

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

模拟幔源熔体中 V/Sc、V/Ti 和 V/Yb 变化与氧逸度的关系

刘纯韬¹, 叶辰阳¹, 张舟^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

氧逸度 (fO_2) 是表征体系氧化还原状态的热力学参数, 它调控着变价元素的地球化学行为, 对地幔部分熔融过程、岩浆挥发分的组成以及大气成分的演变均具有重要影响。变价元素钒 (V) 与单价态元素的比值 (如 V/Sc、V/Ti、V/Yb) 是获取地幔氧逸度的重要指标。然而, 这些比值在地幔部分熔融过程中的地球化学行为仍存在争议。为此, 我们模拟了不同的源区矿物组合和化学成分条件, 以探究这些比值与弧玄武岩和洋中脊玄武岩 (MORB) 地幔源区氧逸度的关系。研究结果表明, V/Sc 比值受地幔源区性质和熔融程度变化的影响

较小, 是更为可靠的示踪地幔氧逸度演化的指标。相比之下, V/Ti 和 V/Yb 比值对熔融程度更为敏感, 且 V/Ti 比值明显受地幔化学成分的影响。本研究深化了我们对地球上不同构造背景下地幔氧化还原状态的理解。例如, 将我们的模型应用于玄武岩数据集后发现, 现代弧下地幔通常比 MORB 源区更为氧化, 这反映了俯冲板片衍生的流体和沉积物对弧地幔氧逸度的影响。

关键词: 地幔氧逸度; 变价元素比值; 氧逸度指标; 玄武岩

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072066)

第一作者简介: 刘纯韬 (1994-), 博士后, 研究方向: 地球化学大数据. Email: c.-t.liu@zju.edu.cn

*通信作者简介: 张舟 (1986-), 研究员, 研究方向: 地球化学大数据. Email: zhangzhou333@zju.edu.cn

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

九州帕劳脊南段熔岩岩石成因：对古伊豆-小笠原- 马里亚纳弧裂解过程的制约

刘振轩^{1,2}, 鄢全树^{1,2,3*}

1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东 青岛 266061;

2. 河海大学 海洋学院, 南京 210016;

3. 山东省深海矿产资源开发重点实验室(筹), 山东 青岛 266061

发育于西太平洋汇聚板块边缘的伊豆-小笠原-马里亚纳(IBM)沟-弧-盆体系完整记录了自 52 Ma 以来的区域构造-岩浆活动历史, 是研究俯冲带岩浆作用与物质循环、圈层相互作用及洋内岛弧发育演化过程(俯冲起始、岛弧裂解、弧后盆地扩张)的理想区域(Stern, 2003; Yan et al., 2024)。截至目前, 虽然对 IBM 俯冲带开展了大量研究并获取了许多重要认识, 但对 IBM 早期岛弧演化的研究仍相对缺乏(Samajpati 和 Hickey-Vargas, 2022; Ribeiro et al., 2020; 2022), 洋内岛弧裂解作用对后弧岩浆组分的影响仍有待阐明。本文对菲律宾海板块内早期演化形成的九州-帕劳残余弧脊南段(22° N 以南)基底玄武岩样品开展了地质年代学、岩石学、元素地球化学分析。结果表明, 其典型代表的 K-Ar 年龄为 23.7±0.68 Ma, 代表着弧后盆地打开前古 IBM 弧裂解期间最后阶段的岛弧岩浆活动。全岩地球化学特征表明, 九州-帕劳脊南段基底熔岩为亚碱性到平湖拉斑玄武岩, 其微量元素组成与典型的岛弧玄武

岩(IAB)相似, 并显示出微弱的俯冲组分贡献, 且弧下地幔存在广泛的不均一性。模拟计算结果表明, 该脊段基底熔岩是由尖晶石二辉橄榄岩经过 4%~12%低程度部分熔融所形成。对比 IBM 俯冲带其它处于岛弧裂解期的后弧岩浆活动, 九州-帕劳脊南段熔岩与其北段熔岩及演化更成熟的西马里亚纳残余弧、伊豆-小笠原弧岩浆在俯冲组分添加量上存在系统性差异, 更类似婴儿期的 IBM 弧。本研究进一步提出, 岛弧裂解影响下, 软流圈被动上涌阻碍了俯冲组分进入九州-帕劳脊南段弧下地幔。菲律宾海板块的旋转运动及太平洋板块的俯冲后撤共同影响下造就了南北差异性的裂解条件, 致使后弧处岩浆活动与弧壳增生终止, 并阻碍了九州-帕劳脊南段进一步演化成为平均组分为安山质的成熟岛弧, 最终表现为不成熟的洋内岛弧。

关键词: 洋内俯冲带; 岛弧裂解作用; 后弧岩浆活动; 岩石成因; 九州—帕劳脊

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

大兴安岭南段蒙和乌拉花岗岩年代学、 地球化学特征及构造意义

岳海欣^{1,2}, 于赫楠^{1,2*}, 孙珍军^{1,2}, 何燕萍^{1,2}, 于瀛博³

1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201;

2. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 101601;

3. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201

大兴安岭南段位于中亚造山带东段的兴蒙造山带, 是我国北方著名的有色金属基地和多金属矿集区。经历了古亚洲洋闭合、蒙古-鄂霍茨克洋闭合和古太平洋板块俯冲等地质构造演化, 地处古亚洲洋成矿域和滨西太平洋成矿域的叠加区, 显生宙以来经历了剧烈的构造活动, 形成了大规模断裂和褶皱构造, NE 向的黄岗梁-甘珠尔庙大型复式褶皱断裂带控制了岩浆岩的分布和多金属成矿作用。研究区构造活动受古太平洋构造体系与蒙古-鄂霍茨克构造体系的显著影响, 但其详细作用机制和影响的时空范围尚未明确, 限制了中生代岩浆活动与成矿作用关系的研究。本文在总结前人研究成果的基础上, 对蒙和乌拉地区进行了详细的野外地质调查, 开展了岩相学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素分析研究, 为该地区岩浆演化与成矿作用的关系提供科学依据。本文研究岩体岩性分别为花岗斑岩和黑云母二长花岗岩。二者锆石 CL 图像可以看出锆石颗粒内部均发育清晰的振荡环带, 锆石均为岩浆成因 ($Th/U=0.24\sim 0.7$), 锆石 U-Pb 同位素定年结果显示年龄分别为 135.60 ± 0.29 Ma 和 134.33 ± 0.28 Ma, 属于早白垩世花岗岩; 花岗斑岩 A/CNK 介于 1.08~1.11, A/NK=1.11~1.14, 黑云母二长花岗岩 A/CNK=1.03~1.07, A/NK=1.09~1.11, 且二者都具有高硅富碱的特征, 属于弱过铝质钙碱性花岗岩; 两个岩体具有较高的 SiO_2 (76.78%~77.38%)、 Na_2O+K_2O (8.10%~8.42%) 和 FeO^T/MgO (13.74~21.69), 低 P_2O_5 ($\leq 0.03\%$)、

$10000*Ga/Al$ (3.14~3.27) 均大于 2.6, 呈极强的 Eu 负异常 ($\delta Eu=0.09\sim 0.13$), 全岩高饱和温度分别为 772~791°C、766~783°C, 结合它们的岩石成因判别图以及较高的分异指数 ($DI=96.11\sim 96.90$), 充分证明其属于高分异 I 型花岗岩。二者岩体中较强的重稀土元素亏损、强 Eu 负异常、正 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 (4.50~9.30)、较年轻的二阶段模式年龄 (904~595 Ma) 以及在 $\epsilon_{Hf}(t) - t$ 图中数据点均落于新生底侵下地壳演化线和古生代俯冲增生杂岩演化线之间的结果, 均暗示花岗质岩浆物质可能源于新元古代新生下地壳物质部分熔融。部分学者对区域进行了岩石学、年代学和地球化学研究, 认为蒙古-鄂霍茨克洋闭合引起东部发生碰撞, 造成了东北地区碰撞造山作用和隆升作用, 直至早白垩世早期大兴安岭南段构造环境由挤压向伸展转变。同时, 早一中侏罗世古太平洋板块俯冲方向发生转变, 导致陆内挤压、陆壳增厚, ~144 Ma 发生俯冲回卷作用, 伴随着俯冲板片重力下沉, 岩石圈伸展, 在晚侏罗世一早白垩世影响至大兴安岭地区。前人资料研究显示, 地球物理学方法系统总结出的俯冲板片下降速率证实了板片下沉时间的合理性。结合花岗岩的构造判别图解, 表明岩体形成于碰撞后伸展环境, 是古太平洋板块向欧亚大陆俯冲回卷作用的结果。

关键词: 大兴安岭南段; 花岗岩; 岩石元素地球化学分析; 花岗岩年代学

基金项目: 廊坊市科学技术研究与发展计划自筹经费项目 (2023013091); 河北省研究生教育教学改革研究项目 (YJG2023121)

第一作者简介: 岳海欣 (2001-), 在读硕士, 研究方向: 区域岩浆活动与成矿作用关系. Email: yuehaixin18@163.com

*通信作者简介: 于赫楠 (1987-), 硕士研究生, 研究方向: 岩浆岩岩石学及矿床地质学. Email: 239082532@qq.com

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

西太平洋南雅浦岛弧火成岩岩石成因与物质循环

闫施帅^{1,2}, 鄢全树^{1,2,3*}

1. 河海大学 海洋学院, 南京 210098;

2. 自然资源部第一海洋研究所 海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东青岛 266061;

3. 山东省深海矿产资源开发重点实验室(筹), 山东青岛 266061

雅浦俯冲汇聚系统由太平洋板块及次一级的卡罗琳板块俯冲于菲律宾海板块之下形成的, 随后它又受到了卡罗琳海底高原向雅浦海沟的碰撞/俯冲作用 (Beccaluva et al., 1980; Yan et al., 2022)。因此, 该区是研究海底高原与俯冲带相互作用的理想区域。雅浦俯冲带具有许多独特的构造特征, 比如, 雅浦岛弧主要由变质岩和极少量的火山岩组成, 沟弧间距异常短 (< 50 km), 缺乏中深度地震活动, 以及雅浦俯冲带南、北部俯冲汇聚过程存在明显差异 (Altis, 1999; Kobayashi, 2004; Ohara et al., 2002)。2018 年自然资源部第一海洋研究所利用“向阳红 01”科考船在雅浦海域开展了综合地质调查航次, 获得了关键构造位置的多种类型的火成岩样品。本研究对采自南雅浦岛弧(大致以索罗尔海槽为界把雅浦岛弧分为南、北两段)的橄榄岩、辉长闪长岩、玄武岩和安山岩开展了系统的矿物学、元素化学和同位素地球化学的研究。结果表明: (1) 橄榄岩为弧前橄榄岩, 是海

底高原作用下经俯冲板块少量脱水导致的地幔楔低程度部分熔融 (10%~15%) 后的地幔残余物, 并在俯冲板块的构造侵蚀下暴露于雅浦岛弧; (2) 辉长闪长岩具有与新生期岛弧熔岩类似的微量元素地球化学特征, 指示其是由俯冲输入组分交代的相对较为亏损的浅层地幔楔低程度部分熔融所形成的; (3) 雅浦岛弧玄武岩表现出似 IAB 的地球化学特征, 而雅浦岛弧安山岩是岛弧前缘较低深度的基性岩受到少量沉积物熔体作用后形成的, 它们的源区地幔具有太平洋型 MORB 同位素地球化学特征。同位素组成表明, 南雅浦岛弧熔岩的地幔源区受到了卡罗琳板块下太平洋型地幔的影响, 在卡罗琳海底高原的差异俯冲作用下, 其软流圈地幔可能已通过由雅浦南北两侧差异俯冲所形成的板片窗而流入进雅浦弧下地幔中。

关键词: 岩石成因; 岩浆过程; 海底高原; 超慢速俯冲; 南雅浦岛弧

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

东昆仑晚三叠世壳幔相互作用及其对岩浆-成矿活动大爆发的动力学启示

熊富浩^{1*}, 侯明才¹, 马昌前²

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院地质学系, 成都 610059;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

壳幔相互作用是实现地球深部圈层物质循环和地壳生长演化的重要方式, 因此, 理清壳幔物质相互作用的动力学过程对于认识火成岩多样性与成矿物质迁移富集机理具有重要意义。青藏高原北部东昆仑造山带发育大规模晚三叠世花岗岩浆-成矿作用, 且具有显著的壳幔岩浆混合印记, 是探究壳幔相互作用与岩浆-成矿大爆发动力学联系的极佳窗口。本文以东昆仑晚三叠世复式岩墙、A 型花岗岩和埃达克质花岗岩等多种特殊成因类型岩浆岩为研究对象, 基于精细的矿物结构和原位微区元素-同位素等研究, 系统探究了晚三叠世不同成因类型岩浆岩记录的壳幔相互作用过程。研究结果揭示, 东昆仑造山带晚三叠世巨量岩浆-成矿作用与古特提斯域碰撞后伸展背景密切相关, 东昆仑于晚三叠世 228~208 Ma 期间发生了快速隆升剥蚀与大范围壳幔岩浆混合作用。多期次幔源岩浆底侵、不同属性加厚地壳(古老和新生)的部分熔融、长英

质晶粥活化、幕式壳幔岩浆混合和高程度分离结晶控制着东昆仑造山带晚三叠世长英质岩浆岩成因类型多样性。其中, 底侵的幔源 OIB-like 的玄武质岩浆通过高程度的分离结晶可形成 A1 型花岗岩, 加厚新生地壳的熔融以及随后的壳幔岩浆混合分别形成了低 Mg 和高 Mg 埃达克质岩浆岩, 而镁铁质和长英质晶粥岩浆储库的壳内多期次活化和混合则形成了辉长岩-闪长岩-花岗岩等复式岩墙群。本项研究表明, 壳幔岩浆不同方式的混合(熔体-熔体和熔体-晶体)以及不同程度的混合与分离结晶是控制火成岩岩石学多样性的关键, 且 A1 型花岗岩并非仅起源于板内裂谷环境, A1 和 A2 型花岗岩可以共存于造山带相关伸展背景, 其地球化学差异主要受控于岩浆源区和演化过程。

关键词: 壳幔相互作用; 火成岩; 岩石学多样性; 岩浆大爆发

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602049、41972066)。

第一作者简介: 熊富浩(1986-), 副教授, 研究方向: 火成岩岩石学. Email: fhxiong@cdut.edu.cn

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

藏南林周盆地设兴组时代及其区域对比

杨文凯¹, 赵志丹^{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 100083

近年来,林周盆地晚白垩世设兴组沉积岩的物源和沉积时代受到了学术界的广泛关注。碎屑锆石年代学能够揭示沉积岩的物源和沉积时代。但是,目前学者们对设兴组沉积岩的沉积时代和物源缺乏一致的见解。针对这个问题,本文选择了林周盆地中颇具代表性的设兴组沉积岩开展系统研究,就林周盆地设兴组的沉积时代及其区域地质特征进行初步对比。本文研究区主要位于藏南林周盆地,区域上属于冈底斯东段。设兴组地层在林周盆地的春堆村、那嘎寺等地区附近均有出露,这些地层不整合覆盖在林子宗火山岩的不整合面的下部,本文于此处采集了设兴组最高层位的长石石英砂岩,探讨设兴组的沉积时代和区域地质特征。砂岩碎屑颗粒以石英和长石为主,碎屑颗粒的磨圆程度和分选程度均较差。对设兴组沉积岩样品中的碎屑锆石进行 U-Pb 年代学分析,结果表明,本文所研究的设兴组沉积岩中锆石年龄分布极其广泛(92~3021 Ma),设兴组锆石年龄在年龄频谱上表现为具有同拉萨地体相似的年龄峰值,其同拉萨地体具有良好的亲缘性。本文所研究的设兴组沉积岩中最年轻的碎屑锆石年龄为 92 Ma,结合其他人获得的设兴组夹层火山岩的定年结果(约 70~72 Ma)看来,说明设兴组的沉积活动大约出于 92~70 Ma。在锆石微量元素方面,本文的研究数据表明,设兴组砂岩中的

碎屑锆石微量元素数据如 Pb、Ti 存在峰值,可能由于古老的锆石受到变质流体、熔体的作用影响,产生了一定程度的 Pb 损失等。设兴组的年龄分布波形具有同拉萨地体相似的 150 Ma 左右、550 Ma 左右、1150 Ma 左右的年龄峰值,暗示设兴组于拉萨地体具有良好的亲缘性。结合对林周盆地大地构造背景的分析,92~158 Ma 期间,林周盆地经历了中拉萨火山事件以及冈底斯带的隆起,这两个构造变化均为设兴组沉积岩提供了物源。前人在位于堆龙德庆的马乡地区采集过设兴组砂岩样品进行了分析,结合前人报道的设兴组砂岩研究结果表明,设兴组表现为沉积时间短(约 20 Ma 沉积作用时限)、物源区近(拉萨地体为主要物源区),同时形成的砂岩成熟度较低、碎屑矿物缺少分选和磨圆,并且设兴组于晚白垩世时期开始沉积(约 90 Ma),这些结论均与本文所获得的研究结果相吻合。地层方面,林周盆地附近的设兴组地层无明显分布的规律,前人发现林周盆地西部的冲堆地区以及南部的凯布—典中—白定一带的典中组不整合覆盖在设兴组之上,然而东部的古如—达嘎一带则是年波组覆盖于设兴组地层之上。

关键词: 林周盆地; 设兴组; 年代学; 砂岩; 区域对比

基金项目: 国家自然科学基金委员会创新群体项目“碰撞带地壳演化”(42121002)

第一作者简介: 杨文凯(2000-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。Email: 3001220054@cugb.edu.cn

通信作者简介: 赵志丹:(1968-), 教授, 研究方向: 青藏高原及邻区, 秦岭-大别造山带, 中国东部等地区, 岩石学和地球化学。Email: zdzhao@cugb.edu.cn

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

马利亚纳俯冲带不同构造阶段的地幔源区岩性特征： 来自橄榄石主量和微量元素组成的启示

张紫璇¹, 李晓辉^{1*}

1. 中国海洋大学, 山东 青岛 266000

马利亚纳俯冲带的地幔通常被描述为与洋中脊相关的亏损地幔, 主要由橄榄岩 (peridotite) 组成。本研究旨在探讨俯冲过程是否会影响马利亚纳俯冲带下方地幔源区的岩性特征。我们对来自马利亚纳地区不同俯冲环境 (包括岛弧、弧后盆地和初始弧裂谷阶段) 的玄武岩中的橄榄石元素组成进行了综合分析。通过分析橄榄石中的主要和微量元素, 以及关键的元素比值 (如 $10000 \times \text{Zn}/\text{Fe}$ 、 Mn/Zn 和 $100 \times \text{Mn}/\text{Fe}$), 我们发现来自不同俯冲环境的橄榄石均表现出橄榄岩源区的特征。尽管 Ca 含量在样品之间存在显著差异, 高 Fo 值 ($\text{Fo} > 87$) 且高 Ca 含量的橄榄石与橄榄岩的特征一致。而低 Fo 值 ($\text{Fo} < 87$) 的橄榄石则表现出较低的 Ca 含量, 其成分趋势与辉石岩 (pyroxenite) 一致。这种差异可归因于板片俯冲作用

的影响, 俯冲板片增加了地幔楔中的含水量, 从而促进了 Ca 在熔体中的富集。橄榄石中 Mn 元素的分布表明, 在不同的压力和温度条件下, Mn 具有明显不同的分配特征, 且 Mn 元素的浓度对压力变化特别敏感。这些成分变化对应于橄榄岩演化过程中经历的不同压力条件。在不同的构造环境下, Ni 含量的变化主要受控于岩浆演化, 而温度和压力的影响较小。尽管元素含量存在一定差异, 但我们的研究表明, 无论是在岛弧、弧后盆地还是初始弧裂谷阶段, 马利亚纳俯冲带的地幔源区始终由橄榄岩组成, 俯冲过程的变化并未导致地幔源区岩性上的显著不同。

关键词: 马利亚纳俯冲带; 橄榄石; 地幔源区; 岩浆演化

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42476062)

第一作者简介: 张紫璇 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 海洋地质学. Email: zzixuan@163.com

*通信作者简介: 李晓辉 (1990-), 副教授, 研究方向: 海洋地质学. Email: xiaohuili@ouc.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

新疆上户 NYF 型伟晶岩成因及稀土富集过程： 来自副矿物的约束

祝颖雪¹, 王连训^{1*}, 张海军^{2,3}, 杨智全⁴, 张笋⁴

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 武汉 430074;

3. 中国地质调查局武汉地质调查中心 地质调查研究院, 武汉 430205;

4. 新疆地质局巴音郭楞地质大队, 新疆维吾尔自治区库尔勒 841000

花岗伟晶岩是稀有金属、稀土元素及宝石资源的重要载体之一, 其成矿机制与岩浆过程中的结晶分异或部分熔融密切相关。传统观点认为伟晶岩多由高度分异的花岗质岩浆演化形成, 但某些伟晶岩体(如加拿大的 Tanco 伟晶岩和阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩)缺乏时空上共生的花岗岩侵入体, 促使学界提出深熔派生模式以解释其成因。根据成矿元素的不同, 伟晶岩可分为 LCT 型(Li、Cs、Ta)、NYF 型(Nb、Y、F)及 LCT+NYF 混合型。我国伟晶岩主要分布于阿尔泰、松潘-甘孜、喜马拉雅、阿尔金等造山带及塔里木盆地边缘等构造活跃区, 以 LCT 型为主, NYF 型相对少见。新疆库尔勒上户花岗伟晶岩显著富集稀土元素(REE), 可归类为 NYF 型中的 REE 亚型。上户伟晶岩脉出露于塔里木克拉通北缘库鲁克塔格地块西段的库尔勒基底杂岩中, 该基底杂岩由多种变火成岩和变沉积岩组成, 包括黑云角闪斜长岩、花岗片麻岩、混合岩化斜长角闪岩等。伟晶岩脉出露于混合岩化黑云角闪斜长岩中, 呈北东东-南西西向展布, 与区域构造线一致。其矿物组合除石英(约 40%)和长石(绢云母化, 约 30%)等主要矿物外, 还富含稀土矿物(褐帘石、独居石、硅铈钨矿、磷灰石), 富 Ti 矿物(钛铁矿、榍石), 以及富 Zr 矿物(锆石、钽石)。这些次要或副矿物在岩石中分布不均匀, 局部富集成矿, 并有明显的热液蚀变特征(如独居石→次生磷灰石/褐帘石、钛铁矿→榍石)。岩相学显示矿物结晶顺序依次为: 独居石→硅铈钨矿→钛铁矿→褐帘石→磷灰石, 结合主要矿物含量, 表明岩浆成分富含 Ca、Al、REE 和 Ti。在岩浆演化过程中, 独居石优

先结晶消耗熔体中的磷, 随着钛铁矿与硅铈钨矿共结晶导致钛元素耗竭, 钙含量升高促使褐帘石形成, 进而 REE 含量逐步下降, 最终大量结晶长石和相对贫 REE 的磷灰石。热液蚀变进一步改造这些副矿物, 如独居石常呈现冠状环带结构: 独居石残留核外依次发育次生磷灰石和褐帘石环边, 并包裹大量细小钽石包裹体。通过 TIMA 面扫和质量守恒计算, 可知热液体系富 Ca、Al、Si, 且相对于岩浆阶段更为氧化。矿物原位主微量分析表明, 岩浆期稀土矿物 REE 含量显著高于次生稀土矿物, 次生褐帘石趋向斜黝帘石化, 而交代残余独居石则表现出向硅钽石转化的趋势, 这进一步验证了热液中富 Si 和氧化性强的特点。次生褐帘石的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(-23.7~-22.3)与原生褐帘石、独居石和硅铈钨矿的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(-23.3~-22.8)相似, 指示交代热液可能与岩浆同源。这些稀土矿物的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值与塔里木克拉通基底麻粒岩的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(-24.4~-22.4)较为接近, 但明显区别于围岩黑云角闪斜长岩($\epsilon\text{Nd}(t) = -14.8 \sim -11.2$), 表明前者更可能是伟晶岩源岩。锆石 U-Pb 年代学结果显示伟晶岩形成年龄为 $1825 \pm 4 \text{ Ma}$, 与 Columbia 超大陆聚合期一致。综上, 我们认为新疆上户 NYF 型花岗伟晶岩是超大陆聚合过程中地壳深熔作用形成的, 进一步的岩浆结晶分异作用促进了稀土矿物的结晶, 这为 NYF 型伟晶岩中稀土元素富集与成矿提供了研究实例。

关键词: 褐帘石; NYF 型伟晶岩; 深熔作用; 稀土元素富集; 新疆上户

基金项目: 国家自然科学基金(42072082), 湖北省自然科学基金(2022CFB116)

第一作者简介: 祝颖雪(1997), 女, 博士研究生(三年级), 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: zyx2019@cug.edu.cn

*通讯作者简介: 王连训, 男, 中国地质大学(武汉)教授, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: lianxunwang@cug.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

基于数据增强与机器学习的斜长石-熔体湿度计 及其在不同构造背景下的应用

林嘉敏¹, 刘平平^{1*}, 高剑峰², 薛泽润¹, 张舟³

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;

3. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310027

水通过控制硅酸盐熔体的密度、粘度和成分, 从而在调控岩浆的动力学过程中起关键作用。然而, 由于氢的高扩散性, 熔体包裹体和矿物中测得的水含量常呈现显著的波动, 且估计结果往往只能作为最小值的参考。相比之下, 基于斜长石的湿度计在准确重建岩浆水含量方面展现出巨大潜力。本研究对文献中收集的 330 个实验斜长石-熔体对平衡数据, 采用机器学习方法构建改进型斜长石-熔体湿度计。针对小数据集的限制, 我们通过马尔可夫链蒙特卡洛 (MCMC) 模拟进行数据增强, 将数据集扩展至 3300 个样本。基于增强数据集, 利用极端随机树 (Extra-trees) 算法开发了适用于玄武岩至流纹岩成分 (压力范围为 30~1600 MPa, 温度范围为 563~1220 °C) 的改进型斜长石-熔体湿度计, 预测误差约 0.18 wt.%。为进一步提高模型可解释性和可靠性, 我们采用 SHAP (SHapley Additive

exPlanations) 方法进行特征分析, 发现温度、压力以及熔体的 SiO₂ 含量为模型预测过程中贡献度最大的特征。最后, 通过水饱和和熔融实验及三个处于弧、热点和洋中脊环境的典型火山案例: 位于印尼的 Youngest Toba Tuff (YTT)、位于黄石火山的 Mesa Falls Tuff (MFT), 以及位于冰岛东部地区的 Grímsvötn tephra series (Saksunarvatn ash) 的验证计算表明, 该湿度计能以最小的误差精确重现水饱和和熔融实验的水含量, 并比天然火山岩中熔体包裹体的实测最高水含量值系统性偏高。相较于现有方法, 本改进型斜长石-熔体湿度计在确定不同构造环境的岩浆水含量方面有着更高的准确性和更广泛的适用性。

关键词: 岩浆含水量; 斜长石-熔体湿度计; 极端随机树算法; 马尔可夫链蒙特卡洛模拟

基金项目: 国家自然科学基金项目创新科研小组科学基金项目 (42121003); 国家自然科学基金项目 (42272051)

第一作者简介: 林嘉敏 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 岩浆岩石学与机器学习. Email: linjiamin33@stu.pku.edu.cn

*通信作者简介: 刘平平 (1986-), 研究员, 研究方向: 幔源岩浆作用及其资源效应. Email: ppliu@pku.edu.cn.

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

俯冲带岩石圈地幔对弧岩浆作用成因的意义

于洋^{1*}, 黄小龙², 徐义刚², 钟孙霖³, Iwan Setiawan⁴

1. 山东大学 海洋研究院, 山东 青岛 266237;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;

3. 中央研究院地球科学研究所, 台北 011529;

4. Research Center for Geological Resources, National Research and Innovation Agency (BRIN), Indonesia, Bandung 010340

俯冲带是地球地幔与地壳之间物质循环的主要场所。俯冲带岩浆作用在类型和化学组成上变化巨大, 反映了地幔源区中复杂的成因过程。俯冲带岩浆通常被认为源于二端元岩浆形成过程, 包含俯冲板片释放的组分和地幔楔橄榄岩。俯冲组分的加入导致软流圈地幔楔底部橄榄岩发生低温富水熔融, 产生初始熔体。初始熔体上侵, 通过软流圈地幔和岩石圈地幔, 并与周围物质持续发生反应, 最终获得原始岩浆成分。俯冲带原始岩浆应代表地幔中源区熔融过程与熔体上升过程的最终产物。然而, 目前流行的俯冲带岩浆成因模型主要集中在软流圈地幔楔中发生的熔融过程, 对于弧下岩石圈地幔在熔体上升过程中对其成分的改造作用仍然缺乏明确的约束。因此, 我们系统分析了巽他弧玄武岩的 Mg-Fe 同位素, 并综合对比全球俯冲带岩浆成分变化, 揭示弧下岩石圈地幔对俯冲带岩浆作用成因的重要贡献。巽他玄武岩的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值变化范围为 -0.28% 至 -0.05% , $\delta^{56}\text{Fe}$ 值变化范围为 -0.19% 至 0.14% , 与

全球俯冲带岩浆的同位素值相似。它们表现出较低的 TiO_2/Yb ($0.3\sim 0.5$) 和 Fe/Mn ($30\sim 60$) 比值, 表明其来源于软流圈地幔楔橄榄岩的部分熔融。Mg-Fe 同位素与 ϵNd 的缺少相关性, 表明俯冲相关的交代作用对软流圈地幔楔 Mg-Fe 同位素影响较小。巽他弧玄武岩显示出 $\delta^{26}\text{Mg}$ 与 Fe/Mn 的负相关性, 以及 $\delta^{56}\text{Fe}$ 与 Fe/Mn 的正相关性。这种相关性也在全球俯冲带岩浆中被观察到, 可能反映了初始熔体在穿过弧下岩石圈地幔时, 分别混染了低 Fe/Mn ($30\sim 50$) 的辉石岩和高 Fe/Mn ($50\sim 70$) 的橄榄岩。此外, 俯冲带岩浆的 Mg-Fe 同位素与 V/Sc 比成良好的相关性, 暗示混染岩石圈地幔物质可能是导致俯冲带岩浆氧逸度升高的重要机制之一。因此, 我们认为弧下岩石圈地幔对俯冲带岩浆作用成因具有重要的贡献。

关键词: 俯冲带; 岩浆作用; 岩石圈地幔; 镁同位素; 铁同位素

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFF0803403), 自然科学基金 (42273046), 山东大学齐鲁青年学者基金, 山东省泰山学者-青年专家基金项目 (tsqn202312001)。

第一作者简介: 于洋 (1988-), 研究员, 研究方向: 岩石地球化学. Email: yuyang0123@email.sdu.edu.cn.

*通讯作者简介: 王连训, 男, 中国地质大学 (武汉) 教授, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: lianxunwang@cug.edu.cn

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

斜长石稳定性控制弧岩浆拉斑-钙碱性演化趋势

王锦团^{1*}, 李立¹, 熊小林¹, Felix MARXER², 刘星成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, 广州 510640;

2. Leibniz University Hannover Institute of Mineralogy, Hannover, Germany 301670

俯冲带是大陆地壳形成的重要场所, 弧岩浆钙碱性演化趋势是大陆地壳形成的重要机制。越来越多的证据表明弧岩浆的钙碱性演化倾向与上覆地壳厚度相关 (即地壳厚度相关的演化倾向)。地壳厚度通过调控岩浆演化过程中的矿物结晶行为来影响弧岩浆钙碱性演化倾向, 但何种矿物主导了弧岩浆地壳厚度依赖的演化趋势仍存在激烈争议。弧岩浆结晶分异过程中, 斜长石与石榴子石的稳定性均受岩浆结晶压力控制, 因此这两种矿物是调控弧岩浆地壳厚度相关的演化倾向的潜在矿物。我们收集了全球弧岩浆全岩数据, 发现岛弧岩浆早期演化阶段 Dy/Yb 与 La/Yb 比值未发生分异, 不支持石榴子石控制弧岩浆钙碱性演

化的假说。我们还发现 Fe/Al 比值分异也与地壳厚度相关, 这一相关性可通过斜长石结晶随地壳厚增加而受到抑制来合理解释。更重要的是, 矿物/熔体 $Fe-Mg-Al$ 分配实验与分离结晶模拟结果进一步支持斜长石稳定性在调控弧岩浆地壳厚度相关的演化倾向中的作用。为此我们提出斜长石 (而非石榴子石) 主导了弧岩浆地壳厚度相关的演化趋势。本研究揭示了驱动弧岩浆钙碱性演化趋势和大陆地壳形成的内在机制。

关键词: 大陆地壳; 弧岩浆; 钙碱性演化; 斜长石稳定性

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42003047)

第一作者简介: 王锦团 (1989-), 副研究员, 研究方向: 实验地球化学. Email: wangjt@gig.ac.cn

*通信作者简介: 王锦团 (1989-), 副研究员, 研究方向: 实验地球化学. Email: wangjt@gig.ac.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

碳酸岩与硅酸岩的成因联系：来自穿岩浆矿物的启示

程志国^{1*}, 张招崇¹, 金子梁², Matthew J. Brzozowski³

1. 中国地质大学(北京)地质过程与找矿预测全国重点实验室, 北京 100083;

2. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078;

3. 长安大学西部矿产资源与地质工程重点实验室, 西安 710054

碳酸岩与伴生硅酸岩之间的成因联系已在岩石学家们之间争论了数十年。一些副矿物, 如磷灰石和方解石, 可以在不同类型岩浆的分异过程中广泛结晶(可称为穿岩浆矿物), 并记录结晶环境中的地球化学成分变化。因此, 这些副矿物的成分有望为揭示碳酸岩及其伴生硅酸岩的成因联系提供重要的线索。位于中国西北的瓦吉里塔格碳酸岩杂岩体是一个典型的碳酸岩-碱性杂岩体, 由方解石碳酸岩、白云石碳酸岩、方解霞黄煌岩、霞石岩和霓霞正长岩组成。本次研究通过对穿岩浆矿物(如磷灰石和方解石)进行原位地球化学和 C-O 同位素分析, 探讨了不同类型碳酸岩和硅酸岩之间的成因关系。磷灰石的镁含量(Mg_{ap})被证明能够有效记录碳酸岩-碱性杂岩体的演化历史。特别地, 碳酸岩中的 Mg_{ap} 值与方解霞黄煌岩中的磷灰石相似, 但远高于霞石岩和霓霞正长岩

中的值。结合方解石碳酸岩中的方解石与方解霞黄煌岩中碳酸盐球粒的 $\delta^{13}C$ 值相似, 我们提出碳酸岩的母岩浆是通过液态不混溶作用从方解霞黄煌岩中分离出来的。随后, 从不混溶液体中结晶出的方解石和白云石继续形成了方解石碳酸岩和白云石碳酸岩。磷灰石的微量元素和 $\delta^{18}O$ 值表明, 霓霞正长岩的磷灰石呈现出两种成分截然不同的类型: Group-1 型与霞石岩呈现出明显的演化关系, 而 Group-2 型与方解霞黄煌岩有关, 表明霓霞正长岩存在霞石岩和方解霞黄煌岩的双重物质贡献。最终, 我们提出了一个基于碳酸岩碱性杂岩体岩浆储运系统的成因模型来解释碳酸岩与伴生硅酸岩之间的成因联系。

关键词: 磷灰石; 方解石; 碳酸岩-碱性杂岩体; 液态不混溶; 稀土矿化

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

亚洲-印度大陆碰撞后初期岩浆作用： 以西藏拉萨嘎拉山高硅花岗岩为例

钱汝辰¹，王珍珍¹，刘栋¹，赵志丹^{1*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院，北京 100083

亚欧-印度大陆碰撞过程及其对青藏高原隆升的重要作用，是青藏高原地质演化历史的重要课题。岩浆作用记录了大陆碰撞阶段高原演化历史与深部过程，前人对碰撞时期(65~45 Ma)、碰撞后时期(< 30 Ma)均做了较为详细研究与讨论，但是对碰撞后早期阶段(42~35 Ma)的岩浆活动报道较少。本文通过南拉萨地块嘎拉山地区晚始新世黑云母花岗岩的岩石地球化学与同位素成分研究，为该时期的岩浆作用提供了重要线索。嘎拉山岩体位于贡嘎机场北、嘎拉山隧道以西、雅鲁藏布江以南紧靠江边，与江北的典型曲水岩体隔江相望。岩体主要为黑云母花岗岩，具有高硅($\text{SiO}_2 = 72\sim 74 \text{ wt}\%$)、偏铝质($A/\text{CNK} = 0.93\sim 1.02$)等特征。岩石富集大离子亲石元素，亏损高场强元素，具有极低的 Co (1.61~6.25 ppm)、Ni (1.29~7.05 ppm) 含量，高 Sr (312~526 ppm)，低 Y (3.84~11.1 ppm)、Yb (0.42~1.13 ppm)，富集轻稀土元素而亏损重稀土元素，具有高的 Sr / Y 值 (40.8~100.8) 与 $(\text{La} / \text{Yb})_{\text{N}}$ 值 (33.1~46.8)，显示埃达克

质岩石特征。岩体含有富云母包体，可见黑云母聚晶。黑云母花岗岩锆石 U - Pb 谐和年龄为 36 - 40 Ma，锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 +0.1~+5.4，全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 -4.0~-2.1，明显不同于雅鲁藏布江北岸的以花岗闪长岩为主要类型的典型曲水岩基(锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) > +10$ 、全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +3.3\sim +3.7$)。嘎拉山黑云母花岗岩显示了冈底斯岩基较少见的岩石类型和地球化学特征(高硅、富集 Nd-Hf 同位素)，通过系统岩石学与地球化学分析，本文认为嘎拉山岩体(1)具有埃达克质特征的黑云母花岗岩形成于增厚下地壳的部分熔融；(2)高硅特征是经历了低压环境下角闪石、黑云母的分离结晶作用，含硅量中等的岩浆逐渐演化分异的结果；(3)岩体同位素成分指示有一定的富集组分加入，该富集组分可能是印度陆壳物质或者是俯冲的特提斯样大洋沉积物。

关键词：冈底斯岩浆带；后碰撞；高硅花岗岩；岩石成因；

第一作者简介：钱汝辰(2000-)，博士研究生；研究方向：矿物学、岩石学、矿床学。Email: 3190375745@qq.com

*通讯作者简介：赵志丹(1968-)，教授，研究方向：岩石地球化学。Email: zdzhao@cugb.edu.cn

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

碎屑锆石稀土元素相关系数约束造山带演化

胡培远^{1*}, 翟庆国¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

受后期构造事件的影响, 古老造山带的岩石记录往往是不完整的。因此, 仅仅通过岩石记录往往难以全面的了解古老造山带的演化历史。锆石是自然界中常见的含铀副矿物, 不仅可以在经历后期构造、变质事件后保存于岩浆岩中, 也可以在经历风化、搬运等过程后富集于沉积盆地中, 最终成为沉积岩中的碎屑矿物。同时, 锆石是多种与岩石成因密切相关的元素的重要载体, 因而相关元素比值和同位素特征可以作为探索造山带演化的有力工具。在系统总结前人研究工作的基础上, 本研究尝试开发了通过碎屑锆石稀土元素约束古老造山带演化的方法, 即: (1) 在洋-陆俯冲造山带中, 锆石 Eu 异常和轻/重稀土比值主要受控于母岩浆的源区深度, 因而其变化趋势耦合, 并且与地壳平均厚度正相关; (2) 在陆-陆碰撞造山带中, 虽然母岩浆的源区深度依然是重要的控制因素,

但是由于 S 型岩浆岩比例的上升和不稳定的氧逸度和水含量, 锆石 Eu 异常和轻/重稀土比值呈现解耦的变化趋势。随后, 本研究通过计算锆石 Eu 异常和轻/重稀土比值的相关系数 (rdz), 定量刻画了碎屑锆石稀土元素与古老造山带的耦合关系, 即在洋-陆俯冲造山带相对于陆-陆碰撞造山带具有更高的 rdz, 且 rdz = 0.55 可以作为二者的一个经验界线。值得注意的是, 如果碎屑锆石来自多个不同类型造山带, 应当使用 rdz 的变化趋势约束造山带演化过程, 而非单一的 rdz 值。此外, 如果洋-陆俯冲造山带中岛弧岩浆岩的源区受到了地幔柱的影响, 也会产生较低的 rdz 值。

关键词: 碎屑锆石; 稀土元素; 相关系数; 造山带; 地幔柱

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

缅怀我们的导师周新民教授

徐夕生^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023

在漫长的教学科研生涯中, 周老师始终秉持立德树人教育理念, 以身作则, 敬业乐群, 严谨治学, 乐于提携后辈, 教育成果丰硕, 视培养地质学人才与推进科学研究为己任, 将毕生心血倾注于国家的教育事业与地质科学的发展之中。周老师热爱祖国, 为人谦和, 不慕名利, 他的一生是勤勉治学、

无私奉献的典范, 是追求卓越、勇于探索的写照, 深受师生及同行的尊敬与爱戴。作为周老师悉心教导的学生, 在此深切缅怀周老师的几个点滴与谆谆教诲。

关键词: 缅怀周新民教授; 南京大学

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

辽东曲家屯玄武岩的岩石成因研究及其意义

尹焕秋¹, 洪路兵^{1*}, 张银慧¹, 王丹¹

1. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西桂林 541006

晚中生代是华北克拉通破坏的关键时期, 定量约束晚中生代岩石圈厚度对理解华北克拉通破坏过程具有重要意义。本文报道了辽东晚白垩世 (~81 Ma) 曲家屯玄武岩的全岩和橄榄石化学组成。结果显示曲家屯玄武岩为碱性玄武岩, 具有洋岛玄武岩的微量元素组成 (Nb-Ta 正异常, 明显的 K 和 Pb 负异常) 和亏损的 Sr-Nd 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t) = 0.7040 \sim 0.7042$ 和 $\epsilon\text{Nd}(t) \approx -1.9$) 特征, 指示来源于软流圈。橄榄石斑晶的 Fo 值为 84.0~86.2, Ni、Ca 和 Mn 分别为 977~1823 $\mu\text{g/g}$ 、1234~1667 $\mu\text{g/g}$ 、1345~1833 $\mu\text{g/g}$, Fe/Mn、10000Zn/Fe 和 Mn/Zn 比值分别为 66.9~81.3、

7.4~8.7 和 16.6~19.8, 总体与橄榄岩熔体的橄榄石成分相似。结合全岩 FC3MS 和 FCKANTMS 值与橄榄岩熔体相当, 这表明它们的熔融源区为橄榄岩。曲家屯玄武岩浆形成时的地幔温压条件为 1298~1325°C 和 2.5~2.7 GPa, 显示形成时的岩石圈厚度为 82~90 km, 略厚于该地区早白垩世的岩石圈厚度 (40~60 km), 指示从早白垩世至晚白垩世, 华北克拉通东部岩石圈可能已经有所增生和增厚, 克拉通破坏已经结束。

关键词: 岩石圈演化; 华北克拉通破坏; 辽东曲家屯玄武岩; 橄榄石化学组成; 源区岩性

基金项目: 广西科技计划项目 (桂科 AD23026332、桂科 AD22035160); 国家自然科学基金项目 (42002057、42172053)

第一作者简介: 尹焕秋 (1998-), 女, 硕士研究生, 地球化学, 3183884097@qq.com。

*通讯作者: 洪路兵, 男, 博士, 副研究员, honglubing@glut.edu.cn。

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

古太平洋板块间歇性俯冲与幕式岩浆响应

赵梦婷¹, 夏炎^{1*}, 徐夕生¹, 何建强¹, 麻志旺¹, 谭竹¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

东南沿海保存了丰富的晚中生代幕式岩浆活动, 这对理解古太平洋板块在中国东南部晚中生代的俯冲过程至关重要。粤东莲花山断裂带位于东南沿海地区, 隶属于政和-大埔断裂的西南段, 相较于浙闽沿海, 对粤东岩浆作用的研究仍较为薄弱。本文对粤东莲花山断裂带周边不同时期花岗岩及相关岩石开展了详细的岩相学、锆石 U-Pb 定年、全岩主微量元素、全岩 Rb-Sr 和锆石 Hf-O 同位素分析, 重点分析了岩浆起源与花岗岩中暗色包体的成因, 通过汇编已有资料, 查明粤东地区岩浆活动的年代学格架, 提出粤东莲花山地区晚中生代存在四期岩浆活动: 早侏罗世 (192~180 Ma)、中晚侏罗世 (172~150 Ma)、早白垩世早期 (148~130 Ma) 及晚期 (106~94 Ma)。这些花岗岩的地球化学组成变化受控于岩浆的结晶分异作用, 其中早侏罗世与早白垩世暗色包体与寄主岩的

Sr-Nd-Hf 同位素组成一致, 为同源包体。而非岩浆混合作用的产物。早侏罗世闪长玢岩富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 稀土配分图解呈右倾模式, Eu 呈弱的负异常。相对低 SiO₂ (59.85 wt%~62.73 wt%), 高 Al₂O₃ (15.85 wt%~16.01 wt%), 为准铝质-弱过铝质系列 (A/CNK=0.87~1.04), 富钾 (K₂O/Na₂O = 0.76~1.09), K₂O (1.52 wt%~3.66 wt%), $\delta^{18}\text{O}$ 值为 5.1~5.4 ‰, 亏损 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (+8.52~+11.06), 具典型弧岩浆特征, 指示古太平洋板块俯冲于东南沿海之下应早于 180 Ma。后续的岩浆作用呈现出明显的幕式活动特征, 这一现象暗示板块俯冲过程并非以恒定速率持续进行, 存在间歇性的板块活动与停滞交替状态。

关键词: 古太平洋板块俯冲; 东南沿海; 粤东; 幕式岩浆作用; 同源包体

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42172052、42472086、41930214)

第一作者简介: 赵梦婷 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 火成岩岩石学. email: 502023290022@smail.nju.edu.cn.

*通信作者简介: 夏炎 (1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 火成岩岩石学. email: xiayan@nju.edu.cn.

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

硅酸岩-碳酸岩液态不混溶过程中的 Fe 同位素分馏

张晓宝¹, 刘建强^{1*}

1. 西北大学地质学系 地质学系, 西安 710069

液态不混溶作为碳酸岩成因模式之一, 熔融模拟实验已经证明在硅酸岩-碳酸岩液态不混溶过程中轻的 Fe 同位素在碳酸岩熔体中富集, 而重的 Fe 同位素在硅酸岩熔体中富集。然而这一观察缺乏天然样品的验证, 并且液态不混过程中 Fe 同位素的分馏机制仍然不明确。我们报道了瑞典中部 Alnö 杂岩体中超镁铁质煌斑岩和伴生碳酸岩的高精度 Fe 同位素数据并结合岩相学, 全岩主微量元素以及 Sr-Nd 同位素来讨论硅酸岩-碳酸岩液态不混溶过程中的 Fe 同位素分馏行为。Alnö 杂岩体中超镁铁质煌斑岩和碳酸岩具有一致的侵位时间, 并且两者 Sr-Nd 同位素组成重叠 (超镁铁质煌斑岩: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70273\text{--}0.70439$, $\epsilon\text{Nd}(t) = 2.5\text{--}3.6$; 碳酸岩: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70310\text{--}0.70311$, $\epsilon\text{Nd}(t) = 2.4\text{--}2.6$) 指示了它们来源于同一母岩浆。在 Alnö 超镁铁质煌斑岩中可观察到形态各异的碳酸岩球粒, 结合 Alnö 碳酸岩微量元素呈现富集 Sr, Ba, 亏损高场强元素如 Th、U、Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti

元素的特征, 而共轭的超镁铁质煌斑岩则具有 Th-U、Nb-Ta 的正异常, 这些证据都支持 Alnö 超镁铁质煌斑岩和碳酸岩之间液态不混溶的成因联系。Fe 同位素结果揭示 Alnö 超镁铁质煌斑岩 $\delta^{57}\text{Fe} = 0.16 \pm 0.08\text{‰}$; 与其伴生的碳酸岩 $\delta^{57}\text{Fe} = 0.03 \pm 0.04\text{‰}$, $\Delta^{57}\text{Fesil-carb} = 0.13\text{‰}$ 。在排除了低温蚀变、部分熔融、分离结晶等过程对 Fe 同位素组成的叠加影响, 我们得出结论, 在硅酸岩-碳酸岩不混溶过程中存在显著的铁同位素分馏。这与前人熔融实验观察到的分馏结果一致。Fe 同位素的分馏可能受到硅酸岩熔体和碳酸岩熔体不同的聚合网络提供不同的铁键强度以及 Fe 不同价态在矿物及熔体中富集状态不同等因素的影响, 最终导致轻的 Fe 同位素在碳酸岩熔体中更加富集, 而硅酸岩熔体更富集更重的 Fe 同位素。

关键词: 碳酸岩; 超镁铁质煌斑岩; 碱性杂岩体; 液态不混溶; 铁同位素分馏

国家自然科学基金 (42130310、42322202、41802045)

第一作者简介: 张晓宝 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 煌斑岩、碳酸岩等岩石成因. Email: xiaobaozhang_459@163.com

*通信作者简介: 刘建强 (1989-), 副教授, 研究方向: 非传统稳定同位素在火成岩岩石学和地幔地球化学中的应用. Email: jqliu@nwu.edu.cn

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

滇东南个旧杂岩体岩石成因、岩浆源区及对锡成矿的地质意义

王春天¹, 郑晓军^{1*}

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明市 650000

个旧是世界上最大的锡多金属矿集区之一, 该区岩浆活动强烈, 发育多种杂岩体, 尽管前人开展大量研究, 但仍缺乏对各种杂岩体成因以及与成矿关系的系统对比研究。本文以各种杂岩体为研究对象, 通过开展全岩主、微量元素地球化学分析, 试图厘定上述岩石的岩浆源区及岩石成因, 并对锡多金属成矿进行指示。结果表明各种杂岩体岩石地球化学特征和成因存在显著差异, 辉长岩、二长、闪长岩及正长岩形成于来自富集地幔的母岩浆经历了有限的地壳混染; 花岗岩来源于幔源岩浆与壳源岩浆发生混合作用, 既有物理混合又有元素相互扩散作用的影响。此

外, 从 Y、Rb 等微量元素特征显示, 个旧花岗岩具有 S 及 I 型花岗岩的特征。花岗岩在许多 Harker 变异图上呈现连续的演化模式并且经历了两阶段的分离结晶过程, 结合全岩 Nb/Ta、Zr/Hf 等分离结晶指标表明, 岩浆的演化趋势最终产物为高演化的等粒黑云母二长花岗岩, 分离结晶可能是控制岩浆演化的主要成岩过程。由于高温熔融以及黑云母分解反应, 推动了世界级个旧锡矿的形成。

关键词: 滇东南个旧; 杂岩体; 微量元素; 岩浆演化; 构造环境

基金项目: 云南省科技计划项目 (202202AG050006); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目 (云人社通[2020]150号)

第一作者简介: 王春天 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: 2879126291@qq.com

*通信作者简介: 郑晓军 (1983-), 高级工程师, 研究方向: 水工环地质和地质灾害防治. E-mail: zh5101126@163.com

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

粤东晚中生代两阶段岩浆作用对 Sn-(W)成矿的约束

麻志旺¹, 夏炎^{1*}, 徐夕生¹, 赵梦婷¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

钨锡都是亲石元素、地球化学行为相似, 但钨矿往往分布于稳定的克拉通内部, 锡矿的分布多与深大断裂、强烈的壳幔相互作用有关, 地幔物质如何影响钨锡分异目前尚未得到深入研究。粤东地区莲花山断裂带发育了一系列早白垩世斑岩型 Sn-(W)矿床(如厚婆坳、金坑、长埔等), 是研究活动大陆边缘 Sn、W 关键金属元素和 F、Cl、H₂O 等挥发分循环和富集过程的天然实验室。我们对粤东地区田东 Sn-(W)矿床的角闪石花岗岩和黑云母花岗斑岩开展了系统的全岩主微量元素、锆石 U-Pb-Hf-O 同位素和黑云母主量成分研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示存在两期花岗质岩浆作用(163~159 Ma、143~135 Ma), 并在早白垩世岩体中发现大量晚侏罗世继承锆石(K1 岩浆锆石: J3 继承锆石=100: 36), 早白垩世花岗质岩浆可能是晚侏罗世晶粥重新活化的产物。晚侏罗世岩体和早白垩世岩体都具有高 SiO₂(>69.61wt%)、准铝质到过铝质(0.95~1.20)、高 Ga/Al*10000 比值(1.5~3.0)和高场强元素(Zr、Nb、Ce、Y)含量的特征, 全岩锆饱和温度相似(772±

28°C、755±18°C), 且 Ga/Al*10000 与 Zr+Nb+Ce+Y 含量呈负相关, 说明两期岩体都属于铝质 A 型花岗岩。晚侏罗世、早白垩世岩浆锆石的 Hf-O 同位素组成分别 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -5 \sim -3$ 、 $\delta^{18}\text{O} = 7\% \sim 8\%$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -4 \sim 0$ 、 $\delta^{18}\text{O} = 5\% \sim 6\%$, 表明晚侏罗世黑云母花岗斑岩起源于地壳物质的重熔, 而早白垩世黑云母花岗斑岩是在幔源岩浆注入下晚侏罗世岩浆房重熔的产物。粤东基底 Sn 元素含量(~1.48 ppm)远低于南岭基底(10~30 ppm), 晚侏罗世岩体 Sn 元素含量最高可达 10.5 ppm, 粤东晚侏罗世岩浆对基底中的 Sn 元素完成了萃取和初步富集, 为之后锡的富集成矿提供了重要的基础。但晚侏罗世岩体黑云母 F、Cl 含量(0.00±0.00 ppm、0.14±0.10 ppm)低, 早白垩世黑云母(0.16±0.10 ppm、0.17±0.17 ppm)高, 表明幔源岩浆向岩浆房提供的 F、Cl 组分是粤东地区最终在早白垩世锡矿大规模发育的重要因素。

关键词: 莲花山锡矿带; 锡矿花岗岩; 晶粥再活化; 氟氯挥发分

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFF0800404)和国家自然科学基金资助项目(42172052、42472086、41930214)

第一作者: 麻志旺(1998-), 博士研究生, 研究方向: 岩石地球化学, Email: mazhiwangxy@163.com

通讯作者: 夏炎(1988-), 副教授, 研究方向: 火山岩岩石学, Email: xiayan@nju.edu.cn

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

大型花岗质侵入体是如何形成的?

马昌前^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

大型花岗质侵入体的形成涉及一系列复杂的岩浆动力学过程, 包括岩浆的抽取、上升、侵位、组装及其在地壳中的演化。其中, 岩浆侵位是指岩浆在地壳中的运移和占位过程, 而侵入体的组装则涉及岩浆在储库中的充填和排列方式。近年来, 随着地球物理探测和地球化学分析的进展, 侵入体的形成机制得到了新的认识。岩浆侵位的核心问题是如何获得占位空间。主要的侵位方式包括: (1) 围岩向下位移; (2) 围岩向上位移; (3) 围岩横向位移; (4) 围岩无明显位移。这些过程受围岩的流变学性质、岩浆压力及区域构造应力的共同影响。此外, 研究表明, 岩浆上升至地壳的脆-韧性转换带后, 围岩不再发生显著的韧性变形, 导致岩浆侵位的终止。侵入体的组装通常经历一个渐进的积累过程, 而非单次大规模的岩浆注入。目前, 主要的侵入体组装模式包括: (1) 层叠式板状侵入体, 由多个岩浆脉冲按层叠方式堆积, 例如意大利 Elba 岛侵入体和东昆仑南山口岩基; (2) 嵌套式带状侵入体, 由多股岩浆依次呈环带状分布, 如北京周口店岩体和美国 Tuolumne 侵入岩系; (3) 积聚式楔状侵入体, 由多个楔状侵入单元积聚形成的大型侵入体, 如鄂

南-湘北幕阜山岩基。不同的组装方式反映了岩浆供给模式、区域构造环境及围岩性质的差异, 并可能呈现出不同的分异机制、岩体-围岩相互作用和成矿过程。岩浆侵位和侵入体的形成对地壳稳定性、成矿作用及大陆生长具有重要影响。研究表明, 造山带环境中的侵入体往往经历增量式侵位, 而与超级喷发相关的大型岩浆房可能在较短时间内快速形成。此外, 大型侵入体的形成可能与下地壳物质的侧向流动或挤出有关, 这一过程通过地表隆升或弧后区域的收缩得以实现。尽管近年来对侵入体形成机制的研究取得了重要进展, 但仍存在诸多未解之谜, 例如: (1) 不同侵入体组装模式的控制因素; (2) 岩浆脉冲的生长顺序是否具有规律性; (3) 侵入体形成与地壳演化、资源富集之间的关系; (4) 如何利用成因分析和热力学模拟进一步约束岩浆侵位过程。未来研究应结合地球物理探测、岩石学分析与数值模拟, 以深化对大型侵入体形成机制的理解, 并探索其在地球动力学背景下的演化模式。

关键词: “空间问题”; 花岗岩成因; 侵位和组装机制

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130309)。

作者简介: 马昌前(1958-), 博士, 教授, 研究方向: 花岗岩地质学. Email: cqma@cug.edu.cn

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

南秦岭沉积物源与构造演化：来自晚白垩世碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素的证据

王伟¹, 崔亚圣¹, 余浩宇^{1*}, 辛杰¹, 李乐¹, 杨迪¹, 胡远清¹

1. 湖北省地质科学研究院 (湖北省富硒产业研究院), 武汉 430034

南秦岭晚白垩世浙川盆地与郧阳盆地保存了关键的造山带沉积记录, 为揭示区域沉积-构造演化提供了重要资料。本研究基于两盆地中三件晚白垩世寺沟组砂岩样品的碎屑锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素分析, 系统厘定了地层沉积时代、物源特征及其构造关联。结果表明, 碎屑锆石年龄谱以新元古代 (910~720 Ma)、早古生代 (490~430 Ma)、晚三叠世 (210~230 Ma) 和早白垩世 (140~118 Ma) 为主峰, 次峰集中于古元古代 (1.9~1.8 Ga) 和太古宙 (2.9~2.5 Ga)。Hf 同位素具有规律性分异特征: 晚三叠世锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值轻微负偏 (-5.8 至 -1.4), 反映其源区来自基底物质部分熔融, 与秦岭中广泛存在的同期火山活动相符; 早白垩世锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值显著负偏 (-26.8

至 -4.6), 指示古老陆壳物质的再循环, 为伴随新生地壳贡献。物源解析表明, 浙川盆地与郧阳盆地的碎屑物质源自华北克拉通、北秦岭造山带、南秦岭造山带及扬子克拉通。其中, 晚三叠世锆石与勉略洋闭合后碰撞隆升引发的剥露作用有关, 早白垩世锆石则来源于后碰撞伸展背景下的造山带塌陷。晚白垩世锆石的缺失与断裂控制的局部流域系统相吻合, 表明晚白垩世秦岭造山带存在显著的陆内变形特征。本研究为南秦岭多阶段构造体系转换提供了关键证据, 深化了对地壳组成、演化以及圈层相互作用的认识。

关键词: 南秦岭造山带; 碎屑锆石; 构造演化; 晚白垩世

第一作者简介: 王伟 (1988-), 高级工程师, 研究方向: 岩石地球化学.Email: efvghbth@foxmail.com

通讯作者简介: 余浩宇 (1995-), 助理工程师, 研究方向: 岩石地球化学.Email: 674145818@qq.com

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

塔里木盆地北部二叠纪辉绿岩的发现: 时空分布、成因机制及动力学启示

陆鹿^{1*}, 张银涛², 谢舟², 许永忠¹, 康鹏飞², 李壮福¹, 魏菱¹, 陈皓宇¹, 汤恒昊¹

1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国石油股份有限公司塔里木油田公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000

塔里木二叠纪大火成岩省成因及深部动力学过程是目前地球科学领域的研究热点。该大火成岩省内产出多种岩性, 包括玄武岩、英安岩(流纹岩)、镁铁质-超镁铁质侵入岩、碱性岩(碱性花岗岩、正长岩、煌斑岩、碳酸岩)等。对于不同岩性之间的时空关系及成因机制的研究, 是深入理解塔里木大火成岩省形成过程的关键。镁铁质-超镁铁质侵入岩是塔里木大火成岩省中的重要组成单元, 前人研究表明其局限于西部巴楚地区, 位于大火成岩省的边缘, 侵入于 280 Ma 左右, 整体晚于玄武岩的喷发时代。基于这一特征, 结合大火成岩省内部不同岩性单元的时空分布及成因机制, 一些学者提出“孵化型”两阶段地幔柱活动模式。然而, 在塔里木大火成岩省中的其他地区是否也有镁铁质-超镁铁质侵入岩的分布, 其时代是否真如前人所言整体晚于玄武岩的喷发, 目前依然无法明确。本文通过对塔里木油田公司大量石油钻井的分析, 在塔里木盆地北部阿满过渡带发现大量辉绿岩侵入体, 并对其进行了系统分析, 包括地震资料解译、宏微观岩相学观察、U-Pb 同位素定年、全岩主微量元素和 Sr-Nd 同位素分析等。地震资料解译揭示出辉绿岩的两种产状类型, 即顺层侵入和碟状侵入。磷灰石 U-Pb 定年结果表明, 辉绿岩年龄在 308~262 Ma 之间, 可进一步划分为 308~298 Ma

和 286~262 Ma 两个侵位阶段。早期侵入体在研究区内零星分布, 而晚期侵入体则分布较为广泛, 并构成研究区内辉绿岩侵入体的主体。辉绿岩在地球化学上表现出碱性、富钠、高钛特征, 并具有较为一致的稀土元素和微量元素配分模式, 分别以 LREE 和高不相容元素富集为特征, 无 Eu 异常, 而 Ba 和 Pb 明显正异常。全岩 Sr-Nd 同位素组成相对亏损, $Sr_i = 0.704907-0.707392$, $\epsilon Nd(t) = 0.60-2.75$ 。元素和同位素特征表明辉绿岩在组成上与 OIB 相似, 因此它们的起源与地幔柱有密切的联系。具体而言, 辉绿岩很可能来源于地幔柱的部分熔融, 并伴有一定程度的地壳混染和结晶分异。该项研究突出贡献在于在塔里木大火成岩省内部新发现了镁铁质-超镁铁质岩的分布区, 表明塔里木大火成岩省内的基性-超基性侵入岩的分布比以往认为的更加广泛(大火成岩省内部和边缘均有分布), 而侵位时间跨度也更加漫长(跨越整个塔里木大火成岩省的生命周期)。除此之外, 基于这一新发现, 结合前人研究成果, 重构了塔里木大火成岩省形成过程的深部壳-幔作用模式。

关键词: 塔里木大火成岩省; 辉绿岩; 二叠纪; 地幔柱; 壳-幔作用

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

青藏高原始新世岩浆大爆发的精细过程及气候环境效应

纪伟强^{1*}, 陈厚彬¹, 张少华¹, 吴福元¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

青藏高原广泛发育新生代岩浆活动, 其中以拉萨地块早始新世岩浆活动最为剧烈 (峰期为~50 Ma), 包括林子宗群火山岩和冈底斯岩基同期侵入岩。具有成因联系的火山岩和侵入岩的研究, 不但能揭示火山喷发的规模和形式, 还能揭示岩浆储库的动力学过程。前人研究表明, 旁多盆地保留了大面积的始新世火山岩 (帕那组) 和侵入岩, 主体都形成于~50 Ma, 为研究始新世岩浆大爆发的精细过程提供了理想对象。研究团队对该地区进行了详细的野外调查、样品采集和室内研究工作, 发现旁多盆地帕那组火山岩和侵入岩具有密切的成因联系, 构成了旁多火山-侵入杂岩。其中高硅流纹岩、熔结凝灰岩和花岗斑岩代表了岩浆储库中提取的高硅熔体, 石英二长斑岩代表了残存的堆晶; 熔体和堆晶在主量元素和微量元素组成上具有较明显的互补关系 (如 SiO_2 、Eu 异常等)。石英二长斑岩和粗面英安岩则属于补给的偏基性岩浆、高硅熔体和堆晶体混合的产物。基性岩浆注入导致了旁多地区的火山喷发和不同类型火山-侵入岩的形成。野外发现石英二长岩与花岗斑岩之间呈渐变过渡关系, 石英二长岩局部存在长石等骨架矿物的平行排列, 斜长石边缘发育膝折现象 (指示压实应力影响)。骨架矿物的水平定向, 有利于粒间熔体排出并沿着垂直方向聚集和向上运移, 进而导致熔体抽提和火山喷

发。水平定向和压应力模拟研究揭示了 20%~30% 的压缩应变率, 这可以导致熔体抽提速率提高 15 倍以上, 有效促进了高硅熔体的提取和喷发。旁多盆地帕那组火山岩分布面积超过 1900 km^2 , 以前人得到的火山岩层序厚度 (2 km) 来计算, 其致密岩石当量 (DRE) 超过 3000 km^3 , 远远超过超级火山喷发的判别标准 (450 km^3)。在整个拉萨地块, 南木林盆地、雄巴盆地、桑桑盆地等地区帕那组火山岩的发育规模也都明显超过了超级火山喷发级别, 帕那组总的分布面积超过 16 000 km^2 。地球化学研究表明帕那组火山岩与高 CO_2/S_T 比值火山岩成分相似, 表明岩浆源区比较富集含碳物质, 火山活动相关的碳释放量也较高。如果考虑岩浆活动相关的变质碳释放, 拉萨地块始新世时期会具有更高的碳释放潜力。特提斯造山带东段, 从青藏高原南部到东南亚地区 (>6000 km) 都广泛发育的早始新世岩浆活动 (52~50 Ma), 估算的碳释放通量上限可以与白垩纪全球大陆弧的碳释放通量相媲美。这些始新世岩浆活动导致的碳释放将引起大气圈 CO_2 浓度的显著升高和同期温室气候发育 (即早始新世气候适宜期)。

关键词: 青藏高原; 始新世岩浆大爆发; 岩浆过程; 气候环境效应

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

东南沿海白垩纪侵入岩硅同位素组成及其岩石成因指示

郭锋^{1*}, 欧阳一帆², 赵亮¹

1. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100;
2. 湖南省地球物理与地球化学调查所, 长沙 410014

东南沿海地区地处西太平洋活动大陆边缘, 中生代以来受到了太平洋板块俯冲与后撤作用的直接影响。区域上发育了大规模的岩浆作用, 伴生了世界最具特色的金属成矿作用, 是我国关键金属矿产资源的重要基地。尽管前人对区域火成岩成因开展了大量的研究工作, 但是有关俯冲再循环地壳组分性质以及岩浆侵入过程中的流体活动影响等仍存在认识上的分歧。本研究选择中国东南沿海地区(包括福建漳州、泉州、福州和平潭)具有不同类型(I型和A型)和成分(从镁铁质到长英质岩石)的白垩纪侵入岩开展了全岩和钠铁闪石 Si 同位素分析, 运用硅同位素分馏原理探究了岩浆源区、分异过程和流体-岩石相互作用对硅同位素变化的影响, 进而为揭示其岩石成因机制提供了新视角。(1) 东南沿海地区白垩纪不同成分和类型的侵入岩之间存在明显的硅同位素分馏。其中 I 型(包括二长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩)的 $\delta^{30}\text{Si} = -0.170\sim-0.161\text{‰}$, 平均值为 -0.013‰ ; A 型花岗岩的 $\delta^{30}\text{Si} = -0.062\sim-0.041\text{‰}$, 平均值为 -0.002‰ ; 具有类似 SiO_2 的 I 型比 A 型花岗岩更富集 ^{30}Si ; 基性侵入岩(富闪侵入岩和辉长岩)的 $\delta^{30}\text{Si} = -0.437\sim-0.031\text{‰}$, 平均值为 -0.296‰ 。(2) 白垩纪钙碱性系

列辉长岩-闪长岩-花岗岩具有明显高于“火成岩序列”演化线的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值, 在变化趋势上与“火成岩序列”的演化线趋势相吻合, 样品之间的 $\delta^{30}\text{Si}$ 变化主要受控于岩浆分离结晶作用的影响。结合前人来自全岩地球化学的研究结果, 这些钙碱性系列侵入岩相对较重的硅同位素组成可能与古太平洋板块俯冲作用背景下, 地壳组分(如海洋沉积硅质岩或硅化玄武岩)的再循环过程相关。与之相反, 同期的富闪侵入岩投点于“火成岩序列”下方, 具有相对更低的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值。这些样品的低 $\delta^{30}\text{Si}$ 主要归因于岩浆演化过程中含水矿物相如角闪石堆晶作用的影响。(3) 钠铁闪石单矿物的 $\delta^{30}\text{Si}$ 变化在 -0.665 到 -0.542‰ 之间, 平均值为 -0.603‰ , 平均 $\Delta^{30}\text{Si}$ 全岩-钠铁闪石 = -0.605‰ 。同位素模拟计算得到全岩与钠铁闪石的硅同位素分馏系数为 $a_{\text{全岩-钠铁闪石}} = 0.288\text{‰}$, 二者之间仍存在较大的 $\Delta^{30}\text{Si}$ 差异(约 0.317‰)。根据硅同位素在流体-岩石中的分馏模拟计算结果, 富 F 的碱性热液流体是导致钠铁闪石进一步偏轻 Si 同位素组成的主导因素。

关键词: 硅同位素地球化学; 岩浆演化; 流体作用; 白垩纪侵入岩; 东南沿海

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

大陆与大陆地壳

王浩^{1*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化学科中心, 北京 100029

大陆是人类赖以生存的物质基础, 大陆地壳提供着人类所需的主要矿产资源, 因此揭示大陆地壳的产生、演化及稳定暴露至海平面之上的过程是固体地球科学领域重要的议题, 然而目前学界对这一问题仍缺乏统一的认识。现今大陆地壳在地球化学组成上与岛弧岩浆岩具有诸多相似之处, 因此多数学者相信现今陆壳形成于俯冲带环境, 然而洋弧地体以基性岩为主, 而成熟的大陆地壳则具有麻粒岩为主的下地壳、闪长质的中地壳以及花岗质的上地壳, 初始的洋弧地体如何转变为具有典型结构和成分分层特征的大陆地壳是目前固体地球科学领域重要的研究议题。此外, 在地球形成早期, 地温梯度很高, 不能形成持续稳定的俯冲作用, 也不具有全球联动的板块构造, 那么在缺乏板块构造的地球早期, 大陆地壳是如何形成的? 同样由于地温梯度较高, 岩石圈强度较低, 早期地球地表的高差较小, 无法形成持续稳定的出露在海平面之上的大陆。那么, 持续稳定暴露在海平面之上的大陆是何时出现的? 是何种机制导致大陆地壳可以长期暴露在海平

面之上? 本文以南非和华北两个克拉通为切入点深入探讨了地球早期 (>3.2 Ga) 陆壳的生长与演化方式, 结合地幔与地壳两方面的研究判断在古太古代以前, 地球应该不存在全球联动的板块构造。大陆地壳暴露至海平面之上的过程不仅是地球深部动力学机制的显著变化, 也会引起全球表生环境的明显响应。综合判断地球深部动力学机制与地表响应的全球地球化学指标, 才是准确探讨这一问题的关键。综合来看, 3.0 Ga 似乎是一个重要的时间节点, 但需要更多地球化学和数值模拟结果的支持。综合华北克拉通南北缘的古生代岩浆活动特征判断, 显生宙以来的陆壳增长以洋弧地体的侧向增生为主, 在发生弧-陆碰撞的过程中或之后的短暂时间内, 洋弧地壳发生了明显的结构分层, 迅速转化具有典型结构和成分特征的大陆地壳。而陆弧地区的岩浆活动主要以地壳再造为主, 陆壳净增长量有限。

关键词: 大陆地壳; 地壳暴露; TTG; 地壳翻转; 增生造山

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

中国东北五大连池新生代钾质火山岩的 地幔源区岩性特征

赵雨潇¹, 葛子奕¹, 曾罡^{1*}, 李宇¹, 刘建强², 陈立辉², 于浩远¹, 周中彪¹

1. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 地球科学与工程学院, 南京 210000;

2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 地质学系, 西安 710000

橄榄石是玄武质岩浆早期分异过程中主要的矿物相, 其结晶过程同时影响岩浆中 Ni、Mn 等元素的配分, 研究橄榄石的地球化学成分, 可以更好地理解源区地幔的物质组成与岩性特征。前人研究发现, 中国东北钾质火山岩源区可能存在大量再循环组分, 如沉积物、洋壳等。因此, 通过研究钾质火山岩中的橄榄石斑晶, 厘定其地幔源区的岩性, 就能为理解这些地表物质的深部循环提供重要约束。本文对五大连池这一典型的钾质火山岩区开展了系统的采样, 选取了其中小孤山、莫拉布山等 12 座火山中的橄榄石斑晶进行分析研究。研究发现, 五大连池火山岩中结晶的橄榄石成分呈现出显著的不均一性。部分橄榄石具有偏低的 Mn/Fe 比值与中等程度的 Ni/(Mg/Fe) 比值,

与前人研究结果一致, 与榴辉岩来源熔体结晶的橄榄石成分相符; 另一部分橄榄石则呈现出高 Ni 含量和高 Fe/Mn 比值, 与反应辉石岩来源熔体结晶的橄榄石成分一致。这一发现再次证明了中国东北钾质火山岩源区地幔在岩性上的复杂多样性。进一步的计算模拟表明, 榴辉岩(高硅)的存在是解释五大连池火山岩高 FeO/MnO 比值的关键。该再循环组部分熔融形成的熔体在上升过程中, 经历熔体—橄榄岩的相互作用, 最终结晶的橄榄石成分能够解释五大连池火山岩中橄榄石斑晶的 Fe/Mn 成分变化特征。

关键词: 钾质火山岩; 橄榄石斑晶; 榴辉岩; 五大连池; 中国东北

基金项目: 国家自然科学基金项目(42322202、42130310)和中央高校基本科研业务费项目(2024300389)

第一作者简介: 赵雨潇(2000-), 硕士在读, 研究方向: 岩石学. Email: zhaoyxemail@126.com

*通信作者简介: 曾罡(1985-), 副教授, 研究方向: 火成岩与地幔地球化学. Email: zgang@nju.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

华南基底岩石的流体助熔及花岗岩成因

丁兴^{1*}, 李嘉豪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, 广州 510640

花岗岩是大陆地壳的主要组成部分,其形成与陆壳基底岩石的部分熔融直接相关。传统上,人们普遍认为地壳岩石部分熔融的过程缺乏流体参与,以脱水熔融为主。然而地壳深处存在着广泛的流体活动,特别是在俯冲带地区,因而流体助熔近年来越来越受关注。作为降低活化能的介质和溶解挥发分的溶剂,流体的参与很可能会显著改变部分熔融体系的物理、化学性质;而成矿金属大多对挥发分具有很强的化学亲和力,它的地球化学行为也一定程度上受到挥发分的影响。自然界这些富挥发分的流体如何影响基底岩石的部分熔以及如何影响成矿金属的地球化学行为,至今仍缺乏针对性的系统研究,这导致我们对花岗岩的源区过程以及其成矿专属性的认识存在明显不足。

华南属于环太平洋成矿带,自晚中生代以来就受控于(古)太平洋板块俯冲的影响,这导致华南深部地壳遭受了广泛的流体改造或交代作用。为了明确含氟流体对花岗岩源区岩浆过程中稀土元素地球化学行为的影响,本文采用华南代表性的高稀土片麻岩和低稀土片麻岩作为初始物质,与~4 wt.%的流体(纯水、1.5M HF、1.0M NaF)在 0.8 GPa、1000 °C 的条件下开展了流体助熔的部分熔融实验。实验结果表明所有片麻岩的熔融程度达到 40%以上,残余矿物组合主要为斜长石+石英+斜方辉石±单斜辉石+钛铁矿+磷灰石±黑云母。部分熔融产生的熔体的成分主要为花岗

闪长质-花岗质,总体具有高氟(0.11~0.27 wt.%)、高水(0.38~1.86 wt.%)和 A2 型花岗岩的特征;其中,高稀土片麻岩部分熔融形成的熔体为钾玄质和准铝质,而低稀土片麻岩熔融形成的熔体偏高钾钙碱性和强过铝质。两者在微量元素蛛网图上均表现为 K、Rb、Th、Ce、Sm、Y、Yb 等元素的正异常和 Ba、Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等元素的负异常;稀土配分曲线则表现为右倾、Eu 轻微负异常的特征。相对于原岩,含氟流体助熔会强化熔体中 Si、K、Na、Rb、Sr、Ba、Th、U、LREE 和 F 的富集,并增加熔体的 LaN/YbN 比值。同时,实验也证实片麻岩部分熔融形成的熔体的稀土元素含量主要受原岩控制,高稀土片麻岩更易于熔出稀土元素初始富集的熔体;相对于原岩,各类流体助熔均会造成稀土元素在熔体中不同程度的富集,其中,含 HF 流体最高可富集稀土 46%~49% (近 1.5 倍富集)。由此本文特别强调含 F 流体的参与在形成华南 LREE 型和 HREE 型成矿花岗岩的重要作用。此外,本文也提出了一种新的 A2 型花岗岩形成机制,即含 F 流体助熔地壳基底岩石,这可以很好地解释华南晚中生代大规模分布的与稀土、稀有金属及氟成矿相关的陆内 A2 型花岗岩的形成。

关键词: 含氟流体; 含氯流体; 流体助熔; 片麻岩; 花岗岩

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

阳原碱性玄武岩结晶演化的矿物学记录： 热力学和动力学意义

杨宗锋^{1,2,3*}, 张馨月¹, 申俊峰³

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京市海淀区学院路 29 号 100083;
2. 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 北京市海淀区学院路 29 号 100083;
3. 中国地质大学(北京)成因矿物学研究中心, 北京市海淀区学院路 29 号 100083

橄榄石作为镁铁质岩浆中的主要结晶相, 对于解释岩浆过程至关重要。然而, 利用橄榄石来解读岩浆历史往往因不平衡结晶导致复杂的分带模式而变得复杂, 这些模式尚未得到完全理解。先前的研究未能充分探讨快速结晶与晶内扩散过程之间的相互作用在这些分带模式生成中的作用, 从而在我们对岩浆演化的理解中留下了显著的空白。在本研究中, 我们对阳原碱性玄武岩中的骨骼状橄榄石晶体进行了二维元素分布的全面分析, 并辅以全岩、单斜辉石、尖晶石和磁铁矿的成分分析。通过将 these 成分分析与 Rhyolite-MELTS 分离结晶建模、晶内扩散模拟以及成分边界层效应相结合, 我们阐明了这些分带模式的形成机制。研究表明, 不平衡结晶主要受生长的速率和机制变化驱动, 主导了橄榄石中复杂分带的形成, 而晶内扩散则起次要作用。主要观察结果包括富磷成分边界层, 从同心环到由富磷带连接的骨骼结构的转变, 以及 Fo 和 NiO 正环带加局部震荡环带、Al₂O₃ 和 P₂O₅ 的振荡分带, 其中高 Fo 和 NiO 与低 P₂O₅

和 Al₂O₃ 相对应, 同时表现出各向异性的元素关系。多个橄榄石晶体的近同时成核与连续生长——这一过程虽在玄武岩结晶实验中少见但在理论上已被预测——驱动了所有造岩矿物的成分多样性, 而单斜辉石和尖晶石中的某些成分特征归因于快速的不平衡结晶。估计的结晶时间范围为从成核到淬火的 10 至 30 天, 表明短寿命的岩浆系统能够保留元素的振荡分带和 Fo-NiO 的各向异性协变, 而长寿命系统可能仅保留各向异性, 具体取决于初始 NiO 各向异性的程度和晶内扩散的持续时间。本研究强调了在未来橄榄石分带模式研究中进行高分辨率、精确分析的必要性, 以增进我们对岩浆结晶过程中动态熔体环境的理解。未来应用橄榄石示踪源区和约束岩浆演化过程时, 值得评估快速不平衡结晶作用的影响, 因为这种效应可能引起矿物单晶尺度各种元素和同位素的显著分异。

关键词: 橄榄石; 玄武岩; 非平衡结晶; 成分环带; 晶内扩散

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272037)

第一作者兼通讯作者简介: 杨宗锋, 男, (1984-), 副教授, 研究方向: 火成岩岩石学, 成因矿物学与找矿矿物学. Email: yangzongfeng@cugb.edu.cn

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

华北晚中生代地质演化与古太平洋板块俯冲

马强^{1*}, 徐义刚², 郭建芳¹, 钟玉婷², 郑建平¹, 张超¹, 邹祖阳²

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

自中生代以来, 西(古)太平洋板块持续向东亚大陆俯冲, 深刻影响了东亚陆缘的中新生代地质演化。然而, 关于古太平洋板块的中生代俯冲历史仍不清楚, 该过程对岩浆活动、构造作用、盆地发展及浅表系统的控制作用也尚不明了。我们通过大尺度岩浆分布规律、高分辨率年代地层学及典型盆地岩浆演化序列等多角度研究了华北克拉通中生代岩浆、构造、沉积等事件的迁移规律, 厘定了各事件的时空序列,

并为岩浆作用、燕山运动 B 幕、板块前进-后撤转换、燕辽生物群、早期热河生物群等重要事件提供了高精度的年代学约束。研究发现, 华北中生代岩浆-构造-沉积-生物事件具有“穿时性”的协同演化特征, 为华北中生代地质演化受古太平洋板块俯冲与后撤控制提供了关键证据和新约束。

关键词: 古太平洋板块俯冲; 华北克拉通; 穿时

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

华北克拉通侏罗纪淡色花岗岩成因及稀有金属成矿

范文博^{1,2,3*}, 姜能³, 翟明国^{2,3}, 胡俊^{3,4}, 胡洋², 郑欢², 鲍霖⁵, 渠森²

1. 陕西理工大学, 陕西 汉中 723001;

2. 西北大学, 西安 710069;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

4. 中国地震局地震与火山灾害重点实验室, 北京 100029;

5. 江西省地质局有色地质大队, 江西 赣州 341000

淡色花岗岩及与之相关的伟晶岩, 是稀有金属成矿的一种重要岩石类型, 在 Nb、Ta 等战略性关键矿产资源的的研究中具有重要地位。在我国, 与此类花岗岩有关的稀有金属矿床主要出现在华南南岭地区。近年来, 在喜马拉雅造山带的淡色花岗岩内, 也发现了与之类似的稀有金属矿床, 再次引起了学术界对此类岩石成因及其与稀有金属成矿关系的关注。显生宙时期, 位于中国东部的华北克拉通内, 是否也存在类似的淡色花岗岩和稀有金属矿床呢? 带着对这一问题的思考, 我们对华北克拉通前人已有的研究资料进行了梳理, 并在冀东地区开展了详细的野外地质观测、岩石学、矿物学、岩石地球化学及铌钽铁矿 U-Pb 年代学等研究工作。综合研究发现, 华北克拉通冀东地区, 的确存在着一些以二云母或白云母花岗岩为主的侏罗纪淡色花岗岩, 部分岩体还发现了石榴石、铌钽铁矿、锆石、独居石、萤石、黄玉等多种副矿物。与此同时, 一些岩体的 Nb、Ta 等稀有金属元素含量, 明显高于此类花岗岩型矿床的边界品位, 且与江西宜春雅山 414 矿床等可以比拟, 并显示岩体整体成矿的特点, 成矿潜力大。矿物成分、稀土元素四分组效应与 Nb/Ta、Zr/Hf、Rb/Sr 比值以及 CaO、Ba、Sr 等元素含量的差异性指示, 这些淡色花岗岩经历了不同程度的岩浆分异作用, 部分还受到了岩浆演化晚期熔-

流体相互作用的强烈影响。铌钽铁矿的岩相学观察, 也支持 Nb、Ta 的成矿与成岩时代接近, 且二者存在着密切的成因联系。进一步, 我们通过氧同位素, 对淡色花岗岩的岩浆源区进行限定。全岩及石英等单矿物较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 指示这些淡色花岗岩并非主要来自变沉积岩部分熔融的产物, 而是具有与区域其它侏罗纪花岗岩一致的 I 型属性。它们可能是与同期黑云母花岗岩类似的 I 型花岗岩岩浆, 经历不同程度结晶分异和演化的产物。分异演化程度的不同, 是导致这些淡色花岗岩具有不同稀有金属成矿潜力的重要因素, 高度的分异演化有利于成矿元素的富集。华北克拉通吉南、辽西等地, 以及华北克拉通之外的东北、华南地区, 也零星报道了一些类似的侏罗纪花岗岩。因此, 华北克拉通东部乃至中国东部更大范围, 可能均存在这一期的淡色花岗岩及与之相关的稀有金属成矿。它们的形成环境明显不同于喜马拉雅造山带内的淡色花岗岩, 启发我们对此类型岩石及相关矿床成因、未来的勘探方向的思考。有利于岩浆分异的环境, 对于此类岩石及其矿化的形成, 可能更为关键。

关键词: 淡色花岗岩; 铌钽铁矿; 稀有金属; 岩石成因

本文受国家自然科学基金项目 (42103041、41573032)、国家重点研发计划 (2016YFC0600103)、陕西理工大学汉江学者青年拔尖人才启动专项项目、西北大学及范文博个人资助

第一作者简介: 范文博 (1987-), 副教授, 主要从事岩石学、岩石地球化学和地层学方面的研究. Email: fans07cugb@126.com

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

低水岩浆体系下紫苏花岗岩“夹带”成因新模型

杨航¹, 姚金龙^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710068

紫苏花岗岩是含有紫苏辉石的花岗质岩石, 常伴随下地壳麻粒岩出现, 是许多前寒武纪高级变质地体的重要组成部分。按照紫苏辉石的成因, 紫苏花岗岩可大致分为岩浆和变质脱水成因两类。而紫苏辉石与含水熔体在接近固相线条件时发生水化反应, 容易形成含水矿物, 难以保存。因此关于紫苏花岗岩的类型, 成因及保存机制目前争议颇大。华南高州地区出露早古生代 (~431 Ma) 含麻粒岩包体的紫苏花岗岩, 属于云开基底 (高州杂岩) 的一部分, 是探讨揭示紫苏花岗岩成因模式的重要窗口。区域上高州紫苏花岗岩 (含麻粒岩包体) 侵入花岗片麻岩, 由紫苏辉石、石榴子石、斜长石、石英和少量黑云母组成, 地球化学特征表明岩体为弱过铝质 ($ACNK=1.06-1.1$), 具高 ΣREE 含量 (323~419 ppm) 和 $10\ 000 \times Ga/Al$ (3.0~3.6) 以及高锆饱和温度 ($>850^\circ C$), 具典型的 A 型花岗岩特征。锆石 Hf-O 同位素组成 ($\delta^{18}O = 8.0-9.8\%$; $\epsilon_{Hf}(t) = -11.5$ 至 -3.4) 指示壳源物质再造, 无幔源成分加入。岩相学和矿物成分特征表明高州紫苏花岗岩包含岩浆型和转熔型两种紫苏辉石。而紫苏花岗岩中转熔型紫苏辉石其矿物成分与麻粒岩一致, 可能来自源区的夹带, 指示麻粒岩包体可能作为原岩。部分港湾状紫苏辉石和石榴子石被黑云母围绕, 表明无水

矿物的水化。锆石水含量测试和地球化学模拟并结合流体包裹体成分分析等手段发现岩浆系统中的低水环境是紫苏辉石能够保存的关键。紫苏花岗岩具有高的岩浆固结温度 (~850 °C) 和极其低的熔体水含量 (< 0.3 wt.%), 否则在近固相线条件下紫苏辉石会被完全水化, 从而转变为黑云母花岗岩。相平衡模拟和岩相学证据显示锆石为早期结晶产物, 记录了原始熔体的信息。高州紫苏花岗岩 (135 ppm, 中位数) 相比正常花岗岩 (202~643 ppm) 具极低的锆石水含量, 结合相平衡模拟工作, 表明紫苏花岗岩从开始结晶到完全固结一直处于低水环境。包裹体拉曼光谱分析指示体系中富 CO_2 的流体的存在, 这可能进一步降低体系水活度, 增加了紫苏辉石的稳定域。据此, 我们提出低水环境下无水矿物夹带 (紫苏辉石和石榴石) 的紫苏花岗岩成因新模式。而低水环境与麻粒岩高温熔融及体系中富 CO_2 流体的存在有关。区域岩浆-变质-构造资料表明, 云开~431 Ma 的 A 型紫苏花岗岩的形成与武夷-云开造山带后造山伸展-拆沉背景下软流圈物质的上涌有关, 代表后造山伸展作用达到顶峰。

关键词: 华南早古生代; 紫苏花岗岩; 低水环境; 矿物夹带; 锆石水

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42322208, 41972238)

第一作者简介: 杨航 (1996-), 博士研究生, Email: 1195753477@qq.com

*通讯作者简介: 姚金龙 (1987-), 教授, 研究方向: 板块构造、大陆造山带、超大陆聚散及其环境效应, Email: yaojinlong@nwu.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

华北克拉通东部不均一地幔来源中生代火山岩的亲铜元素特征

汪浪¹, 汪在聪^{1*}, 汪翔¹, 雷煜田¹

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

交代岩石圈地幔在大型金矿床形成过程中被认为扮演着愈来愈重要的角色。然而, 交代岩石圈地幔通常具有不均一的地球化学性质并且产生化学成分多变的岩浆。这种源区的不均一性是否会导致地幔以及衍生岩浆金属含量变化仍不清楚。早白垩世时期, 华北克拉通东部郯庐断裂带两侧的交代岩石圈地幔具有不同的性质(EM1 和 EM2 型)。基于详细的岩相学, 本研究报道了沿郯庐断裂带及其次级断裂带分布的早白垩世火山岩(130~120 Ma, $n = 36$)的铂族元素(PGE)、金和铜等亲铜元素含量。这些火山岩具有一致的岛弧型微量元素特征, 但是富集程度不同的 EM1 和 EM2 型 Sr-Nd 同位素特征。硫化物的岩石学特征以及亲铜元素含量、Cu/Pd 与 MgO 之间缺乏相关性, 这些现象表明 EM1 型火山岩硫化物分离程度较低, 但是 EM2 型火山岩 Cu/Pd 随着进一步演化而升高, 说明存在明显的硫化物分

离。这些火山岩具有类似 MORB 的低 PGE、Au 和 Cu 含量。Ba/Nb 与 Au/Pd 和 Au/Cu 总体上呈现一定相关性, 说明在俯冲交代过程中地幔中 Au 相对于 Cu 和 Pd 存在微弱的富集并加入了有限的金属。部分 EM1 型火山岩由于岩浆演化过程也致使 Pd、Au 和 Cu 含量的略微升高。然而, 尽管存在化学成分的不均一性, 但是相对原始的 EM1 型和 EM2 型岩浆(MgO > 5.5 wt.%)具有相似的 Au 和 Cu 含量。因此, 地幔不均一性可能不是控制地幔源区和岩浆中亲铜元素变化的关键因素。值得注意的是, 在克拉通破坏过程中, EM1 和 EM2 地区的地壳厚度和断裂带明显不同。所以, 岩浆受构造背景影响而经历不同的演化过程是金属分布的空间变化和最终在地壳成矿的关键。

关键词: 火山岩; 亲铜元素; 交代岩石圈地幔

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0804200); 国家自然科学基金(42273023)

第一作者简介: 汪浪(1999-), 博士研究生, 研究方向: 亲铜元素地球化学与金属成矿. E-mail: wanglang@cug.edu.cn

*通讯作者简介: 汪在聪(1985-), 教授, 研究方向: 亲铁亲铜元素地球化学, 行星增生与壳幔演化. E-mail: zaicongwang@cug.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

东南沿海古太平洋俯冲与硅质岩浆系统演化

夏炎^{1*}, 徐夕生¹, 谭竹¹, 赵梦婷¹

1. 南京大学 地球科学与工程学院 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京 210023

中国东南沿海广泛发育晚中生代的岩浆作用, 并形成一条由火山盆地、破火山和大量岩浆岩构成的火山-侵入杂岩带。越来越多的研究阐释了浙闽沿海火山-侵入杂岩的成因与穿地壳演讲系统演化过程, 然而粤东晚中生代花岗岩-火山岩并没有得到足够的重视, 研究程度还比较低。此外, 对中国东南部古太平洋板块俯冲-后撤的具体过程, 也存在不同的认识。因此, 有必要对粤东多期次花岗岩-火山岩开展深入研究。

我们对粤东晚中生代火山岩开展了详细锆石 U-Pb 定年, 在此基础上建立了粤东晚中生代火山作用的时空格架。粤东晚中生代火山作用可以划分为四个火山活动旋回: 早中侏罗世 (195~161 Ma)、晚侏罗世 (161~146 Ma)、早白垩世 (146~130 Ma)、晚白垩世 (113~95 Ma)。同时, 我们对粤东莲花山断裂带及相邻区域的多期次花岗岩的研究也发现, 晚中生代莲花山地区存在四期花岗质岩浆活动: ~192-180 Ma、~172-150 Ma、~148-130 Ma、~106-94 Ma, 基本可与火山作用的四个旋回对比。莲花山盆地和白云嶂盆地毗邻莲花山断裂带, 出露多种火山岩和侵入岩, 周围存在众多锡矿床 (三角窝锡矿床、金坑锡矿床、陶锡湖锡矿床、吉水门锡矿床, 长埔锡矿床等)。莲花山盆地出露熔结凝灰岩、花岗斑岩和流纹斑岩, 而白云嶂盆地出露熔结凝灰岩、粗面岩、流纹岩和石英二长斑岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明在

误差范围内火山岩和侵入岩的结晶年代 (143~138 Ma) 一致, 属于近同时形成, 火山岩和侵入岩也具有一致的锆石 Hf-O 同位素和全岩 Nd 同位素组成。此外, 火山岩与侵入岩显示出明显互补的地球化学特征, 指示白云嶂盆地和莲花山盆地出露的火山岩和侵入岩的母岩浆来源于同一个深部岩浆储库, 但在浅部形成了两个独立的岩浆储库。两个浅层岩浆储库分别经历了不同程度的结晶分异和晶体熔体分离作用。最终通过多期次岩浆脉动式抽取形成了不同类型的火山岩、花岗斑岩和流纹斑岩。残余的晶粥就地固结形成石英二长斑岩。锆石 Hf-O 同位素和全岩地球化学研究揭示了粤东晚中生代不同时代的花岗岩、火山岩具有各自不同的岩浆起源。早侏罗世岩浆岩是新生地壳部分熔融的产物, 中晚侏罗世到晚白垩世的岩浆岩主要来源于古老地壳的重熔。从早侏罗世到晚白垩世, 岩石成因中新生组分的贡献比例呈现出先下降再增加的趋势。综合中国东南部已发表的火成岩的时空分布资料和锆石 Hf 同位素数据, 中国东南部晚中生代幕式岩浆作用揭示了古太平洋板块俯冲过程并非以恒定速率持续进行, 存在间歇性的板块活动与停滞交替状态。

关键词: 火山-侵入杂岩; 晶体-熔体分异; 幕式岩浆作用; 晚中生代; 粤东

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

北大西洋雷克雅内斯 V 型脊的成因： 来自橄榄石地球化学成分的制约

吴涛^{1*}, 朱恒睿¹, 鲁江姑², 董玮琳¹

1. 浙江大学 海洋学院, 浙江省杭州市 310058;

2. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江省杭州市西湖区保俶北路 36 号 310058

北大西洋雷克雅内斯脊位于冰岛南端,是由冰岛地幔柱和北大西洋洋中脊相互作用而成。其呈非常特殊的“V”型,发育一系列“穿时”的 V 型脊和 V 型槽。然而这些 V 型脊和 V 型槽的成因一直存在争议。目前的观点主要有三个: 1. 冰岛地幔柱内部周期性的热脉动 (Thermal pulsing); 2. 扩展裂谷 (propagating rift); 3. 地幔浮力上涌 (buoyant mantle upwelling)。为了解决这个争议,国际大洋发现计划 (IODP) 395 和 395C 航次沿雷克雅内斯脊开展了一系列钻探工作。有 5 个站位打到了基底玄武岩。其中 4 个位于两组 V 型脊 (U1562 和 U1563) 和 V 型槽 (U1554 和 U1555) 上。本研究对来自 V 型脊和 V 型槽的 4 个钻孔样品中橄榄石开展了初步岩相学和矿物主、微量元素研究。岩相学观察发现在大部分玄武岩样品中,橄榄石为唯一斑晶。其中,来自 V 型脊的样品发现有燕尾状、骨架-枝晶状橄榄石,反应了快速喷发冷却的过程,而 V 型槽的橄榄石则较自形。来自 V 型脊的橄榄石 Fo 值变化在 87.4~84.6,而来自 V 型槽的橄榄石 MgO 含量相对较低, Fo 值变化在

84.8~82.5。通过 pMELTS 模拟发现,初始岩浆 MgO 含量是造成橄榄石 Fo 值差异的主要原因,而岩浆温度和水含量则影响不大。橄榄石-尖晶石 Al 温度计计算结果表明,所有橄榄石的结晶温度具有相同的变化范围。所有橄榄石均具有较低的 Ni 和较高的 Mn 含量。结合 Fe/Mn 和 Zn/Fe 比值,指示它们的地幔源区以橄榄岩为主。此外,来自 U1554 (V 型槽) 站位的橄榄石比其他三个站具有更低的 V 和 Cr,但更高的 Ti 和 Cu 含量。这表明,相对于其他三个站位,U1554 的地幔源区具有更富集和更氧化的特征。这些特征与冰岛已发表的橄榄石成分相似,表明这些富集物质可能来自于冰岛地幔柱。我们的初步研究表明,地幔源区的岩性和成分不是控制 V 型脊和槽的主要因素。尽管地幔熔融温度的波动可能控制了该特殊地形的形成,但两者之间温度差可能很小 (<25°C),导致不能被橄榄石尖晶石 Al 温度计所区分。

关键词: 北大西洋; 雷克雅内斯脊; 橄榄石; 微量元素; 冰岛地幔柱

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

大陆中上地壳陆缘弧岩石剖面： 以腾冲地块早始新世镁铁质岩为例

文泰^{1,2}, 张超^{1*}, 赵少伟²

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

2. 长安大学 资源学院, 西安 710054

大陆地壳成因和生长方式一直是固体地球科学领域的研究热点。俯冲阶段形成的岛弧广泛发育镁铁质岩浆, 是认识大陆地壳形成和演化的重要载体, 而在此之后的同碰撞阶段的岩浆活动进一步加剧了地壳的增生和分异。腾冲地块西部那邦早始新世镁铁质-超镁铁质岩石组合是一系列连续陆缘弧岩浆演化的结果, 完整记录了新特提斯洋俯冲和印度-亚洲板块同碰撞阶段的陆缘弧岩浆体系, 但该时期镁铁质岩的成因及深部动力学机制还存在较大争议。本文以腾冲地块早始新世那邦角闪石岩-辉长岩-闪长岩组合为研究对象, 通过对其进行系统的野外地质、岩相学、全岩和矿物元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学、Sr-Nd、Lu-Hf 同位素和斜长石原位 Sr 同位素组成研究, 旨在查明腾冲地块早始新世镁铁质岩的岩浆结晶-堆晶演化过程, 揭示了矿物结晶过程与岩浆演化之间的关系和动力学过程, 并探讨堆晶-分异作用对大陆地壳垂向分异的控制作用。那邦早始新世镁铁质-长英质岩石剖面是一套典型的中上地壳弧岩浆剖面。那邦早始新世镁铁质岩的年龄为 52~53 Ma, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

(t) = 0.705 580~0.706 838, $\epsilon\text{Nd}(t) = -3.3\sim-1.7$, $\epsilon\text{Hf}(t) = -1.2\sim-7.8$, 与冈底斯弧同碰撞期岩浆岩具有相似的年龄和同位素组成。因此, 那邦早始新世镁铁质岩的原始岩浆起源于亏损地幔源区, 受到俯冲板片长期交代地幔楔过程, 最终就位于中上地壳岩浆储库。那邦角闪石岩-辉长岩-闪长岩岩石系列是中上地壳镁铁质岩浆储库中发育的一套以角闪石和斜长石为主要堆晶矿物的堆晶岩, 以角闪石为主、斜长石为辅的堆晶过程形成了角闪石岩和辉长岩, 以斜长石为主、角闪石为辅的堆晶过程形成了闪长岩。其中, 部分角闪石是单斜辉石与演化熔体发生替代反应的产物; 斜长石的环带和结构特征表明斜长石经历了同源岩浆的补给作用, 并诱发斜长石的多期结晶、溶解-再沉淀的过程。因此, 同源岩浆的多期补给是中上地壳镁铁质岩形成和演化的驱动力, 是大陆地壳由镁铁质向长英质转化的有效机制。

关键词: 弧岩浆; 镁铁质岩; 岩浆补给; 堆晶作用

本文受国家自然科学基金项目(41972055、2272052、41902046)联合资助

第一作者简介: 文泰(1998-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学. Email: taiwen421@outlook.com

*通信作者简介: 张超(1982-), 教授, 研究方向: 岩浆过程与高温高压实验模拟. E-mail: zhangchao@nwu.edu.cn.

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

塔什库尔干石头城、塔南霓辉正长岩的成因及其构造意义

杨伟^{1,2}, 童英^{1*}, 邱亮², 赵庆¹, 何芳^{1,2}

1. 中国地质科学院 地质所, 北京 100000;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京市海淀区学院路 100000

塔什库尔干地区位于帕米尔构造结的东部, 是研究青藏高原演化的重要地质窗口。该区发育的新生代碱性杂岩带, 包含苦子干以及石头城和塔南霞石正长岩等多个岩体, 记录了印度-亚洲大陆碰撞过程中的岩浆活动和构造演化历史。本研究通过岩石学、地球化学、U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析, 本文探讨了塔什库尔干石头城、塔南碱性杂岩的岩浆演化过程及其大地构造意义。结果表明, 该碱性杂岩带形成于新生代后碰撞伸展环境, 岩浆源区为加厚地壳底部的榴辉岩相镁铁质岩石, 拆沉作用为其提供了物质与热源。

引言

塔什库尔干地区位于帕米尔构造结的东缘, 是青藏高原西缘重要的地质窗口。该区的新生代碱性杂岩带因记录了印度-亚洲大陆碰撞后的岩浆活动和构造演化而备受关注。大量研究表明, 帕米尔构造结不仅见证了特提斯洋的俯冲、闭合过程, 也保存了陆陆碰撞后地壳增厚、拆沉以及伸展的宝贵信息。塔什库尔干一带的碱性杂岩还富含稀土元素, 具有重要的矿产资源潜力。然而, 关于塔什库尔干石头城、塔南区域碱性杂岩的成因与大地构造意义, 以及其与青藏高原碰撞-伸展演化的关系, 尚缺乏系统研究。为此, 本文结合岩石学、地球化学、U-Pb 年代学与 Lu-Hf 同位素分析, 对塔什库尔干石头城和塔南碱性杂岩的岩浆演化过程进行系统探讨, 旨在阐明其在印度-亚洲大陆碰撞后伸展环境中的形成机制及构造意义。

岩浆演化阶段

综合各项研究成果, 可以将该区域新生代碱性岩的演化归纳为两个主要阶段: 阶段 I - 深部初生阶段(慢源阶段)岩浆主要由下地壳部分熔融产生, 受益于厚重、含榴辉岩残余的基质环境; 这一阶段产生的岩浆具有富碱、富钾和富钙的基本特征, 反映出高压下部分熔融的遗传信息。此时平衡结晶作用占据主导, 矿物(如钾长石、斜长石、透辉石或霓辉石)的结晶基本在液体中持续进行, 分离结晶作用影响较小, 因而各岩石类型在化学组成上具有较强的继承性。阶段 II - 快速上升与侵位阶段(壳源及局部混合作用), 随着构造环境由挤压转为局部拉张(如走滑与断裂活动), 岩浆快速上升、侵位于上部较浅的地壳。

结论

塔什库尔干石头城和塔南碱性杂岩形成于新生代后碰撞伸展环境, 岩浆源区为加厚地壳底部的镁铁质榴辉岩石部分熔融。锆石 U-Pb 定年结果显示其侵位年龄约为 10~12 Ma, Lu-Hf 同位素指示源区经历了壳幔混源或壳内部分熔融。结合地球化学和同位素特征, 认为地壳拆沉大断裂与岩石圈减薄在本区碱性岩浆作用中发挥了重要作用, 体现了印度-亚洲大陆碰撞后的构造拉张特征。

关键词: 青藏高原西缘; 西昆仑; 塔什库尔干; 石头城塔南; 霓辉正长岩

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42372263)

第一作者简介: 杨伟(1998-), 硕士研究生, 构造地质学, E-mail: weiyang@email.cugb.edu.cn。

通信作者: 童英(1974-), 教授, 博士生导师, 岩石学, 目前主要从事花岗岩和大数据研究, E-mail: yingtong@pku.org.cn。

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

藏南拆离系内剪切作用促进下的淡色花岗质岩浆分异： 以聂拉木地区为例

杨雷^{1*}, 王佳敏², 刘小驰², 吴福元²

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

花岗质岩浆的结晶分异作用是导致地壳化学多样性的关键过程之一。近些年来研究表明, 喜马拉雅淡色花岗岩普遍经历过不同程度的分离结晶过程, 且与稀有金属成矿作用紧密相关。作为全球最大规模的伸展拆离系统, 藏南拆离系是喜马拉雅淡色花岗岩重要的迁移-就位通道。淡色花岗岩的地球化学变化与藏南拆离系之间的时-空关系表明, 藏南拆离系同时也扮演着促进淡色花岗质岩浆分异的重要功能。但是该过程和机理尚缺乏系统研究。为解决这一问题, 本研究在藏南聂拉木地区系统采集了拆离断层内的同构造淡色花岗岩 (~300 m 厚岩席) 进行年代学、矿物学和地球化学研究。年代学表明淡色花岗岩主要结晶于 ca. 20 Ma, 正处于聂拉木地区藏南拆离断层的活动区间内 (ca. 25~15 Ma)。随着接近上拆离面 (海拔由低到高), 淡色花岗岩在矿物学和地球化学上呈现出系统的变化: (1) 黑云母含量降低, 白云母含量增加且出现富锰石榴石; (2) 相容元素 (如 Ca、Sr、Ba、Zr、Th 等) 及 Zr/Hf, Nb/Ta 比逐渐降低, 不相容元素 (如 F、Li、Rb、Cs 等) 及 Rb/Sr 比逐渐增加; (3) 斜长石 An 牌号逐渐降低, 从奥长石 (An = 28~

23 mol%) 到钠长石 (10~2 mol%); (4) 黑云母和白云母中 Mg、Ti 和 Mg# 降低, F 含量增加。这些特点表明淡色花岗岩岩系的成分变化主要受到分离结晶作用的控制, 从底部到顶部, 分离结晶程度增加。这一点与 Rhyolite Melt 模拟结果相一致: 岩席的下部成分更类似于堆晶, 而上部则类似于残余熔体成分。值得注意的是, 淡色花岗岩的 EBSD 石英组构分析表明淡色花岗岩岩席上部, 对应于演化程度更高的位置, 具有更高的差应力和应变速率。计算结果表明拆离系上部的高应变速率可以显著增加局部空隙体积和降低局部空隙压强。相对于浮力驱动的分异机制 (如压实作用、受阻沉降和微沉降等), 藏南拆离断层的剪切作用可能是更为有效的促进高喜马拉雅淡色花岗岩分异演化的机制。这一模型将区域尺度构造活动与岩浆化学成分演化联系起来, 将为淡色花岗岩的分异机制以及稀有金属成矿作用提供了进一步制约。

关键词: 淡色花岗岩; 藏南拆离系; 变形作用; 分离结晶; 喜马拉雅

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

幔源岩浆源区辉石岩的分布和演化：来自机器学习的约束

杨凯龙¹, 刘佳^{1*}, 芦登岗¹, 周靖钧¹, 栾志康¹, 雷天婷¹

1. 浙江大学, 杭州 310058

玄武岩作为地幔熔体的衍生物, 是揭示地幔物质组成与演化、地壳物质再循环和地球多圈层相互作用的窗口。玄武岩的地球化学特征常被用来揭示其形成构造背景和地幔源区性质, 但传统手段基于单一地球化学指标或经验公式, 受到玄武质岩浆演化复杂性的影响, 其适用范围和准确率具有局限性。在大数据和人工智能技术迅猛发展的背景下, 机器学习手段已成为解决地球科学领域难题的新途径。本文基于构建的实验岩石学及热力学模拟的玄武岩主量元素数据集, 训练机器学习分类模型来判别天然玄武岩样品的源区岩性, 在测试集和外部验证集

分别取得了 97% 及 95% 的预测精度, 显示出卓越的性能。随后, 我们将模型应用到全球板内玄武岩数据集上, 初步探究了时间尺度上全球玄武岩源区组分的变化情况, 以及玄武岩源区与岩石圈厚度的潜在联系。与传统方法相比, 机器学习能够从更高维度解析地球科学大数据, 揭示背后的内在联系和规律, 为玄武岩源区岩性的判别提供了一种更为准确和高效的研究方法, 也为我们对地幔组成与演化的研究提供了新视角。

关键词: 玄武岩; 地幔源区; 辉石岩; 机器学习

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42373044)

第一作者简介: 杨凯龙 (2000-), 博士生在读, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: 1790830292@qq.com

*通信作者简介: 刘佳 (1985-), 研究员, 研究方向: 地球内部挥发分. Email: liujia85@zju.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

橄榄岩 KLB-1 在 H₂O 不饱和条件下的熔融实验： 对科马提岩成因模型的启示

宋雨萍^{1*}

1. 中国科学院大学 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

太古宙科马提岩是在地幔极端条件下熔融形成的。其化学成分指示喷发温度高达约 1600 °C, 这表明它们的地幔源温度很高 (Nisbet et al., 1993)。然而, 由于科马提岩岩浆中含水量的不确定性, 这一信息变得模糊不清。一种观点认为科马提岩基本上是干燥的, 起源于地幔柱 (Herzberg et al., 2007), 而另一种观点则认为这些岩浆含有百分之几的水, 这大大降低了它们的喷发温度, 并将其与俯冲过程联系起来 (Parman et al., 2004)。在这里, 我们将水-二辉橄榄岩样品 KLB-1 体系作为实验初始物, 在 3~9 GPa, 1573-2298 K 下开展高温高压熔融实验并通过与相同二辉橄榄岩的无水熔融实验结果进行比较, 讨论了添加到干燥的二辉橄榄岩中的 H₂O 对熔融成分的影响,

以及温度和压力对熔融成分的影响。在地幔潜在温度足够高的前提下, 科马提岩可以在 H₂O 不饱和条件下由地幔部分熔融产生。结合津巴布韦 Belingwe 绿岩带 (2.7 Ga) 科马提岩实例, 揭示其成因与地幔水循环的关联。由于其主要和微量元素组成以及低氧逸度与俯冲环境不一致, 高 H₂O/Ce 比是由于地幔过渡带的含水物质被夹带到科马提岩源中造成的, 表明 Belingwe 的科马提岩为地幔柱成因以及太古宙地幔的高温属性, 并揭示早期地球深部地幔存在含水储库, 并且为太古宙地幔动力学与早期地球水循环提供了关键约束。

关键词: KLB-1; 水不饱和; 熔融; 科马提岩

第一作者简介: 宋雨萍 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 固体地球物理学. Email: songyuping@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 郭新转 (1979-), 研究员, 研究方向: 高温高压实验技术、地球内部物质传输特性、变质岩石学. Email: gxzhuan@mail.gyig.ac.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

秦岭造山带早古生代富水镁铁杂岩中暗色包体的 岩石成因及其记录的岩浆作用

朱博康¹, 廖小莹^{1*}, 盖永升¹, 刘良¹, 王戈¹, Sang Wan Pak¹, 杨文强¹

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

岩浆岩中暗色包体的成因与岩浆演化过程关系密切, 可以用于探究、约束岩浆的起源、演化以及形成环境。北秦岭富水杂岩体是秦岭造山带中出露最大的早古生代富钾镁铁质杂岩体, 主要岩石类型包括辉长岩、角闪辉长岩和闪长岩。前人对该杂岩的研究主要聚焦于形成时代, 岩浆源区性质, 源区熔融条件等方面, 但对富水岩体内分布的大量暗色包体, 包括角闪石岩和暗色辉长岩, 仍缺乏系统的成因研究。本研究通过年代学、地球化学、同位素地球化学、矿物化学等分析方法, 探究暗色包体的岩石成因及其与寄主岩石的关系。寄主岩石与暗色辉长岩包体具有一致的地球化学特征, 属于钾玄岩系, 具有弧型微量元素特征和富集的 Sr-Nd 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (i) 值为 0.7123~0.7137, ϵNd (t) 值为 -5.1~ -4.5)。相比之下, 角闪石岩包体具有不同的地球化学特性, 属于中钾钙碱性-低钾拉斑系列, 表现为富集 Th 和 U, 亏损 HFSE 和 Sr, LREE 轻微富集或平坦的 REE 配分模式, 与寄主岩石相比具有相对亏损的 Sr-Nd 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (i) 值为 0.7068~0.7136, ϵNd (t) 值为 -5.1~ -1.1)。基于实验岩石学的微量元素模拟结果显示, 角闪石岩包体和寄主岩石可能源自受俯冲洋壳与陆壳叠加交代的富集地幔, 记录了从洋壳俯冲到陆壳俯冲的转变。综合岩相学、地质年代学、地球化学、矿物化学和微量元素模拟分析, 揭示出角闪石包体源自受俯冲洋

壳交代的富水富集地幔早期部分熔融后在下地壳深部岩浆房中的早期堆晶, 结晶温压条件为 871 °C 和 13.7 kbar; 暗色辉长岩包体是寄主岩浆在岩浆通道和岩浆房边部发生淬冷作用、快速结晶的细粒矿物组合, 结晶温度和压力分别为 852 °C 和 11.9 kbar。综合前人及本研究的地质年代学研究发现, 锆石 U-Pb 年代学结果显示包体角闪石岩和暗色辉长岩分别形成于 500 Ma 和 497 Ma, 且两类包体中都有少量岩浆锆石记录了约 475 Ma 的年龄, 寄主岩石主要形成于 484~492 Ma。结合年代学和矿物化学, 本文认为富水镁铁质侵入杂岩体及其包体岩石记录了三期岩浆侵入事件和角闪-绿片岩相变质作用。第一期岩浆侵入事件 (500~497 Ma) 和第二期岩浆侵入事件 (484~492 Ma) 的 P-T 条件接近, 约 10.3 kbar 和 853 °C; 第三期岩浆侵入事件发生于 473 Ma, P-T 条件下限可被约束在约 7.9 kbar 和 800 °C。角闪-绿片岩相变质作用发生于 335 Ma, P-T 条件可被限定在约 1.4~3.9 kbar 和 328~468 °C。本研究不仅首次对富水镁铁质杂岩中暗色包体的岩石成因及其记录的岩浆演化过程进行了详细研究, 还通过微量元素模拟为富水杂岩的地幔源区性质和岩石成因提供新的解释、为区域构造演化提供新的制约

关键词: 暗色包体; 富水杂岩; 角闪石; 富角闪石堆晶岩; 多期次岩浆侵入

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42272059、42030307)

第一作者简介: 朱博康 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。E-mail: zbk5293@163.com

*通信作者简介: 廖小莹 (1991-), 副教授, 研究方向: 变质地质学及造山带演化。E-mail: xyiliao@nwu.edu.cn

• 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 •

安徽庐江-枞阳地区中生代黄梅尖碱性岩体的成因研究

张诗滢¹, 柯珊^{1*}, 何永胜², 王阳²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

黄梅尖岩体是长江中下游庐江-枞阳地区一个大型的碱性复式岩体,也是该地区重要的铀源。根据岩石类型、岩石结构和矿物组成,黄梅尖岩体可以分为边缘相和中央相,边缘相以中粒碱长正长岩为主,由碱性长石、中-拉长石、石英、黑云母、角闪石和普通辉石组成。中央相以石英正长岩为主,中粗粒-伟晶结构、晶洞构造,由碱性长石、石英、少量角闪石和黑云母组成,部分样品萤石含量可高达 1%。通过岩相学、矿物学和地球化学分析,本文讨论了黄梅尖复式岩体的演化分异特点,成因联系及其与铀矿化的关系: 1. 边缘相碱长正长岩具有较低的 SiO₂ (54.61~60.10 wt%) 和较高的 CaO、MgO 含量,斜长石牌号为 36~54,显示弱的 Eu、Sr 和 Ba 负异常,主、微量元素相关图解指示其经历了辉石和钛铁氧化物的分异。氧逸度变化在 HM-QFM 之间。2. 中央相石英正长岩 SiO₂ 变化范围大(62.73~75.51 wt%),贫 CaO、MgO, Fe[#]值(0.86~0.99)高,斜长石牌号低(An=0.24~1.01),富氟,挥发分含量高,结合高 Nb、Ga/Al 等元素比值图解,为典型的 A 型花岗岩。不同于边缘相,中央相显示强烈的 Eu、Sr 和 Ba 负异常和微弱的四组分效应,表明其经历了显著的斜长石结

晶分离,具高分异的特点。其氧逸度化在 HM-NNO 之间,总体高于边缘相。3. 二者的 Sr-Nd 同位素组成既有相似性,又有差异。边缘相和中央相的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 分别为-6.398~-5.618 和-6.203~-5.813,组成相似; I_{Sr} 分别为 0.7060~0.7061 和 0.7077~0.7132,差别大。结合前人的研究,中央相的 Sr 含量非常低,易受到围岩混染的影响。4. 两个相带的 U 含量差别很大,边缘相 U 含量仅为 3.82~6.04 (mg/g); 中央相 U 含量为 8.49~109 (mg/g),且与 SiO₂ 呈正相关。分异程度高及富碱、氟是中央相岩石铀富集的主因。U 在岩浆体系中为高度不相容元素,结晶分异越强烈,残余熔体中 U 含量越高;熔体中 Na、K、F 含量高,均会导致岩浆聚合度下降和非桥氧增加,U⁴⁺优先与非桥氧成键,从而增强 U 在熔体中的溶解度。综上所述,黄梅尖复式岩体的边缘相和中央相具有不同的特征,显示出不同的演化过程和演化程度,中央相的高分异和卤族元素富集是其铀含量高的主因,可以成为重要的铀源,而边缘相不具备这些特点,相对贫铀。

关键词: 庐枞地区; 黄梅尖复式花岗质岩体; A 型花岗岩; 结晶分异

基金项目: 深部碳、氧循环的金属同位素示踪技术(2019YFA0708400)

第一作者简介: 张诗滢(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: 13811793390@163.com

*通信作者简介: 柯珊(1975-), 副教授, 研究方向: 岩石地球化学. Email: keshan@cugb.edu.cn

· 专题 9: 岩浆系统与岩石成因 ·

地壳产热元素与过铝质花岗岩的成因联系 ——以武夷山钨成矿带为例

刘向冲^{1*}

1. 中国地质科学院地质力学研究所 矿田构造研究室, 北京 100081

过铝质花岗岩常常与锡、钨、稀有金属（锂、铍、铌、钽等）矿床有密切的成因联系。大量岩石地球化学和同位素数据表明其源岩以变沉积岩为主，然而造成源岩部分熔融的主要热源及其传热机制却进展缓慢。作者选择武夷山钨成矿带行洛坑黑云母花岗岩（侵位于 150 Ma）为例，识别出岩浆锆石 Hf 同位素值（= -25.72~7.01）落入继承性锆石（600~1000 Ma，=-28.24~10.24）范围内；结合前人地化数据认为，行洛坑花岗岩没有幔源岩浆的参与。根据武夷山地区中生代细粒沉积碎屑岩和麻粒岩的产热元素（U，Th，K），计算得到武夷山在中生代的上地壳、中-下地壳平均产热率分别是：2.9 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 和 0.6~4 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ，几倍于全球现今平均值（上地壳：

1.68 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ；中-下地壳：0.19~1 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ）。热模拟表明，这种高地壳产热率在地壳构造加厚至约 50 km 的配合下可在约 30~50 Ma 内使中-下地壳的变沉积岩产生部分熔融。壳内产热元素的自加热效应还将同步地使下地壳、甚至上地幔升温，并可能产生幔源物质的部分熔融。因而，过铝质花岗岩与少量的基性岩墙共存现象可能是同一构造加厚事件在不同深度的热产物，不同于以幔源岩浆底侵作用为核心的、自下而上的穿地壳岩浆体系。上述地壳产热元素与花岗岩的热成因联系可能也适用于华南其他地区的中生代过铝质花岗岩。

关键词：花岗岩；热源；热模拟；钨锡矿