

· 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 ·

中祁连西段盐池湾地区乌兰窑洞花岗质杂 岩体成因与弧岩浆演化

李雪, 王超*, 武美云, 郝江波, 李航, 孙晓奎, 张帅, 喻遵谱

西北大学地质学系 大陆动力学国家重点实验室 陕西西安 710069

祁连造山带位于阿拉善地块和柴北缘地块-西秦岭造山带之间, 西邻柴达木地块并被阿尔金断裂所截, 是秦祁昆造山系的重要组成部分。近年来在中祁连南缘发现一条规模巨大、出露较为连续的弧岩浆岩带, 记录了俯冲带岩浆起源、迁移、储存及侵位等一系列复杂的地质过程。本文对中祁连西段盐池湾地区乌兰窑洞岩体进行了岩相学、全岩地球化学、锆石 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素以及岩浆结晶温压条件估算研究, 揭示这些岩石的形成时代及其成因, 并探讨与岩体形成密切相关的壳幔相互作用形式及其在弧岩浆成因中的意义。锆石 U-Pb 定年结果显示, 该岩体至少存在三期岩浆事件, 花岗闪长岩、石英闪长岩、正长花岗岩等形成于 475 ~ 460 Ma, 安山玢岩脉和正长花岗岩脉形成于 455 Ma, 闪长岩形成于 445 Ma。锆石 Lu-Hf 同位素分析结果显示, 所有样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均小于 0, 表明岩浆源区存在大量地壳物质, 结合多数样品高 MgO、Cr、Ni 特征, 指示源区有幔源岩浆参与, 说明该地区存在明显的壳幔相互作用。随着锆石 U-Pb 年龄由老到新, 锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值富集程度

降低, 反映了幔源组分的增加, 该特征可能与弧后伸展过程有关。岩浆结晶温压条件估算结果显示, 约 475 Ma 时期俯冲板片熔体及沉积物与幔源岩浆混合形成富钠的埃达克质花岗闪长岩, 侵位深度为 7.21 km ~ 8.99 km; 拉斑质石英闪长岩结晶深度为 12.98 ~ 20.35 km, 可能代表该时期岩体最大深度; 约 467 ~ 460 Ma 时期以暗色包体为代表的基性岩浆作用导致了早期岩浆储库发生结晶分异, 形成堆晶岩和高硅花岗岩, 使得岩体继续生长, 闪长岩包体结晶深度为 8.78 ~ 10.94 km, 二长花岗岩结晶深度为 2.24 ~ 4.94 km。该期岩浆整体代表了岩体从深部到浅部的侵位、分异和就位历史; 第二期和第三期岩浆事件主要为一系列壳幔混合源的闪长质脉体, 代表了晚期深部岩浆源区特征。综上, 本文认为乌兰窑洞岩体主体形成于第一期岩浆事件, 处于弧背岩浆演化阶段, 后期暗色包体和脉体可能代表弧后盆地伸展过程。其多期的岩浆记录可能是由俯冲洋壳、地壳物质或大洋沉积物俯冲至地幔楔, 发生部分熔融和壳幔相互作用, 然后底劈返回至地壳形成的。

基金项目: 国家自然科学基金(41672187, 42030307)和大陆动力学国家重点实验室资助

第一作者简介: 李雪(1997-), 硕士研究生, 研究方向: 主要为花岗岩研究. E-mail: 1016450797@qq.com

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

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

南极洲难言岛古生代岩浆岩的地球化学特征及构造意义

高鹏, 唐立梅*, 陈灵

自然资源部第二海洋研究所海底科学重点实验室, 杭州 310012

南极洲北维多利亚地 (NVL) 由三个截然不同以断层为界的地体拼接而成, 分别是内部的威尔逊地体 (WT)、中间的鲍尔斯地体 (BT)、外侧的罗伯逊湾地体 (RBT) (Borg and DePaolo, 1991; Kunstet al., 2005; Federico et al., 2006)。前人研究结果普遍支持 BT、RBT 是俯冲增生拼接形成的, 是罗斯造山运动的产物。罗斯运动发生于晚元古代至早中奥陶系时期, 古太平洋板块向西与东冈瓦纳南极大陆发生持续性俯冲碰撞 (Borg and DePaolo., 1991), 形成了一系列岛弧和弧后盆地, 并在随后的增生事件中拼接至现今构造位置 (Federico et al., 2006)。本研究对南极北维多利亚地难言岛进行详细的野外地质调查工作, 对来自难言岛青龙山、望鹅岭、定军山的岩浆岩样品进行了详细岩石矿物学、地球化学及锆石年代学等方面的研究, 并结合区域地质探讨了其构造意义。岩石学及主量地球化学特征结果表明, 难言岛侵入岩的岩石类型主要有花岗岩、正长岩、辉长岩、闪长岩等, 其侵入状态有岩体和岩脉。花岗岩属于钙碱性系列, 并普遍具准铝质至过铝质特征, 闪长岩属于钙碱性系列, 花岗质岩脉具高钾钙碱性岩浆弧亲和性。微量元素特征显示, 二

长花岗岩具 Eu 正异常, 最大异常 10 倍。闪长岩与石英闪长岩呈弱 Eu 负异常, 某些二长花岗岩 (K 异常) 呈现弱 Eu 负异常, 甚至无异常。对九个花岗岩和闪长岩样品进行了锆石的高精度 SHRIMP 测定, 定军山的花岗岩样品年龄在 $477.3 \pm 1.7\text{Ma}$ ~ $471.8 \pm 1.8\text{Ma}$, 望鹅岭的花岗岩平均年龄为 $485.1 \pm 2.7\text{Ma}$, 闪长岩年龄为 $500.4 \pm 1.2\text{Ma}$; 青龙山的岩石样品年龄均为 $\sim 499.1 \pm 0.99\text{Ma}$ 。全岩 Sr-Nd 同位素特征显示所有样品具有 EM II 型富集地幔特征。相关的构造环境指示图表明较年轻的二长闪长岩具有板内及洋岛玄武岩区 (伸展环境) 特征, 相关花岗岩则具有强的岛弧亲和性, 正长岩呈现出了早中奥陶同碰撞运动产生花岗岩 (SKG) 及后造山花岗岩 (PKG) 的特征, 二长闪长岩的地化特征表明其形成于板内伸展的构造环境, 其所处时期可能为从寒武至奥陶期间缓慢的由碰撞向伸展过渡的时期 (Bomparola et al., 2007)。本研究结果为进一步了解早古生代罗斯运动的岩浆作用及古沟弧盆体系的初始演化及形成过程 (Federico et al., 2006) 提供了新的数据支持, 并对理解现今板块俯冲体系在地质历史时期的演化发展具有重要意义。

基金项目: “国家重点研发计划”项目、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金、国家自然科学基金 (2017YFC1405502、QNYC1901; JG2002、41976072)

第一作者简介: 高鹏 (1996-), 硕士研究生, 研究方向: 海洋地质学、岩石地球化学. E-mail: gaopeng@sio.org.cn

*通信作者简介: 唐立梅 (1981-), 博士研究生, 副研究员, 研究方向: 海洋地质学. E-mail: tanglm@sio.org.cn

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

特提斯带东段缅甸中-新生代构造演化- 岩浆-成矿作用研究进展

李金祥^{1*}, 范蔚茗^{1,3}, 张利云¹, 丁林^{1,3}, 彭头平², 孙亚莉¹,
蔡福龙¹, 岳雅慧¹、谢静¹

1. 中国科学院青藏高原研究所, 大陆碰撞与高原隆升重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 510640;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

缅甸是特提斯构造带东构造结的东延, 经历了古、中、新特提斯洋俯冲及随后陆-陆碰撞, 并发育相应独具特色的岩浆及成矿作用 (张洪瑞等, 2010; 王宏等, 2012; 杨经绥等, 2012; Ding et al., 2017; Mitchell, 2018; 吴福元等, 2020; 王瑞等, 2020), 对认识整个特提斯带造山带的形成和演化具有重要的意义。近 10 几年来, 该地区的构造演化、岩浆及成矿作用、洋/陆岩石圈俯冲深部过程等方面受到了国内外学者的广泛关注, 取得了重大的进展 (如 Mitchell et al., 2012; Gardiner et al., 2017, 2018; 陈希节等, 2016; Cai et al., 2020; Jiang et al., 2017; Myint et al., 2018, 2021; 魏超等, 2018; Lin et al., 2019; 张强等, 2019; Licht et al., 2020; Mao et al., 2020; Zhang et al., 2020)。在缅甸地区除发育闻名世界的翡翠以外, 还发育两条重要的中-新生代岩浆岩带及其伴生热液金属成矿带 (Zaw, 2017): 西缅地体弧岩浆岩及 Cu-Au 成矿带、滇缅马苏地体的花岗岩及 Sn-W 成矿带, 且这条 Sn-W 成矿带也是世界上著名的南亚 Sn 成矿带的重要组成部分 (Schwartz et al., 1995)。本文基于近年来研究成果, 对缅甸地区中-新生代岩浆岩及金属成矿作用的时空分布搁架、岩浆成因、构造背景等进行全面的梳理和综述, 并与青藏高原进行类比, 期望对全面认识特提斯带的构造演

化-岩浆-成矿作用之间的内在成因联系起到一定的促进作用。

通过综合梳理缅甸地区构造演化-岩浆及成矿作用等方面的进展, 得出以下认识: 缅甸西缅地体的文多-波帕带白垩纪-渐新世岩浆岩及 Cu-Au 成矿作用与冈底斯带类似, 而滇缅马苏地体曼德勒-丹老带侏罗纪-始新世岩浆岩及 Sn-W 成矿作用与我国腾冲地区类似, 暗示南亚 Sn 矿带可以向北延伸到我国腾冲地区。在缅甸地区 (至少在北部) 始新世以来存在印度大陆岩石圈的俯冲, 洋-陆岩石圈持续地俯冲形成多期含 Sn 花岗岩, 从而形成了缅甸巨型 Sn-W 成矿带。但还是存在很多问题需要进一步的研究, 如尽管目前地球物理已经证实印度大陆岩石圈正在俯冲 (Zheng et al., 2020), 但从~50Ma 碰撞以来, 大洋-大陆俯冲转换的时空关系、深部过程及成矿响应的耦合关系还不清楚; 西缅地体的构造属性是洋岛弧还是陆缘弧; 在西缅地体和滇缅马苏地体还发育众多 Au 矿床 (如 Kyaukpahto; Kirwin and Royle, 2018), 研究程度很低, 成矿时代及成因都不清楚; 缅甸超大型 Sn-W 成矿带的成因机理方面还没有厘清, 目前主要集中在成矿岩浆成因及形成时代方面, 以及为什么在同一构造-岩浆带背景下, 冈底斯和南羌塘地区并没有规模宏大 Sn-W 矿床的发育。

基金项目: 本文得到国家自然科学基金 (41941016, 41490613, 41972083)、中科院先导专项 A 子课题 (XDA2007030101) 和第二次青藏高原科学考察研究子专题 (2019QZKK0708) 联合资助

*通信作者简介: 李金祥 (1981-), 研究员, 研究方向: 特提斯带岩浆-热液成矿作用. E-mail: ljx@itpcas.ac.cn

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

冈底斯岩浆弧东段沉积岩的晚白垩世 变质作用及其构造意义

李中尧¹, 袁玥¹, 张泽明^{1,2*}

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

位于青藏高原南部的冈底斯岩浆弧形成于中生代以来新特提斯洋北向俯冲过程中,并在印度与欧亚大陆碰撞过程中叠加了强烈的新生代岩浆作用(Zhu et al., 2011; Zhang et al., 2013)。冈底斯岩浆弧东段出露的中-新生代变质岩代表了岩浆弧的中-下地壳组成,是研究岩浆弧深部组成与形成演化的理想窗口(Zhang et al., 2014)。本文对冈底斯东段米林田兴村地区的变沉积岩,即大理岩、黑云斜长片麻岩、含石榴钙硅酸盐岩和石榴矽线黑云片岩,进行了岩石学和锆石 U-Pb 年代学研究。研究表明,石榴矽线黑云片岩由矽线石、黑云母、石榴子石、斜长石、钾长石、石英和少量的钛铁矿组成,峰期变质条件为 820°C 和 7.5 kbar。大理岩、钙硅酸盐岩和石榴矽线黑云片岩中的锆石给出了 83~88 Ma 的变质年龄。本文和现有研究表明,冈底斯弧东段扎西-米林-布久地区出露的变质岩经历了晚白垩世到早新生代的高压麻

粒岩相变质作用,代表岩浆弧的下地壳;从米林-扎西到西南部的田兴村(本研究区)和才巴村,变质程度逐渐降低到角闪岩相,变质压力从 9~16.7 kbar 降低到 7.5 kbar 和 5~6 kbar,变质温度从 830~900°C 降低到 820°C 和 720~750°C,变质时间也从 87~89 Ma 变新到 86Ma 和 74~79 Ma,由岩浆弧的下地壳转变成中-下地壳。本文认为,晚白垩世新特提斯大洋岩石圈的平俯冲和大体积幔源岩浆的注入,导致冈底斯岩浆弧发生了明显的地壳生长与加厚,使里龙岩基中的辉长岩-闪长岩-花岗闪长岩和沉积岩包体运移到中-下地壳,经历了麻粒岩相至角闪岩相变质作用与部分熔融。中酸性岩浆岩和沉积岩向中-下地壳的运移,很可能是岩浆弧中-下地壳由基性转变成中性成分的重要机制。岩浆弧加厚下地壳的部分熔融形成了分布在上地壳的花岗岩,表明岩浆弧的新生地壳在晚白垩世俯冲过程中发生了分异与再造。

基金项目: 国家自然科学基金特提斯地球动力系统重大研究计划重点项目——冈底斯岩浆弧东段的变质深熔岩浆作用: 大陆地壳的生长与再造(91855210)

第一作者简介: 李中尧(1994-), 硕士研究生, 岩石学专业. E-mail: illogy@qq.com

*通信作者简介: 张泽明(1961-), 研究员, 研究方向: 造山带组成与构造演化研究. E-mail: zzm2111@sina.com

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

东秦岭熊耳山地区晚中生代岩浆成因及其构造指示

胡昕凯^{1,2,3*}, 张寿庭³

1. 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012;

2. 自然资源部海底科学重点实验室, 杭州 310012;

3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

熊耳山矿集区位于秦岭造山带东段, 区内晚中生代岩浆活动十分频繁, 形成了大量的花岗岩体和斑岩岩株。在晚中生代秦岭造山带进入后碰撞阶段, 但该阶段形成的岩浆岩的岩浆来源、岩石成因和地球动力学背景仍然存在较大争议。一些研究人员认为, 由于晚中生代扬子克拉通 A 型俯冲到华北克拉通的下地壳或岩石圈地幔之下, 北秦岭和扬子克拉通北缘的地壳物质是花岗岩的岩浆来源。而部分学者认为华北克拉通和扬子克拉通之间的碰撞导致陆内造山, 而晚中生代下地壳继续在加厚, 花岗岩是由加厚下地壳和新生地壳部分熔融的物质混合的产物。还有部分学者认为晚中生代花岗岩是华北克拉通南缘的古老地壳的部分熔融物质和幔源物质混合的产物。本此研究以熊耳山矿集区的晚中生代典型花岗岩体为研究对象, 开展全岩主微量元素、锆石 U-Pb-Hf-O 同位素, 揭示岩浆来源、岩石成因和地球动力学背景。

花岗岩的全岩地球化学特征为富碱、高铝, 低 MgO 和 Mg#, 轻稀土富集重稀土亏损, 富含大离子亲石元素, 亏损高场强元素。熊耳山晚中生代花岗岩的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值在 -26.6 至 -8.0 之间, $T_{\text{DM}2}$ 在 1691 Ma 至 2872 Ma 之间, 显示其岩浆源区以典型的古老陆壳为主。样品的锆石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{zircon}}$ 值与地幔锆石的范围(平

均 $5.3 \pm 0.6\%$) 基本一致, 因此可以排除岩浆来源于扬子克拉通北缘和北秦岭的俯冲残留物, 这些岩浆源通常含有丰富的上地壳物质, 氧同位素值变化大。大多数样品的稀土元素和微量元素范围和特征与华北克拉通南缘结晶基底组成之一的晚太古代太华群 TTG 片麻岩高度重合。太华群的锆石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{zircon}}$ 值范围为 5.1 至 7.3%, 平均值为 $6.07 \pm 0.3\%$, 与研究区内晚中生代花岗岩类的锆石 $\delta^{18}\text{O}_{\text{zircon}}$ 比较相似。本次研究统计了熊耳山矿集区晚中生代花岗岩的继承锆石 U-Pb 年龄, 2.2~2.8 Ga 阶段的继承锆石为主要的继承锆石群。北秦岭的年龄在古元古代到早古生代之间, 扬子克拉通北缘的基底年龄主要小于 2.2 Ga。熊耳群火山岩的主要喷发年龄被限制在 1.83~1.74 Ga 之间, 而太华群是在 2.9~1.8 Ga 期间经历多阶段的岩浆事件形成的。因此继承锆石 U-Pb 年龄范围与太华群的年龄范围最为相近, 而这也排除了新生地壳部分熔融物质的加入。秦岭造山带后碰撞阶段陆内俯冲引起的地壳大规模增厚, 导致了加厚下地壳的部分熔融; 紧随其后的华北克拉通破坏导致岩石圈减薄和软流圈上涌, 构造体制从挤压向伸展转换, 古老下地壳和富集地幔的部分熔融, 发生强烈的壳-幔相互作用, 导致熊耳山地区晚中生代大规模岩浆活动。

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

Decoupled whole-rock and zircon Hf isotopes in young evolved post-collisional lavas from Dayingshan (SE Tibet): Evidence for open-system magmatic processes

Zipei Guo¹, Haibo Zou^{1,2*}

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

2. Department of Geosciences, Auburn University, Auburn, AL 36849, USA

Young zircons from volcanic rocks provide ideal samples for evaluating whole-rock and zircon Hf isotope equilibrium. We report zircon and whole-rock Hf isotopic compositions for Holocene post-collisional lavas (trachyandesites and trachytes) from Dayingshan volcano, SE Tibetan Plateau. Individual zircon ϵ_{Hf} values differ from the host whole-rock value by up to 7.4 ϵ units, and average zircon ϵ_{Hf} values in individual samples are about 3 ϵ units lower than the corresponding whole-rock ϵ_{Hf} values, indicating discrepancy of zircon and whole-rock Hf isotopes. $\delta^{18}\text{O}$ values for Dayingshan zircons vary from 6.1 to 7.8‰ and are negatively correlated with zircon ϵ_{Hf} values. The decoupling of

zircon/whole-rock Hf isotopic compositions is attributed to open-system magmatic processes rather than disequilibrium partial melting, as indicated by the negative correlation of zircon Hf-O isotopic compositions, as well as the correlations between whole-rock SiO₂ content and Nd-Sr-Hf isotope ratios. The decoupling of zircon/whole-rock Hf isotopic compositions in Dayingshan lavas suggest that care must be taken when using individual zircon ϵ_{Hf} values to study crust-mantle evolution. This Hf isotope decoupling might be more common than previously thought in continental post-collisional volcanic rocks where opensystem magmatic processes are common.

第一作者简介: 郭紫佩 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 火山学研究. E-mail: 434573580@qq.com

*通信作者简介: Haibo Zou (1966-), 教授, 研究方向: 地球化学, 火山学研究. E-mail: haibo.zou@auburn.edu

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

西藏冈底斯碰撞后高钾钙碱性埃达克质岩的一种可能成因：闪长质岩石的部分熔融

易建康¹, 朱弟成^{1*}, Roberto F. Weinberg², 王青¹

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

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

埃达克岩是发育在俯冲带的一系列富钠中-酸性岩石, 以高 Sr/Y 和 La/Yb 比值, 低 Y 和 Yb 含量为主要特征。最初定义的埃达克岩富钠, 起源于榴辉岩相条件下玄武质变基性岩(洋壳)的部分熔融, 源区残留石榴石。在碰撞后背景下(如西藏冈底斯带渐新世-中新世时期), 许多花岗岩显示类似埃达克岩的微量元素地球化学特征(如高 Sr/Y), 但却具有显著高于埃达克岩的 K₂O 含量和 K₂O/Na₂O 比值。这些高钾埃达克质花岗岩通常被用于指示变质基性增厚下地壳的部分熔融。虽然幔源钾玄质或超钾质岩浆的混合被用来解释这些埃达克质花岗岩的高钾特征, 但是已有的岩浆混合模型并未明确壳源熔体端元是否已经具有高钾特征。因此, 存在的关键科学问题是: 冈底斯碰撞后高钾埃达克质花岗岩的成因是什么? 这些碰撞后高钾埃达克质花岗岩能否用于指示地壳增厚?

本文针对冈底斯东段米林二长花岗岩和闪长质正片麻岩开展系统的岩石学和岩相学观察、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素、全岩主量、微量元素和 Sr-Nd 同位素、以及单矿物电子探针分析。结果显示: (1) 二长花岗岩的锆石具有核-边结构, 边部和核部的年龄分别为 30~22 Ma, 66~48 Ma, 均显示岩浆锆石的高 Th 和 Th/U 特征。均具有正的、相近的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+1~+11)。(2) 闪长质片麻岩中发育大量淡色体和石榴石,

指示其后期发生了部分熔融。相平衡模拟表明部分熔融的温-压条件为~740°C 和~9.2 kbar。闪长质片麻岩锆石发育核-边结构, 核部年龄为 66~47 Ma, 显示岩浆锆石的高 Th 和 Th/U 特征显示, 30~25 Ma 的边部为具有极低的 Th 含量和低 Th/U 比值, 为变质或深熔成因。66~47 Ma 的岩浆锆石核具有正的、与二长花岗岩中锆石核一致的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值。(3) 二长花岗岩具有高 SiO₂ (65.6~78.4 wt.%)、K₂O (0.6~6.7 wt.%) 和高 K₂O/Na₂O 比(大部分样品大于 0.7), 高钾钙碱性特征, 同时显示出埃达克质岩的地球化学特征, 如高 Sr/Y、(La/Yb)_N 比值和低 Y、Yb 含量。闪长质正片麻岩具有相对更低的 SiO₂ (55.5~73.0 wt.%) 和 K₂O (0.1~3.6 wt.%) , 具有中钾钙碱性和准铝质成分特征。二长花岗岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.7052\sim 0.7060$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.3 \sim -0.9$) 和闪长质正片麻岩 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.7044\sim 0.7066$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.4 \sim +2.9$) 具有相似的全岩 Sr-Nd 同位素组成。

上述直接的岩石学、锆石年代学和同位素证据表明, 碰撞后 30~22 Ma 高钾埃达克质二长花岗岩起源于 66~47 Ma 闪长质岩石的重熔。这表明冈底斯碰撞后高钾埃达克质花岗岩可以直接起源于闪长质弧岩浆岩在石榴石稳定范围内低压条件下的部分熔融, 不一定指示了基性下地壳岩石在高压下的部分熔融, 进而不能简单用于指示增厚地壳。

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体项目(42121002)

第一作者简介: 易建康(1993-), 博士后, 研究方向: 岩浆作用与大陆地壳形成演化研究. E-mail: jkangyi@163.com

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

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

青藏高原南羌塘晚始新世二辉石粗面英安岩： 增厚和脱水后下地壳高温熔融的产物

曾云川¹, 许继峰¹, 李明键¹, 陈建林², 王保弟³, 黄丰¹

1. 中国地质大学(北京);

2. 中国科学院广州地球化学研究所;

3. 中国地质调查局自然资源航空物探遥感中心

Orthopyroxene-bearing granitic rock (e.g., charnockite) is relatively rare but provides an excellent opportunity to probe the thermal and tectonic evolution of deep orogenic crust because of its distinct mineral assemblage. Here we present petrological, mineralogical, elemental, and Sr–Nd–Hf–O isotopic data for late Eocene (ca. 36 Ma; zircon U–Pb ages) volcanic rocks exposed in the Ejiu region in the southern Qiangtang Terrane to investigate how the central Tibetan crust evolved to its modern thickness and thermal state. The Ejiu volcanic rocks (EVRs) are trachydacites with anhydrous mineral assemblages (i.e., two pyroxenes, sanidine, plagioclase, and ilmenite, without amphibole and biotite) and geochemical characteristics (e.g., high P_2O_5 and TiO_2) that resemble those of charnockite-type magmatic rocks. Mineral and whole-rock thermometry and hygrometry suggests that the parent magma crystallized under hot (~1000 °C) and dry ($H_2O < 2$ wt.%). In addition, the EVRs display adakitic affinities according to their high SiO_2 and Al_2O_3 contents, high Sr/Y, La/Yb, and Gd/Yb ratios, and low Y and Yb contents, without marked negative Eu anomalies. The calculated melts in equilibrium with pyroxenes also display adakitic compositions (e.g., high Sr/Y and La/Yb ratios), indicating that the adakitic compositions of the EVRs did not result from late-stage magmatic evolution. In addition, the melts of the EVRs

were saturated in TiO_2 , as inferred from the high TiO_2 contents of these rocks and the presence of ilmenite. An integrated analysis of the geochemical, petrological, and mineralogical data suggests that the EVRs were neither evolutionary products nor partial melts of hydrous mafic materials at normal crustal pressures, but were formed by fusion of an eclogitized mafic protolith with residue containing garnet and rutile but lacking amphibole and plagioclase. The whole-rock Sr–Nd and zircon Hf isotope compositions of the EVRs [$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.7053$ to 0.7066 ; $\epsilon_{Nd}(t) = -1.40$ to -0.99 ; zircon $\epsilon_{Hf}(t) = +1.08$ to $+5.31$] indicate that the parental protolith was relatively juvenile in nature, but also contained some supracrustal materials given the high zircon $\delta^{18}O$ values [zircon $\delta^{18}O = +8.21\%$ to $+11.00\%$]. The above arguments lead us to propose that of partial melting of a previously dehydrated—but chemically undepleted—mafic lower continental crust at high pressure (>1.5 GPa) and high temperature (>1000 °C) generated the EVRs. Based on a synthesis of independent geological and geophysical data, we further suggest that the southern Qiangtang Terrane crust of the central Tibetan Plateau was thick, dry, and elevated during the Late Cretaceous to early Eocene time, and that it became abnormally hot owing to the ascending asthenosphere after lithospheric foundering during the middle Eocene.

· 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 ·

冈底斯岩浆弧东段变质沉积岩的成因： 对新生地壳形成与演化的启示

李文坛¹，张泽明^{2*}，丁慧霞¹

1. 中国地质大学(北京)，北京 100084;

2. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037

大陆岩浆弧以幔源岩浆增生和新生地壳的生长为特征。然而，大陆岩浆弧的中、下地壳常含有一些变质沉积岩。这些表壳岩进入深部地壳的机制，对新生地壳组成的影响，以及对岩浆弧构造演化过程的制约还需要进一步研究。冈底斯岩浆弧形成于中生代新特提斯洋俯冲及新生代印度-亚洲大陆碰撞的过程中。在冈底斯岩浆弧东段米林-林芝地区出露了一系列中、新生代形成的中、高级变质岩，而且，这些变质岩的原岩主要为中、新生代的弧岩浆岩，所以代表冈底斯弧的中-下地壳组成。在这些变质岩浆岩中含有呈透镜体产出的变质沉积岩，其中包括片岩、副片麻岩、大理岩、钙硅酸岩和石英岩等。本文对林芝地区的片岩、副片麻岩和晚石炭世地层中的变质杂砂岩进行了岩石学和年代学研究。片岩和副片麻岩的矿物组合为石榴石+夕线石+黑云母+白云母+斜长石+石英+钛铁矿，经历了~ 0.7 GPa 和~ 710℃的角闪岩相

变质作用和部分熔融。片岩和片麻岩中的锆石具核-边结构，继承的碎屑核获得了 314~3355Ma 的年龄范围，并且具有 370~ 320 Ma、570~ 470 Ma、1220~ 1070 Ma 的年龄峰值。变质杂砂岩中的继承碎屑锆石获得了 319~2741Ma 的年龄范围，其年龄峰值与片岩和片麻岩的锆石继承碎屑核一致。片岩和片麻岩中的独居石和锆石增生边给出了 73~ 57 Ma 的变质年龄。结合已有研究成果，我们得出以下认识：(1) 冈底斯弧东段中、下地壳中产出的变质沉积岩的原岩很可能是拉萨地体的晚石炭世沉积岩。(2) 岩浆弧的地壳缩短和逆冲推覆导致表壳沉积岩进入到了岩浆弧的中、下地壳。(3) 进入深地壳的沉积岩明显改变了新生地壳的组成和化学成分，很可能是初生的基性地壳转变成中性地壳的重要原因。(4) 晚白垩世(90~60Ma)新特提斯洋岩石圈的平缓俯冲和板片回转诱发的幔源岩浆作用是东冈底斯弧地壳生长与再造的构造机制。

基金项目：国家自然科学基金(批准号：91855210)

第一作者简介：李文坛(1995-)，博士研究生，研究方向：变质岩岩石学。E-mail: liwentan2018@163.com

*通信作者简介：张泽明(1961-)，研究员，研究方向：造山带组成与构造演化。E-mail: zzm2111@sina.com

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

冈底斯西段麻木早白垩世花岗岩岩石成因及地质意义

刘畅^{1,2}, 杨竹森^{2*}

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

青藏高原冈底斯带作为全球最典型的大陆碰撞造山带之一, 发育有大量的岩浆岩, 而近年对于冈底斯带西部中生代岩浆作用的源区、成因及演化等问题研究较少。革吉县麻木铅锌矿化区是中冈底斯成矿带(中拉萨地块)西段南缘近年发现的一个矽卡岩型铅锌矿化区, 矿化产于花岗斑岩与灰岩外接触带的矽卡岩内。本文对研究区内花岗斑岩和流纹质晶屑凝灰岩进行了详细的年代学、岩石学、岩石地球化学、锆石微量元素和锆石 Hf 同位素研究, 综合讨论了岩浆成因及源区深部过程。

麻木研究区内的花岗斑岩结晶时代为 (117.6 ± 0.4) Ma, 表明与花岗斑岩侵入活动相关的矽卡岩型铅锌矿化时代属于早白垩世; 流纹质晶屑凝灰岩的时代为 (119.7 ± 0.5) Ma, 结合其蚀变较强以及劈理普遍发育的现象, 应归属于则弄群(J3K1Z), 而不应归入 1: 25 万亚热幅地质图上所填的典中组(E1d)。两套岩浆岩均属于钾玄岩系列 I 型花岗岩, 富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损高场强元素和 Eu, 具有较高负值的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 分别为 $-9.57 \sim -3.43$ 和 $-8.79 \sim -6.68$, 以及较古老的 Hf 同位素地壳

模式年龄 TDM2, 分别为 1389 ~ 1775Ma 和 1477 ~ 1728Ma, 属于早白垩世同期岩浆作用的产物。指示研究区早白垩世岩浆岩源于古老下地壳物质的重熔, 并有少量地幔物质的加入, 经历了岩浆混合后角闪石、长石和黑云母等矿物的分离结晶, 最终形成了花岗斑岩和流纹质晶屑凝灰岩。

前人对于拉萨地块岩浆岩的年代学研究资料显示, 拉萨地块北部的岩浆作用活动时间范围多是 160 ~ 150Ma, 中部的岩浆作用活动时间范围多是 140 ~ 130Ma (Zhu et al., 2009; Zhu et al., 2013; Zhu et al., 2016; 姜昕等, 2010), 而拉萨地块南部并未发现白垩世的岩浆作用。本次的研究区位于中拉萨地块南缘, 花岗斑岩和流纹质晶屑凝灰岩分别形成于 117.6 Ma 和 119.7Ma, 符合这一时空变化规律。故认为研究区早白垩世岩浆作用的主要诱发机制可能为南向俯冲的班公湖—怒江洋板片回转。同时, 对于大陆碰撞成矿, 麻木铅锌矿化点作为早白垩世铅锌矿化事件, 对于补充冈底斯金属成矿带西段铅锌成矿作用研究以及完善多期铅锌成矿事件的认识具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 92062105), 国家自然科学基金(批准号: 91855214)

第一作者简介: 刘畅(1996-), 硕士研究生, 研究方向: 成因矿物与找矿物研究. E-mail: 314996593@qq.com

*通信作者简介: 杨竹森(1964-), 研究员, 研究方向: 矿床学与矿物地球化学研究. E-mail: yangzhusen@vip.sina.com

· 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 ·

角闪石分离结晶：弧岩浆自氧化和富沃的一种重要方式

王瑞^{*}，张京渤，洪俊

1. 中国地质大学（北京）北京 100083；
2. 西安地调中心 西安 710054

弧岩浆是大陆地壳形成的主要贡献者，具有比 MORB 更高的氧逸度，但这种氧化属性究竟是来自于地幔楔源区还是在其上升过程中逐步形成仍存在广泛争议。Fe 作为地壳中丰度最高的变价元素，其价态的变化可以反映岩浆的相对氧化还原状态，富 Fe 矿物的分离结晶可以改变残余熔体的 Fe 价态。角闪石和石榴子石是下地壳堆晶中常见的富 Fe 矿物，我们通过对巴基斯坦 Kohistan 弧下地壳堆晶中的角闪石和石榴子石开展高精度穆斯堡尔谱 Fe 价态分析发现，随着初始岩浆的分离结晶，堆晶的全岩 $Fe^{3+}/\sum Fe$ 从 0.4 降至 0.2，与角闪石从 0.35 降至 0.2 相似，而石榴子石的 $Fe^{3+}/\sum Fe$ 则没有发生较大改变，这说明弧岩浆中 $Fe^{3+}/\sum Fe$ 的变化主要受控于角闪石。同时堆晶的 $Fe^{3+}/\sum Fe$ 随岩浆的演化呈现出降低趋势，这使得残余熔体中的 $Fe^{3+}/\sum Fe$ 会随岩浆演化

而增加。这一点也在大数据中得到了印证，汤加岛弧和安第斯大陆弧的 $Fe^{3+}/\sum Fe$ 均随 Mg# 的降低而升高，与此同时 Dy/Yb 比值随 SiO_2 的降低而降低，这都表明了角闪石对于弧岩浆氧化属性的控制作用。分离结晶模拟也表明，当原始岩浆的 $Fe^{3+}/\sum Fe$ 大于 0.2 时，角闪石的分离结晶可使残余熔体的 $Fe^{3+}/\sum Fe$ 升高 0.1~0.3。同时，角闪石对残余熔体 $Fe^{3+}/\sum Fe$ 的提升能力随着岩浆的演化逐渐增强。我们认为角闪石在深部的堆晶作用和浅部潜在的分离结晶作用造成了弧岩浆的分步氧化。斑岩矿床普遍和富水高氧逸度的弧岩浆密切相关，角闪石分离结晶不仅是岩浆富水的一个重要指示，也有利于岩浆变得更氧化，这对于演化的岩浆富沃成矿意义重大。我们的工作强调了岩浆的内部作用特别是岩石学作用在形成富沃弧地壳的重要性。

· 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 ·

东准卡拉麦里晚古生代新生地壳“阶段式”生长机制

任文林¹, 张博文^{1,2*}, 苏春媚¹

1. 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆乌鲁木齐, 830049;

2. 新疆大学中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆乌鲁木齐, 830049

卡拉麦里花岗岩带位于新疆北部东准噶尔造山带中, 是中亚造山带内重要的构造单元之一, 整体以北西向条带状岩基产出, 主要由卡姆斯特、老鸦泉、贝勒库都克、萨北、黄羊山及苏吉泉 6 个岩体构成。据卡拉麦里花岗岩带锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学及 Nd-Hf 同位素特征显示, 该岩带是准噶尔板块东缘晚古生代新生地壳垂向生长的产物, 且反映出其新生地壳独特的生长机制。该带内花岗岩呈现高硅 ($\text{SiO}_2=62.62\sim 79.83\%$)、过碱性-碱性 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=5.63\sim 10.37\%$)、准铝质-弱过铝质 ($A/\text{CNK}=0.69\sim 1.18$) 及贫钙镁特征; 强烈亏损 Sr、Ba、Eu、Sc 元素, 富集 Hf、Rb、Y、Zr 元素; REE 配分曲线

均呈深“V”型的左倾趋势, 具明显负铕异常。该岩带岩浆活动时限为 324Ma~304Ma, 呈现自西向东由老到新的趋势, 并获得该岩带 14 组全岩 Nd 的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值介于 5.06~3.56, 显示出从西端卡姆斯特岩体至东端苏吉泉岩体的 Nd(t) 值逐渐减小且 $T_{2\text{DM}}$ 值逐步增大的规律。最终结合 $\epsilon\text{Nd}(t)-t(T_{2\text{DM}})$ 、Sr-Yb 及 Zr-T($^{\circ}\text{C}$)-Gd/Yb 图解判断, 卡拉麦里地区新生地壳在西端卡姆斯特岩体处垂向生长量最大, 老鸦泉及贝勒库都克岩体处新生地壳垂向生长量减少, 而于黄羊山岩体处又明显增大, 最后在东端苏吉泉岩体处新生地壳生长量呈减少趋势, 总体上该地区晚古生代新生地壳呈现自西北向东南“阶段式”生长的机制。

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金 (2021D01C042)

第一作者简介: 任文林 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: 326713032@qq.com

*通信作者简介: 张博文 (1984-), 讲师, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: 54392171@qq.com

· 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 ·

大陆弧石榴辉石岩的铜同位素组成

黄建, 文秋玉, 方舒彬, 黄方

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 中科院壳幔物质与环境重点实验室

板块汇聚边缘是大陆地壳增生的主要场所, 而大陆弧岩浆岩的原始成分是玄武岩质的, 与大陆地壳的长英质成分不符, 说明大陆弧岩浆演化在塑造大陆地壳成分方面起到关键作用。相比洋中脊玄武岩, 大陆地壳的一个显著特点是亏损铜 (Cu) 和富集重 Cu 同位素。考虑到硫化物极度富集 Cu ($D_{\text{sulfide-melt}} \approx 800$), 硫化物分离结晶被认为是导致大陆地壳亏损 Cu 的一级控制因素。高温高压实验结果显示, 硫化物相比玄武质熔体富集轻 Cu 同位素, 暗示硫化物分离结晶可能是大陆地壳富集重 Cu 同位素的重要机制。但是, 目前并没有有力的证据支持这一推测。

美国亚利桑那和加利福尼亚州内华达的石榴辉石岩是大陆弧岩浆深部堆晶形成。这些石榴辉石岩具

有非常高的 Cu 含量, 是一个富集 Cu 的储库。随着大陆弧不断增厚, 石榴辉石岩发生榴辉岩相变质作用, 密度超过地幔橄榄岩, 最终会拆沉进入地幔。因此, 掌握石榴辉石岩的 Cu 同位素组成将会帮我们解决 (1) 大陆地壳富集重 Cu 同位素的原因和 (2) 大陆地壳安山质成分的形成过程。

分析结果显示, 石榴辉石岩总体具有偏轻的 Cu 同位素组成 (-3.5 ~ 0.64‰) 和偏高的 Cu 含量 (8.6 ~ 928 ppm), 说明石榴辉石岩形成过程中, Cu 同位素发生了显著的分馏。大陆弧深部堆晶岩非常富集 Cu 和轻 Cu 同位素, 证实在大陆弧演化过程中, 硫化物的分离结晶导致高演化的岩浆亏损 Cu 和轻 Cu 同位素, 最终导致大陆地壳亏损 Cu 和富集重 Cu 同位素。

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

岩浆作用揭示的冈底斯弧深部地壳演化

赵志丹^{1*}, 朱弟成¹, 侯增谦^{2,3}, 张泽明^{1,2}, 莫宣学¹

1. 中国地质大学, 北京, 100083;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100029;

3. 国家自然科学基金委员会, 北京 100083

近年来, 对青藏高原拉萨地块, 尤其是拉萨地块南缘 (冈底斯弧) 中生代到中新世的不同时期 (~200Ma、90~100Ma、40~50Ma、10~23Ma) 岩浆作用开展了系统研究 (如许伟, 2019, 博士论文; Xu Wei et al, 2019, JP; Huang Feng, et al., 2019, Lithos; Ma Lin, 2013, Lithos; 张泽明等, 2019, 岩石学报; 侯增谦等, 2020, 地质学报; Wang Zhenzhen et al., 2020; Zhu et al., 2018, GSL; 赵志丹未发表资料)。

综合研究揭示了早中生代冈底斯弧地壳的分异过程与下地壳 (岩浆弧基底) 的性质、90~100Ma 部分熔融作用、40~50Ma 大规模岩浆作用、中新世地幔-地壳多层圈岩浆作用, 探讨了与上述岩浆作用同期的成矿作用耦合关系, 揭示了下地壳的形成、演化、成矿作用, 以及下地壳加厚及其伴随的高原地表隆升历史, 为揭示青藏高原主碰撞带的构造-岩浆-成矿综合地质作用提供了重要约束。冈底斯弧中段到东段, 中生代 (~200Ma) 岛弧发育连续、广泛, 以角闪石为主的堆晶下地壳可能是它的主要特色, 为中生代晚

期一直到新生代的岩浆作用、下地壳变质作用、成矿作用等过程奠定了物质基础。

中生代冈底斯弧结构具有重要的成矿意义。研究表明 (Chiaradia et al., 2013, NG) 岛弧地壳厚度决定岩浆作用类型和含 Cu 的多少, 火山岩 Cu 含量决定于岛弧厚度 (厚地壳的 Cu 少, 薄地壳 Cu 多), 厚地壳产出的岛弧岩浆的 Cu 囤积在下地壳底侵岩石中。而中生代时期冈底斯弧为厚岛弧地壳, 厚岛弧地壳喷出地表的火山岩含 Cu 少, 而与之配套的底侵在岩浆弧底部的堆晶岩石 (超基性-基性岩石, 崔久堆晶岩) 含 Cu 高 (150~1326 ppm, Xu et al, 2019, JP)。

冈底斯弧基底富含角闪石、富水、富集 Cu 等成矿元素的下地壳为白垩纪之后多期埃达克质岩石 (90~100Ma、30~50Ma、10~20Ma) 的岩浆作用形成、含 Cu-Mo 斑岩形成, 提供了富饶的岩石源区、成矿流体和成矿金属。岛弧体系的下地壳再循环是中新世 Cu 成矿的重要源区, 碰撞造山型下地壳与岛弧增生期的岩浆作用显示了明显的物质成分继承性 (Hou et al., 2015; 侯增谦等, 2020; 张泽明等, 2019)。

· 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 ·

内蒙古科右中旗早白垩世 O 型埃达克岩岩浆 起源及其构造意义

田丽¹, 孙德有^{1,2*}, 苟军¹

1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061;

2. 自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室, 长春 130061

大兴安岭南段晚中生代岩浆活动剧烈, 一直以来都是研究热点。本文对内蒙古科右中旗西哲里木闪长岩体开展了详细的岩相学、年代学、全岩地球化学以及锆石 Hf 同位素分析等测试工作, 以确定该闪长岩体的形成时代、岩石成因及地球动力学机制。地质学和岩相学研究表明西哲里木闪长岩体具有明显的岩相分带: 中心岩相带由中细粒黑云母辉石二长闪长岩和辉石角闪闪长岩组成; 边缘岩相带由细粒角闪辉石闪长岩组成。锆石 U-Pb 测年显示中心带和边缘带岩石样品年龄分别为 $133.9 \pm 1.8\text{Ma}$ 和 $133.4 \pm 1.4\text{Ma}$, 说明闪长岩体形成于早白垩世; 全岩主量、微量元素

表现出 O 型埃达克岩的特征。基于锆石 Hf 同位素组成 ($\epsilon_{\text{Hf}(t)} = +7.7 \sim +10.0$) 和全岩地球化学特征, 我们使用了部分熔融模型来进一步限制岩浆起源。我们选择蚀变洋壳和俯冲沉积物 (GLOSS-II) 作为岩浆源区组成。结果表明, 西哲里木闪长岩的初始岩浆可以在石榴-角闪岩相条件下由蚀变洋壳和俯冲沉积物混合部分熔融形成。早白垩世早期, 大兴安岭南段广泛分布有加厚下地壳成因和俯冲洋壳成因的埃达克岩以及 A 型花岗岩, 这些共生的岩石组合在伸展构造背景产出, 可能受到蒙古-鄂霍茨克洋闭合后造山塌陷引起的伸展和古太平洋板块回撤双重构造背景的影响。

基金项目: 中国铀业有限公司项目 (批准号: 202003)

第一作者简介: 田丽 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 岩浆作用与成矿. E-mail: 1318250308@qq.com

*通信作者简介: 孙德有 (1965-), 教授, 研究方向: 火成岩岩石学、岩浆作用与成矿. E-mail: sundy@jlu.edu.cn

· 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 ·

西藏冈底斯东段朗县同碰撞富角闪石镁铁质-超镁铁质岩成因及其意义

王睿强^{1,2}, 朱弟成^{1*}, 王青¹, 赵志丹¹

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

2. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059

地壳深部富角闪石镁铁质-超镁铁质岩一般形成于流体活动强烈的俯冲环境, 近年来在弧岩浆的成因和演化以及大陆地壳的形成研究中备受关注。本文首次报道了西藏冈底斯东段朗县地区发现的同碰撞角闪石岩和角闪辉长岩, 并结合与其具有密切时空联系的花岗质岩石, 进行了系统的全岩元素地球化学测试和矿物原位微区分析。

锆石 U-Pb 定年结果显示, 角闪辉长岩和花岗质岩石的形成年龄均为~52 Ma, 与冈底斯同碰撞岩浆活动大爆发(55-45 Ma)同期。角闪石岩具有典型的堆晶结构, 主要由角闪石和少量粒间斜长石(<5%)组成。角闪辉长岩主要由角闪石(60-90%)和斜长石(10-40%)组成, 斜长石形态多样, 可充填于角闪石间隙、可被角闪石包裹, 或呈半自形-自形与角闪石形成梳状结构。两类岩石中的角闪石均呈自形-半自形粒状, 具有深黄-褐的多色性。花岗质岩石包括英云闪长岩和二长花岗岩, 以岩株的形式产出, 出露规模较小, 仅~50 km²。

化学成分上, 同碰撞富角闪石镁铁质-超镁铁质岩

和花岗质岩石的全岩主微量元素与俯冲期幔源含水岩浆结晶分异形成的堆晶岩和派生熔体类似。此外, 富角闪石镁铁质-超镁铁质岩中角闪石平衡熔体的主微量元素也与花岗质岩石一致, 表明同碰撞富角闪石镁铁质-超镁铁质岩与花岗质岩石分别为同一结晶分异过程中形成的堆晶岩和派生熔体。然而, 与俯冲期富角闪石堆晶岩相比, 同碰撞该类岩石中角闪石结晶时的压力和水含量均偏低, 导致角闪石结晶相对被抑制。角闪石平衡熔体具有 Eu 负异常、其 Sr 含量随 SiO₂ 含量增加而降低以及斜长石 An 值和 La、Sr 含量均记录了斜长石优先于角闪石结晶的过程。因此, 同碰撞富角闪石镁铁质-超镁铁质岩是相对贫水的幔源初始岩浆演化至安山质岩浆后在较低压力条件下结晶分异形成的堆晶岩, 其互补的分异产物花岗质岩石规模较小。

综上所述, 本文识别出了冈底斯同碰撞期以角闪石为主导的结晶分异过程, 但该过程对冈底斯地壳的生长贡献有限。冈底斯同碰撞岩浆活动大爆发仍以幔源岩浆底侵及由此诱发的大规模地壳重熔为主, 对冈底斯地壳的成熟起到了关键作用。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(42102044), 国家自然科学基金委创新群体项目(42121002)

第一作者简介: 王睿强(1990-), 讲师, 研究方向: 岩浆作用与青藏高原形成. E-mail: vickwrq2008@163.com

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

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

弧岩浆富磷灰石铁镁质堆晶的拆沉导致陆壳磷亏损

蔡荣华¹, 刘金高^{1*}, 孙瑶¹, 高若菡¹

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

大陆地壳的微量元素异常对于我们了解大陆地壳的形成与演化有重要的意义。我们发现上、中、下地壳的微量元素配分曲线皆具有明显的磷负异常, 并且这种现象不可能通过地幔的部分熔融产生。为了破解这一“地壳成分难题”, 我们对全球新生代的弧岩浆、岩浆矿物及弧堆晶数据进行了详细的搜集整理, 进而发现大陆地壳磷的亏损程度与 Th/La 比值具有明显的负相关性。这一现象不能通过俯冲板片物质的加入进行解释, 而是由于弧岩浆演化过程中磷灰石的结晶所导致的。富磷灰石的镁铁质堆晶在深部岛弧的聚集与之后的拆沉导致了地幔与大

陆地壳在磷系统上的不匹配。结合之前对岛弧地区富石榴子石辉石岩堆晶的研究, 我们认为低 Mg# 的堆晶岩最可能代表与大陆地壳互补的储库, 这种堆晶岩可以解释大陆地壳的诸多元素异常(例如: Cu/Ag, Nb/Ta 和 P/Nd)。此外我们发现冰碛岩的 Th/La 比值可以很好地反映不同地质时期地壳的演化程度, 太古代冰碛岩的 Th/La 略高于地幔值, 而後太古代样品则具有高度变化的 Th/La 并且其均值与现今估计的地壳值一致, 这说明後太古代地壳经历了更强烈的磷灰石分异作用, 可能标志着俯冲作用的开始。

基金项目: 42121002, 41730214

第一作者简介: 蔡荣华(1998-), 博士研究生, 研究方向: 地幔地球化学与地壳演化. E-mail: ronghua@cugb.edu.cn

*通信作者简介: 刘金高(1984-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: jingao@cugb.edu.cn

· 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 ·

腾冲大六冲火山岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf-O 同位素研究

童杰¹, 邹海波²

1. 陕西省西安市西北大学地质系, 西安 710069

青藏高原及其边缘的碰撞后火山岩包含与新生代大陆-大陆碰撞相关的地球动力学过程的宝贵信息。腾冲火山区位于我国云南省西部和缅甸交界处的腾冲县境内, 既有黑空山、打鹰山、马鞍山等一系列晚第四纪新期火山, 也有早更新世以来有过喷发活动的大六冲等。目前年轻火山锆石用激光铀铅定年的研究比较少, 本文研究了西藏东南腾冲火山场一座更新世火山大六冲锆石的锆石 U-Pb 定年和 Hf-O 同位素组成, 并提供了大六冲熔岩的主微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位

素, 以了解其岩浆成因和演化。本文用 Tera-wasserburg 图解法得出大六冲火山岩的锆石 U-Pb 年龄为 0.196Ma、0.504Ma、0.537Ma, 显示中更新世的 2 次喷发。大六冲火山岩属于英安岩、高钾钙碱性系列。其稀土元素特征为富集轻稀土 (LREE) 的右倾模式, 存在 Th 和 Pb 的正异常, 及 Nb、Ta、Sr、Eu 的负异常, 综合全岩 Sr-Nd-Pb 同位素和锆石 Hf-O 同位素等地球化学研究分析, 腾冲大六冲火山岩岩浆源区可能是 EM II 型富集地幔, 受地壳物质和分离结晶作用的影响。

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

班公湖-怒江特提斯洋在约 150 Ma 从南向前进型俯冲转变为后撤型俯冲的岩浆记录

安宇¹, 李世民¹, 朱弟成^{1*}, 王青¹, 谢锦程¹, 张亮亮¹

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

在增生造山带, 识别前进型和后撤型俯冲带以及厘定二者转换的时间和过程对于理解造山带的演化和大陆地壳的生长和稳定具有重要意义。本文以中部拉萨地体侏罗-白垩纪岩浆岩为对象, 通过揭示岩浆岩成分随时间的变化, 结合区域地质资料, 探讨了青藏高原拉萨地体在中中生代的俯冲类型和方向。

本文样品来自中部拉萨地体西部麻米地区, 结合中部拉萨地体其它 5 个不同地区的中生代岩浆岩数据, 识别出了两套成分不同的岩浆岩组合: (1) 中-晚侏罗世高镁闪长岩-花岗闪长岩 (约 172–150 Ma) 和 (2) 早白垩世低镁花岗闪长岩-正长花岗岩 (约 150–130 Ma)。高镁岩石具有低的 SiO_2 (55.7–70.7 wt.%), 高的 Mg\# (39–67) 和富集的锆石 Hf 同位素组成 (-17.8 ~ -5.5); 低镁岩石具有高的 SiO_2 (63.0–78.8 wt.%), 低的 Mg\# (29–51) 和相对亏损的锆石 Hf 同位素组成 (-14.4 ~ -0.1)。二元混合模拟计算表明: 高镁岩石可能是由中拉萨地体基底起源的岩浆 (75–50%) 与俯冲沉积物交代的地幔楔起源

岩浆 (25–50%) 混合形成; 低镁岩石可能起源自混合的下地壳 (古老基底和初生地壳), 地幔贡献比例较低 (10–30%), 混合后的母岩浆在侵位期间发生了以斜长石、钾长石、角闪石和黑云母为主的结晶分异。

高镁和低镁岩石均为钙碱性系列, 具有富集大离子亲石元素, 亏损高场强元素的弧岩浆岩的特征, 形成了东西跨度约 1200 km 的狮泉河-折古-门巴岩浆弧。结合拉萨地体中生代岩浆作用的时空分布以及区域上的构造-沉积记录, 本文认为新特提斯和班公湖-怒江特提斯洋岩石圈在中中生代均俯冲到拉萨地体之下, 形成了两个相向的俯冲带。中拉萨地体狮泉河-折古-门巴弧在约 150 Ma 从高镁系列岩浆向低镁系列岩浆的转变, 很可能记录了班公湖-怒江特提斯洋板片南向前进型向后撤型俯冲的构造转换。

本文的结果表明, 通过岩浆岩的时空分布和岩浆成分随时间的变化, 可以识别古老造山带的俯冲极性和类型, 为研究其他古老造山带的演化提供了一个案例。

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体项目 (批准号: 42121002), 国家自然科学基金委青年科学基金项目 (批准号: 41902047)

第一作者简介: 安宇 (1995), 男, 博士, 研究方向: 岩浆作用与特提斯演化研究. E-mail: AnYu719@163.com

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

· 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 ·

碎屑锆石深度剖面揭示冈底斯岩基大规模重熔始于 70Ma

刘力¹, 朱弟成¹, 王青², 张亮亮¹

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

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

重建冈底斯岩基的重熔历史对于理解大陆地壳的形成与演化有着重要的意义。最新研究成果表明, 冈底斯岩基在洋壳俯冲期形成大量铁镁质-超铁镁质的堆晶岩, 而大规模部分熔融自俯冲晚期开始, 一直持续到碰撞期。针对冈底斯岩基的野外观察、地质年代学、地球化学的证据综合表明, 在 70Ma 左右冈底斯岩基开始发生大规模重熔。

本次研究提供了一种全新的研究路径, 即利用流经冈底斯岩基河流中的碎屑锆石的年龄与微量元素深度剖面去揭示冈底斯岩基的重熔历史。分布于 87–95°E 的由北向南流向的 12 条河流中的 1483 颗碎屑锆石的年龄以及微量元素数据以及 278 对锆石核边年龄组合用来全面刻画冈底斯岩基演化历史。

数据显示, 边部年龄为 110–70Ma 的具有核边结构的锆石非常少, 而从 70Ma 开始, 边部年龄为 70–10Ma 的具有核边结构的锆石非常多。暗示着 70Ma 的确是冈底斯岩基大规模重熔的开始时间。同时, 从同碰撞的开始阶段(60Ma), 锆石的 Eu/Eu^* 从最低值 0.2 一直稳步增加到 15Ma 时的 0.55, 预示着冈底斯岩基从同碰撞期开始地壳的持续增厚。

相比于针对冈底斯岩基的原位采样, 流经冈底斯岩基的河道流域, 由于其覆盖面积广, 采样偏差小, 因此其所展示的数据结果更加全面。河道沙中碎屑锆石针对冈底斯岩基重熔和地壳演化的研究结果, 跟前人基于岩基样品的分析结果基本一致, 预示着碎屑锆石深度剖面研究造山带多期次岩浆-构造运动这种新的研究路径的可靠性。

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

大陆浅俯冲对冈底斯带东南部斑岩成矿的构造-岩浆控制

周秋石¹, 王瑞^{1,2*}

1. 中国地质大学(北京)科学研究院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国地质科学院 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100037

位于青藏高原南部的冈底斯斑岩成矿带赋存了一系列形成于后碰撞时期的斑岩型 Cu-Mo 矿床。有别于传统的大洋俯冲背景斑岩矿床, 形成这些后碰撞斑岩矿床的深部动力学机理还有待进一步研究。多数后碰撞斑岩矿床集中于 90–92°E 的经度区间, 前人的地震成像表明这些矿床下方存在较高的热异常, 由俯冲的印度岩石圈发生撕裂导致。撕裂的印度岩石圈为热的软流圈上涌提供了窗口, 并为西藏岩石圈下地壳发生部分熔融形成成矿岩浆提供了必要的热源。需要指出的是, 同样由地震层析剖面揭示的, 伴随着印度岩石圈撕裂, 各地区的印度岩石圈存在俯冲角度上的差异。例如 90–92°E 内的后碰撞斑岩矿床下方的印度板片俯冲角度较陡, 这为上涌的软流圈与西藏岩石圈发生能量交换提供了必要的空间条件。

然而, 近 20 年来在 93°E 发现的新的后碰撞斑岩矿集区-集中于工布江达县的得明顶、汤不拉、吹败子后碰撞斑岩型 Cu-Mo 矿床引起了部分学者的关注。有别于 90–92°E 下方的陡俯冲印度板片, 这些矿床下方的印度板片俯冲角度较小, 为浅俯冲, 因此缺乏软流圈提供热源的条件。针对印度大陆浅俯冲的构造-岩浆响应及其与斑岩成矿事件的联系, 我们采集了靠近缝合带的来自林芝的贫矿埃达克质岩(一种普遍认为在碰撞背景下起源于下地壳的岩石), 以及远

离缝合带的来自得明顶、汤不拉的成矿埃达克质岩的相关全岩与锆石数据进行研究。

研究表明, 来自得明顶、汤不拉的埃达克岩具有相对低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.7059–0.7068)、以及相对高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (–3.27 – –1.70), 以及更高的强相容元素含量(Ni 平均 20.1 ppm, Cr 平均 43.4 ppm), 表现出相比于林芝更显著的年轻地幔特征($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.7059 – 0.7085, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ = –6.20 – –2.90, Ni 平均 4.07 ppm, Cr 平均 5.84 ppm)。此外, 成矿埃达克质岩还具有一些富水和高氧逸度的地球化学特征, 如 Dy/Yb 同 SiO₂ 之间的负相关关系指示富水的角闪石分离结晶, 而不成矿岩石的正相关关系指示石榴石分离结晶; 此外锆石氧逸度计算成矿岩石具有约 $\Delta\text{FMQ}+2$ 的平均氧逸度, 相比于不成矿的 $\Delta\text{FMQ}+0$ 等等。一系列证据表明, 成矿斑岩很可能利用了大洋俯冲期预先富集水、氧逸度等条件的弧下地壳的物质。大洋俯冲为弧下地壳提供的富集物质未能立刻促使成矿事件, 而是储存在了地壳, 在后期印度大陆的浅俯冲造成的物理条件变化下被重新激活, 并最终形成成矿岩浆, 促成成矿事件。近缝合带的贫矿体系, 其源区主要为来自西藏或喜马拉雅的古老地壳物质, 且在俯冲期未受充分改造, 因而未能具备足够的成矿物质富集条件。

基金项目: 国家重点研发项目(2022YFF0800902), 国家自然科学基金(No. 41973037), 深地科学与探测技术实验室开放基金项目(202204)

第一作者简介: 周秋石(1999–), 博士, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: zhouqiushi121@gmail.com

*通信作者简介: 王瑞(1986–), 教授, 研究方向: 大陆碰撞岩浆作用和斑岩成矿作用. E-mail: rw@cugb.edu.cn

· 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 ·

藏南冈底斯岩基内中新世岩脉的地球化学特征及成因研究

李丽婵¹, 赵志丹^{1*}, 唐演¹

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083

在冈底斯南部发育的中新世岩脉具有不同的产状、年龄, 蕴含了岩浆作用和构造作用的双重信息, 对于构造岩浆事件的识别和揭示冈底斯弧演化、印度与亚洲大陆的碰撞过程, 以及碰撞导致的高原应力状态变化等都具有重要的意义。为了对比藏南冈底斯岩基内东西岩脉的差异, 本文在东部的拉萨地区和西部的谢通门地区分别对花岗岩体内岩脉进行了采样, 并进行了锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素和全岩主量和微量元素的测定和系统研究。研究表明: (1) 拉萨和谢通门地区的中新世岩脉在主微量元素上有相似的特征, 岩性主要为闪长岩、石英闪长岩、闪长玢岩和花岗闪长岩 ($\text{SiO}_2=56.60\%\sim 66.95\%$)。岩石具

有较高的 Sr/Y 值 (21~171) 和 La/Yb (10~35), 显示出埃达克质岩石的特点。(2) 拉萨地区岩脉的锆石 U-Pb 年龄为 $13.8 \pm 0.2\text{Ma} \sim 16.2 \pm 0.3\text{Ma}$, 锆石原位 Lu-Hf 同位素测试显示样品 $\delta\text{Hf}(t)$ 为 +4.5 ~ +9.8。谢通门地区岩脉的锆石 U-Pb 年龄为 $14.5 \pm 0.2\text{Ma} \sim 15.3 \pm 0.3\text{Ma}$, 锆石原位 Lu-Hf 同位素测试显示样品 $\delta\text{Hf}(t)$ 为 -2.6 ~ +15.0。(3) 藏南冈底斯岩基内东部中新世岩脉的成因为加厚新生下地壳的部分熔融, 西部中新世岩脉的主体是由新生下地壳的部分熔融形成的, 但在岩浆形成过程中有印度陆壳物质的加入。结合前人的研究工作, 冈底斯岩基内中新世岩脉的形成在深部动力学背景上可能受控于下地壳的拆沉作用。

基金项目: 西藏拉萨地块南缘白垩纪以来岩脉成因与构造意义 (42073035)

第一作者简介: 李丽婵 (2000-), 研究生, 研究方向: 岩浆深部熔融. E-mail: llc973963473@163.com

*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. E-mail: zdzhao@cugb.edu.cn

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

藏南日喀则弧前盆地内中新世岩墙群的成因与构造意义

唐演¹, 赵志丹^{1*}

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083

青藏高原南部的日喀则弧前盆地位于冈底斯岩浆弧与雅鲁藏布江缝合带之间, 记录了从新特提斯洋北向俯冲到印度-欧亚大陆碰撞(白垩纪-中新世)过程中的沉积-构造-岩浆活动信息。本团队近年来在日喀则弧前盆地内发现一系列中新世岩墙群, 包括东西向岩墙群和南北向岩墙群, 侵入弧前复理石地层和上部磨拉石地层中, 主要分布于日喀则到昂仁一带 200km 范围内。其中, 东西向岩墙群以包含斜长石和角闪石斑晶的闪长玢岩为主, 还有极少量花岗岩; 南北向岩墙群以细粒闪长岩为主, 部分岩墙含有少量细粒斑晶, 在昂仁西还有部分超钾质岩脉。在一处典型剖面, 南北向岩墙被东西向闪长玢岩岩墙穿切, 并有典型的南北向高角度正断层切断了东西向岩墙。本文对弧前盆地内的这些岩墙群开展了系统的年代学、地球化学和锆石 Hf 同位素研究, 探究其岩石成因与构造意义, 增加了对青藏高原新生代演化过程的认识。

系统的锆石 U-Pb 年代学工作表明, 东西向岩墙的侵位年龄为 15.4~13.1 Ma, 南北向岩墙的侵位年龄为 14.8~10.8 Ma, 与其他学者对弧前盆地内部分岩墙的定年结果(14.9~11.8 Ma)一致。东西向岩墙与南北向岩墙都表现出北部岩墙年龄老于南部岩墙的特征, 但在年龄误差范围内, 二者属于同期岩浆活动的产物。两类岩墙的闪长岩质部分在地球化学上具有很强的相似性, 除去个别 CaO 含量高的样品, 其余岩

墙都属于钙碱性-高钾钙碱性系列岩石, 准铝质-弱过铝质, SiO₂ 含量为 55.92~65.33%, 并且都具有高 Sr 低 Y、高 Sr/Y (86~251)、高 La/Yb (17~78) 的埃达克质地球化学特征。弱过铝质的钙碱性东西向花岗质岩墙(SiO₂=71%)则具有极高的 Sr/Y (313~358)。这些岩墙的轻重稀土分异明显, 富集轻稀土, 亏损重稀土, 未显示 Eu 负异常; 明显富集 Th、U、K、Sr 等元素, 而亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素。东西向岩墙 130 颗中新世原生锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为 -6.1 ~ +6.9, 平均值为 +3.5, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值的锆石占比为 7%, 地幔模式年龄范围为 399~923 Ma, 平均值为 532 Ma。南北向岩墙 38 颗中新世原生锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围为 -1.1 ~ +12.8, 平均值为 +3.8, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值的锆石占比为 5%, 地幔模式年龄范围为 162~731 Ma, 平均值为 519 Ma。上述特征表明, 两类岩墙具有相似的源区, 很可能是加厚的新生下地壳, 并有极少量印度陆壳物质的贡献。结合藏南区域上有关后碰撞中新世埃达克质岩石的研究, 本文认为加厚镁铁质下地壳的熔融很可能是拉萨地体加厚岩石圈的拆沉作用导致。拆沉在深部与浅部都发生了响应, 深部表现为软流圈上涌、超钾质岩浆活动、加厚下地壳部分熔融形成埃达克质岩浆等, 浅部则表现为区域上的东西向伸展。表现在日喀则弧前盆地, 则是 15~11 Ma 之间发生的东西向和南北向埃达克质岩墙群侵入以及同期的正断层作用。

基金项目: 西藏拉萨地块南缘白垩纪以来岩脉成因与构造意义(42073035)

第一作者简介: 唐演(1994-), 博士研究生, 研究方向: 岩浆作用与深部过程. E-mail: cugbtonytang@126.com

*通信作者简介: 赵志丹(1968-), 教授, 研究方向: 岩浆作用与深部过程. E-mail: zdzhao@cugb.edu.cn

• 专题 9: 大陆碰撞带岩浆成因与地壳演化 •

西藏雄巴地区晚侏罗世花岗岩年代学、 地球化学和岩石成因

徐晓彤¹, 赵志丹^{1*}, 唐演¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

在拉萨与羌塘地块碰撞、印度与欧亚大陆碰撞, 以及班公湖-怒江洋和新特提斯洋的俯冲消减等一系列地质过程中, 形成了现今暴露在青藏高原上的大量的中生代和新生代岩浆作用记录。对这些岩浆岩进行系统研究, 对于揭示青藏高原构造演化历史和地球动力学过程具有重要意义。西藏中拉萨地块西段大规模侏罗纪-白垩纪花岗岩类的成因类型及构造背景尚未得到有效约束, 该时期岩浆作用的时空分布、岩石成因以及深部动力学机制等问题亟需新的深入研究。本文针对中拉萨地块西部革吉县雄巴乡的中酸性花岗岩体进行了地球化学、锆石 U-Pb 年代学、锆石 Hf 同位素研究。研究表明: (1) 雄巴色卡剖面花岗岩和花岗闪长质包体的锆石年龄分别为 150~146 Ma 和 149 Ma, 表明该区花岗岩为晚侏罗世岩浆活动的产物。(2) 寄主花岗岩的 SiO₂ 含量为 70.41~78.15%, 花岗闪长质包体 SiO₂ 含量为 66.94~69.10%, 与寄主花岗岩相比表现出更偏中基性的特征。二者都属于 I 型过铝质高钾钙碱性系列岩石。在球粒陨石标准

化稀土元素配分模式图中, 寄主花岗岩与花岗闪长质包体显示出负 δEu 异常。在原始地幔标准化的微量元素成分图中, 寄主花岗岩和花岗闪长质包体表现出相似的微量元素特征, 富集 Rb、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 显示出弧岩浆的特征。(3) 雄巴地区花岗岩锆石具有较负且变化范围大的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-11.7~-6.8), 指示其可能来源于拉萨地块古老下地壳物质的重熔作用。在革吉-雄巴地区本文所采样品附近, 已有前人研究发现了晚侏罗世花岗岩中更偏基性的闪长质包体。本文包体结合地球化学特征和哈克图解可以看出是岩浆混合作用的产物, 包体有相似的 Hf 同位素成分 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -11 \sim -9$), 说明偏基性的岩浆端元可能源于富集地幔的熔融。在晚侏罗世寄主花岗岩与花岗闪长质包体所代表的两种岩浆间发生过充分的岩浆混合作用。(4) 结合前人对该地区晚侏罗世岩浆作用的研究, 本文认为班公湖-怒江特提斯洋板片南向俯冲作用是导致雄巴地区中酸性岩浆作用的主要因素。

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0702)

第一作者简介: 徐晓彤 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 深部过程地球化学. E-mail: xtxu1216@163.com

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