分的差异, type I 单斜辉石可进一步分为 IA 和 IB 两个亚类。所有的单斜辉石均具有高 Mg#, 低 Na₂O 和 Al₂O₃ 的特点, 并具有大离子亲石元素富集、高场强元素亏损和不同程度地高 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值, 指示富集岩石圈地幔的熔体来源, 且熔体在地壳层位发生结晶。Type IA/IB 核部以及 type II 单斜辉石具有协同演变的主微量元素组成和相似的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值, 且

与斜长石斑晶的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值一致, 表明这些斑晶来源于同一母岩浆 (Magma 1), 为其发生结晶分异的产物。与之相反, type IA 和 IB 单斜辉石边部的主微量成分协同变化, 但却与相应核部及 type II 单斜辉石的成分截然不同; 并且, 边部的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值明显低于核部, 这表明 IA/IB 单斜辉石边部结晶于另一种同位素组成不同 (源区成分不同) 的岩浆 (Magma 2)。

通过恢复与不同单斜辉石±斜长石斑晶平衡的元熔体成分, 并选择端元岩浆成分进行主量和稀土元素模拟分析显示, 安山岩基质的成分可由上述两类岩浆经过分异和不同程度的混合形成。综上, 本研究首次论证了非均质富集的岩石圈地幔岩石发生部分熔融, 其产生的岩浆可通过各自的分异作用和在地壳浅部的岩浆混合, 形成安山质岩浆。该研究进一步揭示了如何通过富集岩石圈地幔熔融及伴随的结晶分异和岩浆混合作用形成大陆地壳。

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

内蒙古集宁地区古元古代晚期幕式岩浆作用及其热效应

朱伟鹏¹, 王彬¹, 田伟^{1*}, 魏春景¹, 傅斌²

1. 北京大学地球与空间科学学院 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871, 中国;

2. 澳大利亚国立大学地球科学研究院, 堪培拉 ACT2601, 澳大利亚

华北克拉通 (NCC) 西北部古元古代孔兹岩带东段集宁地区以广泛分布的高温/超高温 (UHT) 变质岩露头 and 频繁的岩浆事件为特征。尽管前人业已证明 UHT 变质作用与大规模地壳层次的热扰动有关, 但是对具体热源的认识依然不清, 尚未建立幔源岩浆作用与 UHT 变质作用之间的联系。

笔者在内蒙古集宁地区采集了侵位时间跨度超过 100 Ma 的两套层状岩体, 岩性分别为角闪辉长岩 (1923±28 Ma) 和苏长辉长岩 (1824±2 Ma), 以此作为该区 UHT 变质作用的理想热源。通过对角闪辉长岩进行主微量元素、全岩 Sr-Nd 同位素和锆石 Hf-O 同位素测试分析, 发现该岩石为尖晶石+石榴石相二辉橄榄岩地幔 10~20 % 熔融后混染地壳物质而结晶的产物, 具有流体交代特征。

搜集前人报道的集宁地区基性侵入岩锆石年龄数据, 经统计分析后发现 2.0~1.8 Ga 的岩浆作用具有两幕式特点, 其中 2.00~1.89 Ga 数据为第一组 (M_1 期), 1.89~1.80 Ga 数据为第二组 (M_2 期), 峰期分别对应于

~1.95 Ga 和~1.85 Ga, 那么角闪辉长岩应形成于 M_1 期岩浆作用, 而苏长辉长岩则应为 M_2 期岩浆作用的产物。 M_1 期岩浆作用正好耦合于该区 UHT 泥质麻粒岩/片麻岩的变质作用峰期和缓慢冷却过程。笔者采用蒙特卡洛方法模拟计算了 M_1 期岩浆作用的时间跨度可达~71 Myr。

以集宁地区典型高镁辉长苏长岩为原始岩浆, 矽线石-石榴石片麻岩为围岩, 使用“岩浆房模拟器 (MCS_PhaseEQ_2019AC)”模拟该区基性侵入岩的成因。由主量元素哈克图解可知, 这些岩石的形成符合能量约束下的同化混染和分离结晶 (EC-AFC) 过程, 即幔源岩浆在岩浆房中分离结晶的同时混染地壳围岩。岩石中的普通辉石、韭闪石和锆石记录了岩浆的缓慢冷却过程。

综上, 笔者从年龄和成分两方面建立了基性侵入岩与 UHT 泥质麻粒岩/片麻岩的联系, 可以认为集宁地区古元古代晚期幔源岩浆作用为 UHT 变质作用提供了热源, 这些基性侵入岩极有可能是鄂尔多斯地块和阴山地块拼合后软流圈上涌的产物。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42030304) 和国家重点研发计划课题 (2017YFC0601302) 联合资助

第一作者简介: 朱伟鹏 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 岩石地球化学与岩浆热力学模拟. E-mail: wpzhu2014@pku.edu.cn

*通信作者简介: 田伟 (1976-), 副教授, 博士生导师, 研究方向: 火山学与岩浆岩岩石学. E-mail: davidtian@pku.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

华北克拉通怀安块体 TTG 片麻岩和花岗岩: 对构造演化和地壳增生的指示意义

高敏^{1*}, 张振杰^{2,3}, 成秋明^{3,4},

1. 中石油石油勘探开发研究院, 北京 100083;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 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;
4. 中山大学 地球科学与工程学院, 珠海 51900;

对于华北克拉通太古代-古元古代的构造演化过程尚未形成统一认识, 怀安块体位于华北克拉通中央造山带的北部西缘, 是研究华北克拉通构造演化过程的重要窗口。怀安块体主要由英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG 片麻岩)和花岗岩侵入体组成。为探讨怀安块体太古代-古元古代的构造演化和地壳增生过程, 共采集 15 个花岗岩样品和 3 个 TTG 片麻岩样品, 进行了锆石 U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素以及全岩主微量元素分析。

利用新采集的花岗岩以及前人已发表的花岗岩的 934 个岩浆锆石 U-Pb 年龄数据和 Lu-Hf 同位素数据, 计算怀安块体中太古代-古元古代新生地壳的比例。计算结果表明, 新生地壳的比例在 3.1-2.6 Ga 期间最大, 达到 100%, 然后在 2.6-2.45 Ga 期间降低, 在 2.5 Ga 时降低到 50%, 在 2.45 Ga 时降低到 20%, 然后在 2.45-2.3 Ga 期间增加, 在 2.3 Ga 时增加到 45%, 最后在 1.95-1.7 Ga 期间降低到 0%。

通过分析新采集的以及前人已发表的花岗岩和 TTG 片麻岩岩浆锆石 U-Pb 年龄, 发现怀安地区 2.51-2.39Ga 花岗岩和 TTG 片麻岩的结晶年龄表现为沿 NE-SW 方向呈自北向南逐渐变年轻的趋势。

TTG 片麻岩和花岗岩全岩主微量元素测试结果表明, 2.51-2.39Ga TTG 片麻岩具有高 Mg#、高 Sr、高 Sr/Y、低 Yb、Eu 正异常、轻稀土元素(LREE)

富集、重稀土元素(HREE)亏损的特征, 岩浆锆石具有较高的 $\epsilon_{Hf(t)}$ 值(9.1~2.8)和较高 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.046), 说明 TTG 片麻岩的岩浆来源于俯冲洋壳和地幔楔的部分熔融物质。2.51-2.39Ga 花岗岩为镁质、中-高钾钙碱性、偏铝质-弱过铝质, 具有 Eu 正异常和低 HREE 的特征, 岩浆锆石具有高 $\epsilon_{Hf(t)}$ 值(2.72~-2.6)和高 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.033), 指示花岗岩的岩浆来源于壳内火成岩和次大陆岩石圈地幔的部分熔融物质。

通过综合分析, 取得以下成果认识:

(1) 怀安块体在 3.1-2.5Ga 期间处于地壳增长阶段, 在 2.5-1.7Ga 期间处于地壳再造阶段。地壳增长曲线模拟结果表明, 怀安块体现存地壳的~63%形成于 3.1-2.5 Ga 期间、~26%形成于 2.5-2.0 Ga 期间, 2.0-1.7 Ga 期间几乎没有新生地壳形成。说明怀安块体大部分的地壳增长发生在中-新太古代, 与华北克拉通以及世界上的其他克拉通相似。

(2) 花岗岩和 TTG 片麻岩的锆石稀土元素特征以及全岩地球化学特征指示怀安块体在 2.6-2.0Ga 期间是一个长期活跃的大陆岩浆弧。

(3) 结合俯冲构造环境, 提出怀安块体新太古代-古元古代剪刀式俯冲模型, 大洋岩石圈较早的俯冲于怀安地块的北部、较晚的俯冲于怀安块体的南部。

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

地幔流导致东北亚陆缘新生代周期性弧后伸展

王枫^{1*}, 许文良¹, 董玉¹, 熊帅¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061;

作为俯冲工厂的重要组成部分, 弧后盆地是了解俯冲带发展和深部地幔动力学的关键。与弧后盆地形成相关的弧后伸展和/或弧后周期性伸展在板块构造体制中已经得到了很好的印证。然而, 导致弧后伸展或扩张的机制却一直存在争论。对于不同俯冲带的弧后扩张或周期性弧后扩张提出了不同的成因模式, 然而由于缺乏相关的地球化学、地质年代学和地球物理测深资料, 使得检验这些模式很困难。

针对弧后周期性伸展或扩张形成机制这一关键科学问题, 选择东北亚陆缘新生代不同期次玄武岩作为研究对象, 通过详细的岩石地球化学研究, 尤其是利用新生代玄武岩地球化学的时空变异和对构造属性敏感的元素及其比值, 同时结合地球物理资料, 探讨了东北亚陆缘新生代弧后周期性伸展/扩张的机制。

东北亚陆缘新生代玄武质岩浆作用至少可以划分 6 个阶段: 55–50Ma、34–33Ma、22–21 Ma、11–10 Ma、5–2Ma 和 <2.0 Ma。考虑到库页弧与欧亚大陆的碰撞发生在 15Ma 左右, 并且导致了弧后扩张的停止, 选择了 55–50Ma、34–33Ma、22–21Ma 和 11–10Ma 四期钠质玄武岩作为研究对象。

东北亚陆缘新生代板内型 (与弧后伸展有关的) 玄武岩先后经历了自西向东两次迁移: 即第一次从松辽盆地中的双辽玄武岩 (约 51 Ma) 向东 (约 400km) 至敦化地区 33Ma 板内玄武岩, 第二次从敦化地区 33Ma 板内玄武岩向东至日本海约 20Ma 弧后盆地玄武岩 (具有 MORB 地球化学属性), 日本海为第二次弧后扩张中心。

东北亚陆缘新生代早期弧型玄武岩同样经历了两次向东迁移的过程, 即从汪清地区 (距同时代板内型双辽玄武岩约 500km) 52 Ma 的弧型玄武岩向东至日本海东部奥尻岛 34Ma 的弱弧型玄武岩, 乃至到日本北海道东南部 22Ma 的典型弧型玄武岩。

东北亚陆缘新生代盆地沉积中心经历了自西向东逐渐变新的迁移过程, 反映了对地幔深部过程的浅表响应。这也得到了最新深部地震各向异性资料的证实——向东深部地幔流的存在, 且比地表具有更快的速度。

日本北海道东南部的 10Ma 玄武岩具有典型弧型玄武岩的地球化学属性, 而东北汪清地区约 11Ma 的板内玄武岩则表现出弱弧型的地球化学特征, 并且与约 52Ma 的弧型玄武岩相比, 具有相对低的 LILE 含量和相对弱的 HFSE 丰度以及更为亏损的 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素成分。上述特征表明, 前者 (10Ma) 起源于受俯冲流体交代地幔楔的部分熔融, 且形成于岛弧环境, 而后者 (11Ma) 则起源于早期 (可能为 52Ma) 受俯冲流体交代地幔楔熔融后再次熔融的产物, 且形成于板内环境。

东北亚陆缘新生代玄武岩地球化学的时空变异, 揭示了向东的地幔流是导致弧后伸展 (或扩张) 的主导机制。板片后撤引起的地幔流应是导致第一次弧后伸展的动因, 而海沟后撤所引发的地幔流则是导致第二次弧后伸展 (扩张) 的主导机制。库页弧与欧亚大陆的碰撞 (约 15Ma) 导致弧后扩展的停止, 进而引发了板内 (中国东北约 11Ma) 和弧 (日本北海道约 10Ma) 岩浆作用的发生。

基金项目: 西北太平洋从活动陆缘到沟-弧-盆体系转换的时间与机制: 晚白垩世—古近纪岩浆作用记录 (91858211)

作者简介: 王枫 (1984–), 教授, 研究方向: 岩石地球化学、火成岩成因. E-mail: jlu_wangfeng@jlu.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

洋底高原俯冲对大洋俯冲带岩浆活动和构造演化的影响

张吉^{1,2}, 张国良^{1,2*}

1. 中国科学院海洋研究所, 深海极端环境与生命过程研究中心, 青岛 266071;

2. 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071

洋底高原随着大洋板块运移至俯冲带时, 可以引起大规模的变质作用、构造变形和岩浆活动, 可以对板块边界形态、俯冲带的构造演化产生重要影响。洋底高原与俯冲带的相互作用是当前俯冲带研究中的前沿问题, 对于深入理解汇聚板块边缘化学地球动力学具有重要意义。西南马里亚纳-雅浦岛弧是西太平洋俯冲带中独特的变质岩岛弧, 其变质岩的形成与板块边界的构造事件密切相关, 记录了卡洛琳洋底高原俯冲、碰撞和增生相关的过程, 是研究洋底高原与俯冲带相互作用的理想对象。因此, 西南马里亚纳-雅浦岛弧的变质岩的原岩性质、构造背景和形成年代的研究, 可以有效阐明太平洋板块/卡洛琳板块与菲律宾海板块的构造演化历史, 为全球洋底高原与俯冲带相互作用的研究提供一个重要窗口。

雅浦-马里亚纳-卡洛琳海域开展的综合海洋地质调查, 发现了西南马里亚纳-雅浦岛弧存在大规模的区域变质带。我们对雅浦岛弧南部 (Y3 拖网站位) 获取的变质岩开展了详细的矿物学、年代学和地球化学研究。首次获得雅浦岛弧变质岩的放射性定年结果, 根据角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年和锆石 SIMS 原位 U-Pb 测年结果, 雅浦岛弧角闪岩形成于 ~21 Ma。雅浦岛弧南部的角闪岩样品在矿物组合、主量元素、微量元素和同位素组成存在明显差异。角闪岩的原岩来自三种不同的构造环境: 初始雅浦岛弧的弧前玄武岩; 初始雅浦火山弧上的岛弧拉斑玄武岩; 俯冲的卡洛琳洋底高原的洋岛玄武岩。雅浦岛弧角闪岩的原岩形成于弧前、火山弧和俯冲的洋底高原三种不同的构造环

境, 这表明雅浦岛弧角闪岩的形成是初始雅浦岛弧与卡洛琳洋底高原相互作用的结果, 记录了雅浦岛弧与卡洛琳洋底高原的碰撞事件 (~21 Ma)。目前卡洛琳高原并没有完全俯冲于地幔之中, 而是对雅浦和南马里亚纳俯冲带三联点的构造格架造成重要影响。我们对马里亚纳俯冲带最南端的弧前区 (M2 站位) 的火山岩和绿片岩相变质岩样品开展了地球化学和年代学的研究工作。斜长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果表明, 火山岩的形成年代为 ~18 Ma; 变质磷灰石的 U-Pb 分析结果表明, 变质玻安岩的年龄为 ~24 Ma。全岩主量元素和微量元素结果表明, 绿片岩相变质岩样品的原岩为钙碱性的低硅玻安岩, 具有高硅高镁低钛、轻稀土元素极其亏损的特征。火山岩样品为拉斑玄武岩, 具有 Nb、Zr、Hf 和 Ti 的负异常, 轻稀土元素极其亏损、高 V/Ti 和低 Yb/V 等结果指示该火山岩具有弧前玄武岩的特征。玻安质绿岩的原岩是极其亏损的低硅玻安岩, 可能形成于马里亚纳俯冲带的俯冲起始阶段; 在卡洛琳洋底高原的碰撞作用下, 马里亚纳弧前区域的低硅玻安岩在约 24Ma 时发生绿片岩相变质作用。在约 18Ma 时, 西南马里亚纳弧前区域发生岛弧岩浆活动, 形成具有弧前玄武岩特征的火山岩。卡洛琳洋底高原的俯冲直接影响了马里亚纳俯冲带最南端的岩浆活动和构造活动, 重塑了菲律宾海板块和卡洛琳板块边界的形态; 区域构造方面, 卡洛琳洋底高原的俯冲作用很可能助力了菲律宾海板块的顺时针旋转, 并引起了帕里西维拉海盆的扩张方向的改变。

基金项目: 中国博士后基金面上项目 (2022M713184); 山东省自然科学基金 (青年) 项目 (ZR2022QD027)。

第一作者简介: 张吉 (1992-), 助理研究员, 研究方向: 海洋岩石地球化学. E-mail: zhangji@qdio.ac.cn

*通信作者简介: 张国良 (1981-), 研究员, 研究方向: 海洋岩石地球化学. E-mail: zhangguoliang@qdio.ac.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

地幔楔橄榄岩蛇纹石化和脱水过程中 Mg 同位素组成变化

尹壮壮¹, 陈仁旭^{1,2*}

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

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 安徽合肥 230026

蛇纹岩在俯冲带地球化学循环中发挥着重要作用。已有研究表明蛇纹石化过程中 Mg 同位素分馏不明显, 而蛇纹岩经历低温化学风化, 产生黏土矿物, 则会具有重 Mg 同位素组成, 经历碳酸盐化, 形成碳酸盐矿物, 会具有轻 Mg 同位素组成。蛇纹岩在俯冲过程会发生变质脱水, 作为俯冲带内非常富 Mg 的岩石, 其变质脱水释放的流体具有一定的 Mg 含量, 对俯冲带流体的 Mg 同位素组成具有重要的影响。然而, 对于俯冲带蛇纹岩变质脱水过程中 Mg 同位素分馏的研究相对缺乏。我们对红安造山带银山寨蛇纹岩及伴生滑石菱镁岩进行了系统的岩相学、全岩主微量元素、Mg-C-O 同位素分析。岩相学及野外产状指示银山寨蛇纹岩和滑石菱镁岩具有成因上的联系, 表明滑石菱镁岩是通过外部来源 CO₂ 流体渗入促进叶蛇纹石的分解, 随后沉淀形成菱镁矿和滑石形成的。滑石菱镁岩大多具有高于地幔的氧同位素($\delta^{18}\text{O}=6.97\sim 7.48\%$)和碳同位素组成, 指示含碳流体可能来自含碳

酸盐的沉积岩。蛇纹岩 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值为 $-0.41\sim -0.30\%$, 滑石菱镁岩 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值为 $-0.26\sim -0.04\%$ 。蛇纹岩和滑石菱镁岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 均与 MgO 和 TC 含量呈负相关, 而经过 HCl 淋滤的蛇纹岩残留物也具有高于原岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$, 指示蛇纹岩可能受到了碳酸盐流体的交代作用, 并导致蛇纹岩的 Mg 同位素变轻。经过 HCl 淋滤的蛇纹岩残留物的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 高于地幔值, 叶蛇纹石同样具有较高的 $\delta^{26}\text{Mg}$, 指示叶蛇纹石化过程中 Mg 同位素会变重。蛇纹岩中的叶蛇纹石具有比橄榄石明显高的 Mg 同位素组成($\delta^{26}\text{Mg}$ 分别为 $-0.39\sim -0.06\%$ 和 $-0.55\sim -0.29$), 这表明叶蛇纹石在分解形成橄榄石的过程中 Mg 同位素会变轻, 而释放的流体则具有重的 Mg 同位素组成。这种重 Mg 同位素的流体会进入俯冲带和深部地幔, 交代俯冲地壳岩石, 及改变弧岩浆源区的 Mg 同位素组成, 这可以很好地解释一些俯冲地壳岩石和岛弧岩浆岩具有重 Mg 同位素的特征。

基金项目: 国家自然科学基金(41873033)

第一作者简介: 尹壮壮(1996-), 研究生, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: zzyin@mail.ustc.edu.cn

*通讯作者简介: 陈仁旭(1981-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: chenrx@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

俯冲洋壳变质过程中卤素活动行为：来自西南天山 变基性岩的制约

潘正华, 陈仁旭*

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

卤素可以增加矿物稳定性, 抑制板片熔融, 增强流体的元素迁移能力。了解俯冲板片变质过程中卤素活动行为, 对于认识俯冲带元素分异和壳幔相互作用具有重要意义。然而, 目前对于俯冲洋壳变质过程中卤素活动行为的认识还很缺乏。我们对来自西南天山的蓝片岩、高压榴辉岩和超高压榴辉岩的 F-Cl 含量进行了系统研究, 结果为俯冲洋壳变质过程中卤素活动行为提供了新的制约。

相平衡模拟得到所研究的蓝片岩、高压榴辉岩和超高压榴辉岩的峰期温压条件分别为: ~1.75 Gpa 和 495°C; ~2.5 Gpa 和 520°C 和 ~3.0 Gpa 和 530°C。蓝片岩(410-580 ppm)向高压榴辉岩(190-540 ppm)再到超高压榴辉岩(100-360 ppm)表现出 F 含量的降低; 而超高压榴辉岩 Cl 含量(<50-90 ppm)则高于蓝片岩和高压榴辉岩(<50 ppm)。作为岩石中主要的含卤素矿物, 磷灰石具有高 F (1.55-3.64 wt.%)低 Cl (0-0.115 wt. %)的特征。系统的磷灰石研究在这些变质岩中识别出原岩到超高压榴辉岩相变质各个阶段生长的磷灰石。从原岩经过蓝片岩相、高压榴辉岩相再到超高压榴辉岩相变质过程中, 磷灰石的

LREE、MREE、(La/Sm)_N 和 Ce/Ce* 逐渐降低, 而 Eu/Eu* 逐渐升高。磷灰石 F 含量从蓝片岩相(2.50-3.64 wt.%)经高压榴辉岩相(1.95-3.55 wt.%)再到 UHP 榴辉岩相(1.55-3.13 wt.%)轻微降低, 而磷灰石 Cl 含量在超高压榴辉岩相(0-0.115 wt.%)则略高于蓝片岩相(0-0.048 wt.%)和高压榴辉岩相(0-0.070 wt.%)。这个观察与全岩 F-Cl 含量的变化类似。全岩 F 含量与 P₂O₅、Th、U 含量呈正相关, 根据磷灰石含量计算出的 F 分布显示磷灰石可以控制岩石中 72-83% 的 F, 指示磷灰石是洋壳俯冲变质过程中最主要的含 F 相。UHP 榴辉岩中的磷灰石相对于 HP 榴辉岩和蓝片岩具有更高的 Cr、Co 含量以及 Ba/Th, 指示 UHP 榴辉岩可能受到来自于蛇纹岩脱水流体的交代。相对于蚀变洋壳, 蓝片岩具有相当的 F 含量但明显较低的 Cl 含量, 指示洋壳俯冲到蓝片岩相过程中 F 易保留在岩石中, Cl 则几乎完全丢失, 但蓝片岩相到 UHP 榴辉岩相阶段的进变质过程中板片中的 F 持续丢失, 而 UHP 榴辉岩相阶段时, 板片可能受到蛇纹岩脱水形成的流体交代, 使其具有相对蓝片岩和 HP 榴辉更高的 Cl 含量。

第一作者简介: 潘正华 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 俯冲带流体活动. E-mail: zhpan0@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈仁旭 (1981-), 教授, 研究方向: 俯冲带流体活动和壳幔相互作用. E-mail: chenrx@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

浅部含蓝片岩的年轻岩石圈对于碰撞后造山带钾质-超钾质岩成因的约束

王煜^{1*}, Stephen Foley², Stephan Buhre³, Jérémie Soldner¹, 徐义刚¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

2. Macquarie University, Australia Sydney 2109;

3. University of Mainz, Germany Mainz 55099

造山带岩浆作用的成因研究是重建造山带演化历史的关键。然而, 这些岩浆的成分复杂、成因多样并受多重因素制约, 因而准确的识别其来源及形成机制非常困难。阿尔卑斯-喜马拉雅造山带 (AHOB) 作为典型的弧-陆碰撞造山带, 广泛发育同碰撞和碰撞后的新生代岩浆活动; 此外, 由于其广泛分布钾质-超钾质岩的特征和其独特的构造背景及地球动力学演化历史, 一直都是探寻钾质-超钾质岩浆作用机制的理想场所。

前人通过对 AHOB 幔源岩浆岩的研究, 查明其源区主要由大陆地壳组分、难熔橄榄岩组分以及一种具有极高 Th/La 比值的未知组分三种成分组成。目前, 该未知组分仅在 AHOB 钾镁煌斑岩中观察到, 全球其他地质构造环境下的岩石中并未发现。这是由于俯冲板片熔/流体的 Th 和 La 分馏能力有限, 因此弧岩浆和其他幔源岩浆 (如 MORB 和 OIB) 的 Th/La 比值通常低于 0.5, 且与 Sm/La 呈负相关。

针对 AHOB 钾质-超钾质岩中发现极高 Th/La 比值这一独特地球化学特征, 学术界提出了两种可能的形成机制: 极高的 Th/La 比值是大陆地壳的直接熔融而来; 与赋存在浅部岩石圈的混杂岩中低熔点物质 (硬柱石或者黝帘石蓝片岩) 的部分熔融有关。然而, 至今仍然没有研究证据能够有效证明哪一种机制才是破解 AHOB 钾质岩“Th/La 难题”的最佳钥匙。

针对上述问题, 我们统计分析了 AHOB 幔源岩浆岩 ($n \approx 5000$) 的全岩地球化学数据, 发现极高 Th/La 比值并不是钾镁煌斑岩这类岩浆岩独有的特征, 而是该造山带钾质-超钾质熔岩的普遍特征, 表明上文提到的未知组分广泛地参与了该造山带的钾质-超钾质岩浆作用。此外, 通过调研全球蓝片岩及榴辉岩中可

能携带这种极高 Th/La 比特征的矿物, 我们找到了这把“钥匙”, 即在俯冲板片和地幔楔交界面形成的混杂岩 (mélange) 中伴生的硬柱石蓝片岩。该蓝片岩中的硬柱石, 尤其是具有陆源特征的硬柱石, 是唯一具有类似 AHOB 钾质岩中识别出的极高 Th/La 和较高 Sm/La 比值的矿物, 据此提出 AHOB 碰撞后钾质岩的成因不同于传统的深俯冲作用, 而是一种比较浅的俯冲叠瓦作用 (60-80 公里), 且与在俯冲板片和地幔楔交界面形成的混杂岩中伴生的硬柱石蓝片岩密切相关。通过模拟计算, 对比“深-浅”两种不同俯冲模型产出熔体的 Th/La 比值, 可见“浅俯冲”模型可以更好地揭示 AHOB 钾质岩中观察到的独特地球化学特征。

因此, AHOB 钾质-超钾质岩浆源区中这种独特的高 Th/La 比值, 绝非简单的在陆内深俯冲过程中通过大陆地壳的直接熔融形成, 而是与复杂的壳幔相互作用、浅部叠瓦作用及后碰撞造山作用有关。这一新模型预测, 如果蓝片岩在造山带钾质岩成因中具有重要作用, 那么随着时间推移, 越古老的造山带钾质岩中含有的 Th/La 比应该越低, 反之则越高, 这是因为蓝片岩在地球演化过程中的作用在逐渐增强。事实上, 由老至新的造山带钾质岩中 Th/La 比值的确呈现一个逐渐升高的趋势, 从而进一步证实了浅俯冲模型对于 AHOB 钾质岩成因的约束, 以及混杂岩中伴生的蓝片岩在造山带碰撞后钾质岩成岩过程中的重要作用。这些过程对于理解现代地球上的弧岩浆和碰撞后造山带岩浆作用非常关键, 但是可能在地球形成早期 (如晚太古宙) 更为重要, 因为由众多弧拼合并而形成的原始地壳很可能广泛分布在这一地球演化时期。

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

攀枝花大田地区岩浆岩地球化学、年代学、同位素特征及其地质意义

张苏恒¹, 徐争启^{1,2,3}, 刘映君¹, 尹明辉¹

1. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059;

2. 地学核技术四川省重点实验室, 成都 610059

3. 成都理工大学地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059

Rodinia 超大陆的裂解是前寒武纪研究的重点, 扬子板块出露有较多的新元古代沉积-火山岩, 过去常作为研究 Rodinia 超大陆裂解的重要地区。超大陆的裂解目前存在两种模型: (1) 裂谷-地幔柱模型; (2) 板块-岛弧模型。基于两种观点的不同, 新元古代时期华南是处于 Rodinia 超大陆的中部还是西北缘就引起了较大争议。

攀枝花大田地区位于扬子板块西缘南部。区域内出露有新元古界至新生界地层; 发育有强烈的岩浆活动, 且具有多期次的特征。侵入岩以酸性岩为主, 并发育一系列基性侵入岩, 侵入到大田、黑么、田冲岩体中。前人研究表明, 大田岩体中花岗闪长岩形成年龄约为 760 Ma, 为俯冲板块熔融而成, 表明研究区经历了超过 200 Ma 的持续俯冲作用; 而大田岩体南部黑么岩体中斑状花岗岩的年龄约为 825 Ma, 形成于弧后伸展环境; 大田岩体北部瓜子坪流纹岩的年龄为 785 Ma, 具有低 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征, 认为其形成于裂谷-地幔柱环境。前人的研究结果表明, 该地区是研究 Rodinia 超大陆裂解的重要场所。但是, 对于 Rodinia 超大陆的裂解还需要进一步研究, 到底是什么导致了该地区低 $\delta^{18}\text{O}$ 岩石的形成, 是裂谷-地幔柱还是弧前扩张? 如果是俯冲板块后退导致的拉张背景, 那么这一构造作用是什么时候开始, 又是什么时候结束? 本文通过研究, 初步得出以下结论:

(1) 研究区 846-805 Ma 的辉绿岩未发生明显的地壳混染作用, 受到一定程度的分离结晶作用, 其源

区受到了俯冲成分的改造, 其深度接近 85 km; 780-762 Ma 的辉绿岩未发生明显的地壳混染作用, 受到一定程度的分离结晶作用, 源区受到了明显的俯冲成分改造, 并发生了明显的岩石圈-软流圈相互作用, 其深度为石榴子石相稳定存在的深度 (>85km)

(2) 大田岩体为花岗闪长岩和石英闪长岩, 其地球化学特征为 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, 低 K_2O 、高 Na_2O , $\text{Sr} \geq 400 \times 10^{-6}$, $\text{Y} \leq 20 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} \leq 1.8 \times 10^{-6}$, $\text{Sr}/\text{Y} \geq 20$, 具有典型埃达克岩的特征, 为俯冲板块熔融而成, $\text{Mg}^\#$ (49.32-55.18) 表明俯冲板块溶体中加入了部分橄榄岩。

(3) 氧逸度的研究表明了 846 Ma-762 Ma 为持续的俯冲环境这一结果在一定程度上是正确的。同时, 846-805 Ma 的氧逸度特征 (高-低) 表明了在这一时期俯冲作用转为了俯冲后退。而 805 Ma-780 Ma 这一时期研究区可能为弧后扩张至弧前扩张的过渡环境, 780-753 Ma 研究区可能为持续的俯冲作用。

(4) 扬子板块西缘的形成主要可分为四个阶段: ①840 Ma 之前为持续的俯冲环境; ②840-810 Ma 为俯冲后退导致的弧后伸展环境; ③810-780 Ma 为弧后伸展转为弧前扩张的阶段; ④780-750 Ma 为持续的俯冲环境。

(5) 结合岩石学、地球化学、同位素特征以及氧逸度特征, 本位认为扬子板块位于 Rodinia 超大陆西北部, 与印度西北部、马达加斯加、塞舌尔、塔里木克拉通共同构成了 Rodinia 超大陆的西北缘陆块。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 41872079)、成都理工大学珠峰科学研究计划 (2022ZF11413)

第一作者简介: 张苏恒 (1993-), 博士研究生, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: 527077518@qq.com

*通信作者简介: 徐争启 (1975-), 教授, 研究方向: 铀矿地质及矿床地球化学. E-mail: 547510779@qq.com

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

蛇纹岩脱水交代俯冲大陆板片的电气石原位 B 同位素记录 (Sopron area, Eastern Alps)

熊家伟¹, 陈伊翔^{1,2*}, Attila Demény³

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

2. 中国科学技术大学中国科学院比较行星学卓越创新中心, 安徽合肥 2300262;

3. 匈牙利科学院天文与地学研究所, 布达佩斯 H-1112

俯冲带流体对壳幔相互作用和系统演化具有重要影响。俯冲板片脱水交代地幔楔可以显著改变地幔岩石及其弧岩浆岩的地球化学组成, 同时, 俯冲板片脱水的流体也能交代改造板片岩石。在俯冲带中由于物质组成的复杂性, 流体的来源和性质多种多样, 一个重要的问题是如何解析和识别俯冲带, 尤其是大陆俯冲带中蛇纹岩来源的流体? 结合电气石地球化学特征及原位 B 同位素数据或许能提供更多制约。我们对东阿尔卑斯 Sopron 地区的正片麻岩及受到富 Mg 流体交代的富蓝晶石石英岩中的电气石进行了一些工作。

主量特征上, 片麻岩中电气石核幔部和交代岩中电气石的非常类似, 总体是铁质的电气石, Na 含量相对较低。交代岩中电气石边部则显示非常高的 Mg# (~0.99)。B 同位素组成上, 片麻中的电气石的核幔边具有类似的 B 同位素组成 ($\delta^{11}\text{B} = -14 \sim -12\%$), 落入大陆地壳的 B 同位素范围。交代岩中电气石核幔部具有类似的 B 同位素组成, $-14 \sim -9\%$, 与花岗质岩石的范围类似。而边部电气石的 B 同位素显著升

高, $\delta^{11}\text{B} = 3 \sim 20\%$ 。这种具有极高 Mg# 的交代成因电气石边部指示了流体具有富 Mg-¹¹B 的特征。因此交代岩中的电气石记录了蛇纹岩流体对俯冲的陆壳岩石的改造过程。结合前人的一些工作, 片麻岩中电气石核幔部形成于岩浆期的生长环带, 边部可能由变质过程中生长而成, Mg# 略微升高。而石英岩中的电气石核幔部形成于近峰期条件下的变质脱水过程。在退变质 ~1GPa, ~550°C 条件下受到了随后俯冲的大洋板片 Penninic Unit 富蛇纹岩来源流体的交代作用, 形成边部富 Mg-¹¹B 的电气石。

在不同的地方报道有不同的交代电气石。他们具有相对较重的 B 同位素组成和较高的 Mg# (0.6-0.8)。这些形成于不同来源流体 (如俯冲大洋板片、大理岩等) 的电气石与本文报道的具有非常高 Mg# 的电气石明显不同。具有非常高 Mg# (>0.9) 的电气石在西阿尔卑斯 Dora Maira 地块和 Monte Rosa 地块均有报道, 且都被认为与蛇纹岩流体密切相关。因此, 我们认为具有交代成因的电气石, 结合它们非常高的 Mg# 和较高的 $\delta^{11}\text{B}$, 或许作为俯冲带蛇纹岩来源流体的“指示剂”。

第一作者简介: 熊家伟 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 俯冲带流体地球化学. E-mail: xiongjiw@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈伊翔 (1983-), 教授, 研究方向: 俯冲带熔体地球化学. E-mail: yxchen07@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

柴北缘造山带不均一的岩石圈地幔：同折返和碰撞后 镁铁质岩浆岩的地球化学证据

孙国超¹, 戴立群^{1,2}, 赵子福^{1,2}

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

2. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

大陆碰撞造山带普遍发育有同折返和碰撞后镁铁质岩浆岩, 其地球化学特征不仅能够反应造山带岩石圈地幔的性质, 而且为研究大陆碰撞造山带俯冲陆壳物质再循环及其壳幔相互作用提供了重要载体。为此, 我们以青藏高原东北部柴北缘造山带古生代镁铁质岩浆岩为研究对象, 对其进行了全岩主微量元素、Sr-Nd-Hf 同位素、锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素分析。结果表明, 这些镁铁质岩石形成于 420 ± 8 至 395 ± 2 Ma 和 383 ± 5 至 368 ± 3 Ma, 分别对应柴北缘造山带同折返和碰撞后阶段。它们具有弧型的微量元素分布特征、亏损到富集的全岩 Sr-Nd-Hf 同位素组成以及高的锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 与柴北缘造山带正片麻岩和陆壳型榴辉岩相似, 表明它们的地

幔源区受到了俯冲大陆地壳物质的交代作用。同折返和碰撞后镁铁质岩浆岩放射性成因同位素组成的差别指示交代其地幔源区的地壳物质组成和数量有所不同。微量元素定量模拟结果显示, 同折返和碰撞后镁铁质岩浆岩的微量元素组成可由 93.0 : 6.0 : 1.0 和 91.7 : 2.8 : 5.5 的地幔橄榄岩、正片麻岩来源熔体和陆壳型榴辉岩来源熔体的混合物分别发生 23% 和 28% 的聚集分离熔融作用形成。这些不同性质和比例的地壳物质来源的熔体与地幔橄榄岩发生反应产生了不均一的造山带岩石圈地幔。因此, 同折返和碰撞后镁铁质岩浆岩的地球化学组成可以有效记录大陆碰撞造山带岩石圈地幔的成分变化和大陆俯冲隧道内发生的壳幔相互作用。

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB41000000)

第一作者简介: 孙国超 (1989-), 副研究员, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: sgc@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 赵子福 (1973-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学和化学地球动力学. E-mail: zfzhao@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

大陆俯冲带水岩相互作用过程中的 Ba 同位素分馏行为

陈安霞^{1, 2}, 古晓锋¹, 陈伊翔^{1*}, 黄方¹

1. 中国科学技术大学 壳幔物质与环境国家重点实验室, 合肥 230026;

2. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

俯冲带蛇纹岩脱出的流体不但可以将流体活性元素运移到地幔楔, 还可以和围岩发生水岩相互作用。虽然前人研究发现在榴辉岩脱水及流体结晶过程中 Ba 同位素可发生很大的分馏, 但是蛇纹岩脱出流体与变质岩相互作用过程中 Ba 同位素的分馏行为目前还没有相关研究。西阿尔卑斯 Dora-Maira 地体白片岩是陆壳深俯冲过程中蛇纹岩来源的流体交代变花岗岩形成的一套超高压变质岩。本文测量了西阿尔卑斯白片岩及变花岗岩的 Ba 同位素组成, 发现变花岗岩 Ba 同位素变化范围相对较小 ($\delta^{138}\text{Ba} = -0.25\text{‰} \sim 0.26\text{‰}$), 而白片岩的 Ba 同位素变化范围很大 ($\delta^{138}\text{Ba} = -0.99 \sim 0.48\text{‰}$)。在排除了后期风化、原岩不均一性及动力学过程的影响后, 我们认为白片岩

的 Ba 同位素变化是由水岩相互作用引起。同时 Ba 同位素与 Ba 含量及其他流体活性元素 (Sr、Cs、Zn 和 Cu) 间有很好的线性关系, 也佐证了我们的观点。我们还建立了一个水岩反应模型来描述流体作用过程中 Ba 同位素及 Ba 含量的变化, 该模型显示白片岩形成于较高的水岩比 (4~12) 条件下, 因此俯冲隧道内部是一个强水岩反应带。蛇纹岩来源的流体具有较重的 Ba 同位素组成 ($\sim 0.7\text{‰}$), 在水岩作用过程中岩石中的重 Ba 同位素优先进入流体, 其分馏值 ($\Delta^{138/134}\text{Ba}_{\text{流体-岩石}}$) 可达 0.8‰。因此, 蛇纹岩来源的流体在水岩反应前后都具有较重的 Ba 同位素组成, 这种富集重 Ba 同位素的流体会进一步影响局部地幔及岛弧火山岩的 Ba 同位素特征。

基金项目: 地球化学 (42203012、41873009、42073029)

第一作者简介: 陈安霞 (1987-), 博士后, 研究方向: 金属稳定同位素地球化学. E-mail: anxia@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈伊翔 (1983-), 教授, 研究方向: 俯冲带熔/流体活动及其地球化学效应. E-mail: yxchen07@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

胶东半岛晚侏罗纪煌斑岩成因及构造意义

陈燕平¹, 李旭平^{1*}

1. 山东科技大学 地球科学与工程学院 青岛 266590

胶东半岛自中生代起经历了克拉通的减薄与破坏, 岩石圈地幔的物质组成与结构发生了的变化。镁铁质岩浆岩是地幔岩浆作用的产物, 是理解大陆岩石圈地幔演化的窗口。胶东半岛出露的镁铁质岩主要为早白垩纪 (133~112Ma, 峰期年龄为~120Ma), 少量晚三叠纪镁铁质岩 (214~200Ma) 出现在苏鲁超高压变质带。近年来在胶东半岛陆续发现晚侏罗纪煌斑岩, 但对其成因过程未作深入研究。本次研究的煌斑岩来自胶东半岛栖霞地区的金山金矿区, 其锆石和磷灰石 U-Pb 定年分析显示其成岩年龄为~155Ma。对金山煌斑岩进行详细的全岩主、微量元素及 Sr-Nd-Pb 同位素分析表明, 这些煌斑岩呈钙碱性, 富集 LREEs 和 LILEs 元素, 亏损 HFSEs (如 Nb、Ta、Ti 等), 具有 IAB 式微量元素分布特征。这些岩石具有相对富集的 Sr-Nd-Pb 同位素特征, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值为 0.70896~0.71149、 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 -11.63 ~ -7.36, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 17.23 ~ 18.55、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.43~15.63、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 37.66~38.77。这些镁铁质岩的母岩浆在源区或上升的过程中捕获了新太古代、三叠纪和早侏罗纪锆石, 但 Sr-Nd 同位素与 SiO_2 含量无明显的相关性, 这表明受地壳混染作用影响有限。全岩 Rb/Sr、Ba/Rb、Dy/Yb、

K/Yb、Nb/Ta、Fe/Mn 比值表明其源区为尖晶石-石榴石过渡带的含角闪石二辉橄榄岩, 且源区富辉石岩脉, 表明源区曾受含水熔体的交代作用。煌斑岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成表现出与三叠纪超高压变质岩具有亲缘关系的, 其中元古代的 Nd 二阶模式年龄, 及三叠纪继承锆石的出现均表明源区受到了来自扬子板块陆地壳物质的影响。全岩 Nb/U、Th/Nb、Ba/Th、 $(\text{Ta}/\text{La})_N$ 、 $(\text{Hf}/\text{Sm})_N$ 表明岩石圈地幔也受含水流体的交代, 这些流体可能主要来源于俯冲的古太平洋板块。因此胶东半岛晚侏罗纪煌斑岩成因过程如下: (1) 三叠纪时期扬子板块向北俯冲, 与华北板块发生碰撞。扬子板块沿俯冲隧道发生脱水和部分熔融作用, 交代华北克拉通下部的岩石圈地幔, 形成富集的岩石圈地幔。但由于岩石圈地幔温度较低, 交代岩石圈地幔并未发生大规模部分熔融作用; (2) 侏罗纪时期, 古太平洋板块低角度俯冲到华北克拉通之下, 释放含水流体进一步交代上覆岩石圈地幔。~155Ma 时, 古太平洋板块发生局部回撤, 软流圈侧向流动, 加热上部交代的岩石圈地幔, 进而部分熔融形成晚侏罗纪煌斑岩。由此可见晚侏罗纪煌斑岩岩石成因反映了华北克拉通东部岩石圈地幔的演化过程。

基金项目: 国家自然科学基金山东省联合基金项目(U1906207)

第一作者简介: 陈燕平 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 矿物岩石地球化学. E-mail: chenyanpingfeb@126.com

*通信作者简介: 李旭平 (1959-), 教授, 研究方向: 矿物岩石地球化学. E-mail: llixuping@sdust.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

俯冲带超临界流体活动及其地球化学效应

陈仁旭^{1,2*}, 陈铁男¹, 郑永飞^{1,2}

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

2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 安徽合肥 230026

超临界流体具有高的溶质含量但低的粘滞度, 越来越多的研究认为其是俯冲带元素迁移的主要载体。然而, 俯冲带超临界流体只在一定的温压范围内保持热力学稳定, 随着温度和压力的变化, 超临界流体会发生相分离分解为不混溶的富水溶液和含水熔体或者由于与岩石发生反应而失去超临界性质。此外, 俯冲带变质岩经历复杂的演化过程, 导致早期的流体活动记录有可能被抹掉。这两方面的原因导致俯冲带中超临界流体活动识别很困难。超高压复杂脉体及其寄主超高压变质岩为俯冲带超临界流体活动研究提供了理想的研究对象。超高压复杂脉体主要由石榴石、绿辉石、石英、金红石、角闪石和磷灰石组成, 石榴石中发现有柯石英包裹体。脉体中矿物不仅含有较高含量的 Cr、Ni、Sr、REE 和 HFSE, 还含有多相晶体包裹体。多相晶体包裹体含有绿辉石、石英、角闪石、磷灰石、帘石、斜长石、云母、金红石、方解石和无水石膏等矿物相以及流体和空洞。这些特征表明, 这些超高压复杂脉体是超临界流体成因。通过对多相晶体包裹体中矿物的识别, 恢复出超临界流体的组成为 31 wt.% SiO₂, 20 wt.% CaO, 10 wt.% (SO₄)²⁻, 8 wt.% (CO₃)²⁻, 8 wt.% FeO, 7 wt.% Al₂O₃, 和 9 wt.% H₂O, 以及少量的 Na₂O, K₂O 和 TiO₂。超临界流体高的碳、硫和铁含量, 说明它们是氧化性的, 具有高的氧逸度; 这也得到了石榴石-单斜辉石氧逸度计算结果的证实。石榴石-单斜辉石氧逸度计、矿物之间 V 的配分、磷灰石 Eu 和 Ce 异常和全岩成分表明, 超临界流体的交代作用导致榴辉岩的 fO_2 值从 FMQ-

3.40 ~ FMQ-3.31 升高到 FMQ-0.08 ~ FMQ+1.86。被交代榴辉岩的 Fe 和 S 含量、Fe³⁺/Fe 比值以及绿辉石和黄铁矿的模式含量都有所下降。这一观察结果表明超临界流体在水岩反应过程中溶解了榴辉岩中的绿辉石和黄铁矿并且引发了 Fe-S 氧化还原耦合, 进一步将榴辉岩中的三价铁和硫酸盐转移到超临界流体中。脉体中巨晶矿物的变价元素剖面表明, 超临界流体在演化过程中逐渐变得氧化, fO_2 值从 FMQ+0.02 升高到 FMQ+0.32。在超临界流体的运输过程中, 是石榴石的结晶导致其 Fe³⁺/Fe 比值和氧逸度的升高。考虑到脉体中几乎不出现含硫矿物, 因此硫可以被超临界流体长距离运输。这些观察表明, 超临界流体具有很强的氧化性, 使其交代的岩石更加氧化。因此超临界流体是将氧化组分从板片迁移到地幔楔的有效载体, 并对高氧逸度的弧岩浆产生贡献。模拟计算和天然观察表明, 超临界流体会导致强烈的 Nb-Ta 分异, 其交代的榴辉岩和地幔楔岩石可以提供高 Nb/Ta 比值的储库。根据统计的 Nb-Ta 数据, 我们建立了两个可能用于识别俯冲带超临界流体活动的可能地球化学指标。超临界流体高的高场强元素迁移能力还表现在变质新生长锆石相比原岩锆石具有较均一的 Zr 同位素组成。受超临界流体交代的榴辉岩表现出不同的 Mg-Fe 同位素组成, 考虑到超临界流体高的 Fe 含量, 其交代地幔楔可以为俯冲带岩浆岩提供异常 Fe 同位素组成的源区。这些观察表明, 超临界流体由于其高的元素溶解能力和迁移能力是俯冲带弧下深度元素迁移的重要介质, 对俯冲带壳幔相互作用具有重要意义。

基金项目: 科技部重点研发项目 (2018YFA0702700)

第一作者简介: 陈仁旭 (1981-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: chenrx@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

逐渐变快的板块构造运动: 来自碎屑锆石的制约

李振新¹, 张少兵^{1*}, 郑永飞¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

威尔逊旋回包括了完全的板块构造过程, 包括张裂、俯冲和碰撞, 是板块构造的本质, 其完整的运行时长可以反映板块构造运动的快慢。我们对华北克拉通南缘太华杂岩古元古代变沉积岩中的碎屑锆石进行了系统的 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素和微量元素分析。碎屑锆石的主要 U-Pb 年龄峰期有 2.6–2.5 Ga、2.3 Ga、2.2 Ga 和 1.9 Ga。2.6–2.5 Ga 的碎屑锆石具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 表明华北克拉通在新太古代时期发育了大量新生地壳。2.3 Ga 的碎屑锆石具有负的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 主要反映了大陆张裂作用下的相对古老地壳的再造。2.2 Ga 的碎屑锆石具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值、较高的 U/Yb 比值, 表明其来自于大陆弧安山岩。与较老的锆石相比, 2.2 Ga 的碎屑锆石具有较低的 LREE/MREE、REE+Y 和较高的 P, 表明其源区中有沉积物的加入。

其氧逸度较低, 同时变沉积岩中含有大量的石墨, 这些特征反映了加入的沉积物含有较多的有机碳, 可能是 2.3 Ga Lomagundi-Jatuli 事件中的埋藏的有机物。1.9 Ga 的锆石无明显 CL 环带, 具有低的 Th/U 比 (< 0.1) 和高的 (U/Ce)/Th 比 (> 1), 属于典型的变质锆石, 记录了古元古代晚期大陆碰撞事件。因此, 这些碎屑锆石完整记录了 2.3 Ga 大陆张裂、2.2 Ga 大洋俯冲和 1.9 Ga 大陆碰撞事件, 揭示了一个完整的古元古代时期的威尔逊旋回, 其运行时长近 400 Myr。对碎屑锆石大数据进行了时间序列频谱分析, 我们发现威尔逊旋回的周期随时间逐渐变短。结合对超大陆聚合和持续时间、造山带和碰撞带的持续时间、被动大陆边缘的持续时间和古地磁数据的分析, 我们认为随着地球的不断冷却和冷俯冲的启动, 板块构造运动的速率逐渐变快。

基金项目: 41973002

第一作者简介: 李振新 (1995–), 博士后, 研究方向: 前寒武纪地质学. E-mail: zhenxinli@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 张少兵 (1980–), 教授, 研究方向: 前寒武纪地质学. E-mail: sbzhang@ustc.edu.cn

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

石榴石的高水含量及其对俯冲带水迁移的意义

乔新月, 陈伊翔*, 周琨

中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 合肥 230026

俯冲带是地壳与地幔之间物质循环的关键区域, 也是水循环的重要通道。俯冲带中的岩石和矿物中会含有一定量的水, 一般以结构羟基和分子水的形式存在。在大陆俯冲带中, 俯冲物质能够将水携带至地球内部, 影响地幔的诸多物理化学性质, 因此确定俯冲地壳的水储存能力是认识俯冲带水迁移的关键问题。

对苏鲁造山带荣成地区超高压变质榴辉岩中石榴石薄片剖面进行原位水含量分析, 发现石榴石具有很高的结构羟基含量, 平均值为 1500 ppm (表达为 wt.% H₂O, 下同), 最高可达 3500 ppm; 且分子水含量低, 平均约为 70 ppm, 超过半数分析点低于傅立叶红外光谱的分析检出限, 同时发现石榴石颗粒内部水含量具有极大变化, 范围为 600-3800 ppm。单个石榴石颗粒的测图结果表明, 含水量与元素组成之间具有良好的相关性。其中, 含水率与 Ca、Mg 呈正相关, 与 Fe、Mn 负相关, 表明石榴石取代更可能是羟

基取代机制。极低的分子水含量和石榴石不能根据核-边关系进行划分的水含量环带表明, 折返过程的流体活动或退变质作用不太可能是石榴石高含水量的来源。这种石榴石的不均匀环带反映了矿物的多阶段生长, 主要对应进变质峰期超高压变质阶段及折返初期阶段, 因此石榴石的结构羟基含量可以代表峰期的水储存。在俯冲过程中, 随变质温压条件的升高岩石中的水可以转变为结构羟基赋存于石榴石中, 因此俯冲带条件下石榴石具有极强的水储存能力, 其饱和水含量与石榴石成分强烈相关。

结果发现, 超高压变质榴辉岩中的元素环带显示了石榴石的多阶段生长, 随俯冲过程形成具有不同组成的石榴石, 同时岩石中携带的水转化为结构羟基储存在石榴石中, 进而形成了石榴石中与主微量元素环带对应的水含量环带。因此, 石榴石能够在俯冲带中携带大量的水, 并作为将水输送到地幔深处的重要载体。

基金项目: 板块构造体制下关键挥发性元素循环的过程和机理 (批准号: XDB41020503)

第一作者简介: 乔新月 (1998-), 女, 博士研究生, 研究方向: 俯冲带流体活动研究. E-mail: qxy320@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈伊翔 (1983-), 男, 教授, 研究方向: 俯冲带熔/流体地球化学研究. E-mail: yxchen07@ustc.edu.cn