

新疆卡鲁安矿区伟晶岩锆石 U-Pb 定年、 铪同位素组成及其与哈龙花岗岩 成因关系研究

马占龙^{1,2}, 张辉^{1*}, 唐勇¹, 吕正航¹, 张鑫^{1,2}, 赵景宇^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用 LA-ICPMS 和 LA-MC-ICPMS 技术, 对卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田中 4 条伟晶岩脉以及哈龙岩体中锆石 U-Pb 定年、铪同位素组成进行了研究。研究显示, 卡鲁安矿区 805、806、807 号脉的形成时代分别为 (216.0±2.6) Ma、(223.7±1.8) Ma 和 (221±15) Ma, 属三叠纪岩浆活动的产物。对于库卡拉盖 650 号脉, 锆石 U-Pb 定年结果显示, 它由形成时代为 (227.9±2.6) Ma 的早期钠长石伟晶岩与形成时代为 (211.3±2.4) Ma 的晚期锂辉石-钠长石-锂云母伟晶岩 2 期伟晶岩构成。哈龙岩体形成时代为 400.9~403.3 Ma, 由于伟晶岩与哈龙岩体之间存在形成时代上的差异 (170 Ma 以上), 预示着它们之间不具成因上的联系。卡鲁安矿区伟晶岩脉中锆石显示较小的正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+0.65~+2.50) 和较大的模式年龄 T_{DM2} (1090~1213 Ma), 相似于可可托海 3 号脉、柯鲁木特 112 号脉中锆石的铪同位素组成, 指示伟晶岩由陆-陆碰撞体制伸展背景下的加厚地壳物质减压熔融所形成。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; 锆石铪同位素; 花岗岩; 伟晶岩; 阿尔泰

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)01-0009-18

Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of pegmatites from the Kaluan mining area in the Altay, Xinjiang and their genetic relationship with the Halong granite

MA Zhan-long^{1,2}, ZHANG Hui^{1*}, TANG Yong¹, LÜ Zheng-hang¹,
ZHANG Xin^{1,2} and ZHAO Jing-yu^{1,2}

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Zircon U-Pb dating and Hf isotopes of four pegmatites from the Kaluan-Azubai pegmatite mining area were carried out by LA-ICPMS and LA-MC-ICPMS in this paper. The formation ages of pegmatites, numbered 805, 806 and 807 in the Kaluan mining area, were determined to be (216.0±2.6) Ma, (223.7±1.8) Ma and (221±15) Ma, respectively, i.e. products of Triassic magmatic activities. For the Kukalagai No.650 pegmatite, zircon U-Pb dating shows that it made up of two stages of pegmatites, that is, the early albite pegmatite (227.9±2.6) Ma and the late spodumene-albite-lepidolite pegmatite (211.3±2.4) Ma. The intrusive age of Halong granite is in the range of 400.9–403.3 Ma, as the products of Devonian magmatic activities. As large gaps in their formation age (>170 Ma) between pegmatites and Halong granites, it indicates that pegmatites from the Kaluan mining area have no genetic relationship with the Halong granite. Zircons from the pegmatites of Kaluan mining area have lower positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (+0.65 – +2.50), with T_{DM2} model ages of 1090–1213 Ma, similar to zircon Hf isotopes of the Keketuohai No.3 pegmatite and the Kelumute No.112 pegmatite, indicating that the pegmatites were created by crust

收稿日期(Received): 2014-02-07; 改回日期(Revised): 2014-04-17; 接受日期(Accepted): 2014-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(41372104); 新疆有色金属工业(集团)有限责任公司科研项目(2011YSKY-02); 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室开放课题资助基金(2008012)

作者简介: 马占龙(1988-), 男, 硕士研究生, 岩石地球化学、矿床地球化学研究方向。E-mail: mazhanlong88@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): ZHANG Hui, E-mail: zhanghui@vip.gyig.ac.cn; Tel: +86-851-5891494

MA Zhan-long et al.: Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of pegmatites

thickening and decompression melting in a post-collision tectonic setting.

Key words: zircon U-Pb dating; zircon Hf isotopes; granite; pegmatite; Altay

0 引言

位于新疆北部的阿尔泰造山带,是中亚造山带的重要组成部分,其中广泛分布着花岗岩及伟晶岩脉^[1-3],是我国稀有金属、宝石及白云母的重要产地^[3]。近年来,大量年代学研究揭示,阿尔泰花岗岩主要形成于 470~440 Ma、425~360 Ma、355~320 Ma、290~270 Ma 和 245~190 Ma^[4-5],而在三叠纪发生了大规模伟晶岩侵入事件^[6-10]。

位于中阿尔泰构造单元中的哈龙花岗岩体,是一个规模巨大的复式岩基,在其东西部分布着 4 个伟晶岩田,分别是位于哈龙岩体东部的柯鲁木特-吉得克伟晶岩田和阿拉山伟晶岩田,位于哈龙岩体西部的卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田和琼库尔伟晶岩田。这 4 个伟晶岩田中分布有一万余条伟晶岩脉,其中具代表性的稀有金属伟晶岩矿床,包括卡鲁安 806、807 号脉大型锂矿床、库卡拉盖 650 号脉大型锂矿床、柯鲁木特 112 号脉中型 Li-Nb-Ta 矿、佳木开碧玺矿及琼库尔 1 号脉中型 Nb-Ta 矿。空间上,在哈龙岩体西侧,由花岗岩与库鲁木提群外接触带向西,伟晶岩矿化呈现出分带性,依次出现无矿化伟晶岩、铍矿化伟晶岩、锂矿化伟晶岩、石英脉的分带特征,卡鲁安矿区伟晶岩则处于锂矿化伟晶岩带。但由于缺乏系统可靠的伟晶岩、花岗岩年代学资料,目前不清楚该区伟晶岩脉形成时代以及与哈龙片麻状花岗岩的成因联系。

卡鲁安矿区是一个潜在的超大型锂辉石矿床。本工作拟利用 LA-ICPMS、LA-MC-ICPMS 技术,开展哈龙花岗岩、卡鲁安矿区 805、806、807 号脉及库卡拉盖 650 号脉中锆石 U-Pb 定年及锆石钨同位素研究,旨在揭示卡鲁安矿区伟晶岩形成时代及期次,伟晶岩形成的可能物源、构造背景以及与哈龙花岗岩之间的成因关系。

1 区域地质概况

中亚造山带是由西伯利亚克拉通与中朝、塔里木板块之间的古亚洲洋消减而形成的巨型缝合带^[11-14],也是世界上最大的显生宙增生造山带之一^[15-17]。阿尔泰造山带作为中亚造山带的重要组成部分^[18],其

独特的构造演化-岩浆活动-成矿作用一直是国内外地球科学研究的热点。

新疆阿尔泰造山带位于西伯利亚板块西南缘与准噶尔-哈萨克斯坦板块结合部位,南以额尔齐斯大断裂为界与准噶尔板块相接,北为西伯利亚板块,向南东延至蒙古国的戈壁阿尔泰,向北西延至哈萨克斯坦的矿区阿尔泰和俄罗斯的山区阿尔泰。Windley *et al.*^[1]根据新疆阿尔泰造山带的地层、岩浆岩、变质岩及构造,将新疆阿尔泰造山带由北向南划分为 6 个块体(图 1)。块体 1 主要包括中晚泥盆世的安山岩、英安岩,晚泥盆世到早石炭世的页岩、粉砂岩、杂砂岩、砂岩、石灰岩以及古生代花岗岩类。块体 2 位于西阿尔泰,主要包括哈巴河群(中奥陶世-志留纪),夹一部分变质程度低的新元古代-早泥盆世的沉积岩、火山岩。块体 3 是中阿尔泰的主体部分,由角闪岩相的变质沉积岩和可能为前寒武纪(新元古代)的高级变质沉积岩组成。块体 2 和块体 3 可以并为一个块体,具微陆块的性质^[1,11,19,22]。块体 4 包括康布铁堡组和阿爾泰组^[1],其中康布铁堡组主要由弧火山岩、火山碎屑岩以及很少的一部分基性火山岩和细碧岩组成,属晚泥盆世-早泥盆世^[23];阿爾泰组变质程度较低,主要为一套浊流沉积和砂页岩,含有少量的玄武岩、酸性火山岩和石灰岩,其中化石显示为中泥盆世,被认为形成于弧前盆地^[1,24]。块体 5 也包括一些变质程度较高的片麻岩、片岩,新的锆石年代学研究表明其可能形成于石炭纪^[25]。块体 6 是由泥盆纪岛弧和少量奥陶纪石灰岩及石炭纪火山岩组成,属准噶尔块体北缘,被额尔齐斯断裂带与块体 5 分开。额尔齐斯断裂带是中亚最大的一个走滑断层^[18,26,27],被认为是古生代俯冲带^[11,26]。总的看来,新疆阿尔泰造山带以红山嘴-诺尔特断裂、康布铁堡-库尔特断裂和额尔齐斯断裂为界,可以简单地划分为北、中、南阿尔泰块体^[11,26]。北阿尔泰块体对应于块体 1,中阿尔泰块体对应于块体 2 和块体 3,南阿尔泰块体对应于块体 4 和 5^[4]。

2 卡鲁安-阿祖拜伟晶岩矿田以及哈龙岩体地质特征

福海县卡鲁安-阿祖拜伟晶岩矿田处于中阿尔

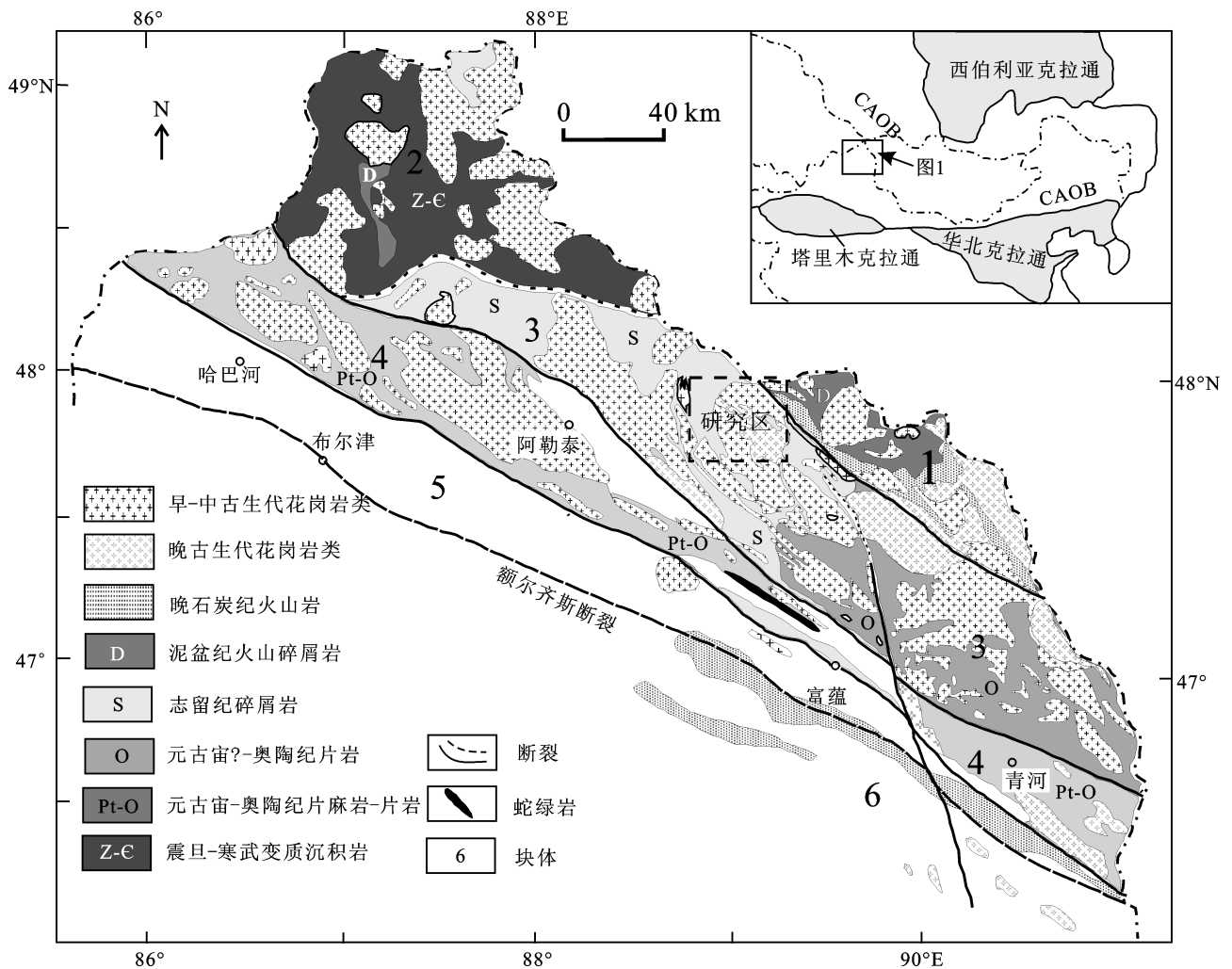


图 1 阿尔泰造山带区域地质简图(据文献[19-21])

Fig.1 Sketch geological map of the Chinese Altai Orogen (after references [19-21])

泰构造单元哈龙-清河早古生代深成岩浆弧内。矿田位于哈龙河-阿祖拜河两侧, 在可可托海复背斜所出露的哈龙花岗岩与片岩接触带约 2000 m (图 2), 属于群库尔-阿祖拜伟晶岩带的北端延伸部分, 向北至哈龙河上游, 向南延伸至阿祖拜。

矿田出露地层为中上志留系库鲁木提群 (S_{2,3}KL^a), 为一套浅海-半浅海相类建造, 主要岩性为由灰绿-灰紫色细砂岩、粉砂岩与泥岩组成的不均匀互层体。受区域变质作用, 岩石多已变质成石英-黑云母片岩, 包括夕线石-石英片岩、红柱石-黑云母-石英片岩、含长石黑云母的绢云母-绿泥石-石英片岩和堇青石-黑云母-石英片岩。

区内岩浆岩主要为哈龙片麻状黑云母花岗岩及花岗伟晶岩。哈龙岩体呈岩基状, 出露于矿田的东边, 在平面上近似呈 NNW-SSE 向的带状展布, 规模较大, 面积约为 600 km²。岩体岩性主要有片麻状黑

云母花岗岩、二云母花岗岩。在岩体北、西及南侧, 与库鲁木提下亚群呈侵入接触关系, 接触变质作用明显, 在岩体内接触带常见库鲁木提下亚群的捕虏体。

在矿田范围内, 由哈龙花岗岩体向西, 伟晶岩类型及其矿化依次出现水平分带(图 2): 带, 距花岗岩接触带内外各约 500 m, 走向大致平行花岗岩接触带展布, 伟晶岩脉规模巨大, 分布着长数百米至大于千米、宽数米至数十米的微斜长石型伟晶岩, 稀有金属矿化极弱, 不具工业价值; 带, 在岩体外接触带 500~1500 m 的范围内, 分布着长为数十米至数百米的微斜长石型伟晶岩, 早期文象结构带中含有大量绿柱石, 为具有工业价值铍矿化带, 此外有钽铌铁矿和非金属白云母产出; 带, 在岩体外接触带 2000~4500 m 范围内, 分布着规模较大的钠长石-锂辉石型伟晶岩, 绝大多数伟晶岩脉平行围岩片理产出, 走向近 NS 向, 倾向 SW-W 陡倾斜, 伟晶

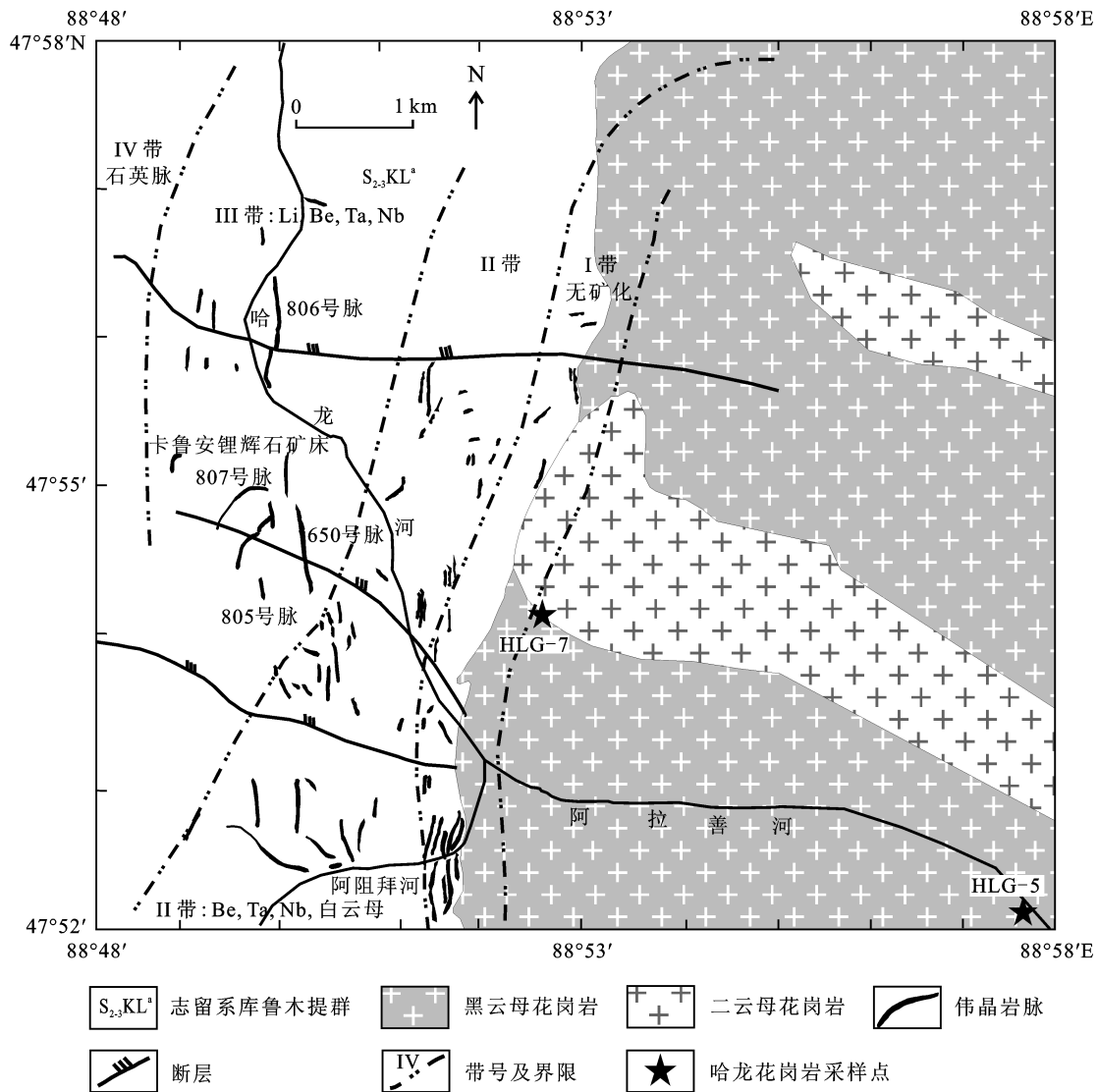


图 2 卡鲁安-阿阻拜稀有金属矿田矿化分带图(据新疆有色地勘局, 1957)

Fig.2 Mineralized zoning map of the Kaluan-Azubai rare-metal field (modified after nonferrous geological prospecting bureau of Xinjiang)

岩脉长五十米至千余米, 为具有工业价值锂矿化带; 带, 位于带西侧(外侧), 分布着低温热液阶段产出的石英脉。

卡鲁安矿区代表性伟晶岩脉分述如下。

卡鲁安 805 号脉 地理坐标为 $47^{\circ}54'31.41''N$, $88^{\circ}49'46.74''E$ 。地表露头长 90 m, 厚 5.45 m, 呈反“C”形, 延深 35 m, 产状 $105^{\circ} \sim 74^{\circ}$, 为一复杂的透镜状脉体, 结构带分带性较差, 可见细粒结构带和中粗粒结构带, 局部有块体微斜长石。石英-钠长石-锂辉石结构带是该矿脉的主体, 位于矿脉的中心部位, 锂辉石为薄板状, 定向排列明显, 长轴垂直脉壁。

卡鲁安 806 号脉 地理坐标为 $47^{\circ}56'10.34''N$, $88^{\circ}50'05.42''E$ 。该脉是 2009 年对物探异常查证时发现的盲矿体, 位于矿区北部哈龙河东岸。矿脉形态

为不规则脉状, 沿走向变化较大, 厚度 0.70~5.60 m。目前控制长度约 900 m, 平均水平厚度 2.42 m, 顺层侵入到黑云母-石英片岩, 产状 $260^{\circ} \sim 65^{\circ}$, 延深 200 m。伟晶岩类型为钠长石-锂辉石型, 主要结构带分别为 1~3 cm 的细粒伟晶岩带, 30~50 cm 的石英-微斜长石中粗粒伟晶岩带(锂辉石含量 < 5%), 中部为石英-薄片钠长石-锂辉石带(锂辉石矿体)。

卡鲁安 807 号脉 地理坐标为 $47^{\circ}54'57.81''N$, $88^{\circ}49'48.03''E$ 。该脉走向为近 EW, 地表揭露出伟晶岩长约 650 m, 目前已控制矿脉长~480 m, 总体呈波状弯曲, 产状为 $170^{\circ} \sim 180^{\circ} \sim 60^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 与产状为 $262^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 的黑云母石英片岩呈切层侵入关系。向下延深较稳定, 已控制 200 m, 且矿体有变厚的趋势。自上而下, 807 号脉由石英-钠长石-锂云母伟晶岩过

渡到石英-钠长石-锂辉石伟晶岩, 过渡界线大约在 2400 m 标高左右, 上部为石英-钠长石-锂云母伟晶岩, 中粗粒结构, 由石英、钠长石、少量的白云母和锂云母组成。下部为石英-钠长石-锂辉石伟晶岩, 为中细粒结构, 块状构造, 主要由石英、钠长石和锂辉石组成。

库卡拉盖 650 号脉 地理坐标为 $47^{\circ}54'45.65''\text{N}$, $88^{\circ}50'24.92''\text{E}$ 。已控制长度 1230 m, 平均水平厚 9.88 m, 产状 $240^{\circ}\sim 250^{\circ}$ $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$, 向南在 300 m 左右处尖灭。脉体由 2 期侵入的伟晶岩组成, 早期为钠长石伟晶岩, 侵入于黑云母-石英层理中, 含少量锂辉石; 晚期伟晶岩既可以侵入到黑云母-石英层理中, 也见侵入到早期的伟晶岩中, 以接触带见薄片状锂辉石定向生长为特征, 主要为锂辉石-钠长石-锂白云母和锂云母-钠长石组合。

3 样品采集及分析测试方法

本次采集卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田中 805、806、807 号脉以及库卡拉盖 650 号脉中早期和晚期伟晶岩大样(大于 10 kg)以及矿区东侧 2 件哈龙花岗岩样品, 其中 HLG-5 为片麻状黑云母花岗岩, 而 HLG-7 为二云母花岗岩。具体采样位置参见图 2。

2 件花岗岩样品和 5 件伟晶岩大样分别破碎至 60~120 目和 40~100 目, 锆石按照常规重力和磁选方法分选, 最后在双目镜下挑纯。锆石制靶、阴极发光(CL)成像在北京铀铀领航科技有限公司完成。锆石 U-Pb 定年测试在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室 LA-ICPMS 实验室完成。193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统由德国哥廷根 Lamda Physik 公司制造, 型号为 GeoLasPro。电感耦合等离子体质谱由日本东京安捷伦公司制造, 型号为 Agilent 7700x。准分子激光发生器产生的深紫外光束经匀化光路聚焦于锆石表面, 能量密度为 10 J/cm^2 , 束斑直径为 $44\text{ }\mu\text{m}$, 频率为 5 Hz, 共剥蚀 60 s, 锆石气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。测试过程中以标准锆石 91500 为外标, 校正仪器质量歧视与元素分馏; 以标准锆石 GJ-1 与 Plešovice 为盲样, 监控 U-Pb 定年数据质量; 以 NIST SRM 610 为外标, 以 Si 为内标, 标定锆石中的 Pb 元素含量, 以 Zr 为内标, 标定锆石中其余微量元素含量^[28-29]。原始的测试数据经过 ICPMSDataCal 软件离线处理完成^[28,30]。年龄计算、谐和图的绘制采用 Isoplot (3.0)程序完成^[31]。普

通铅校正参考 Andersen 方法完成^[32]。

锆石钆同位素测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 所用仪器为配备 Geolas-193 型紫外激光剥蚀系统(LA)的 Nu Plasma HR(Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)。激光剥蚀的脉冲频率为 10 Hz, 激光束直径为 $32\text{ }\mu\text{m}$, 激光束的能量密度为 10 J/cm^2 。 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的同质异位素干扰通过监测 ^{175}Lu 和 ^{172}Yb 信号强度, 采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02669$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5886$ ^[33] 进行校正。用标准锆石 91500 与锆石样品交叉分析对仪器漂移进行外部监控。在本研究分析过程中获得标准锆石样品 91500 和 GJ-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.282295 ± 0.000028 ($n=14, 2\sigma$) 和 0.282734 ± 0.000015 ($n=16, 2\sigma$), 在误差范围内与文献[34,35]的结果一致。计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值时, 球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282772 , $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.0332 ^[36], ^{176}Lu 的衰变常数 $\lambda=1.867\times 10^{-11}/\text{a}$ ^[37]。单阶段 Hf 模式年龄(T_{DM1})计算时, 亏损地幔的值采用 Griffin *et al.*的结果^[38]; 两阶段 Hf 模式年龄(T_{DM2})计算时, 下地壳的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.019 。

4 结果

4.1 锆石形态特征和 U-Pb 年代学

4.1.1 伟晶岩锆石形态特征和 U-Pb 年代学

伟晶岩锆石具有较高的 U、Th 含量, 加之放射性元素衰变造成晶格破坏和有序度降低, 因此呈半透明或不透明。激光剥蚀选点主要根据锆石 CL 和反射光特征, 对具有韵律环带或残余环带且反射光均一的微区以及 CL 不发光锆石但反射光均一的微区进行剥蚀, 采集信号过程中通过监视信号稳定性来推测是否混入包裹体或裂隙信号, 从而剔除无效的分析点^[7,8,10]。各伟晶岩锆石样品分析结果如下。

样品 KLP805(卡鲁安 805 号脉) 锆石粒径变化于 $200\sim 350\text{ }\mu\text{m}$, 呈半自形, 大多数锆石颗粒阴极发光较弱, 局部微区有较强的阴极发光(图 3a)。部分锆石分析点具有较高的 Th(测点 5 为 $22945\text{ }\mu\text{g/g}$; 测点 8 为 $40288\text{ }\mu\text{g/g}$) 或 U(测点 3 为 $69534\text{ }\mu\text{g/g}$; 测点 5 为 $64288\text{ }\mu\text{g/g}$; 测点 8 为 $53783\text{ }\mu\text{g/g}$)。其余锆石测点具有相对较低的 Th、U 含量, 分别变化于 $599\sim 12837\text{ }\mu\text{g/g}$ 和 $3400\sim 16457\text{ }\mu\text{g/g}$ 。所有分析点的 Th/U 值变化范围为 $0.08\sim 1.95$ (表 1)。18 个测点 U-Pb 分析结果显示, 其中 4 个测点(测点 3、7、14 和 18)

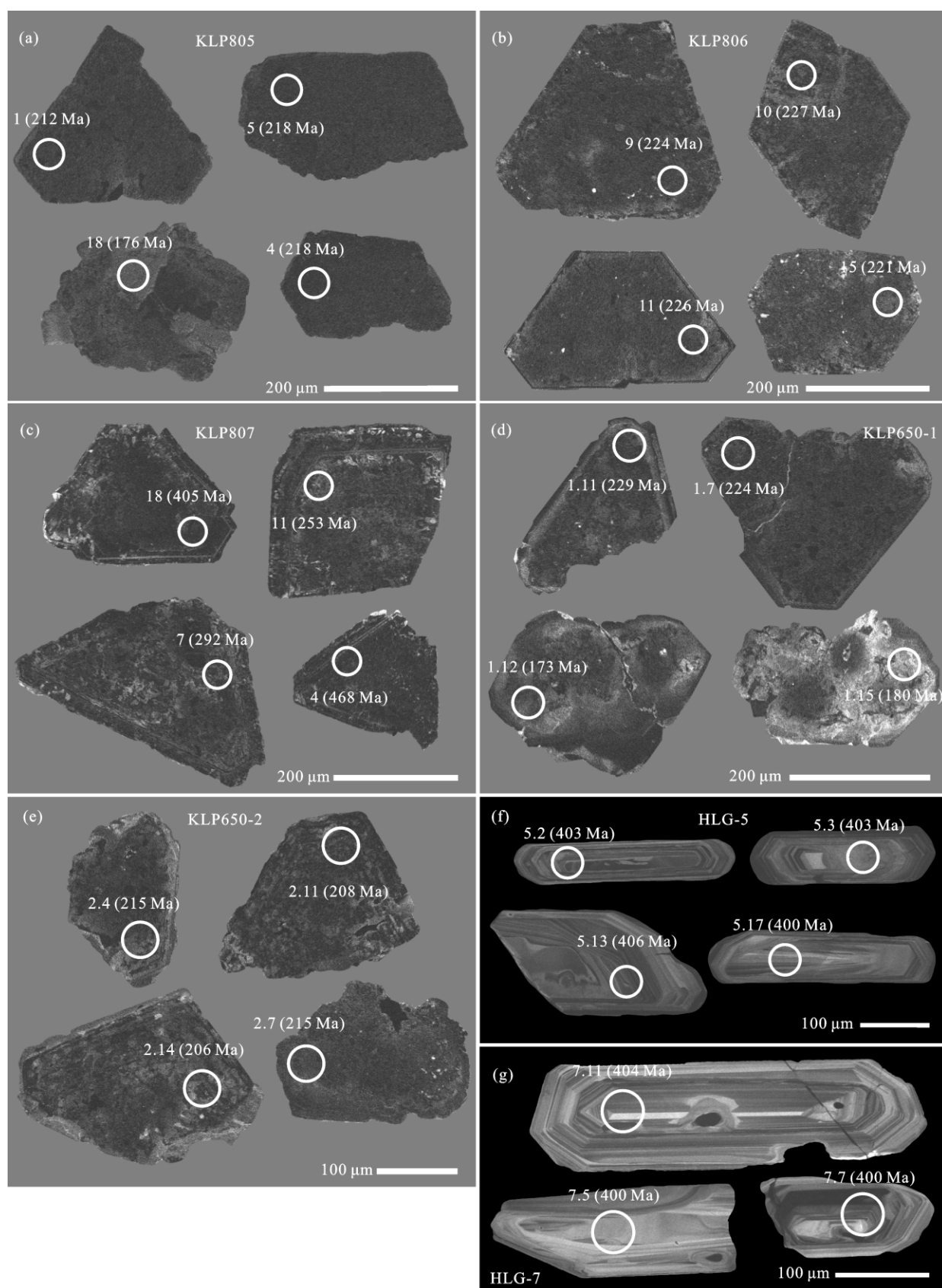


图 3 代表性锆石的阴极发光特征和激光剥蚀位置

Fig.3 Cathodoluminescence images and laser ablation spot locations of representative zircons

表 1 锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄分析结果
Table 1 Zircon U-Pb dating results, determined by LA-ICPMS

样号及 点号	²³² Th (μg/g)	²³⁸ U (μg/g)	Th/U	同位素比值±1σ			年龄±1σ (Ma)	
				²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U
KLP805								
1	4967	11360	0.44	0.05313±0.00199	0.26389±0.00867	0.03346±0.00054	238±7	212±3
2	599	3400	0.18	0.04925±0.00195	0.24857±0.00963	0.03397±0.00060	225±8	215±4
3	12265	69534	0.18	0.04231±0.00115	0.17982±0.00462	0.02869±0.00046	168±4	182±3
4	12837	6596	1.95	0.06553±0.00562	0.33120±0.03136	0.03433±0.00133	290±24	218±8
5	22945	64288	0.36	0.05104±0.00144	0.25960±0.00672	0.03445±0.00044	234±5	218±3
6	7726	5168	1.49	0.05547±0.00284	0.27517±0.01319	0.03417±0.00074	247±11	217±5
7	2003	8681	0.23	0.04854±0.00210	0.20196±0.00863	0.02842±0.00046	187±7	181±3
8	40288	53783	0.75	0.06916±0.00193	0.36381±0.00946	0.03603±0.00046	315±7	228±3
9	7613	5092	1.49	0.08070±0.00300	0.41145±0.01564	0.03515±0.00066	350±11	223±4
10	4476	8703	0.51	0.09269±0.00315	0.48648±0.01748	0.03634±0.00078	403±12	230±5
11	4135	3715	1.11	0.09732±0.00375	0.52877±0.02236	0.03735±0.00071	431±15	236±4
12	1977	13285	0.15	0.04724±0.00144	0.23305±0.00810	0.03390±0.00062	213±7	215±4
13	1398	14216	0.1	0.05190±0.00179	0.25700±0.00899	0.03450±0.00066	232±7	219±4
14	3617	16457	0.22	0.04750±0.00162	0.19419±0.00661	0.02848±0.00048	180±6	181±3
15	2824	14168	0.2	0.06116±0.00252	0.31567±0.02008	0.03487±0.00143	279±16	221±9
16	766	10030	0.08	0.04612±0.00142	0.22453±0.00669	0.03408±0.00068	206±6	216±4
17	3056	7647	0.4	0.05357±0.00226	0.25882±0.01151	0.03349±0.00088	234±9	212±6
18	3435	13644	0.25	0.04960±0.00198	0.19929±0.00859	0.02767±0.00072	185±7	176±5
KLP806								
1	500	1419	0.35	0.07733±0.00416	0.38332±0.02405	0.03448±0.00052	329±18	219±3
2	932	2681	0.35	0.05452±0.00154	0.26939±0.00804	0.03497±0.00039	242±6	222±2
3	764	3282	0.23	0.06131±0.00166	0.29843±0.00796	0.03455±0.00033	265±6	219±2
4	7135	53574	0.13	0.05346±0.00098	0.27067±0.00488	0.03580±0.00025	243±4	227±2
5	1864	5915	0.32	0.07709±0.00349	0.37410±0.01625	0.03520±0.00044	323±12	223±3
6	655	2607	0.25	0.07718±0.00336	0.37377±0.01576	0.03512±0.00038	322±12	223±2
7	2287	4655	0.49	0.10075±0.00266	0.52099±0.01462	0.03633±0.00037	426±10	230±2
8	2075	7126	0.29	0.07658±0.00426	0.36302±0.01970	0.03438±0.00043	314±15	218±3
9	360	2432	0.15	0.06185±0.00324	0.30115±0.01500	0.03531±0.00057	267±12	224±4
10	1547	4357	0.36	0.08034±0.00303	0.39639±0.01452	0.03578±0.00031	339±11	227±2
11	1975	5484	0.36	0.08245±0.00459	0.40483±0.02159	0.03561±0.00056	345±16	226±4
12	760	3565	0.21	0.06414±0.00493	0.29549±0.02204	0.03342±0.00062	263±17	212±4
13	705	3091	0.23	0.07276±0.00605	0.35426±0.02836	0.03531±0.00080	308±21	224±5
14	748	2546	0.29	0.08172±0.00450	0.40296±0.02148	0.03577±0.00049	344±16	227±3
15	541	2900	0.19	0.07248±0.00403	0.34785±0.01863	0.03481±0.00052	303±14	221±3
16	1418	4420	0.32	0.08445±0.00242	0.42467±0.01107	0.03540±0.00034	359±8	224±2
17	444	4798	0.09	0.06561±0.00323	0.32556±0.01531	0.03599±0.00053	286±12	228±3
18	423	2854	0.15	0.08016±0.00795	0.40036±0.03924	0.03623±0.00054	342±28	229±3
KLP807								
1	30667	2986	10.27	0.48799±0.01671	13.18014±0.46640	0.18427±0.00304	2693±33	1090±17
2	3601	1096	3.29	0.22107±0.01044	1.86321±0.11051	0.05642±0.00199	1068±39	354±12
3	2976	1354	2.2	0.36233±0.01548	4.77471±0.25697	0.08853±0.00279	1780±45	547±17
4	6351	1199	5.3	0.37200±0.01709	4.06058±0.17687	0.07527±0.00172	1646±36	468±10
5	11963	1738	6.89	0.39448±0.01912	5.61762±0.26903	0.09645±0.00201	1919±41	594±12
6	8814	1032	8.54	0.43908±0.02515	9.41075±0.53273	0.14662±0.00492	2379±52	882±28
7	964	1301	0.74	0.16324±0.01173	1.11811±0.07764	0.04638±0.00125	762±37	292±8
8	7470	1851	4.04	0.31191±0.01983	2.72872±0.18561	0.05902±0.00194	1336±51	370±12
9	3996	1440	2.78	0.29857±0.01715	2.57209±0.14106	0.05966±0.00128	1293±40	374±8
10	6882	3028	2.27	0.25519±0.01451	1.95546±0.11237	0.05262±0.00109	1100±39	331±7

(续表 1)

样号及 点号	^{232}Th ($\mu\text{g/g}$)	^{238}U ($\mu\text{g/g}$)	Th/U	同位素比值 $\pm 1\sigma$			年龄 $\pm 1\sigma$ (Ma)	
				$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
11	2654	1574	1.69	0.12379 \pm 0.00720	0.71660 \pm 0.04488	0.04008 \pm 0.00088	549 \pm 27	253 \pm 5
12	10773	3534	3.05	0.30388 \pm 0.01575	3.69994 \pm 0.24410	0.08260 \pm 0.00187	1571 \pm 53	512 \pm 11
13	10317	241	42.84	0.49457 \pm 0.03176	16.07762 \pm 1.25565	0.23558 \pm 0.01193	2881 \pm 75	1364 \pm 62
14	5580	464	12.02	0.14734 \pm 0.01071	1.08025 \pm 0.08895	0.05180 \pm 0.00138	744 \pm 43	326 \pm 8
15	1696	961	1.76	0.14999 \pm 0.01167	0.96938 \pm 0.10034	0.04225 \pm 0.00124	688 \pm 52	267 \pm 8
16	8391	3028	2.77	0.29637 \pm 0.01587	2.41660 \pm 0.16722	0.05639 \pm 0.00152	1248 \pm 50	354 \pm 9
17	8945	1201	7.45	0.36423 \pm 0.01732	4.80933 \pm 0.33126	0.08884 \pm 0.00285	1787 \pm 58	549 \pm 17
18	6244	3329	1.88	0.34314 \pm 0.01576	3.32510 \pm 0.22334	0.06485 \pm 0.00209	1487 \pm 52	405 \pm 13
19	5672	1395	4.07	0.37881 \pm 0.01450	6.01236 \pm 0.31686	0.10399 \pm 0.00294	1978 \pm 46	638 \pm 17
20	10439	1688	6.19	0.45553 \pm 0.01713	7.62898 \pm 0.29432	0.11400 \pm 0.00224	2188 \pm 35	696 \pm 13
21	2978	2670	1.12	0.23855 \pm 0.01012	1.78971 \pm 0.07500	0.05083 \pm 0.00104	1042 \pm 27	320 \pm 6
KLP650-1								
1.1	10506	8436	1.25	0.09184 \pm 0.00314	0.45882 \pm 0.01959	0.03677 \pm 0.00109	383 \pm 14	233 \pm 7
1.2	751	1769	0.42	0.10050 \pm 0.00377	0.49059 \pm 0.01725	0.03580 \pm 0.00066	405 \pm 12	227 \pm 4
1.3	2953	6818	0.43	0.09816 \pm 0.00267	0.48786 \pm 0.01517	0.03553 \pm 0.00038	403 \pm 10	225 \pm 2
1.4	347	7661	0.05	0.05320 \pm 0.00138	0.27453 \pm 0.00682	0.03704 \pm 0.00036	246 \pm 5	234 \pm 2
1.5	661	4150	0.16	0.09787 \pm 0.00303	0.48792 \pm 0.01592	0.03553 \pm 0.00046	403 \pm 11	225 \pm 3
1.6	2287	5357	0.43	0.08930 \pm 0.00276	0.44240 \pm 0.01417	0.03536 \pm 0.00058	372 \pm 10	224 \pm 4
1.7	318	1340	0.24	0.06787 \pm 0.00254	0.34107 \pm 0.01333	0.03537 \pm 0.00070	298 \pm 10	224 \pm 4
1.8	334	1431	0.23	0.07703 \pm 0.00391	0.39893 \pm 0.02796	0.03498 \pm 0.00083	341 \pm 20	222 \pm 5
1.9	200	1657	0.12	0.05059 \pm 0.00163	0.26573 \pm 0.00944	0.03703 \pm 0.00091	239 \pm 8	234 \pm 6
1.10	331	6233	0.05	0.04676 \pm 0.00249	0.19109 \pm 0.01531	0.02775 \pm 0.00075	178 \pm 13	176 \pm 5
1.11	440	2959	0.15	0.05024 \pm 0.00170	0.25475 \pm 0.00966	0.03618 \pm 0.00124	230 \pm 8	229 \pm 8
1.12	131	3208	0.04	0.04583 \pm 0.00294	0.18088 \pm 0.01480	0.02719 \pm 0.00093	169 \pm 13	173 \pm 6
1.13	261	1599	0.16	0.05004 \pm 0.00197	0.21261 \pm 0.00901	0.03038 \pm 0.00087	196 \pm 8	193 \pm 5
1.14	725	2299	0.32	0.06809 \pm 0.00458	0.38337 \pm 0.04367	0.03518 \pm 0.00134	330 \pm 32	223 \pm 8
1.15	47	1414	0.03	0.04843 \pm 0.00264	0.19577 \pm 0.01294	0.02839 \pm 0.00067	182 \pm 11	180 \pm 4
1.16	488	3811	0.13	0.04923 \pm 0.00171	0.24676 \pm 0.00938	0.03617 \pm 0.00077	224 \pm 8	229 \pm 5
1.17	860	1392	0.62	0.10764 \pm 0.00372	0.55106 \pm 0.02302	0.03652 \pm 0.00062	446 \pm 15	231 \pm 4
1.18	622	2223	0.28	0.05237 \pm 0.00206	0.25776 \pm 0.01156	0.03553 \pm 0.00060	233 \pm 9	225 \pm 4
KLP650-2								
2.1	164	2761	0.06	0.04730 \pm 0.00225	0.23683 \pm 0.01154	0.03429 \pm 0.00063	216 \pm 9	217 \pm 4
2.2	314	2778	0.11	0.04610 \pm 0.00175	0.21962 \pm 0.00824	0.03250 \pm 0.00047	202 \pm 7	206 \pm 3
2.3	586	3453	0.17	0.04668 \pm 0.00201	0.22665 \pm 0.01027	0.03274 \pm 0.00045	207 \pm 8	208 \pm 3
2.4	1297	3283	0.4	0.05179 \pm 0.00238	0.25688 \pm 0.01100	0.03394 \pm 0.00062	232 \pm 9	215 \pm 4
2.5	1366	3986	0.34	0.04846 \pm 0.00214	0.24517 \pm 0.01033	0.03415 \pm 0.00065	223 \pm 8	216 \pm 4
2.6	1608	8028	0.2	0.05577 \pm 0.00212	0.28375 \pm 0.00952	0.03427 \pm 0.00053	254 \pm 8	217 \pm 3
2.7	133	2578	0.05	0.04592 \pm 0.00311	0.23615 \pm 0.01663	0.03391 \pm 0.00060	215 \pm 14	215 \pm 4
2.8	115	1671	0.07	0.05029 \pm 0.00328	0.25520 \pm 0.02320	0.03271 \pm 0.00060	231 \pm 19	208 \pm 4
2.9	406	2011	0.2	0.04684 \pm 0.00329	0.23747 \pm 0.01676	0.03413 \pm 0.00100	216 \pm 14	216 \pm 6
2.10	1923	4346	0.44	0.04956 \pm 0.00383	0.26166 \pm 0.02507	0.03452 \pm 0.00053	236 \pm 20	219 \pm 3
2.11	1785	3194	0.56	0.04999 \pm 0.00278	0.23805 \pm 0.01237	0.03273 \pm 0.00067	217 \pm 10	208 \pm 4
2.12	323	9225	0.04	0.04900 \pm 0.00213	0.24169 \pm 0.01083	0.03321 \pm 0.00058	220 \pm 9	211 \pm 4
2.13	552	1104	0.5	0.05040 \pm 0.00343	0.23896 \pm 0.01618	0.03248 \pm 0.00076	218 \pm 13	206 \pm 5
2.14	2830	5495	0.52	0.06529 \pm 0.00370	0.30826 \pm 0.01820	0.03241 \pm 0.00072	273 \pm 14	206 \pm 5
2.15	1633	7102	0.23	0.08160 \pm 0.00459	0.41099 \pm 0.02459	0.03445 \pm 0.00071	350 \pm 18	218 \pm 4
2.16	1026	3688	0.28	0.04989 \pm 0.00244	0.24035 \pm 0.01187	0.03323 \pm 0.00063	219 \pm 10	211 \pm 4
2.17	3160	2652	1.19	0.04817 \pm 0.00241	0.24340 \pm 0.01374	0.03382 \pm 0.00077	221 \pm 11	214 \pm 5
2.18	10035	6103	1.64	0.05345 \pm 0.00255	0.24853 \pm 0.01160	0.03240 \pm 0.00079	225 \pm 9	206 \pm 5
2.19	2005	2844	0.7	0.06916 \pm 0.00331	0.33808 \pm 0.01484	0.03422 \pm 0.00085	296 \pm 11	217 \pm 5

(续表 1)

样号及 点号	²³² Th (μg/g)	²³⁸ U (μg/g)	Th/U	同位素比值±1σ			年龄±1σ (Ma)	
				²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U
2.20	3315	10072	0.33	0.04801±0.00241	0.23916±0.01630	0.03283±0.00084	218±13	208±5
2.21	339	1161	0.29	0.04870±0.00245	0.2295±0.01168	0.03239±0.00056	210±10	206±4
HLG-5								
5.1	408	518	0.79	0.05127±0.00166	0.46322±0.01398	0.06436±0.00075	386±10	402±5
5.2	89	286	0.31	0.05415±0.00197	0.48589±0.01714	0.06454±0.00080	402±12	403±5
5.3	132	289	0.45	0.05152±0.00175	0.46612±0.01526	0.06454±0.00079	389±11	403±5
5.4	70	378	0.18	0.05229±0.00160	0.45940±0.01329	0.06319±0.00074	384±9	395±5
5.5	110	372	0.30	0.05567±0.00194	0.49542±0.01589	0.06386±0.00077	409±11	399±5
5.6	131	324	0.41	0.05742±0.00194	0.51433±0.01686	0.06400±0.00082	421±11	400±5
5.7	214	516	0.41	0.05647±0.00156	0.49589±0.01272	0.06303±0.00068	409±9	394±4
5.8	270	783	0.35	0.05382±0.00137	0.47910±0.01093	0.06445±0.00105	397±8	403±6
5.9	156	383	0.41	0.05576±0.00178	0.49285±0.01553	0.06377±0.00073	407±11	399±4
5.10	129	287	0.45	0.05437±0.00187	0.48688±0.01620	0.06448±0.00077	403±11	403±5
5.11	142	1048	0.14	0.05231±0.00127	0.47335±0.01144	0.06464±0.00063	394±8	404±4
5.12	188	449	0.42	0.05379±0.00176	0.47845±0.01495	0.06417±0.00075	397±10	401±5
5.13	163	227	0.72	0.05369±0.00212	0.47469±0.01740	0.06506±0.00089	394±12	406±5
5.14	104	321	0.32	0.05447±0.00239	0.48619±0.01974	0.06474±0.00095	402±13	404±6
5.15	75	320	0.23	0.05214±0.00168	0.46284±0.01384	0.06448±0.00076	386±10	403±5
5.16	362	584	0.62	0.05367±0.00137	0.48482±0.01189	0.06437±0.00060	401±8	402±4
5.17	117	312	0.37	0.05321±0.00183	0.47203±0.01545	0.06401±0.00074	393±11	400±4
5.18	172	267	0.65	0.05566±0.00250	0.49529±0.02242	0.06369±0.00103	409±15	398±6
HLG-7								
7.1	104	234	0.45	0.05438±0.00244	0.48904±0.02139	0.06471±0.00098	404±15	404±6
7.2	111	327	0.34	0.05167±0.00232	0.46862±0.02016	0.06486±0.00093	390±14	405±6
7.3	91	225	0.40	0.05062±0.00190	0.45668±0.01696	0.06467±0.00093	382±12	404±6
7.4	54	301	0.18	0.05179±0.00191	0.46992±0.01703	0.06515±0.00086	391±12	407±5
7.5	168	351	0.48	0.05182±0.00166	0.46053±0.01387	0.06401±0.00079	385±10	400±5
7.6	146	211	0.69	0.05704±0.00221	0.50540±0.01875	0.06397±0.00093	415±13	400±6
7.7	201	668	0.30	0.05490±0.00128	0.49273±0.01103	0.06403±0.00063	407±8	400±4
7.8	164	612	0.27	0.05403±0.00156	0.49706±0.01358	0.06562±0.00075	410±9	410±5
7.9	144	214	0.67	0.05412±0.00188	0.48920±0.01622	0.06532±0.00087	404±11	408±5
7.10	118	2167	0.05	0.05189±0.00116	0.47463±0.01054	0.06478±0.00071	394±7	405±4
7.11	209	794	0.26	0.05303±0.00169	0.48089±0.01416	0.06465±0.00074	399±10	404±4
7.12	132	247	0.53	0.05911±0.00240	0.53397±0.02088	0.06521±0.00099	434±14	407±6
7.13	320	356	0.90	0.05289±0.00195	0.47303±0.01624	0.06433±0.00091	393±11	402±6
7.14	112	342	0.33	0.05093±0.00188	0.45928±0.01739	0.06409±0.00090	384±12	400±5
7.15	149	525	0.28	0.05080±0.00170	0.46454±0.01535	0.06492±0.00087	387±11	405±5
7.16	252	351	0.72	0.05438±0.00174	0.48629±0.01483	0.06403±0.00079	402±10	400±5
7.17	120	206	0.58	0.05338±0.00205	0.47117±0.01707	0.06411±0.00100	392±12	401±6
7.18	111	556	0.20	0.05341±0.00171	0.47754±0.01453	0.06402±0.00079	396±10	400±5

位于谐和线上但 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄相对偏低 (176~182 Ma), 获得 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (180.7±3.1) Ma (MSWD=0.48), 可能代表后期重结晶年龄。其余 14 个测点的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 分布于 212~236 Ma 之间, 考虑到测点 8、9、10 及 11 的 U、Th 过高及普通铅的影响较大, 而不参与年龄计算, 其余 10 个测点的加权平均年龄为 (216.0±2.6) Ma (MSWD=0.37), 代表脉

体的侵入年龄(图 4a)。

样品 KLP806 (卡鲁安 806 号脉) 锆石粒径变化于 200~400 μm, 呈半自形到自形。锆石呈斑杂状, 内部蜕晶化较强 (图 3b)。除测点 4 具有较高的 Th (7135 μg/g) 和 U (53574 μg/g) 含量, 其余测点具有相对较低的 Th、U 含量, 主要变化于 360~2287 μg/g 和 1419~7126 μg/g 之间。18 个分析点的 Th/U 值变

化于 0.09~0.49 (表 1)。锆石 U-Pb 分析结果显示, 所有测点都偏离谐和线, 可能受到蜕晶化作用的影响, 除测点 7 和测点 12 显示较大的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ((230±2) Ma) 和较小的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ((212±4) Ma), 其余 16 个测点则显示了较为一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (218~229 Ma), 加权平均年龄为 (223.7±1.8) Ma (MSWD=1.7), 代表脉体的侵入年龄(图 4b)。

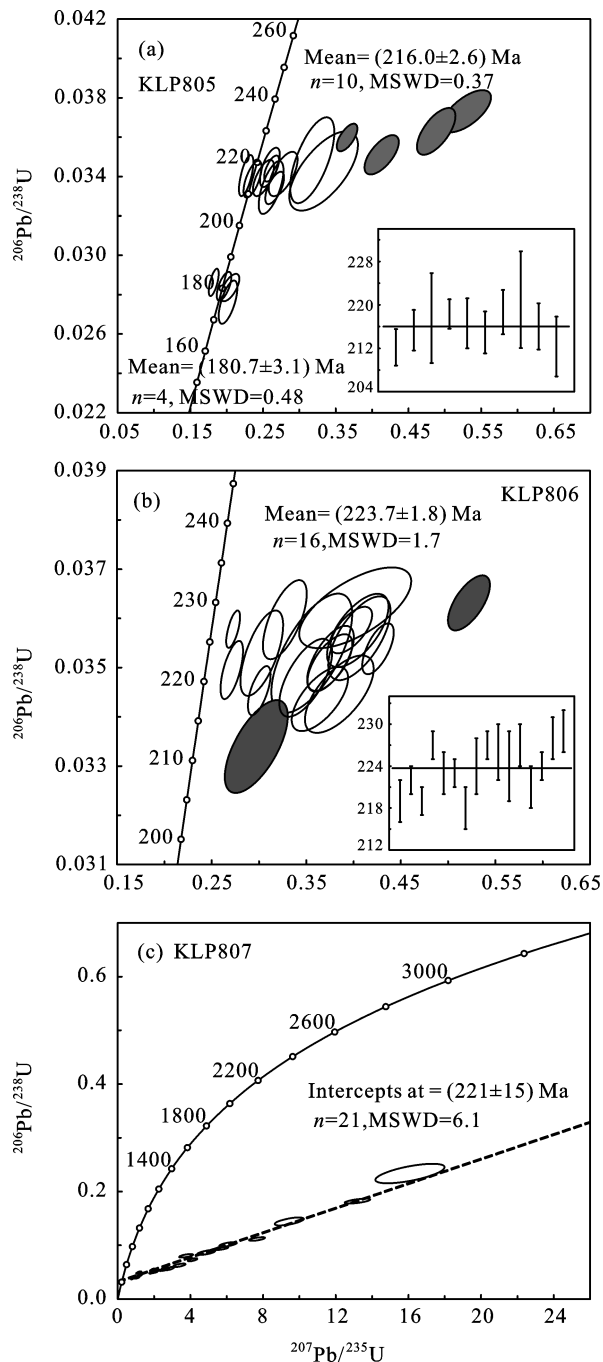


图 4 卡鲁安伟晶岩锆石 U-Pb 年龄谐和图解

Fig.4 Concordia and weighted average diagrams showing the LA-ICPMS U-Pb ages of zircon grains from pegmatites of Kaluan

样品 KLP807 (卡鲁安 807 号脉) 锆石粒径变化于 200~350 μm , 晶形呈半自形到自形。大部分锆石可见模糊的震荡环带, 部分锆石边部较亮, 很可能是后期热液重结晶所致, 少量锆石 CL 很弱, 不显示内部特征 (图 3c)。KLP807 样品中测点 1、5、12、13 和 20 具有较高的 Th 含量, 分布于 10317~30667 $\mu\text{g}/\text{g}$ 之间, 其余测点的 Th 含量介于 964~8945 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。21 个测点的含量值介于 241~3534 $\mu\text{g}/\text{g}$, Th/U 值变化于 0.74~42.84 (表 1)。锆石 U-Pb 分析结果显示, 由于具有显著高的普通 Pb^* , 未能获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄, 只获得下交点年龄 (221±15) Ma (MSWD=6.1) (图 4c), 大致代表脉体的侵入年龄。

样品 KLP650-1 (库卡拉盖 650 号脉早期伟晶岩) 锆石粒径变化于 200~350 μm , 呈半自形到自形, 大多数锆石边部有残余环带, 少量锆石内部有较亮的微区, 可能是后期热液所致 (图 3d)。KLP650-1 样品中除测点 1.1 具有相对较高的 Th (10506 $\mu\text{g}/\text{g}$)、U (8436 $\mu\text{g}/\text{g}$) 含量及 Th/U (1.25) 值, 其余 17 个测点的 Th 含量介于 47~2953 $\mu\text{g}/\text{g}$, U 含量介于 1340~7661 $\mu\text{g}/\text{g}$, Th/U 变化于 0.03~0.61 (表 1)。18 个测点的 U-Pb 分析结果显示, 其中 4 个测点 (测点 1.10、1.12、1.13 和 1.15) 位于谐和线上但 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相对偏低 (172~193 Ma), 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (180.6±4.9) Ma (MSWD=2.5), 可能代表后期重结晶年龄。其余 14 个测点显示了较为一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (222~234 Ma), 加权平均年龄为 (227.9±2.6) Ma (MSWD=1.4), 代表脉体的侵入年龄(图 5a)。

样品 KLP650-2 (库卡拉盖 650 号脉晚期伟晶岩) 锆石粒径变化于 150~300 μm , 半自形。大部分锆石呈斑驳状, 局部出现亮斑, 可能是重结晶所致 (图 3e)。21 个测点的 Th、U 含量分别变化于 115~10035 $\mu\text{g}/\text{g}$ 和 1104~10072 $\mu\text{g}/\text{g}$ 范围, Th/U 值介于 0.04~1.64 之间 (表 1)。锆石 U-Pb 分析结果显示, 测点 2.14、2.15 及 2.19 远离谐和线, 其余 18 个测点谐和度高, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (211.3±2.4) Ma (MSWD=1.6), 代表脉体的侵入年龄(图 5b)。

4.1.2 哈龙岩体锆石形态特征和 U-Pb 年代学

所采哈龙岩体样品中锆石颗粒在透反射光下大多为无色-浅黄褐色, 半透明; 粒径为 120~300 μm , 长宽比在 2 : 1~4 : 1 之间, 大多自形程度较好, 呈四方柱状、双锥发育。阴极发光图像显示, 锆石晶体内部发育较好的震荡环带或扇形环带结构, 属于典型的岩浆成因锆石 (图 3f、图 3g)。激光剥蚀选点

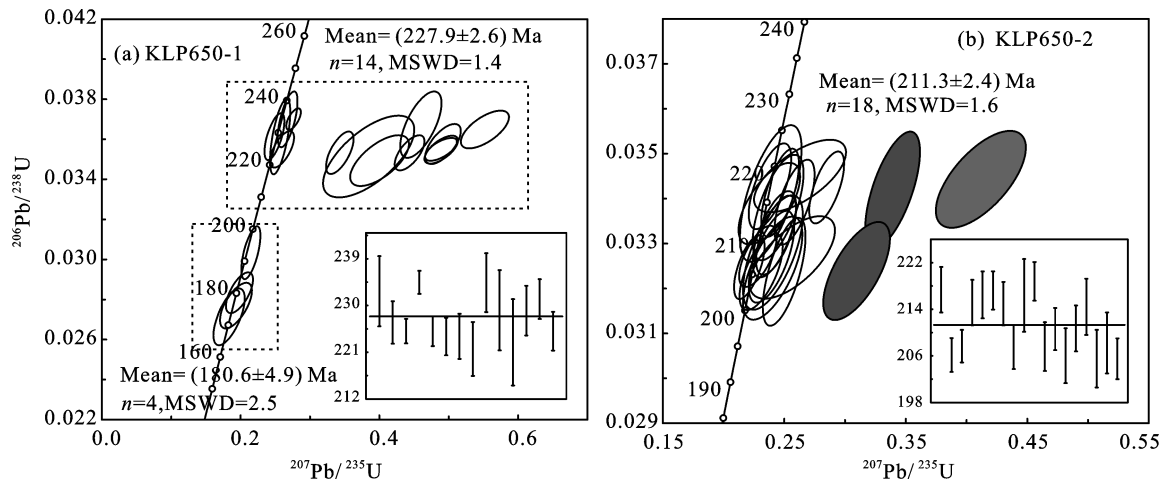


图 5 库卡拉盖 650 号伟晶岩锆石 U-Pb 年龄谐和图解

Fig.5 Concordia and weighted average diagrams showing the LA-ICPMS U-Pb ages of zircon grains from the Kukalagai No.650 pegmatite

参照透射光、反射光和阴极发光图像特征, 避开裂隙和包裹体发育的锆石或微区, 利用 LA-ICPMS 对所采哈龙岩体 2 件样品进行了锆石 U-Pb 分析, 结果见表 1。

分析结果表明, 哈龙岩体中锆石 U 含量变化于 206~2167 $\mu\text{g/g}$ 之间, Th 含量变化于 54~408 $\mu\text{g/g}$ 之间, Th/U 值为 0.05~0.9。样品 HLG-5 和 HLG-7, 各自 18 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布集中且谐和度高, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值分别为 (400.9 ± 2.1) Ma (MSWD=0.48)(图 6a) 和 (403.3 ± 2.3) Ma (MSWD=0.42)(图 6b)。

4.2 伟晶岩锆石钍同位素组成

利用 LA-MC-ICPMS 开展锆石钍同位素组成分析的测点均选自己进行锆石 U-Pb 定年的剥蚀点附近。对样品 KLP805、KLP806、KLP650-1 和 KLP650-2,

根据已测定锆石 U-Pb 年龄, 并结合锆石 CL 特征, 本次选取每个样品中的 10 颗锆石进行钍同位素测试, 分析结果见表 2。

40 个测点中的 38 个测点给出了较一致的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值, 变化于 0.282651~0.282708, 测点 KLP805-10 和测点 KLP650-2-2.2 较低, 分别为 0.282638 和 0.282627。根据各样品已测锆石结晶年龄计算得出的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 0.65~2.50 范围, 对应的模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 变化于 1090~1213 Ma 之间。

5 讨论

5.1 卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田中伟晶岩形成时代及期次

野外地质观察显示, 位于卡鲁安-阿祖拜伟晶岩

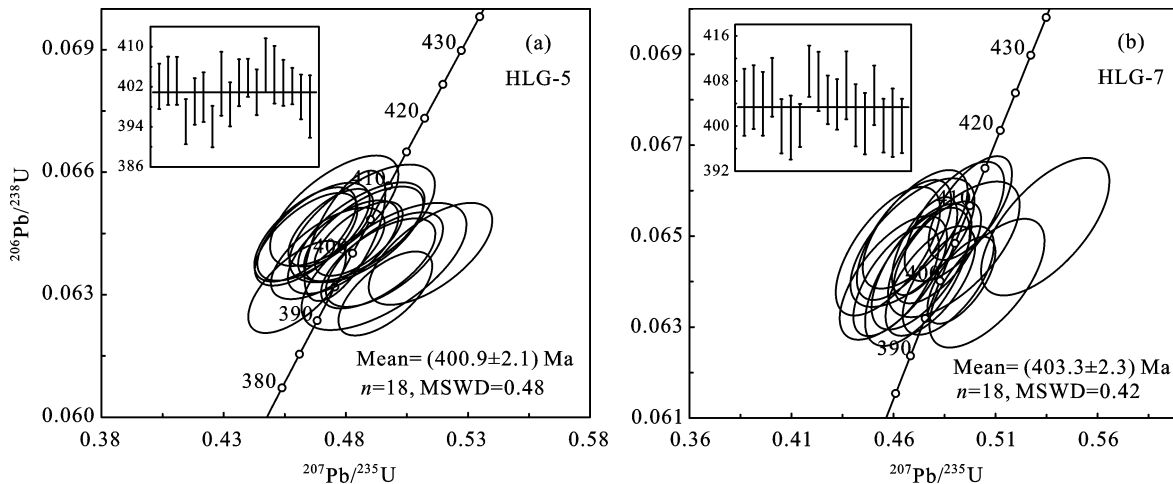


图 6 哈龙花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图解

Fig.6 Concordia and weighted average diagrams showing the LA-ICPMS U-Pb ages of zircon grains from the Halong granite

表 2 卡鲁安伟晶岩脉锆石铪同位素组成(LA-MC-ICPMS)

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions of pegmatites in the Kaluan mining area (determined by LA-MC-ICPMS)

样号及点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} \pm 1\sigma$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	Age (Ma)	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
KLP805								
1	0.282678±0.000006	0.000619	0.000025	216	1.42	792	1158	-0.999
2	0.282699±0.000005	0.000548	0.000020	216	2.15	764	1112	-0.999
3	0.282673±0.000005	0.001446	0.000051	216	1.25	799	1169	-0.998
4	0.282693±0.000004	0.000639	0.000019	216	1.93	772	1126	-0.999
5	0.282708±0.000005	0.000235	0.000008	216	2.50	750	1090	-1.000
6	0.282669±0.000007	0.000407	0.000014	216	1.09	805	1179	-1.000
7	0.282707±0.000006	0.002839	0.000103	216	2.45	754	1093	-0.997
8	0.282688±0.000004	0.000297	0.000010	216	1.78	778	1135	-1.000
9	0.282674±0.000005	0.000374	0.000012	216	1.26	798	1168	-1.000
10	0.282638±0.000006	0.000509	0.000020	216	0.00	848	1248	-0.999
KLP806								
1	0.282683±0.000005	0.000293	0.000011	224	1.77	785	1142	-1.000
2	0.282690±0.000005	0.000687	0.000024	224	2.02	776	1126	-0.999
3	0.282680±0.000005	0.000683	0.000025	224	1.67	790	1148	-0.999
4	0.282671±0.000005	0.000398	0.000013	224	1.34	802	1169	-1.000
5	0.282690±0.000005	0.000962	0.000037	224	2.01	776	1127	-0.999
6	0.282669±0.000005	0.000242	0.000009	224	1.29	804	1172	-1.000
7	0.282686±0.000005	0.000145	0.000006	224	1.89	781	1134	-1.000
8	0.282660±0.000005	0.000593	0.000023	224	0.95	817	1194	-0.999
9	0.282684±0.000005	0.000343	0.000012	224	1.80	784	1140	-1.000
10	0.282651±0.000005	0.000541	0.000022	224	0.65	829	1213	-0.999
KLP650-1								
1.1	0.282670±0.000004	0.000942	0.000042	228	1.41	803	1168	-0.999
1.2	0.282651±0.000006	0.000551	0.000026	228	0.71	830	1212	-0.999
1.3	0.282663±0.000005	0.000927	0.000041	228	1.15	813	1184	-0.999
1.4	0.282662±0.000006	0.000742	0.000034	228	1.13	814	1186	-0.999
1.5	0.282671±0.000005	0.000914	0.000031	228	1.44	802	1166	-0.999
1.6	0.282664±0.000005	0.000628	0.000026	228	1.18	812	1182	-0.999
1.7	0.282684±0.000005	0.001133	0.000052	228	1.89	785	1138	-0.998
1.8	0.282681±0.000006	0.001204	0.000058	228	1.79	789	1144	-0.998
1.9	0.282673±0.000004	0.000696	0.000030	228	1.51	799	1161	-0.999
1.10	0.282687±0.000004	0.003273	0.000139	228	1.99	782	1131	-0.996
KLP650-2								
2.1	0.282673±0.000006	0.000086	0.000004	211	1.15	798	1171	-1.000
2.2	0.282627±0.000006	0.001481	0.000045	211	-0.51	863	1276	-0.999
2.3	0.282676±0.000005	0.001003	0.000032	211	1.23	796	1166	-0.999
2.4	0.282683±0.000005	0.000103	0.000004	211	1.47	786	1151	-1.000
2.5	0.282692±0.000005	0.001324	0.000038	211	1.79	774	1131	-0.999
2.6	0.282667±0.000005	0.000890	0.000028	211	0.90	808	1187	-0.999
2.7	0.282662±0.000005	0.000122	0.000004	211	0.73	814	1198	-1.000
2.8	0.282679±0.000005	0.000933	0.000029	211	1.34	791	1159	-0.999
2.9	0.282674±0.000005	0.001012	0.000031	211	1.17	798	1170	-0.999
2.10	0.282678±0.000005	0.000598	0.000018	211	1.32	792	1161	-0.999

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1\} \times 10000$; $T_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln \{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$; $T_{\text{DM2}} = t + 1/\lambda \times \ln \{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{LC}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$; $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s$ 为样品测定值, t 为样品形成时间; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772^{[36]}$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325^{[38]}$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{LC}} = 0.019$; ^{176}Lu 的衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}/\text{a}^{[37]}$

田中部的库卡拉盖 650 号脉存在 2 期次伟晶岩岩浆的脉动贯入特征, 早期伟晶岩侵入到黑云母-石英片理中, 为钠长石型伟晶岩; 晚期伟晶岩既可以侵入到黑云母-石英片理中, 也见侵入到早期的伟晶岩中, 以接触带见薄片状锂辉石定向生长为特征, 为石英-钠长石-锂辉石、石英-钠长石-锂云母型伟晶岩(图 7)。位于伟晶岩田北部的卡鲁安矿田中产出的是石英-钠长石-锂辉石、石英-钠长石-锂云母型伟晶岩(图 8a), 而在伟晶岩田南部的阿祖拜矿田中, 以微斜长石型伟晶岩产出(图 8b)。

伟晶岩锆石 U-Pb 定年结果显示, 650 号脉中早期钠长石伟晶岩侵入时间为(227.9±2.6) Ma, 而侵入于早期伟晶岩中的晚期锂辉石-钠长石-锂云母伟晶岩形成时代为(211.3±2.4) Ma。对于卡鲁安矿区的 805、806、807 号脉, 本次锆石 U-Pb 定年获得它们



图 7 库卡拉盖 650 号脉中晚期伟晶岩侵入到早期伟晶岩中
Fig.7 Image shows the late pegmatite intruded into the early pegmatite of the Kukalagai No.650 pegmatite

的形成时代分别为(216.0±2.6) Ma、(223.7±1.8) Ma 和(221±15) Ma。

由上可见, 库卡拉盖 650 号脉由 2 期伟晶岩构成, 即可划分出形成时代为(227.9±2.6) Ma 的早期钠长石伟晶岩与形成时代为(211.3±2.4) Ma 的晚期锂辉石-钠长石-锂云母伟晶岩。卡鲁安矿区中伟晶岩形成时代在 216.0~223.7 Ma 之间, 其上限值与库卡拉盖 650 号脉中早期钠长石伟晶岩形成时代相似, 而其下限值与库卡拉盖 650 号脉中晚期锂辉石-钠长石-锂云母伟晶岩形成时代接近。对于卡鲁安矿田, 未见存在 2 期伟晶岩侵入的野外地质证据, 而且因所采集伟晶岩样品数有限, 锆石 U-Pb 定年暂时无法明确分辨出存在 2 期伟晶岩; 对于阿祖拜矿区, 还未开展对伟晶岩的锆石 U-Pb 定年工作。库卡拉盖 650 号脉存在 2 期伟晶岩的野外地质及锆石 U-Pb 定年证据, 以及卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田中, 南部的阿祖拜矿区中伟晶岩与中部的库卡拉盖伟晶岩、北部的卡鲁安矿区伟晶岩存在类型上的差异, 这意味着在卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田中至少存在 2 期次的伟晶岩脉动侵入的特征。

5.2 卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田中伟晶岩与哈龙花岗岩的成因关系

锆石 U-Pb 定年结果显示, 哈龙花岗岩体形成时代在 400.9~403.3 Ma 之间, 属泥盆纪岩浆活动的产物; 而卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田中 4 条伟晶岩形成时代在 211~228 Ma 之间, 均为三叠纪伟晶岩。

由于 LCT 型伟晶岩与 S 型过铝质花岗岩具有成

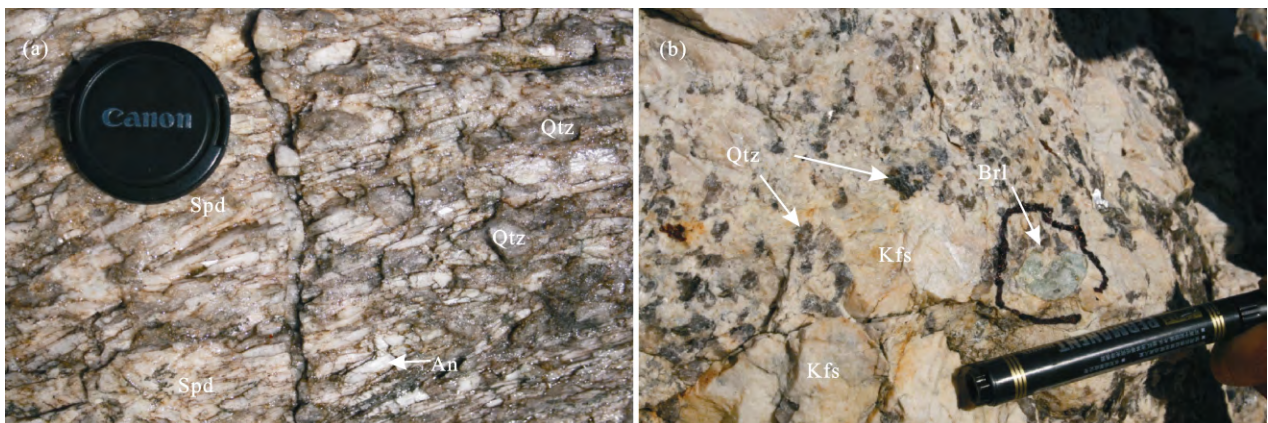


图 8 卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田中的伟晶岩类型

Fig.8 Different pegmatite types in the Kaluan-Azubai mining area

(a) 卡鲁安 806 号脉为石英-薄片状钠长石-锂辉石型伟晶岩; (b) 阿祖拜矿田中的微斜长石型伟晶岩。Ab-钠长石; Brl-绿柱石; Kfs-微斜长石; Spd-锂辉石; Qtz-石英

(a) quartz-lamellar albite-spodumene type pegmatite of the Kaluan No.806 pegmatite; (b) microcline type pegmatite of Azubai mining area. Ab-albite; Brl-beryl; Kfs-microcline; Spd-spodumene; Qtz-quartz

因联系,因此,许多学者倾向性认为伟晶岩是花岗岩岩浆演化晚期的残余岩浆固结的产物^[39-41]。加拿大 Superior province (Ontario)、Bernic Lake (Manitoba) 地区分布的太古代伟晶岩(~2640 Ma)与花岗岩之间时空、组成上存在明显的演化关系。随着岩浆分异的进行,存在明显的垂直分带,由早期的黑云母花岗岩 → 二云母花岗岩 → 粗粒白云母浅色花岗岩 → 伟晶状浅色花岗岩 → 晚期的稀有金属伟晶岩脉^[42]。此外,在空间上可划分出不同的伟晶岩带,如在 Mavis Lake 伟晶岩集中区,由过铝质的 Ghost Lake 侵入体向 SE,由近及远依次出现内部绿柱石带、绿柱石-铌铁矿带、锂辉石-绿柱石-钽铁矿带、钠长石型伟晶岩带^[42]。此外,西方学者推测出露于地表的伟晶岩脉与深部埋藏的花岗岩体有成因联系^[43-48]。空间上,尽管由哈龙岩体向西,稀有金属伟晶岩也存在分带性(卡鲁安伟晶岩处于 Li、Be、Ta、Nb 矿化带),但由于形成时代相差 170 Ma 以上,可以断定哈龙岩体与稀有金属伟晶岩之间不可能存在成因联系。

已有的研究显示,位于哈龙岩体东侧的柯鲁木特-吉得克伟晶岩田中柯鲁木特 112 号伟晶岩脉侵入时代为(238.3±2.0) Ma^[8];位于哈龙岩体西南侧的琼库尔伟晶岩田中琼库尔 1 号脉(Be-Nb-Ta 矿床)形成年龄为(207.2±1.6) Ma、佳木开伟晶岩(碧玺矿)为(212.2±1.7) Ma^[7]。由此可见,围绕着哈龙岩体展布的不同伟晶岩田中伟晶岩很可能均是形成于三叠纪,晚于哈龙岩体的形成时代约 170~200 Ma。如此大的时间上的差异,指示卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田以及哈龙岩体周边的其他伟晶岩田中伟晶岩的形成不可能与哈龙岩体的形成、演化存在成因联系。

5.3 伟晶岩形成物源及大地构造背景

已有的研究显示,阿尔泰伟晶岩以其锆石中低的铪同位素组成和相对较老的 T_{DM2} 为特征,如可可托海 3 号脉中锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 变化于 +1.25 ~ +2.39 范围,二阶段模式年龄(T_{DM2})变化于 1102~1174 Ma^[49];位于哈龙岩体东部的柯鲁木特-吉得克伟晶岩田,其 112 号脉中锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 变化于 +0.03 ~ +2.35 之间, T_{DM2} = 1112~1225 Ma^[8]。

本次研究的卡鲁安矿区伟晶岩脉中锆石显示较小的正 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值(+0.65~+2.50)和较大的模式年龄 T_{DM2} 1090~1213 Ma,与柯鲁木特 112 号脉、可可托海 3 号脉中锆石铪同位素组成一致,即以较小的正 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值

和古老的 T_{DM} 模式年龄为特征(图 9)。正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值,表明形成伟晶岩初始岩浆含有地幔物质的部分熔融,或者是壳源物质和亏损幔源共同作用的结果。由于其 T_{DM2} 远远大于伟晶岩的形成年龄,表明伟晶岩形成与壳源物质的部分熔融有关。加之该区未见有三叠纪基性火山岩的数据报道,因此我们认为与稀有金属矿床相关的三叠纪伟晶岩初始岩浆不可能是由软流圈地幔底侵诱发的板内岩浆活动的产物,而很可能与先期存在幔源物质的古老地壳,即元古代的不成熟地壳物质的减压部分熔融有关。研究表明阿尔泰-蒙古微陆块可能是元古代的不成熟陆壳^[50],而来自花岗岩的同位素对比研究表明,中阿尔泰的古生代(500 ~ 370 Ma)花岗岩较之南阿尔泰显示较低的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 、 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 和更老的模式年龄,中阿尔泰可能存在前寒武纪基底^[3,51,52]。最近, Kröner *et al.*^[53] 综合对比了中亚造山带中的花岗岩,提出大量的元古代古老地壳物质改造贯穿于中亚造山带的演化过程。而且,与 Li-Be-Nb-Ta-Cs 矿床相关的伟晶岩为 LCT 伟晶岩,以过铝质,富含 B、Be、Li、P、碱质 (Na、K),贫 Fe、Mg、Ca 为特征,这意味着它很可能是由泥质岩深熔形成。已有的研究给予我们启示,泥质岩,尤其是与蒸发岩有关的黏土岩类,是最富集电气石的,可提供大量的硼^[54-55],以及 Na、K、Li、Cl、F、P、Fe、Mn 等组分^[56-57]。综合以上研究,我们提出三叠纪伟晶岩的形成很可能是与先期存在幔源物质的古老地壳物质的部分熔融有关。

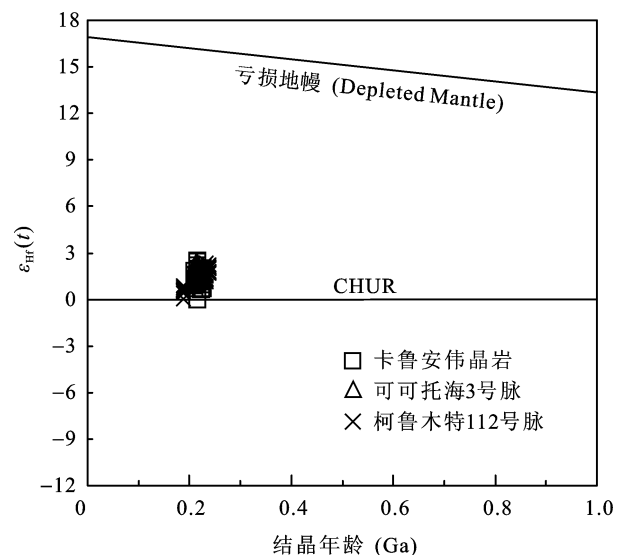


图9 伟晶岩锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 与结晶年龄相关图

Fig.9 Comparison diagram of $\varepsilon_{Hf}(t)$ -age for zircons of pegmatite 可可托海 3 号脉和柯鲁木特 112 号脉铪同位素数据据文献^[8, 49] Data sources: the No.3 pegmatite^[49]; the Kelumute No.112 pegmatite^[8]

新疆阿尔泰造山带从前寒武世晚期至早古生代早期处于稳定大陆边缘阶段, 早古生代开始进入造山启动期, 之后造山运动一直延续到晚古生代, 相继发生了俯冲、碰撞和增生等构造运动, 早-中二叠世时期开始进入了后造山阶段, 中生代之后则进入非造山期^[1,11,16,22,26,58,59]。基于花岗岩地球化学研究得出的中亚造山带构造模式, 由于受到对花岗岩形成复杂性的有限认识而受到质疑^[52], 而花岗伟晶岩尤其是 LCT 型稀有金属伟晶岩对大地构造演化具有很好的指示意义。前人统计了全球最大的 140 个 LCT 伟晶岩田形成时代分布频率, 并与全球超大陆旋回和陆壳生长时间进行对比, 发现大规模伟晶岩侵位与超级大陆聚合时间一致并总是形成于主造山期之后的后碰撞造山阶段^[60]。近年来, 越来越多的阿尔泰三叠纪岩浆活动及典型的陆-陆碰撞体制下造山型矿床被报道, 比如伟晶岩型 Li-Be-Nb-Ta 矿^[7,8,10,61,62]、乌拉斯沟铜矿^[63]、铁木尔特 Pb-Zn-Cu 矿^[64]以及萨热阔布金矿^[65]。基于以上认识, 我们认为阿尔泰三叠纪稀有金属伟晶岩可能形成于古亚洲洋闭合之后的阿尔泰-蒙古微大陆与相邻板块之间的陆-陆碰撞造山作用晚期的后碰撞造山阶段, 这一阶段主要表现为主造山期后的伸展垮塌、地壳减薄导致的地壳减压熔融。

6 结 论

(1) 锆石 U-Pb 定年结果显示, 卡鲁安锂矿区 805、806、807 号脉的形成时代分别为(216.0±2.6) Ma、(223.7±1.8) Ma、(221±15) Ma, 形成于三叠纪。库卡拉盖 650 号脉由 2 期伟晶岩构成, 早期钠长石伟晶岩形成时代为(227.9±2.6) Ma, 晚期锂辉石-钠长石-锂云母伟晶岩形成时代为(211.3±2.4) Ma。哈龙岩体形成时代为 400.9~403.3 Ma, 为泥盆纪岩浆活动的产物。

(2) 所研究的卡鲁安-阿祖拜伟晶岩田中伟晶岩形成于三叠纪, 与哈龙岩体形成时代之间存在 170 Ma 以上的差异, 它们之间不具成因上的联系。

(3) 卡鲁安矿区伟晶岩中锆石显示与柯鲁木特 112 号脉、可可托海 3 号脉相似的钍同位素组成, 由三叠纪陆-陆碰撞体制伸展背景下加厚地壳物质减压熔融所致。

参考文献(References):

[1] Windley B F, Kröner A, Guo Jing-hui, Qu Guo-sheng, Li

- Ying-yi, Zhang Chi. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. *J Geol*, 2002, 110(6): 719-737.
- [2] 邹天仁, 曹惠志, 吴柏青. 新疆阿尔泰造山带花岗岩和非造山花岗岩及其判别标志[J]. *地质学报*, 1988 (3): 229-243. Zou Tian-ren, Cao Hui-zhi, Wu Bai-qing. Orogenic and anorogenic granitoids in the Altay Mts, Xinjiang, and their discrimination criteria[J]. *Acta Geol Sinica*, 1988 (3): 229-243 (in Chinese with English abstract).
- [3] 吴柏青, 邹天人. 试论新疆阿尔泰花岗岩伟晶岩的成因[J]. *新疆矿产地质*, 1989 (1): 60-70. Wu Bai-qing, Zou Tian-ren. The genesis of granitic pegmatites in Xinjiang Altai[J]. *Mineral Geol Xinjiang*, 1989 (1): 60-70 (in Chinese).
- [4] 王涛, 童英, 李舫, 张建军, 史兴俊, 李锦轶, 韩宝福, 洪大卫. 阿尔泰造山带花岗岩时空演变, 构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 595-618. Wang Tao, Tong Ying, Li Shan, Zhang Jian-jun, Shi Xing-jun, Li Jin-yi, Han Bao-fu, Hong Da-wei. Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: Perspectives from Chinese Altay[J]. *Acta Petrol Mineral*, 2010, 29(6): 595-618 (in Chinese with English abstract).
- [5] 曾乔松, 陈广浩, 王核, 单强. 阿尔泰冲乎尔盆地花岗质岩类的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 1921-1932. Zeng Qiao-song, Chen Guang-hao, Wang He, Shan Qiang. Geochemical characteristic, SHRIMP zircon U-Pb dating and tectonic implication for granitoid in Chonghuer basin, Altai, Xinjiang[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(8): 1921-1932 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王登红, 陈毓川, 徐志刚. 新疆阿尔泰印支期伟晶岩的成矿年代学研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(1): 14-17. Wang Deng-hong, Chen Yu-chuan, Xu Zhi-gang. ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotope dating on muscovite from Indosinian raremetal deposits in central Altay, northwestern China[J]. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2003, 22(1): 14-17 (in Chinese with English abstract).
- [7] 任宝琴, 张辉, 唐勇, 吕正航. 阿尔泰造山带伟晶岩年代学及其地质意义[J]. *矿物学报*, 2011, 31(3): 587-596. Ren Bao-qin, Zhang Hui, Tang Yong, Lü Zheng-hang. LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology of the Altai pegmatites and its geological significance[J]. *Acta Mineral Sinica*, 2011, 31(3): 587-596 (in Chinese with English abstract).
- [8] Lü Zheng-hang, Zhang Hui, Tang Yong, Guan Shen-jin. Petrogenesis and magmatic-hydrothermal evolution time limitation of Kelumute No.112 pegmatite in Altay, Northwestern China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopes[J]. *Lithos*, 2012, 154: 374-391.
- [9] Zhu Yong-feng, Zeng Yi-shan, Gu Li-bing. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No.3 vein and related

- granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China[J]. *J Asian Earth Sci*, 2006, 27(1): 61–77.
- [10] Wang Tao, Tong Ying, Jahn Bor-ming, Zou Tian-ren, Wang Yan-bin, Hong Da-wei, Han Bao-fu. SHRIMP U-Pb Zircon geochronology of the Altai No.3 Pegmatite, NW China, and its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite[J]. *Ore Geol Rev*, 2007, 32(1): 325–336.
- [11] Xiao Wen-jiao, Windley B F, Badarch G, Sun Shu, Li Ji-liang, Qin Ke-zhang. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia[J]. *J Geol Soc*, 2004, 161(3): 339–342.
- [12] Mossakovsky A A, Ruzhentsev S V, Samygin S G, Kheraskova T N. Central Asian fold belt: Geodynamic evolution and formation history[J]. *Geotectonics*, 1994, 27(6): 445–474.
- [13] Xiao Wen-jiao, Windley B F, Hao Jie, Zhai Ming-guo. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1069–1089.
- [14] Xiao Wen-jiao, Zhang Lian-chang, Qin Ke-zhang, Sun Shu, Li Ji-liang. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia[J]. *Am J Sci*, 2004, 304(4): 370–395.
- [15] Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wen-jiao, Li Xian-hua, Chen Han-lin, Lin Shou-fa, Xia Xiao-ping, Long Xiao-ping. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids[J]. *Chem Geol*, 2007, 242(1): 22–39.
- [16] Xiao Wen-jiao, Han Chun-ming, Yuan Chao, Sun Min, Lin Shou-fa, Chen Han-lin, Li Zi-long, Li Ji-liang, Sun Shu. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *J Asian Earth Sci*, 2008, 32(2): 102–117.
- [17] Long Xiao-ping, Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wen-jiao, Cai Ke-da. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: Implications for its tectonic evolution[J]. *Sediment Geol*, 2008, 208(3/4): 88–100.
- [18] Sengör A, Burtman V. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299–307.
- [19] Wang Tao, Hong Da-wei, Jahn Bor-ming, Tong Ying, Wang Yan-bin, Han Bao-fu, Wang Xiao-xia. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen[J]. *J Geol*, 2006, 114(6): 735–751.
- [20] Xiao Wen-jiao, Kröner A, Windley B F. Geodynamic evolution of Central Asia in the Paleozoic and Mesozoic[J]. *Int J Earth Sci*, 2009, 98(6): 1185–1188.
- [21] 邹天人, 李庆昌. 中国新疆稀有及稀土金属矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 34–51.
Zou Tian-ren, Li Qing-chang. Rare and Rare Earth Metal Deposits in Xinjiang, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 34–51 (in Chinese).
- [22] Hu Ai-qin, Jahn Bor-ming, Zhang Guo-xin, Chen Yi-bing, Zhang Qian-feng. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks[J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1): 15–51.
- [23] Chai Feng-mei, Mao Jing-wen, Dong Lian-hui, Yang Fu-quan, Liu Feng, Geng Xin-xia, Yang Zong-xi, Huang Chen-ke. SHRIMP zircon U-Pb dating for metarhyolites of the Kangbutiebao formation at the Abagong iron deposit in the southern margin of the Altay, Xinjiang and its geological significance[J]. *Acta Geol Sinica*, 2008, 82(11): 1592–1601.
- [24] Long Xiao-ping, Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wen-jiao, Lin Shou-fa, Wu Fu-yuan, Xia Xiao-ping, Cai Ke-da. Detrital zircon age and Hf isotopic studies for metasedimentary rocks from the Chinese Altai: Implications for the early Paleozoic tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonics*, 2007, 26(5): 1–20.
- [25] 刘峰, 李延河, 毛景文, 杨富全, 柴凤梅, 耿新霞, 杨宗喜. 阿尔泰山带阿巴宫花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. *地球学报*, 2008, 29(6): 795–804.
Liu Feng, Li Yan-he, Mao Jing-wen, Yang Fu-quan, Chai Feng-mei, Geng Xin-xia, Yang Zong-xi. SHRIMP U-Pb ages of the Abagong granites in the Altay Orogen and their geological implications[J]. *Acta Geosci Sinica*, 2008, 29(6): 795–804 (in Chinese with English abstract).
- [26] 何国琦. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994: 1–437.
He Guo-qi. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1994: 1–437 (in Chinese).
- [27] Briggs S M, Yin A, Manning C E, Chen Zheng-le, Wang Xiao-feng, Marty G. Late Paleozoic tectonic history of the Ertix Fault in the Chinese Altai and its implications for the development of the Central Asian Orogenic System[J]. *Geol Soc Am Bull*, 2007, 119(7/8): 944–960.
- [28] Liu Yong-sheng, Hu Zhao-chu, Zong Ke-qing, Gao Chang-gui, Gao Shan, Xu Juan, Chen Hai-hong. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- [29] Hu Zhao-chu, Liu Yong-sheng, Chen Lu, Zhou Lian, Li Ming, Zong Ke-qing, Zhu Lv-yun, Gao Shan. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution[J]. *J Anal At Spectrom*, 2011, 26(2): 425–430.
- [30] Liu Yong-sheng, Gao Shan, Hu Zhao-chu, Gao Chang-gui, Zong Ke-qing, Wang Dong-bing. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-north China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *J Petrol*, 2010, 51(1/2): 537–571.
- [31] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4(1): 1–71.
- [32] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that

- do not report ^{204}Pb [J]. *Chem Geol*, 2002, 192(1): 59–79.
- [33] Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, German C R, Bayon G, Burton K. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections[J]. *J Anal At Spectrom*, 2002, 17(12): 1567–1574.
- [34] Wu Fu-yuan, Yang Yue-heng, Xie Lie-wen, Yang Jin-hui, Xu Ping. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. *Chem Geol*, 2006, 234(1): 105–126.
- [35] Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, Pearson N J, O'reilly S Y. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70(18): A158.
- [36] Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148(1): 243–258.
- [37] Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, Isachsen C E. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 219(3): 311–324.
- [38] Griffin W, Pearson N, Belousova E, Jackson S, Van Achtenbergh E, O'reilly S Y, Shee S. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- [39] Černý P, Meintzer R E. Fertile granites in the Archean and Proterozoic fields of rare-element pegmatites: Crustal environment, geochemistry, and petrogenetic relationships[M]// Taylor R P, Strong D F. *Recent Advances in the Geology of Granite-Related Mineral Deposits*. Montreal: CIMM Spec Publ, 1988, 39: 170–206.
- [40] Černý P, Ercit T S. Mineralogy of niobium and tantalum: Crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implications[M]// Möller P, Černý P, Saupé F. *Lanthanides, Tantalum and Niobium*. Berlin: Springer, 1989: 27–79.
- [41] Černý P. Exploration strategy and methods for pegmatite deposits of tantalum [M]// Möller P, Černý P, Saupé F. *Lanthanides, Tantalum and Niobium*. Berlin: Springer, 1989: 274–302.
- [42] Selway J B, Breaks F W, Tindle A G. A review of rare-element (Li-Cs-Ta) pegmatite exploration techniques for the Superior Province, Canada, and large worldwide tantalum deposits[J]. *Explor Min Geol*, 2005, 14(1–4): 1–30.
- [43] Jahns R H, Burnham C W. Experimental studies of pegmatite genesis: I. A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites[J]. *Econ Geol*, 1969, 64(8): 843–864.
- [44] Norton J J. Sequence of mineral assemblages in differentiated granitic pegmatites[J]. *Econ Geol*, 1983, 78(5): 854–874.
- [45] Jolliff B, Papike J, Shearer C. Petrogenetic relationships between pegmatite and granite based on geochemistry of muscovite in pegmatite wall zones, Black Hills, South Dakota, USA[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56(5): 1915–1939.
- [46] Webster J D, Thomas R, Rhede D, Förster H-J, Seltmann R. Melt inclusions in quartz from an evolved peraluminous pegmatite: Geochemical evidence for strong tin enrichment in fluorine-rich and phosphorus-rich residual liquids[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61(13): 2589–2604.
- [47] London D. Internal differentiation of rare-element pegmatites: A synthesis of recent research[J]. *Geol Soc Am Spec Paper*, 1990, 246: 35–50.
- [48] Fuertes-Fuente M, Martin-Izard A, Boiron M C, Viñuela J M. P-T path and fluid evolution in the Franqueira granitic pegmatite, central Galicia, Northwestern Spain[J]. *Can Mineral*, 2000, 38(5): 1163–1175.
- [49] 陈剑锋. 阿尔泰 3 号脉缓倾斜部分的形成和演化[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2011: 1–87.
Chen Jian-feng. Geochemistry of the part of the plate of the Altai No.3 pegmatite and its formation and evolution[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2011: 1–87 (in Chinese with English abstract).
- [50] 李会军, 何国琦, 吴泰然, 吴波. 阿尔泰-蒙古微大陆的确定及其意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1369–1379.
Li Hui-jun, He Guo-qi, Wu Tai-ran, Wu Bo. Confirmation of Altai-Mongolia microcontinent and its implication[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(5): 1369–1379 (in Chinese with English abstract).
- [51] 童英, 洪大卫, 王涛, 王式洸, 韩宝福. 阿尔泰造山带南缘富蕴后造山线形花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(2): 85–89.
Tong Ying, Hong Da-wei, Wang Tao, Wang Shi-guang, Han Bao-fu. TIMS U-Pb zircon ages of Fuyun post-orogenic linear granite plutons on the southern margin of Altay orogenic belt and their implications[J]. *Acta Petrol Mineral*, 2006, 25(2): 85–89 (in Chinese with English abstract).
- [52] Wang Tao, Jahn B M, Kovach V P, Tong Ying, Hong Da-wei, Han Bao-fu. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 2009, 110(1): 359–372.
- [53] Kröner A, Kovach V, Belousova E, Hegner E, Armstrong R, Dolgoplova A, Seltmann R, Alexeiev D V, Hoffmann J E, Wong J, Sun M, Cai K, Wang T, Tong Y, Wilde S A, Degtyarev K E, Rytsk E. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(1): 103–125.
- [54] Grew E S. Borosilicates (exclusive of tourmaline) and boron in rock-forming minerals in metamorphic environments[J]. *Rev Mineral Geochem*, 1996, 33(1): 387–502.
- [55] Leeman W P, Sisson V B. Geochemistry of boron and its implications for crustal and mantle processes[J]. *Rev Mineral Geochem*, 1996, 33(1): 645–707.
- [56] Slack J F, Palmer M R, Stevens B P. Boron isotope evidence for the involvement of non-marine evaporites in the origin of the Broken Hill ore deposits[J]. *Nature*, 1989, 342(6252): 913–916.
- [57] Williams A E, McKibben M A. A brine interface in the Salton Sea Geothermal System, California: Fluid geochemical and

- isotopic characteristics[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53(8): 1905–1920.
- [58] Xiao Wen-jiao, Pirajno F, Seltmann R. Geodynamics and metallogeny of the Altaid orogen[J]. *J Asian Earth Sci*, 2008, 32(2–4): 77–81.
- [59] 王涛, 洪大卫, 童英, 韩宝福, 石玉若. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 640–650.
Wang Tao, Hong Da-wei, Tong Ying, Han Bao-fu, Shi Yu-ruo. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for vertical continental growth[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2005, 21(3): 640–650 (in Chinese with English abstract).
- [60] Tkachev A. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time[J]. *Geol Soc London Spec Publ*, 2011, 350(1): 7–23.
- [61] Liu Feng, Zhang Zhi-xin, Li Qi, Zhang Chao, Li Chao. New precise timing constraint for the Keketuohai No.3 pegmatite in Xinjiang, China, and identification of its parental pluton[J]. *Ore Geol Rev*, 2013, 56: 209–219.
- [62] 刘文政. 新疆阿斯喀尔特花岗岩-伟晶岩地球化学演化及其 Be-Mo 成矿作用[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2014.
Liu Wen-zheng. The geochemical evolution of the Asikaerte granite-pegmatite system and its implication for the metallogenesis of Be and Mo, Xinjiang[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [63] Zheng Yi, Zhang Li, Chen Yan-jing, Qin Ya-jing, Liu Chun-fa. Geology, fluid inclusion geochemistry, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Wulasigou Cu deposit, and their implications for ore genesis, Altay, Xinjiang, China[J]. *Ore Geol Rev*, 2012, 49: 128–140.
- [64] 郑义, 张莉, 郭正林. 新疆铁木尔特铅锌铜矿床锆石 U-Pb 和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其矿床成因意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(1): 191–204.
Zheng Yi, Zhang Li, Guo Zheng-lin. Zircon LA-ICP-MS U-Pb and biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Tiemuert Pb-Zn-Cu deposit, Xinjiang: Implications for ore genesis[J]. *Acta Petrol Sinica*, 2013, 29(1): 191–204 (in Chinese with English abstract).
- [65] 秦雅静, 张莉, 郑义, 刘春发, 迟好刚. 新疆萨热阔布金矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. *大地构造与成矿学*, 2012, 36(2): 227–239.
Qin Ya-jing, Zhang Li, Zheng Yi, Liu Chun-fa, Chi Hao-gang. Fluid inclusion studies and the genesis of the Sarekuobu gold deposit, Xinjiang[J]. *Geotecton Metallogen*, 2012, 36(2): 227–239 (in Chinese with English abstract).