

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

地壳深熔过程中转熔锆石与深熔锆石的区分和识别

郑春丽¹, 夏琼霞^{1*}, 朱二林¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

锆石是变质岩中最重要的定年矿物之一, 其高 U 含量和低 Pb 含量的特征, 使得锆石 U-Pb 定年成为同位素年代学研究中最有效和最常用的方法之一。锆石可以形成于几乎所有的地质环境, 包括岩浆作用、变质作用和热液作用, 以及变质作用的不同阶段。不同类型变质锆石的形成不仅取决于变质的温度和压力条件, 还取决于变质熔/流体的活动能力, 以及流体的物理化学属性。因此, 对变质锆石的有效区分和识别, 对解释锆石 U-Pb 定年及对应的地质事件具有重要指导意义。林芝地区位于喜马拉雅东构造结西侧的拉萨地体东南缘, 该区出露了大量的混合岩和淡色脉体, 为我们进行转熔锆石和深熔锆石的区分提供了理想的研究样品。锆石 U-Pb 定年结果显示, 该地区主要经历了~49 Ma 和~25 Ma 的两期深熔事件。根据 CL 图像、包裹体组成和微量元素特征可将该地区混合岩中的锆石分为 3 种类型。I 型锆石 U-Pb 定年结果广泛, 主要是来自源区的残留锆石。II 型和 III 型锆石均为新生锆石, II 型锆石为转熔锆石, 表现为: (a) 玻璃质或完全结晶的多相包裹体; (b) CL 图像中呈海绵状或无分带或弱振荡分带, 亮度较低; (c)

Th 和 U 含量高且 Th/U 比值广泛, HFSE (如 Hf、Nb、Ta) 和 HREE 含量相比 I 型锆石高; (d) 与岩浆锆石相似的 REE 配分模式。转熔锆石中 HFSE 和 HREE 的富集反映了转熔过程中钛铁矿、金红石、榍石、石榴石、云母等富钛矿物的分解对锆石生长的贡献。III 型锆石为深熔锆石, 表现为: (a) 振荡分带、面状分带或冷杉状分带, 在 CL 图像中亮度较高; (b) U 含量略高, Th 含量中等, Th/U 比值较低 (主要在 0.01~0.1 之间); (c) Hf、Nb、Ta 等 HFSE 含量与 I 型锆石相当或略高; (d) 与岩浆锆石相似的 REE 分布模式。深熔锆石是深熔熔体演化过程中由于温度降低和贫 Zr 矿物结晶而形成的。尽管转熔锆石和深熔锆石通常具有相似的 U-Pb 年龄范围, 但是其锆石岩相学特征、包裹体类型, 以及微量元素特征的差异, 可以将它们进行很好的区分和识别, 为我们理解和认识地壳深熔过程中熔体的分异和演化, 以及汇聚板块边缘的构造热演化提供了重要参考。

关键词: 转熔锆石; 深熔锆石; 部分熔融; 转熔反应; 喜马拉雅东构造结

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42472069)

第一作者简介: 郑春丽 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 岩石矿物化学. Email: Zhengchunli@mail.ustc.edu.cn

*通讯作者简介: 夏琼霞 (1979-), 教授, 研究方向: 变质岩石学、矿物学和地球化学. Email: qxia@ustc.edu.cn

第二作者简介: 朱二林 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 岩石矿物化学. Email: zhuel@mail.ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

扬子地块西南缘大红山群变火山-沉积岩的变质作用
和年代学研究姜杭云¹, 刘福来^{1*}, 王舫¹, 王慧宁¹, 李同宇¹

1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037

云南新平地区大红山群位于扬子地块西南缘, 是扬子地块西缘出露的少数古-中元古界结晶基底。大红山群主要由低绿片岩-高角闪岩相变质的火山-沉积岩组成。目前对大红山群变沉积岩和变基性岩的变质作用已有相关研究。前人报道了大红山群老厂河组变沉积岩包括含蓝晶石-十字石石榴二云母片岩和石榴云母片岩的变质演化过程, 认为这些岩石记录了新元古代中压相系顺时针 P-T 轨迹。然而, 关于大红山群的中压相系变质岩石的岩石学、矿物相转变、变质演化及年代格架仍需进一步深入系统且精细地研究。本研究对大红山群老厂河组的变沉积岩和变基性岩详细开展矿物学、岩石学和年代学研究, 并利用相平衡模拟方法, 限定峰期变质条件和 P-T 轨迹。重建大红山群的变质岩石的变质演化过程用来阐释扬子地块西南缘构造-热事件演化历史, 为深入探讨扬子地块前寒武纪早期演化历史与 Rodinia 超大陆聚合和裂解的内在成因关联提供关键地质证据。研究区出露的变沉积岩岩性为石榴白云母片岩和蓝晶石榴白云母片岩, 变基性岩呈透镜状和夹层状产于变沉积岩内, 主要岩性为石榴角闪岩。岩相学研究表明石榴白云母片岩蓝晶石榴白云母片岩矿物组合可划分为两个阶段: (1) 升温升压的进变质阶段, 峰期矿物组合分别为石榴石+白云母+黑云母+斜长石+石英+金红石+钛铁矿和蓝晶石+石榴石+白云母+黑云母+石英+金红石+钛铁矿 (M1);

(2) 峰后降压阶段, 退变质阶段矿物组合分别为黑云母+钠长石+石英和黑云母+石英+白云母 (M2)。石榴角闪岩的矿物组合可分为变质峰期阶段石榴石+角闪石+斜长石+黑云母+金红石+钛铁矿 (M1) 和峰后变质阶段角闪石+斜长石+黑云母+磁铁矿+石英 (M2)。其中降温降压的退变质阶段由石榴石边部的“白眼圈”记录。利用传统温压计和相平衡模拟计算得出石榴白云母片岩和蓝晶石榴白云母片岩的峰期温压条件为 560~580℃, 8.5~9.5 kbar 和 575~620℃, 6.5~7.5 kbar, 与变沉积岩共生的石榴角闪岩的峰期温压条件为 590~650℃, 8.2~9.8 kbar, 之后共同经历降温降压的退变质阶段。综合前人和本研究的锆石、白云母、独居石和金红石变质矿物联合定年结果, 获得大红山群老厂河组变质岩石的峰期变质年龄为 845~830 Ma。本研究和前人研究表明大红山群变沉积岩和变基性岩的石榴石进变质成分环带记录了进变质和温度峰期的变质过程, 而岩石中的退变质矿物组合代表了降温降压的变质阶段。大红山群变质岩石的顺时针型 P-T 轨迹和变质时代表明, 扬子地块西南缘在 845~830 Ma 时发生了一次中压型碰撞造山变质作用, 经历先俯冲碰撞, 此后抬升至地表的过程。

关键词: 扬子地块西南缘; 大红山群; 变质演化; 年代学; P-T 轨迹

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

青藏高原南拉萨地体尼木地区始新世闪长玢岩脉与花岗岩脉揭示新特提斯板片撕裂过程

朱拓¹, 赵志丹^{1*}, 王珍珍¹, 刘栋¹, 朱弟成¹, 莫宣学¹

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100000

大洋俯冲到大陆碰撞的过程对于理解造山带形成与大陆地壳增生具有重要科学意义。然而, 此阶段青藏高原深部地球动力学演化仍存在争议。本研究通过针对尼木地区闪长玢岩与花岗岩脉开展全岩地球化学和锆石 U-Pb-Hf 同位素地球化学, 结合南拉萨地体岩浆岩数据, 揭示了新特提斯洋大洋板片从俯冲到撕裂的地球动力学过程。闪长玢岩脉与花岗岩脉侵位于 47~46 Ma, 其锆石同位素组成均显示 Hf 亏损特征, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 +9.0 至 +13.8, 具有年轻的亏损地幔与地壳模式年龄。两类样品均呈现俯冲相关弧岩浆特征, 表现为大离子亲石元素富集与高场强元素亏损。闪长玢岩脉具有埃达克岩特征, 有较低 SiO_2 (56.2~59.8 wt.%) 与较高 MgO (3.4~4.1 wt.%)、镁指数 ($\text{Mg\#} = 54\sim 58$) 和较高的 Sr/Y 值 (75.1~120.5), 源自含俯冲

沉积物加入的大洋板片部分熔融, 并经历了地幔橄榄岩交代, 主要经历以单斜辉石和石榴子石为主导的分离结晶作用。花岗岩脉具有高 SiO_2 (71.2~73.5 wt.%)、中高 K_2O (3.8~4.6 wt.%) 和低 MgO (0.2~0.4 wt.%) 的特征, 源于冈底斯新生地壳部分熔融, 并经历以斜长石和钾长石为主的分离结晶过程。我们认为, 欧亚—印度大陆的陆陆碰撞, 触发了特提斯洋板片撕裂, 冈底斯带古新世-始新世岩浆活动和后续的大陆地壳增长。新特提斯洋板片约 53 Ma 自西向东开始发生撕裂, 导致亏损地幔与新生地壳部分熔融, 最终形成具有弧岩浆属性的尼木闪长玢岩脉与花岗岩脉

关键词: 拉萨地体; 新特提斯洋; 埃达克岩; 岩石学; 地球动力学

基金项目: 国家自然科学基金 (2022YFF0800901-3)

第一作者简介: 朱拓 (2002-), 博士研究生, 研究方向: 岩石学、地球化学. Email: tuo.zhu@qq.com

*通信作者简介: 赵志丹 (1968-), 教授, 研究方向: 岩石学、地球化学. Email: zdzhao@cugb.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

挥发分与金属的俯冲循环: 来自造山带橄榄岩
和幔源岩浆岩的约束汪在聪^{1*}, 任爱卿¹, 汪翔¹, 戴立群²

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 地球科学学院, 武汉 430074;

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

俯冲驱动的亲铜元素循环对汇聚板块边缘地幔交代富集和成矿作用具有重要意义。然而, 在不同俯冲背景和俯冲不同阶段下, 板片来源熔/流体中硫的氧化还原状态、及其能否迁移大量的金属到上部地幔楔富集, 存在较大争议。华北克拉通东部自古生代以来经历了多期次的大洋-大陆俯冲事件, 是研究俯冲背景下挥发分和金属循环的重要实例。本研究聚焦于华北克拉通东部苏鲁造山带橄榄岩和交代地幔来源的岩浆岩, 发现冲板片来源熔流体的氧化还原性质会随着俯冲深度(或阶段)的变化而变化, 且尽管贡献了大量的 S 等挥发分, 但并未造成地幔楔金属元素(如 Au、Cu)的显著富集。具体研究内容如下: 苏鲁造山带方辉橄榄岩具有古元古代的 Re 亏损模式年龄(1.7~1.9 Ga), 并显示 S 和金属的强烈亏损, 是华北克拉通岩石圈地幔高度熔融的结果。相比之下, 纯橄岩和二辉橄榄岩则反映了后期不同程度的交代过程, 主要可分为三期。在超高压变质作用阶段, 玄武质熔体的交代作用会引入还原性的 S ($\delta^{34}\text{S}$: ~0‰), 并将亏损地幔橄榄岩的金属元素含量补充至饱满地幔水平。而在折返阶段中, 尽管存在氧化性壳源熔/流体的加入, 且橄榄岩的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ (高至 0.139)、 $\delta^{34}\text{S}$ (高至 5.2‰)、和 Fe^{3+} 比例(高至 59%)显著升高, 但其金属元素含量并未升高, 表明这些交代过程对金属元素的贡献非常有限。因此, 大陆俯冲带中 S 与金属迁移效率可能会随着深度的变化而变化: 高温高压条件下地幔再富集作用向亏损地幔楔加入了还原性 S 及少量金属, 意味着弧下地幔深度板片释放的

熔流体中硫主要以还原性 S 为主; 而浅部交代介质是含硫酸盐的氧化流体, 但是并未携带大量金属。相比于地幔橄榄岩, 幔源岩浆岩能够反映更大范围的地幔源区特征。华北东部形成于受到大洋俯冲改造的、交代岩石圈地幔来源的岩浆岩具有较高的 Ba/Nb 比值(10~20), $\delta^{34}\text{S}$ (0‰~2‰) 和低 $\epsilon\text{Nd}_{\text{DHP}}$ 值(-4 至 5), 以及较高的 S 含量(700~3200 $\mu\text{g/g}$) 和较低的元素含量(如 Au: 0.1~1 ng/g)。相比之下, 形成于大陆-大洋俯冲叠加改造的、岩石圈地幔来源的岩浆岩具有更高的 Ba/Nb 比值(100~500), $\delta^{34}\text{S}$ (2‰~6‰) 和更低的 $\epsilon\text{Nd}_{\text{DHP}}$ 值(-20 至 -2), 以及更高的 S (高至 4700 $\mu\text{g/g}$) 和 Au (1~4 ng/g) 含量, 而 Cu 等金属元素含量仍然较低。整体上, 这些富水岩浆的 PGE、Cu 含量以及 Os/Ir、Ru/Ir、Pd/Ir、Cu/Pd 比值与 MORB 一致, 表明俯冲相关的地幔交代作用对这些金属的贡献非常有限。相比之下, 大陆俯冲改造可能在地幔同位素富集过程中起着主要作用, 并引入了一定量的 Au (大陆俯冲相关的岩浆岩具有较高的 Au 含量和 Au/Pd 比值)。因此, 华北克拉通东部交代橄榄岩和幔源岩浆的结果一致表明, 俯冲相关的地幔交代作用贡献了大量的挥发分, 但并未造成金属元素的显著富集, 而仅仅是亏损地幔的金属元素含量补充至饱满地幔水平。这些结果对认识汇聚板块边缘的大规模金属迁移富集成矿具有重要启示意义。

关键词: 亲铜元素; 俯冲循环; 地幔交代; 苏鲁造山带; 华北克拉通

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

俯冲蛇纹岩再循环：来自板内玄武岩重 Mo 同位素的证据

代富强^{1*}, 赵子福², 陈仁旭², 陈伊翔², 王煜³, 李杰³

1. 河海大学, 南京 210098;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

地壳物质在汇聚板块边缘循环进入地幔是引起地幔地球化学不均一的重要地质过程。通过对洋岛玄武岩的研究表明, 它们的地幔源区中包含再循环的洋壳物质。然而, 俯冲大洋板片除了包含顶部的洋壳物质外, 还含有蛇纹岩化的大洋岩石圈地幔。但是如何从板内玄武岩的地幔源区中示踪再循环的大洋板片蛇纹岩仍然面临着诸多难题。最近新兴的 Mo 同位素有望在此方面发挥作用, 这是因为板片蛇纹岩及其进变质产物与俯冲洋壳具有截然不同的 Mo 同位素特征, 为示踪再循环板片蛇纹岩提供了强有力的工具。

我们对华北板块东部自 100 Ma 年以来的板内碱性玄武岩进行了全岩 Mo 含量和同位素分析, 以此来查明它们的地幔源区是否遭受到了俯冲 Izanagi-Pacific 板片蛇纹岩的影响。分析结果表明华北板块东部很多板内玄武岩具有重 Mo 同位素组成 ($\delta^{98/95}\text{Mo}$

最高达-0.06‰)。结合全岩 Sr-Nd 同位素和橄榄石 O 同位素数据, 这些重 Mo 同位素特征只能通过深俯冲的 Izanagi-Pacific 板片蛇纹岩来解释。因此, 我们指出板内玄武岩的重 Mo 同位素可以作为蛇纹岩再循环的鉴定性指标。俯冲板片蛇纹岩还能抵消地壳生长和洋壳俯冲对地幔 Mo 同位素的影响, 从而使地幔的 Mo 同位素从 35 亿年以来保持恒定。并且深俯冲的 Izanagi-Pacific 板片蛇纹岩能携带大量的水进入地幔深部, 最终导致了华北克拉通破坏、中国东部板内玄武岩的高水含量以及中国东部地幔的高电导率特征。该研究提供了蛇纹岩再循环的直接证据, 并加深了我们对全球 Mo 循环的认识。

关键词: 蛇纹岩再循环; Mo 同位素; 板内玄武岩; 地幔不均一; 全球 Mo 循环

• 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, 赵子福^{1*}, 戴立群¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 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-Li-Mo 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、低于地幔的 Li 同位素、高于地幔的 Mo 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。Li 同位素定量模拟结果同样指示约有 3~9 wt% 的地壳物质发生了再循环。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。

关键词: 同折返镁铁质岩浆岩; 碰撞后镁铁质岩浆岩; 岩石圈地幔; Mo 同位素

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 •

深俯冲大陆板片部分熔融机制和熔体组成的磷灰石记录

汤跃¹, 陈仁旭^{1*}, 陈茂雨¹, 孙国超¹, 尹壮壮¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学, 合肥 230026

了解深俯冲大陆板片部分熔融机制和熔体组成对于理解壳幔相互作用和地壳分异至关重要。自然界中的部分熔融熔体容易受到后期的叠加改造, 利用它们的全岩成分信息反映初始熔体的组成和利用单一的地球化学指标识别部分熔融机制都相对困难。本研究对柴北缘造山带超高压正片麻岩、退变质榴辉岩及其中的长英质脉体系统地开展了磷灰石 U-Pb 年代学、主量元素、微量元素及卤素元素分析, 揭示了磷灰石组成在识别地壳岩石不同熔融机制和重建熔体组成中的有效性。所研究长英质脉体根据成分差异, 可以分成三种成因: 正片麻岩脱水熔融 (Vein M1)、正片麻岩加水熔融 (Vein M2) 和变基性岩加水熔融 (Vein A)。这些长英质脉体与围岩中磷灰石记录了深俯冲陆壳折返过程中在 ca. 420 Ma 的部分熔融作用。由 Vein A 到 Vein M2 再到 Vein M1, 磷灰石在 Na₂O、FeO、F、Ba、Mn、REE、Y 含量以及 F/Cl 比值表现出升高的趋势, 而 Cl 含量表现出逐渐降低的趋势。

与此同时, 本研究与低压条件下熔体成因的磷灰石在组成上也有很大的差异。这些差异主要受参与熔融反应的源岩类型、矿物类型和比例以及压力的影响。由此可见, 利用磷灰石可以用来有效区分地壳岩石的不同熔融机制。我们进一步利用磷灰石的成分重建了熔体的挥发分含量 (F 和 Cl 含量) 和氧逸度值。结果发现, 俯冲大陆板片部分熔融形成的熔体含有可观的卤素, 是卤素再循环至地幔以及地壳分异的重要途径。进一步发现, 脱水熔融形成的熔体的氧逸度高于加水熔融形成的熔体, 这种差异表明部分熔融过程中水的加入对熔体的氧化还原状态具有关键的控制作用。对于深俯冲板片部分熔融熔体氧化状态的限定, 有助于认识大陆俯冲带氧化还原状态变化及其效应。

关键词: 深俯冲大陆地壳; 部分熔融机制; 磷灰石; 熔体组成

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

板块俯冲如何诱发板内岩浆作用

周中彪^{1,4}, 陈立辉^{2*}, 黄周传¹, Hofmann A.W.³,
王小均², 曾罡¹, 毕雅菁¹, 赵键²

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023;

2. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

3. Max-Planck- Institut für Chemie Abteilung Klimageochemie, Mainz 000000;

4. 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, 山东 青岛 266400

在东亚大陆边缘, 滞留大洋板片之上分布有广泛的新生代板内岩浆作用。尽管大量研究表明这些岩浆活动与太平洋板块的俯冲作用存在成因联系, 但其具体的动力学机制仍存在显著争议。本研究选取黑龙江省东部的双鸭山地区作为关键研究区域, 通过地球化学与地球物理学的学科交叉研究, 来深入探讨板块俯冲诱发板内岩浆作用的动力学过程。地震观测数据显示, 双鸭山地区缺少深源 (深度 > 400 km) 的大地震活动, 同时层析成像结果揭示该区域下方存在滞留板片缺失的现象, 这些地震学证据共同表明双鸭山下方滞留的太平洋板片发生了撕裂, 形成了板片窗结构。基于此, 我们对板片窗之上的双鸭山新生代玄武岩进行了系统的全岩主量元素、微量元素以及 Sr-Nd-Pb-Fe-Mg 同位素分析, 并结合上地幔变形特征研究, 来识别并重建俯冲太平洋板片物质从地幔过渡带向浅部上地幔运移的路径。研究结果表明, 双鸭山玄武岩具有显著偏高的 $\delta^{57}\text{Fe}$ 值和偏低的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值, 同时在元素组成上表现出高 Gd/Yb 比值和低

Ti/Eu、CaO/Al₂O₃ 比值的特征。这些独特的地球化学特征指示双鸭山玄武岩的上地幔源区存在再循环的俯冲太平洋洋壳组分——榴辉岩。此外, 近震 S 波分裂分析揭示了一个与板片窗相关的上地幔环状流结构, 表明含有板片碎片的地幔上涌流在上地幔中转变为向周围地区的环状流动, 从而引发了周围地区广泛的板内岩浆活动。通过初步的地球化学和地球物理学验证, 我们发现东亚地区的大多数新生代玄武岩的形成可能与滞留板片在地幔过渡带中的撕裂过程密切相关。本研究提出了一个“滞留板片撕裂诱发地幔上涌”的地球动力学模型: 俯冲过程导致滞留板片发生撕裂, 诱发地幔物质上涌; 这一过程使得俯冲至地幔过渡带的洋壳 (榴辉岩) 随上涌地幔返回上地幔并发生减压熔融, 最终在大陆内部引发火山作用。这一模型可能为理解板内岩浆作用的起源机制提供新的理论框架。

关键词: 板片撕裂; 地幔过渡带, 滞留板片; 地幔上涌; 板内玄武岩

基金项目: 国家自然科学基金 (42130310、42322202); 中央高校基本科研业务费 (2024300389); 国家重点研发计划 (2022YFF0800701)

第一作者简介: 周中彪 (1993-), 博士后, 研究方向: 玄武岩地球化学. Email: zhoub@qdio.ac.cn

*通信作者简介: 陈立辉 (1972-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学、地幔地球化学. Email: chenlh@nwu.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

东北亚俯冲水运移载体的空间差异性及其深部效应

赵文源¹, 王枫^{1*}, 许文良¹

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春市 130061

地球浅部-深部圈层之间的水循环是驱动地球宜居性演化的关键过程。板块俯冲是地表水进入深部的主要方式, 少量的水就可以显著改变地幔属性, 如降低熔融温度和增强流变性质等, 进而对地球内部关键界面特征、岩浆活动规模、深源地震频次等诸多方面产生重要的影响。由于俯冲板片初始水化程度、俯冲带热结构和脱挥发分机制的时空变异, 全球大洋俯冲带具有显著不同的深部水循环样式。即便是同一俯冲带, 俯冲水输入沿弧同样存在小尺度的结构差异。值得注意的是, 近年来的研究表明, 以东北亚为代表的大地幔楔系统中, 俯冲板片能够将水运移至地幔过渡带, 但沿弧脱水过程的空间差异及其深部效应能否延伸至滞留板片之上的板内环境仍有待于进一步研究。前人利用三维热结构模拟的方法发现西太平洋俯冲带在东北日本具有小尺度 (~300 公里) 的沿弧温度结构差异。相比于日本俯冲带靠近南部的本州岛地区, 北面 (北海道地区) 具有明显高于南面 (本州岛地区) 的俯冲板片-地幔楔界面温度, 暗示着沿弧可能存在不同的脱水行为。更为重要的是, 该区域广泛分布的新生代玄武岩为我们提供了理想的研究载体。作为关键的流体活动元素, B 同位素是示踪深部水循环的理想工具。鉴于此, 本文选取东北亚陆缘沿弧及其对应的板内的中新世玄武岩作为研究对象, 开展了系统的 Sr-Nd-Pb-B 同位素研究。俯冲带温度较高的北面 (北

海道地区) 的弧火山岩具有相对较重的 B 同位素组成 ($\delta^{11}\text{B} = -2.12\text{‰} \sim -6.7\text{‰}$), 而来自俯冲沉积物和蚀变洋壳的板片流体的 B 同位素组成随着俯冲深度增加而逐渐变轻, 无法解释观测到的弧玄武岩重 B 同位素组成, 只有蛇纹石脱水的贡献才能产生这样的同位素特征, 这意味着含水矿物在弧至弧后体系下近乎完全脱水, 因此名义上的无水矿物是携带水进入地幔过渡带的运移载体; 而由于弧下绝大部分的重 B 随水释放, 名义上无水矿物释放的水继承了残余板片极轻的 B 同位素特征, 这与其对应的板内火山岩较轻的 B 同位素组成相吻合 ($\delta^{11}\text{B} = -5.15\text{‰} \sim -10.01\text{‰}$)。相比之下, 南面 (本州岛地区) 的弧火山岩 B 同位素组成较轻 ($\delta^{11}\text{B} = -3.1\text{‰} \sim -4.7\text{‰}$, Moriguti et al., 2004), 仅反映出俯冲沉积物和蚀变洋壳的贡献, 暗示含水矿物从蛇纹石连续转变为稳定性更高的含水硅镁矿物, 这一过程几乎不会释放水, 因此大量的水可以被带入深部地幔, 这得到了板内火山岩的重 B 同位素组成的印证 ($\delta^{11}\text{B} = -5.18\text{‰} \sim -7.71\text{‰}$)。上述研究表明, 大地幔楔系统中弧下小尺度温度结构控制的俯冲水输入样式的空间差异会对滞留板片之上的地幔属性产生重要影响, 这能够很好的解释东北亚板内深源地震、地幔过渡带间断面、地幔过渡带顶部低速层等空间差异特征。

关键词: 东北亚; 大地幔楔; 水循环; 深部效应

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

深时岩浆活动与现今岩石圈深部物质架构的成因关联： 来自中亚造山带西天山的视角

黄河^{1*}, 王涛¹, Daniel G ó mez-Frutos², Antonio Castro²,
朱小三¹, 鲍学伟³

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 西班牙国立自然科学博物馆, 西班牙 马德里 028071;

3. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

岩石圈深部探测始终是地球科学研究的前沿。现今岩石圈物质架构是长期、多阶段深部过程——特别是岩浆作用——的最终结果。因此, 深时岩浆事件, 尤其是区域上最晚一期岩浆事件, 与现今岩石圈物质架构之间应当存在成因联系。本研究针对中亚造山带西段西天山地区晚石炭世—早二叠世岩浆岩, 开展了多元同位素和元素地球化学填图(空间成像)。填图结果揭示两类不同性质的岩石圈: 北侧的具有亏损放射性同位素特征的年轻岩石圈和南侧具有富集放射性同位素特征的古老岩石圈。结合地球物理观测结果和对岩石成因的相平衡模拟, 研究进一步揭示石炭世—早二叠世的岩浆活动, 奠定了现今岩石圈物质架构的基础。其中, 北侧下地壳物质, 形成于源自于俯冲交代地幔源区的岩浆的再分异和熔体抽离, 而缺乏表壳岩

物质的显著参与。相较而言, 南部古老同位素省的下地壳物质, 则通过底垫(relamination)的表壳岩物质与幔源岩浆混合后, 再分异并经熔体脱离形成。而经过下地壳深度的岩浆分异和熔体抽离, 残留固体矿物组合在空间的成分差异, 奠定了现今地球物理物性结构南北向差异的基础。本研究提出在中亚造山带陆块汇聚过程中, 古老地壳物质加入深部岩浆源区总体是较为低效的, 这是中亚造山带保留有大量年轻地壳物质的一个重要的机制。本研究为通过综合岩浆岩多元同位素和元素填图、地球物理观测、相平衡模拟等手段联合揭示深部岩石圈物质, 提供了一个重要的研究实例。

关键词: 中亚造山带; 西天山; 同位素填图; 深部物质

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

柴达木北缘石榴橄榄岩的蛇纹石化作用及
铁磁矿物特征研究李智勇¹, 熊庆², 周翔^{2,3}, 郑建平^{2,3*}

1. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

造山带/俯冲带/缝合带等构造环境中的地幔岩石往往经历了不同程度的蛇纹石化作用, 其矿物组成、物理性质及地球化学等均会发生明显转变, 对研究区域地质演化、地球物理异常解释及地球化学元素循环等具有重要意义。中国西部柴达木北缘超高压造山带中的胜利口石榴橄榄岩地体经历了较高程度($S>65\%$)的蛇纹石化作用, 但矿物反应、岩石物性(如磁性)及化学组成的演变还不完全清楚。岩相学特征显示石榴橄榄岩样品(方辉/二辉橄榄岩)以利蛇纹石化作用为主并形成典型网状结构。橄榄石转变为利蛇纹石-水镁石的混合物, 只有少量新鲜核部残留。细小磁铁矿与叶蛇纹石颗粒形成混合细脉沿原橄榄石颗粒边界分布并呈现三联点结构。不含石榴石的样品(纯橄岩)则以叶蛇纹石化作用为主, 粗粒板状叶蛇纹石呈放射状或咬合结构, 间隙被利蛇纹石、粗粒磁铁矿及具有磁铁矿环边的铬铁矿颗粒填充。热磁实验结果显示: 1) 蛇纹石化石榴橄榄岩在 $T=110\sim 120\text{K}$ 和 $T=581^\circ\text{C}$ 时出现磁化强度转折, 说明纯磁铁矿占主导; 2) 不含石榴石的样品主要在 $T=40\sim 50\text{K}$ 和 $T=573^\circ\text{C}$ 时出现强度转折, 为富铁铬尖晶石类矿物/铬磁铁矿的特征(与电子探针结果一致)。顺磁校正后两类橄榄岩样品的饱和磁化率强度(M_s)分别为 $0.9\sim 1.8\text{ Am}^2/\text{kg}$ 和 $5.4\sim 11.6\text{ Am}^2/\text{kg}$, 相当于 $1\sim 1.95$

$\text{wt}\%$ 和 $5.9\sim 13\text{ wt}\%$ 的纯磁铁矿含量($M_s/92\times 100\%$), 高于挪威西片麻岩省超高压地体中的石榴橄榄岩样品, 但略低于苏鲁超高压带中的石榴橄榄岩样品。FORC 与 Dayplot 结果显示石榴橄榄岩样品中以细粒单畴磁性颗粒为主, 不含石榴石样品以粗粒多畴磁性颗粒为主(与岩相观察一致)。石榴橄榄岩样品的全岩氧同位素值($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}=2.0\text{‰}\sim 3.1\text{‰}$)低于不含石榴石的样品($6.5\text{‰}\sim 8.3\text{‰}$), 与柴北缘超高压带东段沙柳河蛇绿岩剖面的叶蛇纹石化和利蛇纹石化橄榄岩相似。两者的氢同位素结果相似($\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$ 分别为 -114.2‰ 至 -108.5‰ 和 -109.8‰ 至 -91.9‰), 但低于西阿尔卑斯造山带蛇绿岩型叶蛇纹石化橄榄岩样品。综合以上岩石矿物、地球化学及岩石磁学研究结果, 胜利口石榴橄榄岩体展现了较为多样和丰富的蛇纹石化作用及铁磁性矿物特征, 与此带东段沙柳河蛇绿岩、北部祁连山蛇绿岩及挪威、苏鲁等超高压地体蛇纹石化橄榄岩样品相比既有相似又有不同, 有助于了解从大洋扩张到俯冲闭合再到碰撞造山等不同构造背景下地幔岩石的水岩相互作用及其物理性质-化学组成的协同演变过程。

关键词: 柴北缘; 石榴橄榄岩; 蛇纹石化; 铁磁性矿物; 氢氧同位素

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2021YFA0716102)

第一作者简介: 李智勇(1986-), 副教授, 研究方向: 岩石磁学. Email: zhiyonli@cug.edu.cn

*通信作者简介: 郑建平(1964-), 教授, 研究方向: 地幔岩石学. Email: jpzheng@cug.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

岛弧岩浆成分变化及其对俯冲带物质循环的指示

李晓辉^{1*}

1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100

俯冲带是物质循环的重要场所, 俯冲组分在地幔源区的输入控制着岛弧岩浆成分的变化。目前对俯冲组分的研究主要关注蚀变洋壳和沉积物, 而对海山、残余板片、蛇纹岩等的识别及其循环机制的探讨还相对缺乏。另外, 随着俯冲的持续, 板片可能会发生撕裂甚至断裂, 进而引起板片之下软流圈地幔沿着撕裂处上涌, 改变岛弧岩浆组成, 这一过程的地球化学证据却鲜有报道。岛弧岩浆从地幔楔产生并上升的过程中需穿过厚层地壳, 难免会受到地壳物质的混染, 但详细混染过程还缺乏精细刻画。对西太平洋马里亚纳和琉球俯冲带的研究为明确上述问题提供了重要参考。马里亚纳俯冲带的研究发现初始裂谷阶段部分橄榄石内熔体包裹体显示出显著高的放射性 Pb 同位素组成, 表明 HIMU 型海山的俯冲对初始裂谷阶段地幔源区的重要物质贡献, 海山俯冲可能在俯冲带物质循环过程中较为普遍, 为俯冲带岩浆源区的组成及海山循环过程提供新的认识; 玄武岩 Mo 同位素具有显著的穿岛弧变化特征, 轻 Mo 同位素的残余板片物质可以进入弧后岩浆源区, 参与弧后地幔的岩浆物质循环; 弧前蛇纹岩具有重的 Mo 和 Mg 同位素组成, Mo 同位素的变化受到了俯冲早期浅部板片来源流体交代作用的影响, 而后蛇纹石化阶段水镁石的溶解导致 Mg 同位素升高, 强烈蚀变的弧前蛇纹岩的俯冲可以改变岛弧岩浆的 Mo 和 Mg 同位素组成, 是岛弧岩

浆的重要物质来源。在琉球俯冲带的研究中发现台湾北部玄武岩表现出典型岛弧火山岩元素特征及轻的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值, 这一过程涉及到板片下软流圈地幔沿板片撕裂上涌, 提供足够热量, 使得板片“富白云石”碳酸岩受热熔融并产生低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值熔体, 这些熔体交代地幔楔, 导致地幔楔不均一并发生部分熔融, 进而形成低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的岛弧火山岩; 冲绳海槽基性、中性和酸性岩内的单斜辉石地球化学特征存在差异, 晚期中酸性火山岩内单斜辉石环带明显, 表明岩浆演化过程中受到了来自深部的玄武质同源岩浆的填充, 并发生了陆壳岩浆房内不同岩浆物质的混合; 演化程度高的橄榄石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于地幔, 指示晚期岩浆在上升演化的过程中受到了较为显著的高温热液蚀变的陆壳物质混染; 晚期结晶橄榄石内熔体包裹体中都具有少量高 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 组分的存在, 表明岩浆在晚期上升演化过程中捕获了陆壳组分, 明确了陆壳混染对陆缘弧后盆地晚期岩浆演化阶段的重要物质贡献。以上研究涉及了板块俯冲过程中俯冲组分输入、地幔楔不均一性过程、岛弧/弧后盆地岩浆混染等俯冲带物质运移传输的连续过程, 为全面理解俯冲带岩浆演化过程及物质循环机制提供了重要数据和理论支撑。

关键词: 海山; 蛇纹岩; 残余板片; 板片撕裂; 地壳混染

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

岛弧岩浆岩的铬同位素研究

徐丽娟^{1,3}, 沈骥², 刘盛遨¹, 李曙光¹, 赵国春^{3,4*}

1. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

3. 香港大学, 香港 999077;

4. 西北大学, 西安 710069

本研究首次对一套来自堪察加半岛的岛弧玄武岩(IABs)进行铬同位素研究,以研究岩浆过程中的铬同位素分馏。堪察加岛弧玄武岩的铬同位素($\delta^{53}\text{Cr}$)范围为: $-0.09 \pm 0.02\text{‰}$ 至 $-0.16 \pm 0.02\text{‰}$ (2σ , $n=22$)。这些玄武岩的MgO含量与Cr、Ni含量以及CaO/Al₂O₃比值之间呈现正相关关系,表明它们经历了橄榄石和辉石的分离结晶。然而, $\delta^{53}\text{Cr}$ 与Cr、Ni或MgO含量以及CaO/Al₂O₃比值均无相关性。离子模型和瑞利分馏模型显示岛弧玄武岩分离结晶因子非常小($\Delta^{53}\text{Cr}_{\text{crystal-melt}}$: $+0.0001\text{‰}$ 至 $+0.009\text{‰}$),表明分离结晶过程对IABs的 $\delta^{53}\text{Cr}$ 影响有限。此外, $\delta^{53}\text{Cr}$ 与熔融分数(f)之间缺乏相关性,表明部分熔融过程对Cr同位素组成的影响有限。这些岛弧岩浆的 $\delta^{53}\text{Cr}$ 值与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值、铬含量或流体活动性元素比值(如:Ba/Th、B/Nb、

As*/Ce)无相关性,表明来自俯冲板块的流体对岛弧玄武岩地幔源区的铬同位素组成影响极小。值得注意的是,与洋中脊玄武岩(MORBs)和洋岛玄武岩(OIBs)相比,岛弧玄武岩在统计学上具有更高的 $\delta^{53}\text{Cr}$ 值,与硅酸盐地球(BSE)的值相似。非实比熔融模型和瑞利分馏模型表明:岛弧玄武岩高的 $\delta^{53}\text{Cr}$ 值可能是在比MORBs和OIBs更高的岩浆氧逸度条件下的部分熔融和分离结晶的结果。这与它们更高的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值和 $\Delta\log f\text{O}_2(\text{QFM})$ 值一致,强调了不同氧逸度对地球玄武岩中铬同位素分馏的作用。总之,本研究认为铬同位素在示踪行星氧逸度方面具有重要的潜力。

关键词: 铬同位素; 岛弧岩浆; 地幔氧逸度; 堪察加俯冲带

基金项目: 国家自然科学基金(42473017、41730214、42373010 to JS); 香港研究资助局(RGC)资助项目(JLFS/P-702/24、17308023)

第一作者简介: 徐丽娟(1984-), 副教授, 研究方向: 金属稳定同位素地球化学。Email: xulj@cugb.edu.cn

通信作者简介: 赵国春(1961-)教授, 研究方向: Email: gzhao@hku.hk

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

西大别榴辉岩 P-T 轨迹对大陆俯冲带 最大解耦深度的指示意义

夏彬^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

俯冲带是汇聚板块边界的核心区域, 连接地球内部和表层, 是深刻理解板块构造、火山作用、物质循环及地震成矿等关键地质过程的重要场所。尽管已有大量研究, 但对俯冲带的最大解耦深度(MDD)仍不清楚, 这极大的制约了我们对俯冲带内部结构和俯冲带地球动力学过程的进一步认识和理解。以往研究注重数值模拟, 缺乏岩石学相关研究。如何从岩石学角度开展俯冲带 MDD 研究? 本报告试图选择西大别高压-超高压变质带开展一些探索性工作。数值模拟显示, 俯冲板片表面温压结构在最大解耦深度附近呈现显著变化, 但该理论预测尚缺乏关键岩石学证据支持。西大别位于苏鲁-大别造山带的西段, 是中生代华南板块向华北板块之下俯冲、碰撞的结果。其内发育了典型的陆壳深俯冲-碰撞型高压-超高压变质岩, 且保留了完整的进变质信息, 可用来追溯板片俯冲过程中的周围环

境变化。我们选择该带红安一带代表性样品开展岩石学研究, 通过精细限定其变质演化 P-T 轨迹, 并与数值正演模拟得到的俯冲板片表面热结构相比较, 尝试从岩石学角度来解析大陆俯冲带 MDD。初步研究结果显示: 红安一带榴辉岩大多具有相似的进变质阶段近等压升温 P-T 轨迹; 有一个样品记录的进变质轨迹表现为先近等压升温, 而后近等温升压。结合前人工作可以看出, 进变质 P-T 轨迹转折点发生在 20.0~23.0 kbar, 对应 70~80 km 深度。这一 P-T 轨迹样式类似于数值模拟结果, 而转折点发生的深度也大致对应通过数值模拟、地球物理观测等推测出来的结果。因此, 我们认为, 本研究可能为建立俯冲带 MDD 的岩石学判别依据提供新的研究范式。

关键词: 大陆俯冲带; 西大别; 榴辉岩; P-T 轨迹; 最大解耦深度

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

非生物甲烷的新来源：俯冲带榴辉岩化作用与能源潜力

张丽娟^{1*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

无机成气假说由来已久, 其成因众说不一, 包括前寒武纪结晶基底、火山和沉积热液系统以及不同地质背景下的蛇纹石化作用产非生物甲烷气等。本研究将非生物甲烷的来源拓展到俯冲带高压-超高压榴辉岩, 开辟了非生物甲烷研究的新领域。本研究在西天山俯冲带榴辉岩中发现了大量富含 CH_4 的原生流体包裹体。岩石学特征和碳氢同位素组成都证实了这些 CH_4 为非生物成因。相平衡计算表明甲烷形成的温压条件为 $500\sim 560^\circ\text{C}$ 和 $2.1\sim 3.4\text{ GPa}$, 氧逸度为 FMQ-2 至 FMQ-3.5 的还原环境, 是俯冲进变质作用过程中多种反应机制共同作用的结果。结合 DEW 模拟可以估算出全球现代俯冲带非生物

CH_4 的循环通量可达 10.8 Mt/y , 是目前已知非生物甲烷气的最大来源。进一步研究揭示俯冲带高压条件下 H_2O 和 CH_4 不混溶的现象, 建立 CH_4 和 H_2O 混溶/不混溶压力标尺。俯冲板片的碳可能以 CH_4 超临界流体的形式从俯冲板片运移到上覆地幔楔中, 当遇到合适的储盖层条件时就可能形成潜在的天然气田。该研究为深部无机天然油气藏勘探开发提供理论基础, 有望突破油气只限制地表十公里以浅的限制。

关键词: 流体包裹体; 非生物甲烷; 榴辉岩; 俯冲带; 无机成气

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

青藏高原中北部深部地壳热演化与高原隆升

张修政^{1*}, 王强¹, 但卫¹, 苟国宁¹, 齐玥¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广东 510640

青藏高原不仅具有加厚的大陆地壳 (~60~80 km), 同时也具有异常平坦的地貌和莫霍面。目前的绝大部分研究主要集中在高原地壳加厚机制和地表的差异性隆升过程, 但对于平坦高原形成的深部机制却鲜有系统工作。理论和数值模拟研究认为中下地壳热演化引发的地壳熔融和流动是造成高原平坦化的主要机制。然而, 存在的核心问题在于目前没有任何源于天然样品的研究证实上述理论模型, 从而导致高原形成和隆升过程中深部地壳真实的热演化历史并不清楚, 深部地壳样品是该项研究的难点。针对上述问题, 对青藏高原中北部不同时代新生代岩浆岩中地壳包体和锆石捕虏晶进行了长期、系统的研究, 首次系统的构建了青藏高原深部地壳的热演化历史, 揭示青藏高原的地温梯度从 28 Ma 到 2.3 Ma 不断提升, 中下地壳经历了从冷到热, 从富水到无水, 从角闪岩相到超高温麻粒岩相的连续演化过程, 取得以下 2 点创新认识: (1) 在 28 Ma 岩浆岩中发现一套富水的角闪岩相中下地壳包体, 揭示高原在演化早期具有含水、可熔融的地壳端元 (Zhang XZ et al., 2023a, Lithos), 突破了高原地壳为“干的”、无法熔融的传统认识。另外, 发现羌塘地壳深部存在 23~13 Ma 的低压高温麻粒岩相变质作用, 揭示高原深部地壳热状态的转变 (由冷到热) 发生在 28~23 Ma 之间。该研究首次证明高原深部热状态的转变和平坦高原的形成几乎同时, 均发生在早中新世。相平衡模拟显示, 地壳的热状态的转变将会引发广泛的地壳熔融 (>30 vol%), 从而极大地降

低地壳的强度, 因此早中新世以来地壳侧向流动是导致伦坡拉和可可西里盆地快速隆升的主要机制, 证实了青藏高原平坦地貌的形成与深部地壳的热演化具有耦合关系 (Zhang XZ et al., 2022a, Geology)。(2) 在青藏高原双湖地堑北段的东月湖地区发现了第四纪的超高温记录, 其保存在一套特殊的英安质熔岩中, 由超高温熔体、大量超高温泥质麻粒岩包体、转熔矿物, 以及少量基性麻粒岩组成。其变质和熔融时代均集中在 2.3 Ma, 峰期温度为 1100~1150 °C, 压力为 0.8~0.9 GPa, 代表了目前世界上已知最年轻的造山带超高温变质/熔融记录 (Zhang XZ et al., 2022b, Geology)。这一发现为超高温的研究提供了明确的、近现代的构造背景, 首次证实了碰撞造山带可以在地壳加厚之后极短的时间 (20~40 百万年) 演化出超高温条件。进一步热力学模拟揭示了造山带超高温产生的决定性因素在于地壳中放射性生热层的厚度。结合对藏北壳源岩浆岩 B-Nd-Pb-Hf 同位素研究, 提出亚洲大陆南向俯冲导致藏北高原的下地壳存在较多变沉积物 (Zhang XZ et al., 2023b, Lithos), 从而导致中下地壳整体放射性元素含量高, 这种地壳结构能够仅依靠正常放射性衰变热量的积累而快速达到高温-超高温的条件, 从而引发广泛的地壳熔融和地壳流动, 使造山带扩展为地表平坦、宽广的高原。

关键词: 地壳包体; 高温-超高温变质; 高原隆升; 青藏高原

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

地壳深熔与花岗质岩浆分异过程中的 Mo 同位素分馏

朱二林¹, 夏琼霞^{1*}, 戴立群¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

钼 (Mo) 同位素在变质脱水、部分熔融以及岩浆分异过程中表现出较大的分馏, 被广泛应用于示踪俯冲带壳幔物质循环和熔流体活动。对苏鲁-大别造山带低温超高压变质片麻岩以及深熔花岗岩进行岩石学、岩石地球化学和 Mo 同位素分析。结果表明, 经历变质脱水的 A 组花岗质片麻岩呈现源区控制的化学组成特征, 具有变化的 Ba/Th 比值, 其 Mo 同位素组成较高 (0.05‰至 0.48‰), 与大陆上地壳组成相似; 而经历部分熔融的 B 组花岗质片麻岩呈现熔体控制的化学组成特征, 具有变化的 Nb/Sm 比值, Mo 同位素组成 (-0.58‰至-0.13‰) 显著低于 A 组片麻岩; 而深熔花岗岩具有最低的 Mo 同位素组成 (-2.67‰至-0.14‰), 与之相邻的富黑云母熔融残留岩体具有较高的 Mo 同位素组成 (0.16‰至 0.24‰)。较低的 Mo 同位素组成通常被认为与脱去富重 Mo 同

位素的流体相关, 然而花岗岩具有极低的 Ce/Mo 比值, 且同位素组成与 Ce/Pb 比值无相关性, 表明流体效应不是导致熔体 Mo 同位素降低的原因。花岗质片麻岩以及深熔花岗岩 Nb、Ta、Rb、Ti 和 K 与 Mo 同位素良好的协变关系表明 Mo 同位素组成与参与熔融反应的矿物相关。岩相学研究表明, 花岗质片麻岩经历了白云母脱水熔融反应生成深熔花岗岩, 并有转熔矿物黑云母生成。由于黑云母具有较高的 Mo 同位素组成, 熔体与残留体的分离导致了轻的 Mo 同位素组成。因此, Mo 同位素可以有效地示踪地壳深熔过程及熔体演化, 为大陆碰撞带地壳的深熔变质作用以及花岗岩的形成和演化提供重要信息。

关键词: 地壳深熔; 花岗岩; 片麻岩; Mo 同位素

第一作者简介: 朱二林, 博士研究生, 研究方向: 岩石矿物地球化学. Email: example@qq.com

*通信作者简介: 夏琼霞, 教授, 研究方向: 岩石矿物地球化学. Email: qxxia@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

岛弧岩浆岩 Fe 同位素与 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 解耦: 对沉积物循环及地幔氧化还原状态的启示

马利涛^{1*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

俯冲带的氧化还原状态对于理解地球内部的地球化学和地球动力学过程至关重要。然而, 形成岛弧岩浆高氧化状态的机制仍然存在争议。通过对中国西秦岭造山带早三叠世岛弧岩浆岩 Fe 同位素和 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值的研究, 揭示了可能的机制。西秦岭造山带早三叠世岩浆岩显示出弧型微量元素特征和富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成, 表明其地幔源区受到了大量沉积物来源含水熔体的交代作用, 同时伴有少量板块来源富水溶液的加入。此外, 这些镁铁质火成岩表现出比洋中脊玄武岩[MORB, $\delta^{56}\text{Fe} = (0.11 \pm 0.06)\%$]更轻的 Fe 同位素组成 ($\delta^{56}\text{Fe} = -0.05\% \sim 0.09\%$)。尽管俯冲蛇纹岩在弧下深度的脱水作用可以释放出具有较轻 Fe 同位素的流体, 但 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值与板块流体示踪剂(如 Ba/La、Th/Yb、Nd-Hf 同位素)之间缺乏相关性, 表明熔流体交代作用并没有改变地幔的 Fe 同位素组成, 可能是由其他机制造成的, 如先前地幔经历熔体提取。这一过程可能导致优先提取同位

素较重的 Fe^{3+} , 留下一个较还原的残余物, 其具有较轻的 Fe 和较低的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值。然而, 这与基性岩中观察到相比于 MORB(0.16 ± 0.01)更高的 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值($0.19 \sim 0.33$)不一致, 这些基性岩显示出 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值与 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值之间的显著解耦。值得注意的是, $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 值与沉积物熔体示踪剂(Th/Yb、Th/Nd、Th/La 和 Hf 同位素)之间的具有明显的相关性, 表明沉积物熔体的加入在控制弧下地幔高氧化状态的形成中起关键作用。因此, $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 和 $\delta^{56}\text{Fe}$ 的解耦可能是由于地幔源区先前经历熔体提取, 随后又受到含高氧化剂(如 S^{6+})的沉积物熔体的交代作用所致。因此, 弧岩浆中 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 和 $\delta^{56}\text{Fe}$ 的解耦现象为理解弧下地幔熔融机制、沉积物再循环及对地幔氧化状态的影响提供了重要见解。

关键词: 俯冲带; 岛弧岩浆岩; Fe 同位素; $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$; 氧化还原状态

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

新生下地壳水致熔融和脱水熔融的花岗岩双重成因： 来自 Mo 同位素和相平衡模拟的制约

夏友山¹, 高彭^{1*}, 孙国超¹, 赵子福¹, 周尧¹, 李振新¹, 文刚¹, 秦磊¹

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026

水在大陆地壳分化和花岗岩质岩浆形成中起着关键作用。然而, 关于如何区分无流体和有流体参与的熔融机制以探究花岗岩的起源, 仍然存在激烈争论。Mo 同位素已显示出追踪岩浆和变质过程中流体活动的潜力, 因此是识别地壳部分熔融过程中是否存在自由流体的有力工具。本研究对比了大别北淮阳带早古生代钠质和钾质花岗岩的全岩地球化学以及 Sr-Nd-Mo 同位素特征。Sr-Nd 同位素结果表明, 钾质花岗岩起源于新生下地壳, 这与时空上相关的钠质花岗岩一致。然而, 钾质花岗岩的 $\delta^{98}\text{Mo}$ 值 (-0.41‰ 至 0.23‰ , 中位数= 0.02‰) 与相邻同时期的基性岩石 (-0.17‰ 至 0.21‰ , 中位数= 0.02‰) 相似, 而钠质花岗岩的 $\delta^{98}\text{Mo}$ 值则较高 (-0.13‰ 至 0.74‰ , 中位数= 0.22‰)。模拟计算表明, 无论是分异结晶还是地壳混染, 都无法解释钾质和钠质花岗岩之间观察到的

$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值和 Mo 同位素组成的差异。相反, 这些差异可以通过相同基性源岩在不同流体条件下的部分熔融来很好地解释。进一步的相平衡模拟表明, 流体的加入会导致斜长石的优先分解, 从而降低所得熔体的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值, 但提高 $\delta^{98}\text{Mo}$ 值。水致熔融可能是由俯冲带下含水基性弧岩浆结晶过程中析出的流体或新生下地壳中水合矿物分解释放的流体引起的。相比之下, 基性地壳的无流体熔融主要由包括黑云母和角闪石在内的水合矿物的分解驱动, 产生 Mo 同位素组成与源岩相似的钾质熔体。本研究为流体对花岗岩质岩浆 Mo 同位素组成的控制提供了有力证据, 从而提供了一种区分水致熔融和脱水熔融新方法。

关键词: 水致熔融; 脱水熔融; 新生下地壳; Mo 同位素; 花岗岩

基金项目: 中国科学院战略重点研究计划 (B 类) (XDB0710000、XDB41000000)、中国自然科学基金 (42373043)

第一作者简介: 夏友山, 博士研究生, 研究方向: 造山带岩浆岩地球化学. Email: xiays@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 高彭, 特任研究员, 研究方向: 造山带花岗岩成因研究. Email: gaopeng05@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

云南马关新生代玄武岩中的斜长角闪岩:
华南西南缘未暴露的太古宙基底马骁¹, 郑建平^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

火山作用的天然超深钻取样, 提供了探索大陆基底属性和形成演化过程的重要手段之一。华南陆块由扬子和华夏地块组成, 是东亚大陆重要的前寒武出露区。然而, 由于显生宙巨厚沉积盖层的覆盖, 使得太古宙物质(尤其是岩石)在华南的报道十分有限。目前仅在其北缘的扬子北部的鱼洞子、崆岭、钟祥、陡岭, 西部的措科等地质体中岩石, 以及其内部的华夏西部的道县、平乐、北江和小六典等地火山岩中锆石捕虏晶的报道。对采自云南马关新生代玄武岩中的斜长角闪岩在详细岩相学工作基础上, 进行了全岩地球化学分析和锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成系统研究。斜长角闪岩为中粒变晶结构, 块状构造, 主要由斜长石和角闪石组成, 副矿物锆石、榍石, 蚀变矿物帘石、绿泥石。全岩 SiO₂、MgO、TiO₂ 含量分别为 46.4%~48.6%、5.97%~6.97% 和 1.22%~1.37%, K₂O+Na₂O 含量为 2.47%~3.14%、Na₂O/K₂O 比值为 1.35~3.94; 稀土总量为 67~78 μg/g, 相对富集轻稀土元素(La/Yb)_N=6.55~7.52、弱负 Eu 异常(δ_{Eu} =0.83~0.92)。蛛网图中显示富集大离子亲石元素和放射性生热元素等, 并呈高场强元素负异

常、Sr 正异常特征。它们有相对较高的正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(+8.59~+8.76)和较低的 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 值(0.698~0.700), 组成特征上与大陆基性中下地壳类似。斜长角闪岩中的锆石可分为岩浆结晶、变质作用两类:(1) 岩浆锆石的 U-Pb 年龄为 2550 Ma, 代表斜长角闪岩的原岩(拉斑玄武岩)的成岩时间;(2) 变质作用成因锆石的 U-Pb 年龄为 2450 Ma, 代表华南西南缘角闪岩相变质作用发生的时间。岩浆和变质锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 分别是+2.73~+5.76 和-4.49~+4.82、亏损地幔模式年龄 $T_{DM}2.9\sim2.5$ Ga。因此, 所发现的捕虏体是华南西南缘所知最古老岩石。综合分析该斜长角闪岩代表的大陆中下地壳可能形成于新太古代的大陆弧后拉张的构造背景。综合考虑区域上古老地质体岩石以及锆石捕虏晶等地质事实, 进一步扩大了华南地块太古宙基底的范围。所发现斜长角闪岩作为华南西南缘存在的太古宙基底直接证据, 同时也表明太古宙-元古宙之交可能是华南陆块深部地壳生长的重要时期。

关键词: 华南西南缘; 太古宙基底; 地壳捕虏体

基金项目: 国家自然科学基金项目(42320104001)

第一作者简介: 马骁(1997-), 博士研究生, 研究方向: 地壳捕虏体与深部地壳演化.Email: xiaoma@cug.edu.cn

*通信作者简介: 郑建平(1964-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 深源岩石与岩石圈演化.Email: jpzheng@cug.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

花岗岩岩浆分异过程中 Ba 同位素的变化: 对分离结晶和流体-岩浆相互作用鉴别的意义

张念钦¹, 陈伊翔^{1*}

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

花岗岩的成因和成分多样性主要受到部分熔融和岩浆分异等多种作用的控制。然而, 区分部分熔融、分离结晶和流体-岩浆相互作用等过程对花岗质岩浆演化的具体影响仍具有挑战性。Ba 同位素是区分分离结晶和流体-岩浆相互作用过程的潜在有力示踪剂, 但分离结晶对 Ba 同位素组成变化的影响尚不明确。为了应对这一挑战, 我们对中国东部苏鲁造山带同折返花岗岩的 Ba 同位素组成进行了分析。高硅花岗岩 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 值变化显著 (-0.69‰ ~ -0.36‰)。利用相平衡模型, 我们估计部分熔融过程中 Ba 同位素的变化可能导致熔体与原岩之间的增加小于 0.20‰ , 这不能解释观测到的轻 Ba 同位素组成。此外, SiO_2 含量与 Al_2O_3 、 TiO_2 、 $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{t}}$ 、Ba、Sr 和 Eu/Eu^* 等主微量元素含量呈显著相关, 表明这些花岗岩中存在广泛的分离结晶。此外, $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 值与这些主微量元素的组成具有良好的相关性, 表明在花岗质岩浆分离结晶

过程中 Ba 同位素变化较大。同时, 同折返花岗岩的 Zr/Hf、K/Rb、Nb/Ta 比值和稀土元素模式表明岩浆与流体的相互作用不存在。这些观测结果表明, 分离结晶作用是导致花岗岩中 Ba 同位素分馏的主要因素使其低至 -0.69‰ , 而不是流体-岩浆相互作用。利用 Melts 分离结晶模拟表明, 钾长石和云母的分离结晶控制了花岗岩 Ba 同位素的变化, 与岩石学观测结果一致。结合前人对淡色花岗岩和高分异花岗岩的研究结果, 认为利用 Ba 同位素组成进行流体-岩浆相互作用的示踪需要谨慎。分离结晶作用可以导致花岗岩的 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 值低至约 0.70‰ , 但更低的 $\delta^{138/134}\text{Ba}$ 值可能由于花岗岩岩浆后期分化过程中的流体-岩浆相互作用。

关键词: Ba 同位素; 花岗岩; 部分熔融; 分离结晶; 流体-岩浆相互作用

基金项目: 国家自然科学基金 (42073029、42373046); 中央高校基本科研业务费专项资金。

第一作者简介: 张念钦 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 岩石地球化学. Email: nqzhang@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈伊翔 (1983-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学. Email: yxchen07@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

鄂尔多斯盆地内外长城系碎屑锆石年龄谱 及物源区对比研究

管晓涵^{1*}

1. 西北大学地质学系 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西安 710069

华北克拉通是中国最古老的陆块之一, 其早前寒武纪至中元古代的构造演化是地质学研究的重要课题。长城系作为华北克拉通的重要盖层, 记录了克拉通裂解与汇聚的关键信息。然而, 鄂尔多斯盆地作为华北克拉通西部的重要组成部分, 其长城系的沉积特征与东部地区的对比研究仍较为薄弱。本研究以鄂尔多斯盆地内部(靖探 2 井)和外围(吕梁山地区)的长城系碎屑沉积岩为研究对象, 通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年和微量元素分析, 对比盆地内外碎屑锆石的年龄谱和化学特征, 揭示物源区的差异及鄂尔多斯盆地与华北克拉通东部基底在中元古代的构造联系。吕梁山地区长城系样品的最年轻锆石年龄为 1.63Ga (1679 ± 24 Ma), 与华北克拉通东部长城系的底界年龄($\sim 1.65 \sim 1.68$ Ga)一致, 表明其物源主要来自华北克拉通东部基底; 而靖探 2 井长城系砂岩的锆石 U-Pb 年龄约为 1866 ± 23 Ma, 指示其物源主要来自古元古代基底。锆石微量

元素分析进一步显示, 吕梁山地区样品的锆石稀土元素配分模式反映了其母岩可能为酸性花岗岩, 与华北克拉通古元古代晚期广泛发育的花岗岩活动一致; 靖探 2 井样品的稀土配分曲线则显示轻稀土富集、重稀土亏损的特征, 表明其原始物质主要来源于上地壳。结合锆石年龄谱和微量元素特征, 鄂尔多斯盆地长城系与华北克拉通东部地区长城系的沉积岩岩石组合具有相似性, 但部分样品中含有更年轻的碎屑锆石, 表明其物源区存在差异。盆地内长城系物源区主要为盆地东北部古元古界基底, 而盆地外围吕梁山地区长城系物源区则主要来自华北克拉通东部基底。这些发现为进一步理解鄂尔多斯盆地与华北克拉通东部基底在中元古代的构造联系提供了重要依据。

关键词: 华北克拉通; 鄂尔多斯盆地; 长城系; 碎屑锆石

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

铬元素揭示榴辉岩的多期变质作用： 以阿尔卑斯东部 Pohorje 山脉为例

李波涛^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

高压-超高压变质岩温压演化过程的重建强烈依赖于多硅白云母和石榴石的组成。然而, 在温度高于 700 °C 左右时, 通常石榴石中常见的二价阳离子 (Ca、Fe²⁺、Mg、Mn) 容易发生扩散。这种高温扩散性改变了石榴石的原始组成, 从而使变质演化的解释复杂化。微量元素相较于主量元素在石榴石中扩散速率相对较低, 但这些元素在全岩中的含量通常也比较低, 所以在矿物间的分布的规律很难被发现。铬 (它位于石榴石结构的八面体位置) 属于慢扩散阳离子族, 它在石榴石中的环带可保存到约 1000 °C 的温度 (Massonne & O'Brien, 2003)。石榴子石中 Cr 含量的变化可用于识别不同的地质过程。例如, 石榴子石的 Cr 震荡环带被作为间歇性的外来流体渗入的标志 (Angiboust et al., 2014); 螺旋环带被认为石榴石在生长过程中的旋转 (George et al., 2018)。本研究提供了另一个 Cr 含量揭示地质过程的例子: 即通过对东阿尔卑斯山榴辉岩的石榴子石和其它变质矿物中的 Cr 含量划分不同变质阶段矿物集合体、以及相图模拟来检验共生矿物组合的方法, 揭示了被忽略的多期变质事件 (Li

et al., 2024)。本研究在对经历多期变质作用的 Pohorje 山脉的榴辉岩进行研究时发现其石榴子石主量元素成分比较均一 (Vrabec et al., 2012), 但通过系统总结前人资料发现此地区的基性岩富 Cr (Hauzenberger et al., 2016)。基于此, 我们认为可尝试利用石榴子石 Cr 成分环带、并依据变质矿物 Cr 含量划分不同变质阶段矿物集合体、以及相图模拟来检验共生矿物组合的方法, 来揭示被忽略的多期变质事件。为了验证这一想法, 我们对东阿尔卑斯山 Pohorje 山脉榴辉岩石榴子石的进行了 Cr 成分面扫, 发现虽然主量元素含量比较均一, 但存在 Cr 的核-边结构, 并对不同产状的其它变质矿物 (如辉石、角闪石、白云母等) 的 Cr 含量进行测试也发现存在高 Cr 世代和低 Cr 世代。最终根据所有变质矿物的产出位置和 Cr 的含量不同, 确定了两个世代的矿物组合, 结合相图模拟, 揭示榴辉岩经历了与片麻岩相同的多期变质作用。

关键词: 榴辉岩; 矿物中 Cr 含量; 多期变质作用; 阿尔卑斯东部

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

深俯冲陆壳部分熔融熔体的氧化还原状态 和 Fe-Mo 同位素组成研究

穆智慧¹, 陈仁旭^{1*}, 孙国超¹, 尹壮壮¹

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

深俯冲陆壳部分熔融对大陆碰撞带构造演化及壳幔相互作用具有重要影响。已有研究对熔融机制及时限已有较好认识, 但对其氧化还原状态和变价元素行为仍缺乏制约。我们对柴北缘造山带绿梁山超高压变基性岩和片麻岩及其中长英质脉体开展了岩相学、全岩 Sr-Nd-Fe-Mo 同位素分析和锆石学研究, 探讨了深俯冲陆壳部分熔融的氧化还原状态和 Fe-Mo 同位素行为。柴北缘绿梁山超高压变质岩在折返过程中经历了广泛的部分熔融作用。宏观上表现为超高压变质岩的混合岩化及其中长英质脉体, 微观上表现为大颗粒矿物间尖锐状 Pl+Qz 熔体假象结构、熔体迁移特征及锆石中 Pl+Qz 包裹体等。长英质脉体中新生长锆石表现出振荡环带、明显的 Eu 负异常和 HREE 平坦至陡峭的配分模式, 年龄为~420 Ma, 指示麻粒岩相条件下部分熔融, 全岩 Sr-Nd 和锆石 Hf 同位素识别出变基性岩中脉体受到片麻岩来源熔体影响; 片麻岩主要为原地熔融产生熔体, 并部分迁移至变基性岩中。片麻岩熔融成因脉体 Mo 含量 (0.07~0.27 ppm) 显著低于片麻岩 (0.2~1.2 ppm), 同位素 ($\delta^{56}\text{Fe}_{\text{mean}} = 0.20\text{‰}$; $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{mean}} = -0.09\text{‰}$) 略低于片麻岩 ($\delta^{56}\text{Fe}_{\text{mean}} = 0.24\text{‰}$; $\delta^{98/95}\text{Mo}_{\text{mean}} = -0.09\text{‰}$)。通过对 Fe-Mo 同位素的相关元素分析排除了次生过程、流体

出溶、分离结晶、热扩散等过程影响。多硅白云母作为片麻岩熔融过程中的主要分解矿物, 理论上产生高 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值和高 Mo 含量的熔体, 结合 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值与 $\text{Mg}^\#$ 、 $\delta^{98}\text{Mo}$ 值与 La/Yb 无相关性, 指示 Fe-Mo 同位素分馏受部分熔融过程影响有限。而水的加入可以较好得解释片麻岩熔融脉体的同位素特征。不同熔融机制产生的熔体的氧逸度具有差异, 变基性岩和片麻岩来源熔流体混合成因脉体 ($\Delta\text{FMQ}_{\text{mean}} = -0.65$) 较片麻岩加水熔融脉体 ($\Delta\text{FMQ}_{\text{mean}} = -3.0$) 更氧化。片麻岩加水熔融脉体的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 与 ΔFMQ 无相关性, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 与 FMQ 负相关趋势并不符合理论上部分熔融过程氧逸度对 Mo 同位素分馏的影响, 表明部分熔融过程中 Fe-Mo 同位素分馏受氧逸度变化的影响有限。由此可见, 片麻岩加水熔融产生的熔体可能受贫 Mo、低 $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值和低 $\delta^{56}\text{Fe}$ 值的氧化性流体的影响。本研究通过多同位素体系 (Sr-Nd-Fe-Mo-Hf) 与岩石学-锆石学结合, 阐明了深俯冲陆壳部分熔融机制、氧逸度效应及变价元素行为, 为俯冲带部分熔融与壳幔物质循环提供了关键地球化学约束。

关键词: 超高压变质; 部分熔融; 氧化还原状态; Fe 同位素; Mo 同位素

基金项目: 国家重点研发项目 (2024YFF0807300)

第一作者简介: 穆智慧 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学.Email: muzhihui175@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈仁旭 (1981-), 教授, 研究方向: 俯冲带地球化学.Email: chenrx@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

扬子东北缘新生代岩石圈地幔的性质及形成方式: 地幔捕虏体 Sr-Nd-Pb-Os 同位素的启示

刘丹阳¹, 闫峻^{1*}, 赵建新², 俸月星^{3,2}, 王思诺⁴

1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009;

2. 昆士兰大学 放射性同位素实验室, 澳大利亚布里斯班 004072;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519082;

4. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001

华北克拉通东部在古生代-新生代有超过 100 km 的古老岩石圈地幔被强烈改造或移除, 但是尚不清楚相同地球动力学背景下的扬子克拉通东部是否经历了类似的深部地质过程。本研究对扬子克拉通东北缘苏北盆地新生代玄武岩中的尖晶石相二辉橄榄岩捕虏体进行了详细的岩相学、主量元素、微量元素和 Sr-Nd-Pb-Os 同位素分析。研究表明, 这些尖晶石二辉橄榄岩捕虏体均呈碎裂结构和粒状镶嵌结构, 表现出饱满地幔的性质 (全岩 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 2.09\sim 3.73 \text{ wt.}\%$, 橄榄石 $\text{Fo} = 89.1\sim 90.2$), Os 同位素与深海橄榄岩代表的软流圈有相似的范围 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.1208\sim 0.1256$)。单斜辉石微量元素配分模式可分为两组: 第一组 LREE 轻微富集, Sr-Nd-Pb 同位素亏损 [$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7026\sim 0.7031$, $\epsilon_{\text{Nd}} = 8.9\sim 12.3$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 17.840\sim 18.135$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.419\sim 15.474$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.732\sim 38.115$]; 第二组 LREE 轻微亏损, Sr-Nd-Pb 同位素比第一组更为亏损 [$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7022\sim 0.7027$,

$\epsilon_{\text{Nd}} = 10.5\sim 23.0$, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 17.114\sim 17.856$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.365\sim 15.461$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.011\sim 37.728$], 与 DMM 类似。这些微量和同位素特征表明, 苏北盆地的橄榄岩捕虏体是新生的岩石圈地幔。两组橄榄岩部分熔融程度均较低 ($<10\%$), 并且第一组受到了来自俯冲大洋板片沉积物来源的硅酸盐熔体的交代。两组橄榄岩有相似的平衡温度, 指示其来源于类似的深度。综合以上分析, 扬子克拉通东北缘的新生代陆下岩石圈地幔是古老岩石圈地幔拆沉以后, 软流圈快速上涌冷凝新形成的。本研究探讨了岩石圈地幔在古太平洋板片俯冲和后撤引发的弧后拉张背景下的演化过程, 包括古老难熔岩石圈地幔的完全拆沉、软流圈上涌和冷凝、以及新生饱满岩石圈地幔的形成。

关键词: 橄榄岩捕虏体; 岩石圈地幔; 拆沉; Sr-Nd-Pb 同位素; 扬子克拉通

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42030801、41672052)

第一作者简介: 刘丹阳 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: ldy1509@hotmail.com

*通信作者简介: 闫峻 (1966-), 教授, 研究方向: 地球化学. Email: jyan-hut@163.com

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

塔西南上白垩统-古近系分布特征及其对副特提斯海演化的记录

黄碧君^{1*}

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100

塔里木盆地西南地区的上白垩统至古近系地层完整地记录了副特提斯海从扩张、分割到消亡的过程。研究区的陆-海-陆沉积旋回、生物化石组合及构造变形特征为揭示特提斯域演化与亚洲内陆干旱化机制提供了关键证据。伴随着印度板块与亚洲板块的碰撞所引发的大规模的大陆内部变形, 天山、帕米尔高原和昆仑山等古老造山带被重新激活。由前人研究发现, 塔里木西南地区的副特提斯海侵海退历程不但受全球海平面升降的影响, 还可能由于构造运动而表现出穿时性特征, 因此更加精确的结果有待进一步深入和全面的研究。副特提斯海的演化过程中, 在塔西

南地区沉积了数套海相地层, 这些地层构成了油气资源的良好生、储、盖层。在塔西南地区上白垩统-古近系可以划分为 2 套区域性的储盖组合, 即上白垩统依格孜牙组碳酸盐岩与上覆古近系阿尔塔什膏盐岩构成的储盖组合, 及古近系卡拉塔组碳酸盐岩与上覆乌拉根组深色泥岩盖层组成的储盖组合。因此研究副特提斯海的演化能够指导上白垩统--古近纪地层含油气系统的预测和储层分布分析。

关键词: 塔西南地区; 上白垩统; 古近系; 副特提斯海

· 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 ·

全岩 Mg 同位素区分高温和低温 S 型花岗岩

王艳¹, 高彭^{1*}, 赵子福¹, 顾海欧³, 孙国超¹, 黄慧婵²,
伍章健², 尹常青²

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;

2. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 珠海 510275;

3. 合肥工业大学, 合肥 230009

地壳深熔是碰撞造山带形成花岗岩的主要方式。地壳深熔温度的约束对于了解花岗岩的岩石成因和地壳深熔过程至关重要。在变沉积岩部分熔融过程中, 高温条件下, 以黑云母脱水熔融为主, 伴有转熔石榴石的生长, 而在低温条件下, 以白云母脱水熔融为主, 转熔石榴石鲜少形成。在平衡分馏的情况下, 石榴石相对其它含镁相具有更轻的镁同位素组成。因此, 镁 (Mg) 同位素可作为示踪地壳熔融温度相对变化的潜在指标。然而, 温度变化对熔体 Mg 同位素组成的影响程度尚不清楚。本研究分析和报导了喜马拉雅造山带高温和低温淡色花岗岩的 Mg 同位素和 O 同位素数据, 结合先前研究报导的全岩主量和微量元素、锆石 Ti 含量数据来讨论这一问题。低温淡色花岗岩的最大锆石 Ti 温度为 739~801 °C, $\delta^{26}\text{Mg}$ 值为 -0.70‰~0.14‰, 与全球 S 型花岗岩的 Mg 同位素组成一致。高温淡色花岗岩的最大锆石 Ti 温度为 800~855 °C, $\delta^{26}\text{Mg}$ 值为 0.46‰~0.53‰, 明显高于全球 S 型花岗岩和变泥质岩的 Mg 同位素组成。高温

淡色花岗岩具有相对较高的 Nb/Ta、Eu/Eu* 比值, 与低温淡色花岗岩一致的全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 CIA 值, 表明流体交代蚀变、分离结晶以及地壳同化作用并不是造成这两组花岗岩 Mg 同位素组成差异的主要原因。我们认为高温淡色花岗岩较重的 Mg 同位素组成与较高熔融温度条件下更多转熔石榴石的残余有关。相平衡模拟结果证实随着温度的升高, 以白云母分解为主的熔融反应很快转化为以黑云母分解为主的熔融反应, 伴随石榴石比例的逐步增加。平衡分馏计算结果进一步表明熔体的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值与系统中石榴石比例具有正相关关系, 高温条件下产生熔体的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值明显高于低温条件下形成的熔体。本研究阐明了 Mg 同位素组成与深熔温度之间的关系, 强调全岩 Mg 同位素可以作为区分高温和低温 S 型花岗岩的可靠指标。

关键词: 喜马拉雅淡色花岗岩; 深熔温度; Mg 同位素; 相平衡模拟; 转熔石榴石

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42325205、42373043)

第一作者简介: 王艳 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 花岗岩地球化学. Email: wangy4476@mail.ustc.edu.cn

通讯作者简介: 高彭 (1988-), 研究员, 研究方向: 花岗岩地球化学. Email: gaopeng05@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

北大别早白垩世富钾高镁埃达克质岩石的成因: 对造山带垮塌的意义

冯帆¹, 续海金^{1,2*}, 杨绍极¹, 刘强^{1,2}

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, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)新能源学院, 武汉 430074

造山带垮塌的机制和过程, 是理解造山带演化的关键。大别造山带是典型的、已垮塌的大陆碰撞造山带, 为揭示造山带垮塌机制提供理想的研究窗口。通过系统的岩石学、地球化学及年代学研究, 在大别造山带核部——北大别构造单元道士冲地区, 发现了早白垩世(~130Ma)的富钾高镁埃达克质岩石, 为理解大别造山带的垮塌机制提供了重要科学依据。道士冲岩体为石英二长闪长岩, 受罗田穹窿热隆升的影响, 发育明显的片麻理, 为片麻状石英二长闪长岩。岩内发育大量暗色基性微粒包体, 同样受罗田穹窿热隆升的影响, 发生明显的塑性变形, 呈长轴状, 长轴平行于寄主岩石(道士冲岩体)的片麻理。包体内还可见岩浆混合的证据, 如斜长石捕虏晶。道士冲石英二长闪长岩具有富钾高镁埃达克质岩石的地球化学特征: 高 Sr (672.5~818.8 ppm)、低 Y (11.37~20.92 ppm) 和 Yb (0.94~1.87 ppm), 高的 Sr/Y 比值 (35.07~72.02), 没有 Eu 和 Sr 的负异常, 为典型的埃

达克质特征; 高的 MgO (2.08~3.04 wt.%) 含量及 Mg[#]值 (44.36~49.32), 低的 Na₂O/K₂O 比值 (1.12~1.46), 体现出岩体富钾高镁的特征。包体则具有幔源岩浆的地球化学特征: 低 SiO₂ (48.10~51.85 wt.%)、高 MgO (3.27~5.62 wt.%)、Ni (16.60~63.59 ppm)、Cr (30.45~164.60 ppm)、Y (18.17~25.77 ppm) 和 Yb (1.50~1.94 ppm) 含量, 高的 Mg[#]值 (47.33~51.18), 与大别造山带内的基性-超基性岩石类似。通过对道士冲岩体与包体的野外特征和地球化学特征综合分析, 认为形成于加厚下地壳部分熔融的埃达克质熔体与幔源岩浆的混合, 指示了大别造山带在~130Ma 经历了山根拆沉作用。结合前人对大别造山带早白垩世岩浆岩的研究, 认为山根整体、快速的拆沉作用导致大别造山带的垮塌。

关键词: 造山带垮塌; 大别造山带; 高镁埃达克质岩石; 岩浆混合; 拆沉作用

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372057、42072058、41772054)

第一作者简介: 冯帆 (1994-), 博士研究生, 研究方向: 岩石学. Email: feng_fan_1224@qq.com

通讯作者简介: 续海金 (1976-), 教授, 研究方向: 岩石学. Email: xuhaijin@cug.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

大洋岩石圈流体交代过程中的硅同位素分馏: 来自西藏日喀则异剥钙榴岩的证据

许佳乐¹, 陈伊翔^{1*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

海洋岩石圈在俯冲过程中对地幔硅循环及同位素不均一性产生深远影响, 而这一过程与海底交代作用密切相关。海底交代作用形成的具有特异地球化学特征的岩石可进入俯冲带, 并进一步影响深部地球化学性质。因此, 研究低温海底交代作用引起的 Si 同位素变化及其对全球 Si 循环的贡献, 对于理解地球内部物质交换至关重要。异剥钙榴岩是海底辉长岩在蛇纹石化流体作用下形成的富钙交代岩石, 其 Si 同位素组成可提供关键约束。本研究对西藏日喀则蛇绿岩中的异剥钙榴岩及其辉长岩原岩进行了 Si 同位素分析。结果表明, 与辉长岩原岩相比, 异剥钙榴岩具有显著降低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值 (-0.67‰ 至 -0.29‰), 而辉长岩原岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值 (-0.29‰ 至 -0.19‰) 接近大洋中脊玄武岩。异剥钙榴岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值明显偏离岩浆演化趋势, 其低 $\delta^{30}\text{Si}$ 特征不能通过原岩的岩浆分异机制解释。结合异剥钙榴岩相对较低的 Si 含量、偏低的 $\delta^{18}\text{O}$

值以及蛇纹石化流体中 Si 含量极低的特征, 表明外源轻 Si 同位素组分的加入不足以解释其 $\delta^{30}\text{Si}$ 的系统性降低。因此, 最可能的成因机制是交代作用过程中重 Si 同位素的丢失。质量平衡计算表明, 异剥钙榴岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值与其葡萄石和石榴石的含量呈负相关关系, 表明矿物组合的转变直接影响 Si 的迁移。石榴石和葡萄石在形成过程中发生脱硅作用, 导致重硅同位素组分优先进入流体, 而残余的异剥钙榴岩则具有偏低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值。综合来看, 本研究揭示了异剥钙榴岩在海底交代作用中作为轻 Si 储库的重要作用, 并表明其俯冲进入地幔后, 可能成为地幔轻 Si 同位素的潜在来源, 进而影响俯冲带弧岩浆的 Si 同位素组成以及全球 Si 循环。

关键词: 异剥钙榴岩; 流体交代作用; 硅同位素; 俯冲带过程

基金项目: 中科院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB41000000); 国家自然科学基金项目 (42373046)

第一作者简介: 许佳乐 (2000-), 在读博士, 研究方向: 同位素地球化学. Email: xujiale@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 陈伊翔 (1983-), 教授, 研究方向: 同位素地球化学. Email: yxchen07@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

熔体交代作用对大陆岩石圈地幔的改造: 来自 Baldissero 尖晶石二辉橄榄岩的岩石地球化学与 Re-Os 同位素约束

刘庆^{1*}, 侯泉林¹, 何苗¹, 闫方超¹, 梁子贤¹

1. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 101408

位于意大利阿尔卑斯山西部的 Ivrea-Verbano Zone (IVZ) 是全球罕见出露完整的大陆地壳剖面之一 (Rivalenti et al., 1981; Peressini et al., 2007; Mazzucchelli et al., 2010)。作为 Adriatic 板块的组成部分, IVZ 在阿尔卑斯造山运动中因与欧洲板块碰撞而抬升剥露 (Fountain, 1976; Handy et al., 1999; Quick et al., 2009)。IVZ 主要包含两大单元: 高级变质的副片麻岩 Kinzigite 组, 以及侵入其中的镁铁质复合岩体 (Peressini et al., 2007)。其中, Baldissero 地体作为 IVZ 西南缘的关键组成部分, 展现出独特的岩石组合特征。该地体由长 3 km、宽 0.5~2 km 的橄榄岩透镜体构成, 东侧与辉长岩质基性杂岩毗邻, 西侧通过构造接触与 Austroalpine 穹隆的 Canavese 地块相接 (Shervais & Mukasa, 1991; Quick et al., 1995)。现有年代学证据表明, 这些橄榄岩在石炭纪-二叠纪期间就位于下地壳麻粒岩相变基性岩中 (Peressini et al., 2007; Mazzucchelli et al., 2010)。岩石学研究显示, Baldissero 橄榄岩主体为尖晶石相二辉橄榄岩, 含少量方辉橄榄岩和纯橄岩 (Ernst, 1978; Sinigoi et al., 1980), 其显著特征在于被多期次辉石岩脉穿插, 晚期更发育切割早期构造的闪长岩脉 (Sm-Nd 年龄, 204~198 Ma)。值得注意的是, 这些闪长质岩浆活动不仅引起二辉橄榄岩发生局部反

应, 即使是远离岩脉的二辉橄榄岩也受到熔体渗透的影响, 导致副矿物钛韭闪石结晶及不相容元素富集 (Mazzucchelli et al., 2010)。本次研究的 Baldissero 尖晶石二辉橄榄岩展现出典型变质变形特征: 粒状结构 (粒径 1~5 mm) 中, 橄榄石 (约 55%) 发育有亚颗粒, 斜方辉石 (约 25%) 多见膝折带, 单斜辉石 (约 15%) 与填隙状尖晶石 (约 5%) 共生, 橄榄石和辉石普遍显示波状消光。地球化学分析揭示, 样品具有高镁特征 ($Mg\# \sim 91$) 和显著的 CaO 含量 ($\sim 2.9 \text{ wt}\%$), 其稀土配分模式显示 HREE 轻微富集且总体接近原始地幔值, 但明显富集 Cs、Ba、U、Ta 等流体活动性元素。进一步研究发现, PGE 配分呈现平坦的球粒陨石标准化模式, 与原始上地幔 (PUM) 高度吻合, 但 Pd/Ir (1.35~2.09) 和 Ru/Ir (1.87~2.03) 比值系统性偏高。同位素体系方面, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值稳定于 0.124 左右, 与深海橄榄岩范围重叠。综合上述特征, 结合 Re-Os 同位素的模式年龄、PGE 分布规律及区域构造演化史, 我们认为 Baldissero 尖晶石二辉橄榄岩可能代表经历过软流圈熔体交代改造的大陆岩石圈地幔残余。

关键词: 岩石圈地幔; 二辉橄榄岩; Re-Os 同位素; 熔体交代作用

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

古特提斯板片撕裂的快速传播: 来自华南三叠纪花岗岩高精度年代学证据

夏小平^{1*}, 聂虎¹

1. 长江大学 资环学院, 武汉 430000

板片撕裂常被用以解释汇聚环境中的复杂地球动力学过程。然而, 板片撕裂的启动与传播机制尚不明确。华南大容山-十万大山花岗岩带被认为是古特提斯板片垂直撕裂的岩浆响应, 能够为阐明该过程提供重要约束。本文报道了该花岗岩带的高精度锆石 U-Pb 年龄数据, 结果表明, 岩体侵位年龄与其空间分布呈现显著相关性, 从东北至西南逐渐变年轻, 年龄范围为 249.4 Ma

至 246.5 Ma, 持续时间约为 3 Ma。该发现表明, 大容山-十万大山地区的板片撕裂可能从俯冲带的弧后区域迅速传播至海沟。结合区域地质证据, 研究认为穿时碰撞作用可能是诱发板片撕裂的重要机制之一。

关键词: 板片撕裂; 古特提斯; 华南; ID-TIMS 年龄

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

多矿物 U-Pb 年代学和地球化学联合制约江南造山带 西坞口 Sn-W-Rb 岩浆-热液成矿过程

吴锬言¹, 高晓英^{1*}, 侯琪¹, 杨晓勇¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230031

西坞口矿床位于江南造山带东段, 为区内典型的岩浆-热液型 Sn-W-Rb 多金属矿床。为揭示 Sn-W-Rb 多金属矿床从岩浆晚期向热液转变成矿的关键过程, 本研究对西坞口 Sn-W-Rb 多金属矿床及其区内花岗岩开展了独居石、锡石、黑钨矿 U-Pb 年代学、地球化学与岩石学综合研究。野外勘查结合钻孔探察显示, 蚀变花岗岩-云英岩型 Sn-Rb 矿体主要赋存于岩体顶部, 而石英脉型 Sn-W 矿体则多产于志留纪沉积地层中。LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年揭示西坞口岩体存在两期岩浆活动: ~140 Ma 的斑状花岗岩(花岗岩 I)和~129 Ma 的斑状黑云母花岗岩(花岗岩 II)。蚀变花岗岩与蚀变花岗岩型 Sn 矿石中独居石 U-Pb 年龄均为~129 Ma。来自不同

类型矿体中的锡石和黑钨矿 U-Pb 定年进一步限定锡成矿时限为 129 Ma(蚀变花岗岩型)至 126 Ma(石英脉型), 石英脉型钨矿化时限在 125~127 Ma。独居石地球化学特征显示, 从花岗岩至蚀变花岗岩至锡矿石, Th 含量不断降低, Eu 异常增强, LREE-MREE 分异程度增高, 指示岩浆-热液演化是导致蚀变花岗岩型锡矿化的主要原因。结合花岗岩全岩地球化学特征及区域构造背景, 研究认为在~129 Ma 伸展环境下侵位的斑状黑云母花岗岩, 引发了该区主要的锡钨铍成矿事件。

关键词: 江南造山带; 西坞口; 岩浆-热液作用; Sn-W-Rb 成矿

国家自然科学基金(42472076)

第一作者简介: 吴锬言(1998-), 博士研究生, 研究方向: 矿物地球化学与成矿过程研究. Email: wukunyan@mail.ustc.edu.cn

*通讯作者简介: 高晓英(1980-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学与成因矿物学研究. Email: gaoying@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

俯冲陆壳的碳酸盐交代作用改造地幔楔氧化还原状态:
来自苏鲁造山带胡家林超镁铁质岩的制约王闯¹, 陈仁旭^{1*}, 尹壮壮¹, 孙国超¹, 穆智慧¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

地幔的氧化还原状态调控着地球深部挥发分(如 H_2O 、 CO_2)的循环,并对地幔演化、火山喷发、成矿过程及全球碳循环具有关键作用。俯冲带地幔楔较洋中脊玄武岩(MORB)更为氧化,主要归因于俯冲物质的交代作用。来自俯冲大陆板片的碳酸盐熔体富含氧化性组分(CO_3^{2-} , Fe^{3+} , V^{5+}),可能是导致地幔楔氧化的重要交代介质,但其在大陆碰撞带中氧化机制的直接证据仍较缺乏。造山带橄榄岩中幔源橄榄岩直接记录了壳源熔流体与地幔楔的反应,是研究大陆俯冲过程中壳幔相互作用的理想样品。我们对苏鲁造山带胡家林地区纯橄岩、异剥橄榄岩及单斜辉石岩开展了系统的岩石学和地球化学研究。胡家林纯橄岩具有极度亏损的全岩组分、高镁橄榄石($\text{Fo}=90.4\sim 92.8$)及高 $\text{Cr}\#$ (66~79)尖晶石,代表华北克拉通古老岩石圈地幔经历高程度部分熔融(20%~30%)后的难熔残留体。胡家林异剥橄榄岩中橄榄石具有低 Fo (86.7~88.3)且从核到边表现出 Fo 、 SiO_2 、 MnO 的增加以及 FeO 的降低,单斜辉石具有高 $\text{Mg}\#$ (90.3~95.2)且富集 LREE 和 LILE,指示其经历了碳酸盐熔体交代作用。胡家林单斜辉石岩根据其岩相特征分为 I 类(贫石榴石)、II 类(富石榴石)和 III 类(富 Fe-Ti 氧化物)。I-II 类单斜辉石岩全岩组分和单矿物成分与全球

交代成因辉石岩相似,且其单斜辉石具高 $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$ 、 Ca/Al 及低 Ti/Eu 比值,指示了其碳酸盐熔体与地幔橄榄岩反应的产物。III 类单斜辉石岩因全岩与矿物成分与全球堆晶成因单斜辉石岩相似,为演化熔体的堆晶产物。异剥橄榄岩和单斜辉石岩中含有交代成因锆石和残留的岩浆锆石,交代锆石具有低的 Th/U 比值以及较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,并含有方解石包裹体,表明交代介质为地壳来源,锆石年龄 $226\pm 7\text{ Ma}$ 给出了碳酸盐熔体交代作用的时间。异剥橄榄岩和 I-II 类单斜辉石岩单斜辉石的 Sr 同位素特征($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7027\sim 0.7063$)也显示出地壳来源碳酸盐熔体和亏损地幔端元混合的趋势。因此,交代的碳酸盐熔体来源于三叠纪俯冲的扬子板片。相较于原生单斜辉石斑晶,新生单斜辉石 V/Sc 比值的降低,表明俯冲陆壳来源碳酸盐熔体可增强地幔不均一性并氧化上覆地幔楔。本研究揭示了大陆深俯冲过程中碳酸盐熔体对地幔楔的氧化效应,阐明了壳源碳参与地幔氧化的机制。这些发现深化了对碰撞造山带壳幔相互作用的理解,为深部碳循环与地幔氧化还原演化的耦合提供了制约。

关键词: 苏鲁造山带; 超镁铁质岩; 碳酸盐熔体交代; 地幔楔氧化; 壳幔相互作用

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

中国东北晚三叠世镁铁质岩浆岩钼同位素记录 俯冲地壳物质再循环

王志刚¹, 戴立群^{1*}, 赵子福¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026

镁铁质岩浆岩的地球化学研究为探索俯冲带地壳物质输入地幔提供了重要窗口。然而, 俯冲带地壳组分的类别和对地幔的贡献程度很难直接被观察, 且这种再循环机制尚不明确。本研究对中国东北晚三叠世镁铁质岩浆岩的 Mo-Sr-Nd-Hf 同位素进行了综合分析, 制约了早中生代蒙古-鄂霍茨克洋俯冲板片输入地幔的交代过程。晚三叠世镁铁质岩浆岩 (约 227~226 Ma) 具有岛弧型微量元素特征, 较高的 Ba/La、Ba/Th、La/Sm、Th/La 比值, 以及亏损的全岩 Sr-Nd-Hf 同位素组成, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 比值为 0.7039 至 0.7043, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 4.0 至 8.5, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 6.9 至 11.1。这些岩石的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 7.7 至 12.7。

此外, 它们还具有重钼同位素特征, $\delta^{98/95}\text{Mo}$ 值为 -0.24‰至 0.36‰, 大多高于正常地幔值 (-0.20‰±0.01‰)。上述元素和同位素特征指示, 中国东北晚三叠世镁铁质岩浆岩的重钼同位素特征主要继承自蚀变洋壳衍生的富水溶液和少量缺氧沉积物衍生的含水熔体。因此, 镁铁质岩浆岩的 Mo-Sr-Nd-Hf 同位素联合示踪是研究俯冲带地球化学通量的有力手段, 特别是钼同位素系统研究为会聚板块边缘的地壳物质再循环提供了新的见解。

关键词: 钼同位素; 板片流体; 沉积物熔体; 弧岩浆作用; 蒙古—鄂霍茨克洋

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF0800402)

第一作者简介: 王志刚 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 岩石学、岩石地球化学. E-mail: zhigangwang@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 戴立群 (1986-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学. E-mail: lqdai@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

俯冲大洋板片的卤素组成和活动行为

陈仁旭^{1*}, 潘正华¹, 汤跃¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

卤族元素(简称卤素)是挥发性微量元素、易溶于富水流体, 主要赋存于地球表面储库如海水、沉积物、蚀变洋壳中, 在地幔中含量很低。它们在俯冲带通过沉积物、蚀变洋壳和蛇纹岩化岩石圈地幔的俯冲进入地幔。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等。了解俯冲带的卤素活动行为对于理解壳幔相互作用、地幔不均一性和全球卤素及相关元素循环具有重要意义。F 和 Cl 相比 Br 和 I 对地球内部的物理化学过程具有更显著更重要的影响。我们以 F 和 Cl 为主要对象对俯冲带变质岩中卤素的活动性进行了探讨。俯冲带中的卤素主要赋存于地壳浅部物质, 如孔隙流体、沉积物、蚀变洋壳和蛇纹石化岩石圈地幔, 它们在 F 和 Cl 含量进而 F/Cl 比值上存在巨大差异。板片俯冲过程中会发生一系列持续和非持续的变质脱水反应。卤素在板片脱水过程中发生再分配, 并通过替代 OH⁻的形式进入含水矿物中。随着矿物的分解在俯冲带不同深度释放, 形成卤素含量不同的变质流体。这些流体向上交代上覆地幔楔, 引发地幔楔部分熔融。也有部分卤素赋存于更稳

定的矿物(如磷灰石)中, 随板片一起进入更深地幔。洋壳俯冲到蓝片岩相过程中大部分 F 得到保留, 而 Cl 则大部分发生丢失, 蓝片岩相向超高压榴辉岩相进变质过程中则伴随着 F 和 Cl 的持续丢失, 这与不同变质条件下卤素赋存矿物的稳定性有关。蓝片岩和榴辉岩中 F 和 Cl 主要赋存在含水矿物如云母和角闪石以及磷灰石和榍石中。俯冲板片进变质过程中卤素在持续丢失但并不完全, 榴辉岩中不同程度 F 和 Cl 的富集和亏损指示俯冲过程中不同岩性之间存在流体交换。俯冲板片底部富含卤素的蛇纹岩来源流体对榴辉岩的渗滤作用会导致榴辉岩具有高的卤素含量, 这些富含卤素的榴辉岩也是携带挥发份进入弧下深度的重要载体。由于俯冲板片中卤素组成随深度变化导致俯冲板片不同深度下释放流体的卤素含量和组成也存在差异, 进而影响不同深度下释放流体的元素迁移能力。

关键词: 卤素; 挥发份; 榴辉岩; 流体活动; 俯冲带

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

赤峰平庄晚白垩世和渐新世玄武岩的成因研究及其意义

王丹¹, 洪路兵^{1*}, 张银慧¹

1. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西桂林 541000

地震层析成像显示, 东亚陆缘之下的地幔转换带有一高速体, 其往东可延伸至日本俯冲带, 形成了独特的东亚大地幔楔深部构造系统 (Huang & Zhao, 2006; Li & Van der Hilst, 2010; Zhao & Ohtani, 2009), 为我们研究大地幔楔系统的壳幔相互作用、物质组成及深部动力学过程提供了契机。赤峰平庄位于东亚大地幔楔前端。该地区发育了两套不同时代 (晚白垩世和渐新世) 玄武岩, 是探讨东亚大地幔楔前端壳幔相互作用、物质组成及其深部动力学的重要样品。赤峰平庄晚白垩世和渐新世玄武岩均具有 OIB 的微量元素组成, 指示其起源于软流圈。其中, 晚白垩世玄武岩显示高氧同位素组成, 它们的橄榄石斑晶具低 Ni、10000Zn/Fe 和 Fe/Mn, 以及高 Mn 和 Mn/Zn 特征, 指示源区为被经历低温热液蚀变的上洋壳改造的橄

榄岩; 渐新世玄武岩显示低氧同位素组成, 它们的橄榄石斑晶具有高 Ni、10000Zn/Fe 和 Fe/Mn, 以及低 Mn 和 Mn/Zn 特征, 指示源区为被经历高温热液蚀变的下洋壳改造的辉石岩。本文认为, 晚白垩世以来, (古)太平洋俯冲板片滞留于赤峰之下的地幔转换带; 在地幔加热和对流地幔上涌的共同作用下, 洋壳组分逐渐从滞留板片中剥离并进入软流圈, 其中, 晚白垩世以上洋壳为主, 渐新世加入了更多的下洋壳组分。它们与地幔橄榄岩相互作用, 形成了晚白垩世和渐新世玄武岩的源区物质。这表明, 东亚大地幔楔壳-幔相互作用和源区物质组成可能具有时空演化规律。

关键词: 东亚大地幔楔; 壳幔相互作用; 深部动力学; 赤峰平庄

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42172053、42002057); 广西研究生创新项目 (YCSW2024388)

第一作者简介: 王丹 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。Email: 2541967477@qq.com。

*通讯作者简介: 洪路兵 (1985-), 副研究员, 研究方向: 地幔地球化学。Email: honglubiing@glut.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

利用新型弹性力学压力计 (QuiG) 和单矿物微量元素温度计 (Ti-in-Amp) 限定桐柏造山带榴辉岩进变质温压轨迹

王雨淳¹, 高晓英^{1*}, 张强强¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230000

榴辉岩的进变质压力 (P)-温度 (T) 轨迹反映了俯冲带地球动力学演化和热结构的重要信息。石榴石的稳定性使其成分通常与热力学平衡模拟结合使用, 以构建榴辉岩的进变质温压轨迹。然而, 最近研究表明, 石榴石可能经历不平衡的成核和生长, 这可能导致热力学平衡方法不能准确地重现岩石热构造演化。本文将新型的石榴石中石英包裹体弹性拉曼频移压力计 (QuiG)、相平衡模拟和单矿物微量元素温度计 (钙质角闪石中 Ti 温度计和金红石中 Zr 温度计) 多种方法相结合, 对桐柏榴辉岩的进变质 P-T 轨迹进行了精确限定。结果表明, 桐柏榴辉岩在 380~520°C/15~18 kbar 下经历了早期蓝片岩相进变质阶段, 在 520~600°C/18 kbar 下经历了晚期角闪石-榴辉岩相进变质阶段, 随后近等温升压至约 27 kbar 经历峰期绿帘石-榴辉岩相变质。QuiG 限定的进变质压力条件显

著低于相平衡模拟的限定 (23~25 kbar), 但在石榴石变斑晶中包裹体矿物组合的稳定域内。T-X (CaO) 视剖面的计算表明, 当进行相平衡模拟时, 榴辉岩的全岩成分与石榴石生长的有效平衡成分之间的差异会导致对进变质压力的高估, 而弹性力学压力计可准确地限定桐柏榴辉岩所经历的进变质压力。结果表明桐柏榴辉岩经历了一个以早期加热-晚期挤压为特征的进变质演化过程。这表明地温梯度发生从~8~15°C/km (深度~50 km) 到最大值仅 2.6°C/km (深度 55~80 km) 的连续变化, 呈现强烈上凹, 与前人对其它典型大陆俯冲带限定的热结构相当。

关键词: 变质演化; 石榴石中石英包裹体弹性拉曼频移压力计; 钙质角闪石中 Ti 温度计; 地温梯度; 俯冲带

基金项目: 国家自然科学基金项目 (W2412052)

第一作者简介: 王雨淳 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学与地球化学. Email: wangyuchun@mail.ustc.edu.cn

*通讯作者简介: 高晓英 (1980-), 教授, 研究方向: 岩石学与地球化学. Email: gaoying@ustc.edu.cn

• 专题 8: 汇聚板块边缘化学地球动力学 •

印度陆壳再循环的镁铁质岩浆岩地球化学示踪: 来自雅鲁藏布江缝合带古海沟沉积物的约束

陈龙^{1*}

1. 中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛, 266100

自始新世印度—欧亚大陆碰撞以来, 印度大陆岩石圈持续俯冲至亚洲岩石圈之下, 但印度大陆地壳是否经历再循环仍是固体地球科学的前沿问题。再循环的地壳物质与地幔在地球化学组成上有显著差异, 可以通过分析幔源镁铁质岩浆岩的地球化学成分进行示踪。然而, 由于缺乏对印度大陆俯冲前新特提斯洋壳沉积物地球化学成分的有效约束, 目前难以通过对比拉萨地体镁铁质岩浆岩与印度陆壳成分, 明确其源区中富集组分的来源, 是再循环的新特提斯洋壳沉积物, 还是印度陆壳。为解决这一瓶颈问题, 本研究对

雅鲁藏布江缝合带保存的碰撞前-同碰撞期海沟沉积序列和拉萨地体碰撞前、同碰撞和碰撞后镁铁质岩浆岩, 开展 Li-Fe-Mg-K-Sr-Nd-Pb-Hf 等多同位素的地球化学分析, 结合前人地质、地球物理研究结果, 定性和定量约束不同时期镁铁质岩浆岩中的再循环地壳物质的性质。最终, 旨在回答印度大陆地壳是否经历再循环及其起始时间的关键问题。

关键词: 印度陆壳再循环; 海沟沉积物; 拉萨地体; 镁铁质岩浆岩