

# 东天山镜儿泉伟晶岩与花岗岩成因关系： 来自锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素证据

李寄邦<sup>1,2</sup>, 张 辉<sup>1\*</sup>, 吕正航<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所 地球内部物质高温高压重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 对东天山镜儿泉矿区花岗岩岩石地球化学以及花岗岩和伟晶岩锆石 U-Pb 定年、锆石 Hf 同位素组成特征进行了研究, 以便确定它们的形成时代、构造背景及伟晶岩与花岗岩的成因关系。研究结果显示, 镜儿泉矿区花岗岩属于高分异的过铝质花岗岩, 其中黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩形成时代分别为(223.6±1.5) Ma、(223.2±1.3) Ma 和(220.2±1.4) Ma, 锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分别变化于+10.7~ +11.8、+6.2~ +12.6 和 +6.2~ +10.7 范围; 镜儿泉伟晶岩 I 号脉形成年龄为(218.0±1.8) Ma, 锆石中  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分布于+10.6~ +12.3 范围。伟晶岩与花岗岩均具有相似的形成时代、同位素组成以及相对年轻的模式年龄( $t_{\text{DM2}} = 453\sim 864$  Ma), 表明镜儿泉伟晶岩与花岗岩有成因上的联系。因此, 镜儿泉伟晶岩成因应是后碰撞造山背景下不成熟新生地壳部分熔融形成的花岗质岩浆高度分异演化的产物。

**关键词:** 岩石成因论; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 伟晶岩; 花岗岩

中图分类号: P597; P588.121 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2020)04-0385-19

DOI: 10.19700/j.0379-1726.2020.04.003

## Genetic linkage between pegmatites and granites from Jingerquan, East Tianshan Mountains: Evidence from zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic data

LI Ji-bang<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui<sup>1\*</sup> and LÜ Zheng-hang<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of High-Temperature and High-Pressure Study of the Earth's Interior, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

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

**Abstract:** In this study, the characteristics of petrogeochemistry, zircon U-Pb dating, and zircon Hf isotopic composition of pegmatites and granites in the Jingerquan mining area in the East Tianshan Mountains were assessed to determine the formation age, tectonic setting, and genetic relationship between the pegmatites and granites. The results show that the granites in the Jingerquan mining area are highly fractionated peraluminous granite. The intrusion ages of the biotite, two-mica, and muscovite granites are (223.6±1.5) Ma, (223.2±1.3) Ma, and (220.2±1.4) Ma with zircon  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values varying in a range of +10.7 – +11.8, +6.2 – +12.6, and +6.2 – +10.7, respectively. The formation age of the No. 1 pegmatite is (218.0±1.8) Ma with zircon  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values in the range of +10.6 – +12.3. In addition, the pegmatite and granites have relatively young modal age characteristics ( $t_{\text{DM2}} = 453\sim 864$  Ma) indicating that they have a genetic relationship. Therefore, this study suggests that the Jingerquan pegmatites were generated via a high fractionation process of granitic magma from the partial melting of immature juvenile crust during the post-collisional stage.

**Key words:** petrogenesis; zircon U-Pb dating; Hf isotopes; pegmatites; granites

收稿日期(Received): 2018-04-11; 改回日期(Revised): 2018-07-05; 接受日期(Accepted): 2018-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(91962222、41372104); 新疆有色金属工业(集团)有限责任公司科研项目(2011YSKY-02)

作者简介: 李寄邦(1992-), 男, 硕士研究生, 岩石地球化学研究方向。E-mail: libang100@126.com

\* 通讯作者(Corresponding author): ZHANG Hui, E-mail: zhanghui@mail.gyig.ac.cn; Tel: +86-851-84398519

## 0 引言

目前有关花岗伟晶岩成因主要存在以下两种成因模式：岩浆分异和深熔模式；前者认为伟晶岩是花岗质岩浆经高度分异后的残余岩浆固结形成<sup>[1]</sup>；后者认为伟晶岩是经由壳源沉积物低程度部分熔融直接形成，而不经由岩浆房的分离结晶过程<sup>[2]</sup>。已有研究表明，LCT(富集Li-Cs-Ta)型伟晶岩与造山带之间存在着耦合关系<sup>[3-5]</sup>，与过铝质的S型花岗岩形成密切相关<sup>[6]</sup>。通常，过铝质花岗岩是后碰撞造山背景下的典型岩浆作用产物<sup>[7-8]</sup>，而LCT型伟晶岩是花岗质岩浆经由高度分异演化后残余岩浆固结形成<sup>[9-10]</sup>。

中国阿尔泰造山带中发育十万余条伟晶岩脉，是我国稀有金属Li、Be、Nb、Ta、Rb和Cs等以及非金属矿床的重要产地<sup>[11]</sup>。已有的研究表明，阿尔泰造山带中稀有金属矿化伟晶岩基本上与花岗岩之间不存在演化关系<sup>[12-15]</sup>，表明阿尔泰造山带中LCT型伟晶岩的成因不可能用花岗质岩浆分异模式来进行有效的解释。

位于东天山东段的镜儿泉锂矿区，区内出露的主要岩石为黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩，在白云母花岗岩中发育有诸多伟晶岩脉。部分岩脉发育稀有金属矿化，其中伟晶岩I号脉富含锂辉石，为一中型锂矿床。有关镜儿泉矿区花岗岩与伟晶岩的地球化学研究相对缺乏，目前仅见陈郑辉等报道的对镜儿泉伟晶岩中白云母进行了Ar-Ar定年数据((243±2) Ma)<sup>[16]</sup>。由于白云母封闭温度低，且易遭受后期热事件的扰动影响，因此，不清楚上述镜儿泉伟晶岩年龄值的可靠性。此外，不清楚区内花岗岩的形成时代和形成的大地构造背景，也不清楚镜儿泉伟晶岩与花岗岩的成因关系。

对于东天山造山带的构造-岩浆-成矿作用，在泥盆-石炭纪期间，东天山处于岛弧环境下，主要形成与基性-超基性岩相关的岩浆型铬铁矿床和火山-沉积型铁矿床；二叠纪则是东天山岩浆活动和成矿作用的高峰期，大量幔源岩浆侵入，导致地壳的垂向增生，主要形成碰撞-后碰撞造山环境下的铜镍硫化物矿床；进入三叠纪后，东天山的构造演化转入了板内活动阶段，主要形成斑岩型铜钼矿床和沿着康古尔断裂带分布的热液型金矿床<sup>[17-19]</sup>。目前，对于东天山造山带从后碰撞转入板内活动的时限问题

还存在着争议，大多数学者认为东天山在三叠纪处于板内伸展阶段<sup>[20-23]</sup>，然而部分学者通过研究东天山地区后碰撞背景下的花岗岩和康古尔韧性剪切带的金矿床，发现它们的形成时代为三叠纪<sup>[24-26]</sup>。因此，后碰撞造山运动可能从二叠纪持续到了三叠纪。

LCT型伟晶岩与造山带之间存在着耦合关系<sup>[3-5]</sup>，大规模LCT型伟晶岩侵入可能反映了后碰撞大陆岩石圈伸展的动力学背景<sup>[27]</sup>。基于上述，本研究开展镜儿泉矿区伟晶岩和花岗岩中锆石U-Pb定年和锆石Hf同位素的研究，并对不同岩性花岗岩开展岩石地球化学研究，旨在确定花岗岩的属性及演化关系，确定花岗岩、伟晶岩形成时代、物源特征，进而揭示伟晶岩的成因模式以及反演东天山造山带的构造演化历史。

## 1 区域及矿区地质

### 1.1 区域地质概况

在区域板块构造中，东天山造山带处于中亚造山带的南缘，是中亚造山带的重要组成部分。东天山造山带西起吐鲁番小热泉子以西，东至甘(肃)新(疆)省界，东西延伸约560 km，南北宽约110 km，地理坐标范围约为东经89°00'~96°00'、北纬41°40'~42°40'(图1)。

自北向南包括哈尔里克岛弧带，觉罗塔格构造带和中天山地块<sup>[28,31,32]</sup>。其中觉罗塔格构造带又可以分为大南湖-头苏泉岛弧带、康古尔-黄山韧性剪切带和阿奇山-雅满苏岛弧带(图1)。

区内地层主要包括中元古界长城系咸水泉组(Chx)变粒岩和蓟县系镜儿泉组(Jxj)绿片岩相变质岩，古生界泥盆系大南湖组(D<sub>1d</sub>)中基性-中酸性火山岩碎屑岩，石炭系干敦组(C<sub>1g</sub>)石英片岩、黑云母长英质角岩和长石石英变粒岩，侏罗系野马泉组(J<sub>1-2y</sub>)陆相碎屑岩以及第四系(Q)风化物等<sup>[23]</sup>。

区域构造发育，四条近东西向展布的深大断裂构成了东天山造山带的基本格架，自北向南依次为大草滩断裂、康古尔断裂、雅满苏断裂和阿奇克库都克断裂(图1)。区域性深大断裂不仅是东天山地区地质构造单元划分的重要依据，而且控制了区内构造、岩浆活动与成矿作用。特别是北东-南西向康古尔断裂带，长约600 km，宽约5~25 km，其衍生的诸多小断裂集中于镜儿泉、白山、咸水泉地区，是东天山地区与成岩成矿作用密切相关的大型变形-变质带<sup>[33]</sup>。

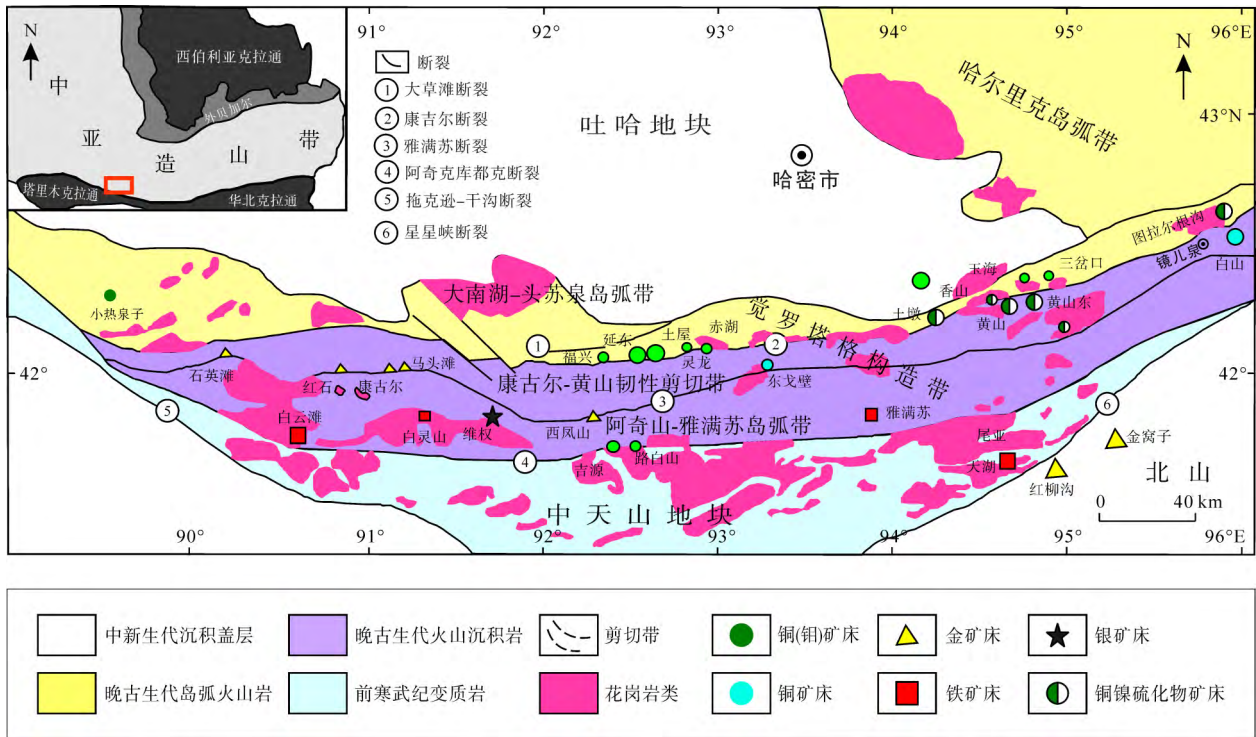


图 1 东天山造山带区域地质及矿产分布图(据文献[28-30], 略有修改)

Fig.1 Regional geology and mineral distribution map of the East Tianshan orogenic belt (after ref. [28-30])

东天山地区在加里东期、海西期以及印支期均有中酸性岩浆侵入活动存在, 其中以海西中晚期岩浆活动最为强烈。加里东期花岗岩类主要分布于镜儿泉以北的四顶黑山和图拉尔根沟一带, 岩性主要为花岗岩和黑云母斜长花岗岩等; 海西期花岗岩在区域内广泛存在, 岩性以二长花岗岩和钾长花岗岩为主, 其次为闪长岩等; 印支期花岗岩类主要分布东天山南部, 岩性主要为钾长花岗岩、碱长花岗岩以及少量二长花岗岩和闪长岩<sup>[22,23,28,34]</sup>。

## 1.2 矿区地质特征及样品采集

镜儿泉伟晶岩型锂矿床在大地构造位置上属于觉罗塔格构造带, 康古尔塔格-黄山断裂带的东侧(图 1)。镜儿泉地区仅出露地层主要为石炭系中统梧桐窝子组(C<sub>2w</sub>)灰岩、新生界新近系桃树园组(N<sub>1t</sub>)粉砂岩和第四系更新统(Q<sub>4h</sub>)灰色砾岩和全新统(Q<sub>3,4p</sub>)洪积砾石。区域上, 大面积的出露闪长岩, 总面积大于 170 km<sup>2</sup>, 黑云母花岗岩和白云母花岗岩分布广泛, 是镜儿泉地区出露的主要花岗岩体(图 2a)。矿区内的岩体主要为闪长岩、花岗岩和伟晶岩, 其中闪长岩以透镜状在北部局部出露(图 2b)。按照矿物组成, 矿区中出露的花岗岩可划分出黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩, 三者呈过渡

渐变关系, 野外地质观察中没有发现明显的侵入接触关系; 其中白云母花岗岩呈东西向展布, 出露面积最广, 二云母花岗岩主要集中在矿区的北部和西南部, 而黑云母花岗岩则出现的南部和西北部<sup>[35]</sup>。

伟晶岩总体呈脉状产于矿区的白云母花岗岩体内, 伟晶岩与白云母花岗岩之间呈现直接的过渡关系(图 3)。其中伟晶岩 I 号脉和 II 号脉是较大的脉体, 走向均为北东-南西。伟晶岩 I 号脉为锂辉石矿体, 为一大透镜状体, 倾角 50°~70°, 全长约 280 m, 膨胀部分约 100 m (长) × 35 m (宽)。上盘岩性为灰白色含石榴子石白云母花岗岩, 受挤压影响局部较破碎。该伟晶岩脉分带明显, 从北东往南西方向分带依次发育文象结构带、石英-微斜长石-白云母带、锂辉石-微斜长石-白云母带、石英-锂辉石核部带。Li 矿化主要在锂辉石-微斜长石-白云母结构带中, 所含矿石矿物主要为锂辉石、铌钽铁矿。此外, 在 I 号脉中部发育大量的绿色鳞片状云母集合体, 与粗粒的微斜长石共生, 很可能流体交代微斜长石的产物。伟晶岩 II 号脉位于 I 号脉的南西方向约 600 m 处, 倾角 30°~50°, 总体长 230 m, 沿走向仍具有膨胀狭缩现象。其上盘岩性主要为白云母花岗岩, 下盘岩性为白云母花岗岩、含石榴子石白云母花岗岩。II 号脉局部出现微弱的 Be-Nb-Ta 矿化, 矿石矿物为绿柱

石和铌钽铁矿。

本次样品采集位置如图 2b 所示, 其中花岗岩样品编号为 J-1~J-12, 伟晶岩样品采自 I 号脉中文象结构带, 编号为 J17。根据手标本及薄片镜下观察, 花岗岩按照其主要的矿物含量可分为白云母花岗岩(编号 J-1~J-4)、二云母花岗岩(编号 J-5~J-8)和黑云

母花岗岩(编号 J-9~J-12)。除主要造岩矿物斜长石(40%~50%)、石英(30%~35%)和微斜长石(15%~25%)外, 白云母花岗岩以含有 7%白云母, 不含黑云母(图 4a 和 4b), 二云母花岗岩以含有 3%白云母和 1%黑云母为特征(图 4c 和 4d), 而黑云母花岗岩以含有 2%黑云母, 不含白云母为特征(图 4e 和 4f)。

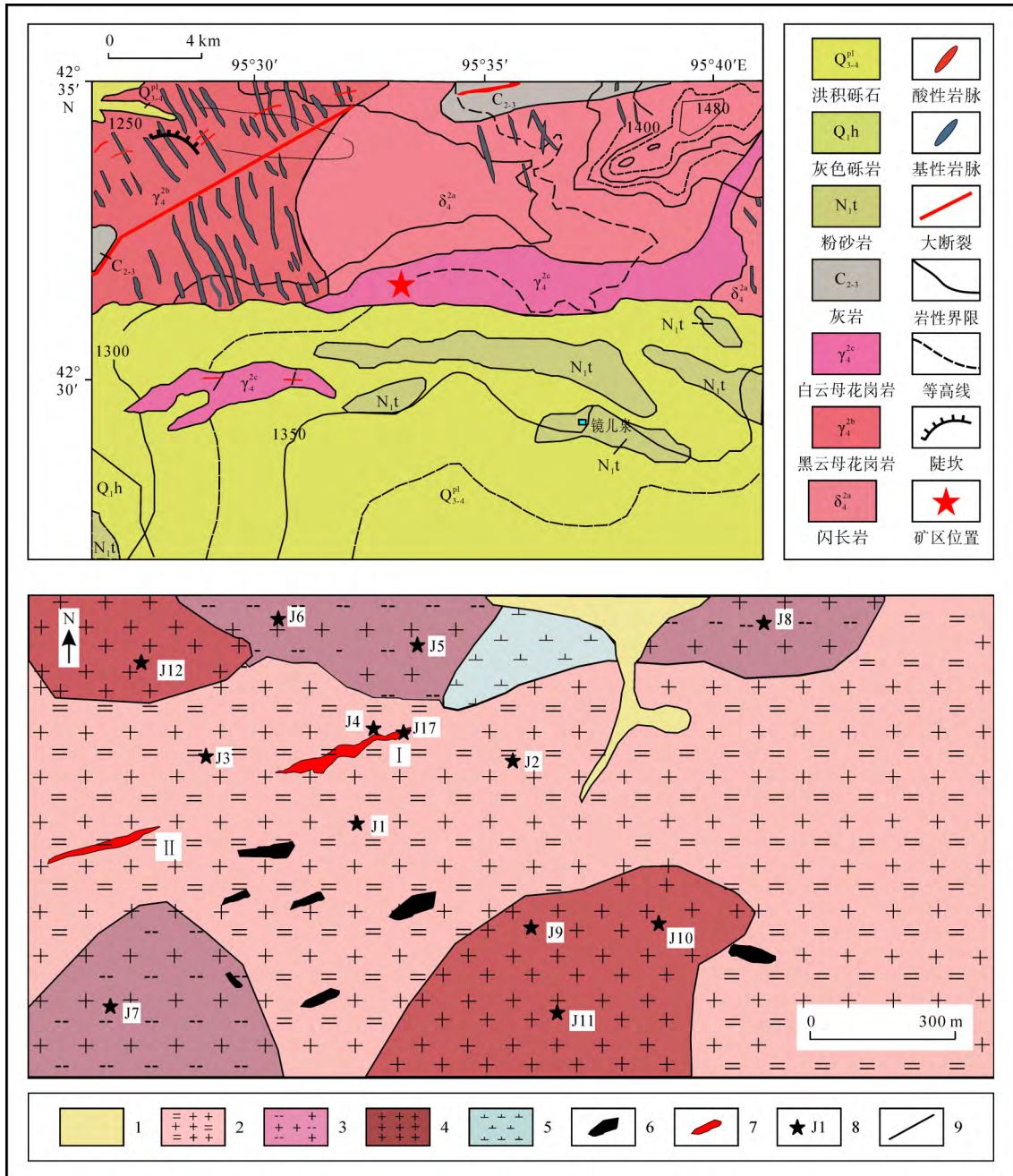


图 2 镜儿泉地区区域地质图(a)及矿区地质简图及采样位置(b)(据文献[35]改编)

Fig.2 Regional geological map of the Jingerquan area (a) and geological map and sampling position of the mining area (b) (after ref. [35])  
 1-第四系风化物; 2-白云母花岗岩; 3-二云母花岗岩; 4-黑云母花岗岩; 5-闪长岩; 6-基性岩脉; 7-伟晶岩脉; 8-采样点及编号; 9-地层与岩性界线  
 1-Quaternary weathering; 2-biotite granites; 3-two-mica granites; 4-muscovite granites; 5-diorites; 6-basic rocks; 7-pegmatites; 8-sampling position and number; 9-stratigraphic and lithologic boundary

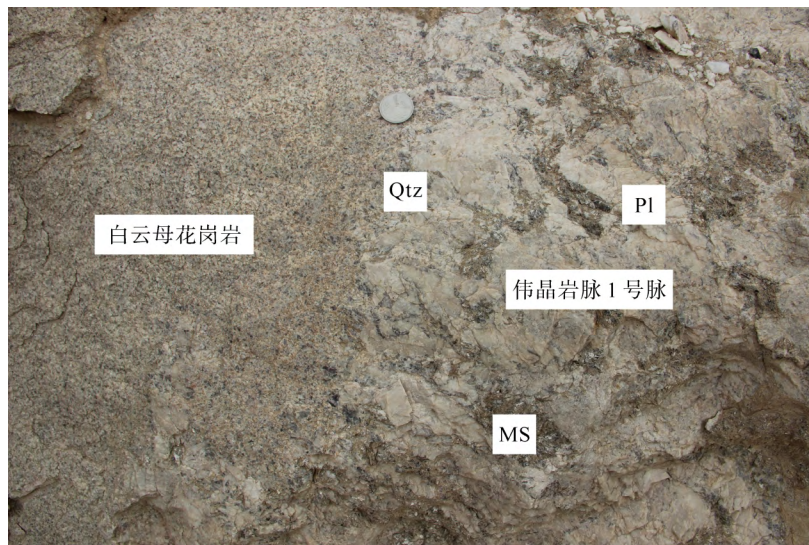


图 3 镜儿泉伟晶岩与白云母花岗岩渐变过渡接触关系

Fig.3 Contact relationship of gradual transition between pegmatite and muscovite granite in Jingerquan mining area

Qtz-石英; Ms-白云母; Pl-长石

Qtz-Quartz; Ms-muscovite; Pl-plagioclase

## 2 分析测试方法

本次采集的黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩样品 12 个, 其中编号 J-4、J-7、J-12 样品除进行主元素和微量元素测试外, 还用于分选锆石进行 U-Pb 定年和 Hf 同位素的测试, 此外, 采集了伟晶岩大样 (> 10 kg, 编号为 J-17) 用于分选锆石进行 U-Pb 定年和 Hf 同位素测试。

花岗岩全岩主元素分析在澳实矿物实验室完成, 使用的仪器是 X 荧光光谱仪, 测试所使用的仪器型号是 AXIOS PANalytical, 采用熔片法, 标样为 GSR03-0903, 测试结果, 相对标准偏差(RSD)优于 1%, 烧失量(LOI)是将 1 g 样品加热到 1100 °C 持续 1 h 后称量获得。

花岗岩全岩的微量元素(包括 REE)组成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完成的, 所使用的仪器是四级杆型电感耦合等离子体质谱(Q-ICP-MS), 加拿大 PerkinElmer 公司制造, 型号为 ELAN DRC-E。微量元素采用 HF+HNO<sub>3</sub> 密闭高压溶样, 详细的样品溶解流程见 Qi *et al.*<sup>[36]</sup>, 溶解好的样品溶液在四级杆等离子体质谱仪上测定, 对标样的重复测定表明, 微量元素的分析误差优于 10%。

花岗岩与伟晶岩样品经破碎至粒径小于 0.18 mm (~80 目)之后, 先进行淘洗和摇床分选重砂, 将重砂

进行磁选, 最后将无或极弱磁性重砂在双目镜下对锆石进行挑纯。锆石的制靶、阴极发光(CL)成像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完成。

锆石 U-Pb 同位素定年测试是在中国地质调查局天津地质调查中心完成。激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICPMS)由美国 ESI 公司 NEW WAVE 193 nm FX 激光器和美国赛默飞世尔公司 NEPTUNE 多接收等离子质谱组成。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<sup>2</sup>, 束斑直径为 44 μm, 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。原始的测试数据经过 Glitter 软件离线处理完成。年龄计算, 谐和图的绘制采用 Isoplot (3.0)程序完成<sup>[37]</sup>。普通铅校正参照 Andersen 方法完成<sup>[38]</sup>。利用 LA-ICPMS 对镜儿泉 3 种岩性的花岗岩和 1 个伟晶岩中的锆石进行 U-Pb 定年工作, 首先, 综合锆石 CL 特征选取激光剥蚀点, 花岗岩与伟晶岩锆石的剥蚀位置选择均一的区域, 其次, 采集信号过程中通过监视信号的稳定性来推测是否混入包裹体或裂隙信号, 从而剔除无效点<sup>[12-13]</sup>。

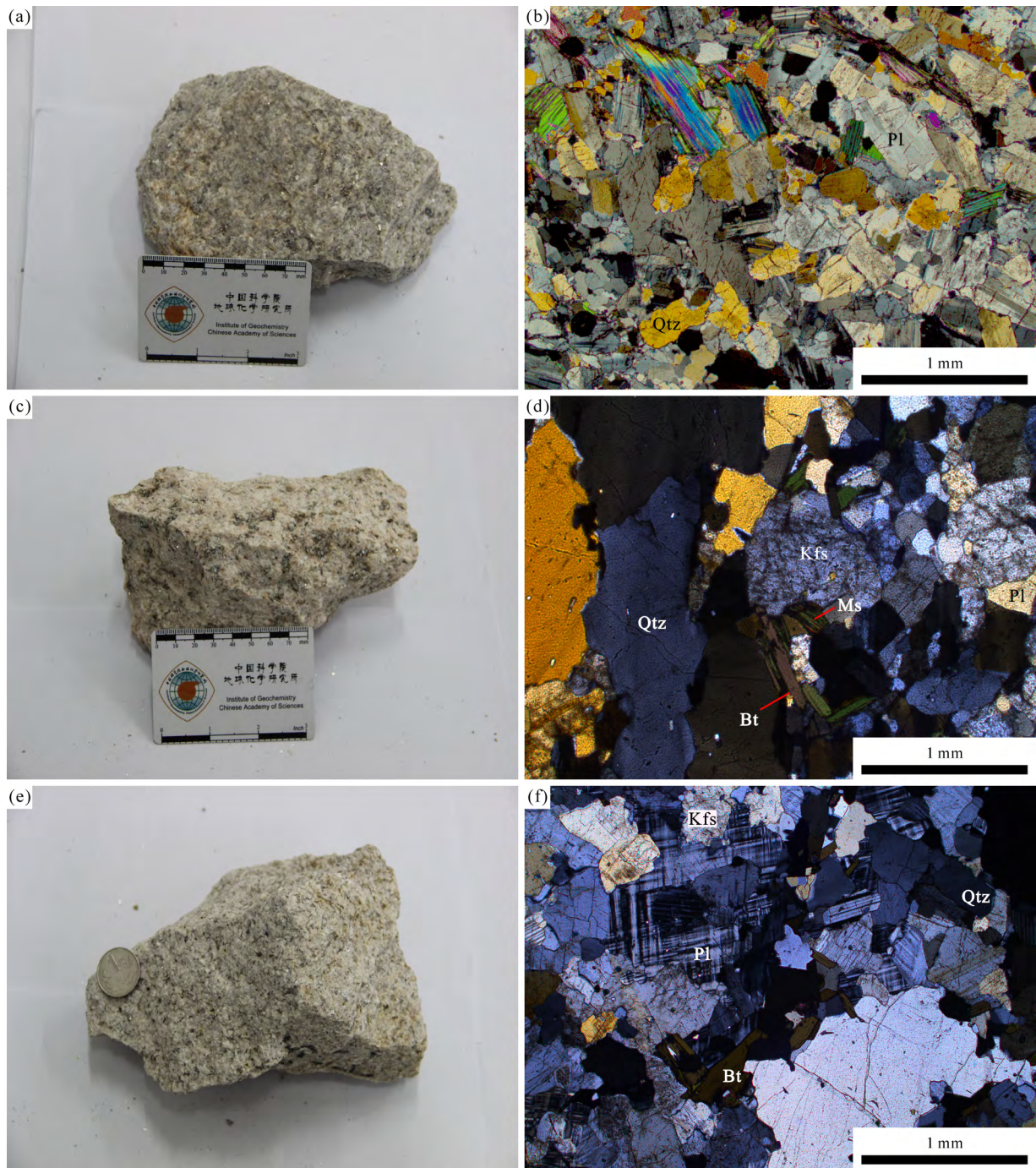


图4 镜儿泉花岗岩手标本及显微特征

Fig.4 Hand specimen and microscopic characteristics of the Jingerquan granites

(a) 白云母花岗岩; (b) 白云母花岗岩正交镜下特征; (c) 二云母花岗岩; (d) 二云母花岗岩正交镜下特征; (e) 黑云母花岗岩; (f) 黑云母花岗岩正交镜下特征。

Qtz-石英; Ms-白云母; Pl-斜长石; Bt-黑云母; Kfs-微斜长石

(a) Muscovite granite; (b) characteristics of muscovite granite (cross-polarized light); (c) two-mica granite; (d) characteristics of two-mica granite (cross-polarized light); (e) biotite granite; (f) characteristics of biotite granite (cross-polarized light)

Qtz-Quartz; Ms-muscovite; Pl-plagioclase; Bt-biotite; Kfs-K-feldspar.

锆石 Hf 同位素分析在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完成, 仪器为 Neptune Plus MC-ICPMS (Thermo Scientific), 结合 RESolution M-50 193 nm 激光消融系统(Resonetics),

这两种仪器的详细描述详见 Zhang *et al.*<sup>[39]</sup>。对进行过 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄分析的锆石颗粒, 原位 <sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 比值测定将在原年龄分析位置或附近进行, 激光剥蚀取样过程中, 激光脉冲频率为 6 Hz,

激光束直径为 45  $\mu\text{m}$ , 信号采集时间为 30 s。

测试过程中,  $^{173}\text{Yb}$  和  $^{175}\text{Lu}$  被用于校正  $^{176}\text{Hf}$  上的  $^{176}\text{Yb}$  和  $^{176}\text{Lu}$  的干扰。修正中使用的  $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}$  和  $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}$  的自然比值分别为 0.79381<sup>[40]</sup>和 0.02656<sup>[41]</sup>。 $\text{Yb}$  的质量偏差因子是通过测量的  $^{173}\text{Yb} / ^{171}\text{Yb}$  和 1.13268 的自然比率来计算的。假定  $\text{Lu}$  的质量偏差因子与  $\text{Yb}$  的质量偏差因子相同。用指数规律将  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  的质量偏差标准化为  $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 。详细的数据简化程序见 Zhang *et al.*<sup>[42]</sup>。在本研究过程中对 Plešovice 锆石进行的 40 次分析得出的加权平均值为  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282485 \pm 0.000035$  ( $2\sigma$ ), 与 Slama *et al.*报道的误差一致<sup>[43]</sup>。

### 3 结果

#### 3.1 花岗岩地球化学特征

镜儿泉三种花岗岩的主元素组成显示(表 1), 花岗岩含有高的  $\text{SiO}_2$  (72.8%~76.2%)及全碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )含量 (7.86%~8.82%), 低的  $\text{TiO}_2$  (0.01%~0.04%)、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$  (1.07%~1.71%)、 $\text{MgO}$  (0.06%~0.12%)、 $\text{CaO}$  (0.28%~1.21%)、 $\text{MnO}$  (0.04%~0.36%)、 $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.02%~0.08%) 含量为特征。显示中等的里特曼指数( $\sigma$ ) (2.02~2.53), 大于 1 的铝饱和指数( $\text{A}/\text{CNK} = 1.02\sim 1.21$ )和相对较高的分异指数( $\text{DI}$ ) (91.0~94.7)。

表 1 镜儿泉花岗岩主元素(%)和微量元素( $\mu\text{g}/\text{g}$ )分析数据表  
Table 1 Analytical results of main (%) and trace ( $\mu\text{g}/\text{g}$ ) elements of the Jingerquan granites

岩性 样号	白云母花岗岩				二云母花岗岩				黑云母花岗岩			
	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9	J-10	J-11	J-12
$\text{SiO}_2$	74.45	73.80	75.69	76.15	75.19	75.37	74.25	74.24	74.15	72.77	73.65	73.87
$\text{TiO}_2$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
$\text{Al}_2\text{O}_3$	14.50	14.93	14.56	14.32	13.38	13.46	14.18	14.22	14.10	14.17	13.22	13.16
$\text{TFe}_2\text{O}_3^{(1)}$	1.07	1.15	1.27	1.18	1.73	1.46	1.61	1.36	1.53	1.71	1.50	1.49
$\text{MnO}$	0.36	0.22	0.17	0.17	0.11	0.10	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05
$\text{MgO}$	0.08	0.08	0.06	0.07	0.09	0.09	0.10	0.10	0.07	0.12	0.09	0.10
$\text{CaO}$	0.28	0.29	0.59	0.58	0.85	0.84	0.85	0.86	1.21	1.21	1.04	1.04
$\text{Na}_2\text{O}$	5.48	3.92	4.43	4.38	3.97	3.95	4.00	4.01	4.49	4.43	3.91	3.96
$\text{K}_2\text{O}$	2.88	4.90	4.00	3.97	4.21	4.22	4.38	4.38	3.89	3.90	3.95	3.98
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.08	0.06	0.07	0.07	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
$\text{LOI}^{(2)}$	0.52	0.47	0.69	0.67	0.21	0.30	0.66	0.90	0.64	0.55	0.13	0.13
Total <sup>(3)</sup>	99.71	99.83	101.54	101.57	99.78	99.83	100.13	100.16	100.17	98.95	97.60	97.84
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	8.36	8.82	8.43	8.35	8.18	8.17	8.38	8.39	8.38	8.33	7.86	7.94
$\sigma^{(4)}$	2.22	2.53	2.17	2.10	2.08	2.06	2.25	2.25	2.25	2.33	2.02	2.04
$\text{A}/\text{CNK}^{(5)}$	1.15	1.21	1.15	1.14	1.06	1.07	1.10	1.10	1.02	1.03	1.05	1.03
$\text{A}/\text{NK}^{(6)}$	1.19	1.27	1.25	1.24	1.21	1.22	1.25	1.25	1.21	1.23	1.23	1.21
$\text{DI}^{(7)}$	94.70	94.00	93.40	93.64	92.51	92.79	92.20	92.45	91.62	90.98	91.89	92.08
La	1.35	2.10	2.16	3.91	7.99	7.11	6.06	7.83	4.07	3.53	7.12	6.50
Ce	4.34	6.81	6.13	10.7	16.7	14.9	12.1	16.0	8.25	6.94	15.7	15.2
Pr	0.60	0.75	0.67	1.30	1.66	1.44	1.24	1.60	0.84	0.70	1.78	1.65
Nd	2.35	2.96	2.63	4.84	5.83	5.30	4.22	5.73	2.93	2.48	6.56	6.58
Sm	1.49	1.18	1.16	2.02	1.15	0.99	0.84	1.04	0.79	0.65	1.61	1.50
Eu	0.01	0.01	0.03	0.02	0.13	0.12	0.13	0.16	0.17	0.16	0.28	0.29
Gd	1.82	1.37	1.31	2.05	0.64	0.85	0.66	0.91	0.93	0.70	1.08	1.19
Tb	0.32	0.29	0.30	0.39	0.13	0.13	0.09	0.10	0.17	0.13	0.16	0.16
Dy	1.06	1.37	2.03	2.31	0.61	0.66	0.41	0.49	1.30	0.67	0.76	0.75
Ho	0.10	0.20	0.35	0.42	0.11	0.12	0.09	0.09	0.24	0.14	0.14	0.14
Er	0.17	0.46	1.04	1.19	0.33	0.41	0.31	0.30	0.68	0.45	0.39	0.34
Tm	0.02	0.07	0.18	0.18	0.05	0.05	0.05	0.05	0.12	0.08	0.05	0.05
Yb	0.16	0.42	1.14	1.16	0.38	0.40	0.40	0.36	0.75	0.54	0.32	0.31

(续表 1)

岩性	白云母花岗岩				二云母花岗岩				黑云母花岗岩			
	样号	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7	J-8	J-9	J-10	J-11
Lu	0.02	0.05	0.15	0.16	0.05	0.06	0.06	0.06	0.10	0.08	0.05	0.05
Y	4.25	7.17	11.9	13.5	3.18	3.64	2.82	2.65	7.76	4.71	4.21	4.13
ΣREE	13.8	18.1	19.3	30.6	35.8	32.5	26.7	34.7	21.3	17.3	36.0	34.7
LREE	10.1	13.8	12.8	22.8	33.5	29.9	24.6	32.4	17.1	14.5	33.1	31.7
HREE	3.67	4.23	6.50	7.86	2.30	2.68	2.07	2.36	4.29	2.79	2.95	2.99
LREE/HREE	2.76	3.26	1.97	2.90	14.6	11.1	11.9	13.7	3.97	5.18	11.2	10.6
δEu	0.01	0.03	0.07	0.03	0.47	0.40	0.54	0.51	0.61	0.71	0.65	0.67
(La/Sm) <sub>N</sub>	0.58	1.15	1.20	1.25	4.49	4.64	4.67	4.86	3.32	3.52	2.85	2.80
(La/Gd) <sub>N</sub>	0.64	1.33	1.43	1.65	10.8	7.27	7.94	7.45	3.81	4.39	5.72	4.74
(La/Yb) <sub>N</sub>	6.09	3.6	1.36	2.42	15.0	12.6	11.0	15.7	3.92	4.65	16.1	15.1
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	9.47	2.71	0.95	1.46	1.38	1.74	1.38	2.11	1.03	1.06	2.82	3.19
Li	218	194	128	125	3.10	2.57	2.60	3.86	11.5	12.7	2.87	3.43
Be	5.48	3.59	4.04	4.65	1.50	1.82	1.03	0.36	1.40	1.32	1.54	0.54
Rb	233	177	180	178	86.2	85.1	81.5	79.5	64.5	64.4	65.3	64.2
Cs	19.9	5.49	7.42	7.05	0.77	0.76	0.62	0.63	0.72	0.72	0.81	0.79
Sr	3.44	2.84	8.83	8.10	95.7	96.4	56.9	58.0	168	174	166	162
Ba	2.31	2.34	14.7	12.3	171.9	171.9	201.9	171.9	592	581	227	233
Zr	23.6	42.9	23.2	21.7	35.8	36.3	43.7	44.1	25.4	27.5	14.2	14.2
Hf	2.50	4.72	2.04	1.96	1.61	1.61	2.30	1.95	1.59	1.41	0.78	0.78
Nb	19.7	22.4	19.0	18.5	2.27	2.09	2.51	2.31	5.19	5.22	7.71	7.63
Ta	2.66	3.37	3.01	3.00	0.65	0.61	0.68	0.62	0.40	0.40	0.38	0.40
Th	1.94	1.67	1.36	2.60	1.50	1.25	2.88	1.75	3.36	2.76	2.18	3.25
U	0.74	0.77	0.87	1.03	0.51	0.52	0.63	0.58	0.52	0.50	0.40	0.33
Ti	59.9	59.9	59.9	59.9	120	120	120	120	120	180	240	240
Ga	19.9	16.2	17.8	15.1	11.4	12.5	12.3	12.4	9.23	9.23	9.13	9.58
K/Rb	103.9	232.7	186.8	187.4	410.5	416.8	451.7	463.0	506.9	509.0	508.4	521.0
K/Cs	1213	7501	4530	47323	42457	43127	53543	53093	49141	49258	45445	46596
Rb/Sr	67.73	62.32	20.39	21.98	0.90	0.88	1.43	1.37	0.38	0.37	0.39	0.40

注: (1) 总铁; (2) 烧失量; (3) 总量; (4) 里特曼指数,  $\sigma = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)$ ; (5) ASI = A/CNK ( $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 摩尔比); (6) A/NK ( $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 摩尔比); (7) 分异指数,  $\text{DI} = \text{Qz} + \text{Or} + \text{Ab} + \text{Ne} + \text{Lc} + \text{Kp}$ , 式中: Qz-石英, Or-正长石, Ab-钠长石, Ne-霞石, Lc-石榴石, Kp-六方钾霞石。

原始地幔标准化微量元素蛛网图显示, 镜儿泉黑云母花岗岩显示富集大离子亲石元素 K、Rb 和高场强元素 Zr、Hf, 亏损高场强元素 Ti; 白云母花岗岩显示富集大离子亲石元素 K、Rb、Th、U、P 和高场强元素 Nb、Ta、Hf, 亏损大离子亲石元素 Sr、Ba、La 和高场强元素 Ti、Zr 的特征; 而二云母花岗岩显示介于黑云母花岗岩与白云母花岗岩之间的微量元素特征(表 1, 图 5a)。黑云母花岗岩中 Ti、P 亏损很可能与残留相中钛铁矿、金红石和磷灰石结晶有关; 而白云母花岗岩中 Sr、Ba、La、Ti、Zr 亏损则可能归因于斜长石、黑云母、独居石、钛铁矿、金红石和锆石的分离结晶。与黑云母花岗岩、二云

母花岗岩比较, 白云母花岗岩明显富集稀有金属元素 Li、Rb 和 Cs(表 1)。

镜儿泉花岗岩显示低的 REE 含量, 其  $\Sigma\text{REE}$  变化于 13.8~36.00  $\mu\text{g/g}$  之间(表 1)。黑云母花岗岩  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Gd})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  比值分别变化于 2.80~3.52、3.81~5.72、3.92~16.11 和 1.03~3.19 之间, 指示存在相对较小的轻-轻稀土、轻-中稀土和中-重稀土之间的分异以及相对较大的轻-重稀土间的分异; 二云母花岗岩  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Gd})_{\text{N}}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$  比值分别变化于 4.49~4.86、7.27~10.9、11.0~15.7 和 1.38~2.11 之间, 表明存在相对较小的轻-轻稀土、中-重稀土之间的分异和相对



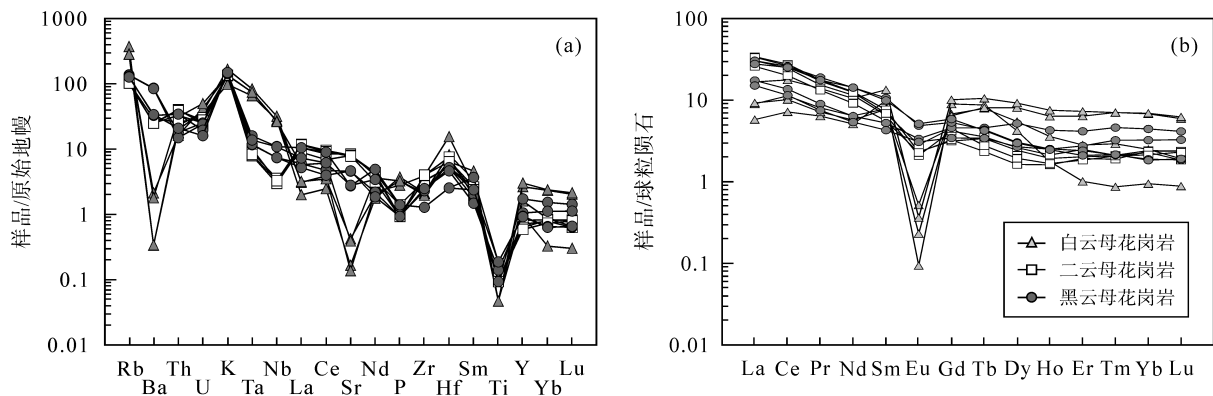


图 5 原始地幔标准化微量元素蛛网图和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(据文献[44])

Fig.5 Primitive mantle-normalized incompatible element spider diagram and chondrite-normalized rare earth element patterns of the three granites (after ref. [44])

较大的轻-中稀土、轻-重稀土间的分异; 白云母花岗岩 $(La/Sm)_N$ 、 $(La/Gd)_N$ 、 $(La/Yb)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 比值分别变化于 0.58~1.25、0.64~1.65、1.36~6.09 和 0.95~9.47 之间, 指示存在很小的轻-轻稀土、轻-中稀土间的分异, 相对较大的轻-重稀土、中-重稀土间的分异; 球粒陨石标准化稀土元素配分模式显示黑云母花岗岩和二云母花岗岩总体具有轻稀土元素(LREE=La-Nd)富集的特征, 而白云母花岗岩显示中稀土元素(MREE=Sm-Dy)富集并有微弱的“四分组”效应的特征(图 5b)。三种花岗岩均显示 Eu 负异常, 其中黑云母花岗岩为较弱的 Eu 负异常(0.61~0.81), 二云母显示中等的负 Eu 异常 (0.39~0.54), 而白云母则是显示强烈的负 Eu 异常 (0.01~0.07), 可能斜长石分离结晶所导致的。

### 3.2 锆石 U-Pb 定年

白云母花岗岩(样号 J4): 锆石呈淡黄色透明, 粒径集中在 80~120  $\mu\text{m}$  之间, 多表现为自形晶体, 大部分锆石显示了强的阴极发光特征, 并且发育振荡环带(图 6a)。锆石中 Th 和 U 含量分别在 89.72~3136  $\mu\text{g/g}$  和 2894~5541  $\mu\text{g/g}$  之间, 其 Th/U 比值变化于 0.02~0.87 之间(表 2), 表明这些锆石是岩浆成因。白云母花岗岩 14 个测点的 U-Pb 分析结果显示,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  比值分布于 215.6~226.2 Ma 之间, 加权平均年龄为(220.2 $\pm$ 1.4) Ma (MSWD = 0.87), 代表白云母花岗岩的形成年龄(图 7a)。

二云母花岗岩(样号 J7): 锆石呈黄褐色透明, 粒径集中在 60~100  $\mu\text{m}$  之间, 多表现为自形晶体, 长宽比值变化于 2:1~4:1 之间, 大部分锆石显示了清晰的环带结构(图 6b), 锆石中 Th 和 U 含量分别变化于 65.80~563.7  $\mu\text{g/g}$  和 95.81~3249  $\mu\text{g/g}$  之间,

其 Th/U 比值变化于 0.15~0.77 之间(表 2), 表明这些锆石是岩浆成因。二云母花岗岩 16 个测点的 U-Pb 分析结果显示,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  比值分布于 220.2~225.4 Ma 之间, 16 个点的加权平均年龄为(223.2 $\pm$ 1.3) Ma (MSWD = 0.35), 代表二云母花岗岩的形成年龄(图 7b)。

黑云母花岗岩(样号 J12): 锆石呈淡黄色透明, 粒径集中在 50~100 $\mu\text{m}$  范围, 表现为自形-半自形晶体, 大部分锆石发育振荡环带(图 6c), 锆石 Th 和 U 含量分别变化于 78.32~1499  $\mu\text{g/g}$  和 176.3~4501  $\mu\text{g/g}$  之间, 并且 Th/U 比值为 0.09~0.74 (表 2), 表明这些锆石是岩浆成因。黑云母花岗岩 13 个测点的 U-Pb 分析结果显示,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  比值分布于 202.0~229.0 Ma 之间, 13 个点的加权平均年龄为(223.6 $\pm$ 1.5) Ma (MSWD=0.98), 代表黑云母花岗岩的形成年龄(图 7c)。

伟晶岩 I 号脉(样号 J17): 锆石呈棕至黑色, 不透明, 自形-半自形晶体, 部分表现为四方双锥, 粒径在 150~200  $\mu\text{m}$  之间(图 6d); 大部分锆石显示暗的 CL 特征, 无环带结构发育, 锆石中含有多孔隙的海绵状区域, 可能锆石蜕晶化后热液交代或重结晶所致; 少部分锆石边部显示弱的环带结构; 大部分伟晶岩锆石具有较高的 U 和 Th 含量, 分别变化于 450.9~7234  $\mu\text{g/g}$  和 125.3~5411  $\mu\text{g/g}$  之间, Th/U 比值变化范围是 0.02~1.14 (表 2)。伟晶岩 13 个测点的 U-Pb 分析结果显示,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  分布于 114.3~220.6 Ma 之间, 其中 4 个测点(J17-9、J-10、J-11 和 J-13)年龄显著偏小且谐和度低, 可能发生过 Pb 丢失或由矿物包体所致。其它 9 个测点加权平均年龄为(218.0 $\pm$ 1.8) Ma (MSWD = 0.38), 代表伟晶岩的形成年龄(图 7d)。

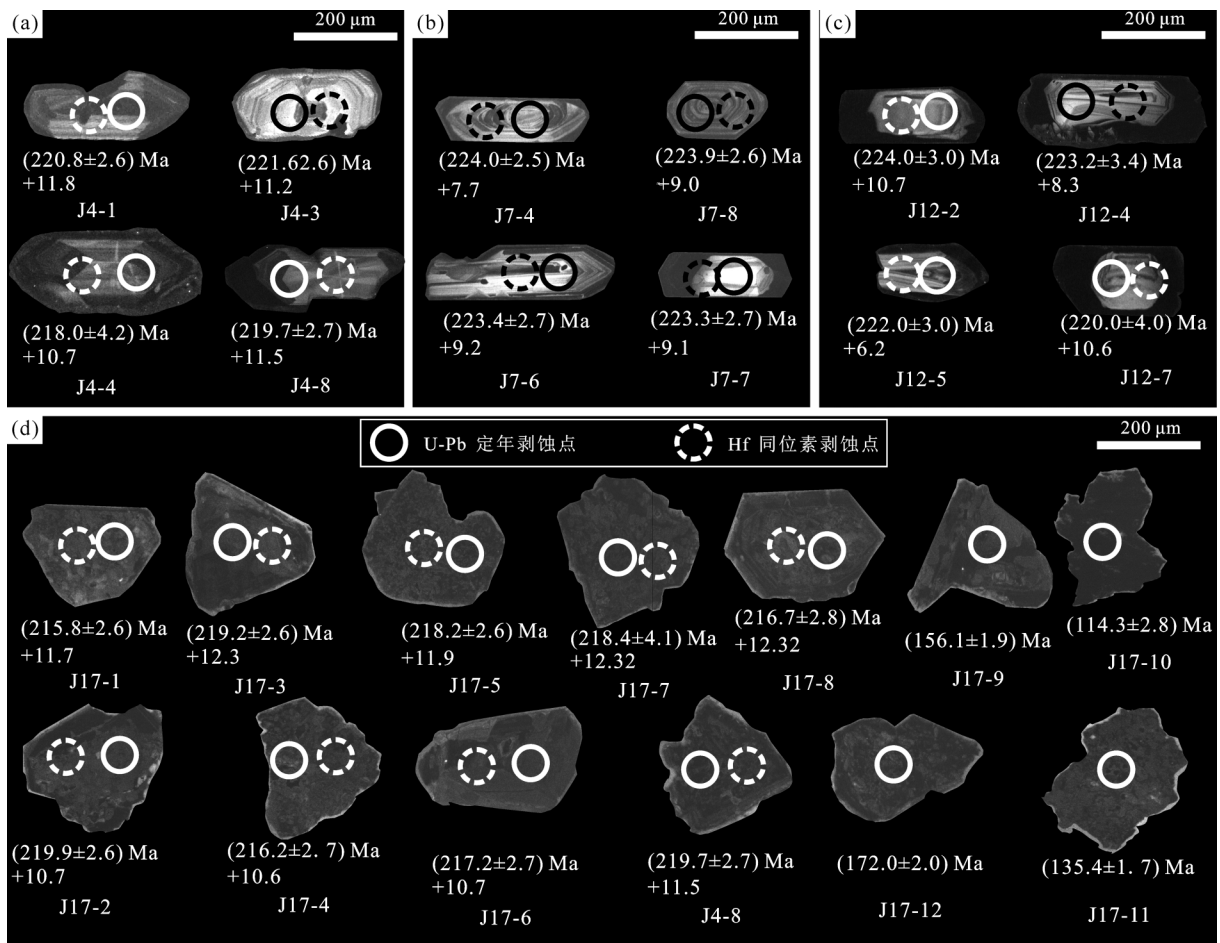


图6 镜儿泉花岗岩与伟晶岩代表性锆石的 CL 图像和剥蚀位置

Fig.6 Cathodoluminescence images and laser ablation locations of representative zircons of Jingerquan granite and pegmatite

(a) 白云母花岗岩中锆石; (b) 二云母花岗岩中锆石; (c) 黑云母中锆石; (d) 1号脉中锆石

(a) Zircons of muscovite granite; (b) zircons of two-mica granite; (c) zircons of biotite granite; (d) zircons of pegmatite No.1

### 3.3 锆石 Hf 同位素

黑云母花岗岩(样号 J12): 8 个测点的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值变化于 0.282824~0.282942 之间, 根据锆石 U-Pb 定年结果计算获得的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化于 +6.2~ +10.7 之间, 对应二阶段模式年龄( $t_{\text{DM}2}$ )变化于 575~862 Ma 之间(表 3)。

二云母花岗岩(样号 J7): 8 个测点的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值变化于 0.282815~0.282995 之间, 根据锆石 U-Pb 定年结果计算获得的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化于 +6.2~ +12.6 之间, 对应二阶段模式年龄( $t_{\text{DM}2}$ )变化于 523~864 Ma 之间(表 3)。

白云母花岗岩(样号 J4): 8 个测点的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值变化于 0.282938~0.282970 之间, 根据锆石 U-Pb 定年结果计算获得的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化于 +10.7~ +11.8 之间, 对应二阶段模式年龄( $t_{\text{DM}2}$ )变化于 501~572 Ma 之间(表 3)。

伟晶岩 I 号脉(样号 J17): 8 个测点  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值变化于 0.282935~0.282985 之间, 根据锆石 U-Pb 定年结果计算获得的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值变化于 +10.6~ +12.3 之间, 对应二阶段模式年龄( $t_{\text{DM}2}$ )变化于 465~578 Ma 之间(表 3)。

## 4 讨论

### 4.1 花岗岩属性及其演化

在 TAS 图解(图 8a)中, 三种岩性的样品均落在花岗岩区域; 在  $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  图解中, 除 1 个白云母花岗岩投在钙碱性系列中, 其它样品均投在高钾钙碱性系列范围(图 8b), 在 A/NK-A/CNK 图解中, 白云母花岗岩投在强过铝质范围( $\text{ASI} \geq 1.10$ ), 而二云母花岗岩和黑云母花岗岩投在了过铝质范围( $\text{ASI} = 1.02\sim 1.10$ ) (图 8c)。在 Zr-Ga/Al 图解中, 所有的数据

表 2 镜儿泉伟晶岩与花岗岩的锆石 U-Pb 定年结果  
Table 2 Zircon U-Pb dating results for the Jingerquan pegmatite and granites

点号	Th (μg/g)	U (μg/g)	Th/U	同位素比值±1σ						年龄±1σ (Ma)			
				<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ
J4 白云母花岗岩													
1	113.8	4358	0.03	0.04562	0.00131	0.25119	0.00773	0.03484	0.00042	227.5	6.3	220.8	2.6
2	270.1	3360	0.08	0.04240	0.00086	0.25332	0.00559	0.03460	0.00040	229.3	4.5	219.3	2.5
3	642.1	3651	0.18	0.06853	0.00130	0.27412	0.00575	0.03497	0.00041	246.0	4.6	221.6	2.6
4	3136	3614	0.87	0.10738	0.00627	0.24729	0.01532	0.03440	0.00068	224.4	12.5	218.0	4.2
5	731.6	2894	0.25	0.04438	0.00302	0.24350	0.01720	0.03401	0.00047	221.3	14.0	215.6	3.0
6	946.5	3437	0.28	0.10994	0.00360	0.38828	0.01406	0.03483	0.00048	333.1	10.3	220.7	3.0
7	2200	4632	0.47	0.07842	0.00077	0.43059	0.00473	0.03472	0.00039	363.6	3.4	220.0	2.4
8	1264	3725	0.34	0.05509	0.00151	0.24105	0.00716	0.03467	0.00043	219.3	5.9	219.7	2.7
9	311.8	4284	0.07	0.10863	0.00555	0.24128	0.01295	0.03458	0.00062	219.5	10.6	219.1	3.8
10	89.72	5541	0.02	0.05894	0.00070	0.28908	0.00379	0.03419	0.00039	257.8	3.0	216.7	2.4
11	274.4	4317	0.06	0.05476	0.00060	0.26278	0.00316	0.03477	0.00039	236.9	2.5	220.3	2.4
12	253.8	3261	0.08	0.09170	0.00101	0.46788	0.00577	0.03490	0.00039	389.7	4.0	221.1	2.5
13	576.8	4898	0.12	0.06567	0.00116	0.27698	0.00541	0.03571	0.00042	248.3	4.3	226.2	2.6
14	132.2	4128	0.03	0.05266	0.00089	0.23553	0.00437	0.03501	0.00041	214.8	3.6	221.8	2.5
J7 二云母花岗岩													
1	264.8	1816	0.15	0.05914	0.00058	0.36826	0.00445	0.03558	0.00041	318.4	3.3	225.4	2.6
2	563.7	2735	0.21	0.04209	0.00040	0.25502	0.00297	0.03555	0.00041	230.6	2.4	225.2	2.5
3	367.6	1958	0.19	0.06520	0.00059	0.35556	0.00391	0.03538	0.00040	308.9	2.9	224.1	2.5
4	174.2	274.3	0.64	0.04323	0.00047	0.24891	0.00320	0.03536	0.00041	225.7	2.6	224.0	2.5
5	255.9	483.0	0.53	0.06677	0.00543	0.24820	0.02082	0.03556	0.00060	225.1	16.9	225.3	3.7
6	236.9	552.5	0.43	0.06593	0.00063	0.34499	0.00389	0.03528	0.00040	300.9	2.9	223.5	2.5
7	537.1	3249	0.17	0.06776	0.00065	0.37035	0.00416	0.03478	0.00039	319.9	3.1	220.4	2.4
8	92.99	173.0	0.54	0.07149	0.00110	0.32975	0.00579	0.03534	0.00041	289.4	4.4	223.9	2.6
9	187.1	284.3	0.66	0.05686	0.00083	0.27358	0.00452	0.03475	0.00040	245.6	3.6	220.2	2.5
10	443.9	1292	0.34	0.06558	0.00079	0.34164	0.00462	0.03499	0.00039	298.4	3.5	221.7	2.4
11	185.4	310.4	0.60	0.07775	0.00111	0.36877	0.00611	0.03511	0.00043	318.7	4.5	222.4	2.7
12	169.4	682.7	0.25	0.05437	0.00114	0.25249	0.00589	0.03526	0.00044	228.6	4.8	223.4	2.7
13	107.5	139.1	0.77	0.07479	0.00131	0.32731	0.00652	0.03518	0.00044	287.5	5.0	222.9	2.7
14	465.6	2851	0.16	0.04765	0.00052	0.26651	0.00335	0.03527	0.00042	239.9	2.7	223.5	2.6
15	338.6	1317	0.26	0.06262	0.00102	0.27869	0.00511	0.03525	0.00043	249.6	4.1	223.3	2.7
16	65.80	95.81	0.69	0.05368	0.00061	0.23860	0.00313	0.03522	0.00041	217.3	2.6	223.2	2.6
J12 黑云母花岗岩													
1	110.8	178.6	0.62	0.07815	0.00148	0.36531	0.00779	0.03613	0.00044	316.2	5.8	228.8	2.7
2	125.8	444.2	0.28	0.04605	0.00474	0.22484	0.02295	0.03542	0.00049	206.0	19.0	224.0	3.0
3	1499	2018	0.74	0.04605	0.00461	0.22986	0.02283	0.03621	0.00044	210.0	19.0	229.0	3.0
4	157.5	410.2	0.38	0.11976	0.00347	0.56857	0.01937	0.03523	0.00054	457.1	12.5	223.2	3.4
5	924.4	4038	0.23	0.04605	0.00570	0.22249	0.02739	0.03505	0.00043	204.0	23.0	222.0	3.0
6	218.6	1706	0.13	0.04605	0.00295	0.22246	0.01399	0.03504	0.00044	204.0	12.0	222.0	3.0
7	78.32	342.1	0.23	0.04605	0.00518	0.22016	0.02448	0.03468	0.00059	202.0	20.0	220.0	4.0
8	152.3	434.2	0.35	0.04605	0.00281	0.22452	0.01345	0.03536	0.00043	206.0	11.0	224.0	3.0
9	93.73	189.7	0.49	0.04605	0.00289	0.22074	0.01363	0.03477	0.00039	203.0	11.0	220.0	2.0
10	94.83	231.3	0.41	0.04605	0.00281	0.22489	0.01350	0.03542	0.00040	206.0	11.0	224.0	2.0
11	299.3	1046	0.29	0.05444	0.00060	0.30151	0.00388	0.03542	0.00040	267.6	3.0	224.4	2.5
12	409.2	4502	0.09	0.05956	0.00102	0.32615	0.00645	0.03521	0.00040	286.6	4.9	223.1	2.5
13	125.6	176.3	0.71	0.05181	0.00113	0.24057	0.00584	0.03521	0.00041	218.9	4.8	223.1	2.6

(续表2)

点号	Th (μg/g)	U (μg/g)	Th/U	同位素比值±1σ						年龄±1σ (Ma)			
				<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ
J17 伟晶岩 I 号脉													
1	1375	3144	0.44	0.08285	0.00107	0.34805	0.00536	0.03405	0.00041	303.3	4.0	215.8	2.6
2	1889	6879	0.27	0.05986	0.00061	0.34378	0.00439	0.03470	0.00041	300.0	3.3	219.9	2.6
3	190.0	3501	0.05	0.06420	0.00067	0.36912	0.00485	0.03458	0.00042	319.0	3.6	219.2	2.6
4	5216	6102	0.85	0.05805	0.00108	0.24353	0.00520	0.03411	0.00043	221.3	4.2	216.2	2.7
5	5411	7234	0.75	0.04953	0.00052	0.27505	0.00367	0.03442	0.00042	246.7	2.9	218.2	2.6
6	273.1	450.9	0.60	0.06249	0.00066	0.36383	0.00503	0.03426	0.00043	315.1	3.8	217.2	2.7
7	4048	3540	1.14	0.06382	0.00679	0.24433	0.02665	0.03446	0.00065	222.0	21.8	218.4	4.1
8	267.2	3725	0.07	0.05902	0.00065	0.32736	0.00489	0.03419	0.00045	287.5	3.7	216.7	2.8
9	618.8	4026	0.15	0.05786	0.00062	0.24206	0.00335	0.02451	0.00030	220.1	2.7	156.1	1.9
10	125.3	5732	0.02	0.09235	0.00919	0.24364	0.02485	0.01789	0.00044	221.4	20.3	114.3	2.8
11	2839	5177	0.55	0.07606	0.00102	0.24151	0.00391	0.02122	0.00026	219.7	3.2	135.4	1.7
12	1066	2796	0.38	0.04868	0.00131	0.25199	0.00751	0.03481	0.00047	228.2	6.1	220.6	2.9
13	2846	5738	0.50	0.05318	0.00055	0.24228	0.00314	0.02703	0.00032	220.3	2.6	172.0	2.0

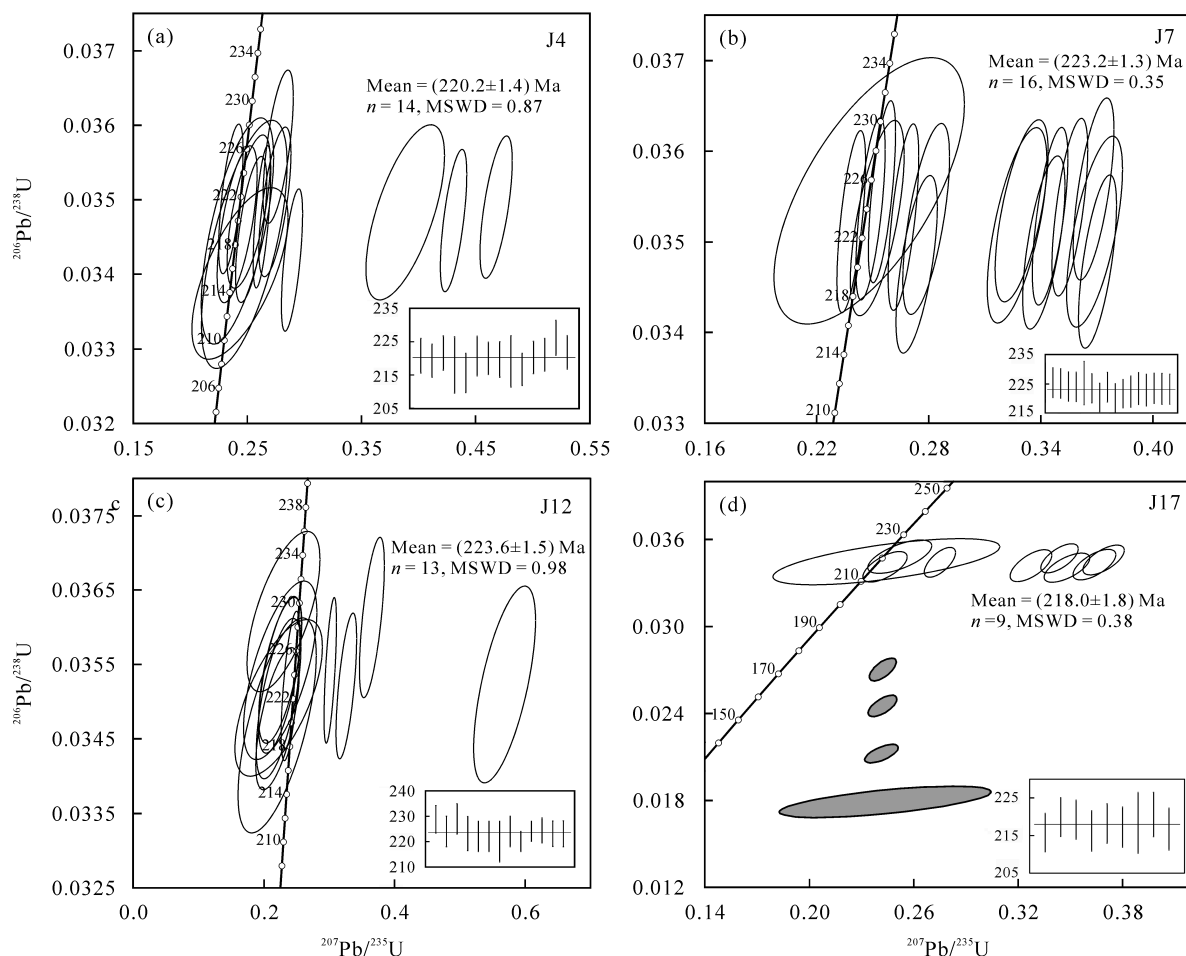


图7 镜儿泉伟晶岩与花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.7 U-Pb concordia diagram for zircon from the Jingerquan pegmatite and granites

(a) 白云母花岗岩(J4)中锆石; (b) 二云母花岗岩(J7)中锆石; (c) 黑云母花岗岩(J12)中锆石; (d) 伟晶岩 I 号脉(J17)中锆石  
 (a) Zircons of muscovite granite (J4); (b) zircons of two-mica granite (J7); (c) zircons of biotite granite (J12); (d) zircons of pegmatite No.1 (J17)

表 3 镜儿泉花岗岩与伟晶岩锆石 Hf 同位素组成分析结果  
Table 3 Zircon Hf isotope results for the Jingerquan pegmatite and granites

点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	年龄 $t$ (Ma)	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}$ (Ma)	$t_{\text{DM2}}$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
白云母花岗岩									
J4									
1	0.282970	0.000010	0.017432	0.000362	220.2	+11.8	393	501	-0.989
2	0.282938	0.000010	0.008099	0.000171	220.2	+10.7	435	572	-0.995
3	0.282952	0.000009	0.005687	0.000124	220.2	+11.2	415	539	-0.996
4	0.282939	0.000010	0.014627	0.000304	220.2	+10.7	435	570	-0.991
5	0.282948	0.000009	0.010641	0.000235	220.2	+11.0	422	549	-0.993
6	0.282955	0.000008	0.005346	0.000110	220.2	+11.3	411	532	-0.997
7	0.282952	0.000009	0.009126	0.000192	220.2	+11.2	417	541	-0.994
8	0.282961	0.000009	0.008536	0.000190	220.2	+11.5	404	520	-0.994
二云母花岗岩									
J7									
1	0.282960	0.000012	0.014283	0.000502	223.2	+11.5	408	523	-0.985
2	0.282898	0.000013	0.060922	0.001822	223.2	+9.1	513	676	-0.945
3	0.282815	0.000013	0.053694	0.001640	223.2	+6.2	631	863	-0.951
4	0.282860	0.000013	0.072570	0.002182	223.2	+7.7	574	766	-0.934
5	0.282995	0.000013	0.044392	0.001400	223.2	+12.6	369	453	-0.958
6	0.282899	0.000013	0.035782	0.001162	223.2	+9.2	502	667	-0.965
7	0.282901	0.000015	0.071625	0.002246	223.2	+9.1	515	674	-0.932
8	0.282900	0.000012	0.100198	0.003135	223.2	+9.0	529	684	-0.906
黑云母花岗岩									
J12									
1	0.282891	0.000013	0.136892	0.003641	223.6	+8.6	551	710	-0.890
2	0.282941	0.000014	0.043471	0.001341	223.6	+10.7	445	575	-0.960
3	0.282915	0.000014	0.050571	0.001621	223.6	+9.7	486	636	-0.951
4	0.282880	0.000014	0.084358	0.002630	223.6	+8.3	551	724	-0.921
5	0.282824	0.000010	0.149800	0.003815	223.6	+6.2	656	862	-0.885
6	0.282862	0.000010	0.074328	0.002119	223.6	+7.8	569	760	-0.936
7	0.282942	0.000013	0.072161	0.002286	223.6	+10.6	455	581	-0.931
8	0.282916	0.000014	0.050712	0.001601	223.6	+9.8	485	634	-0.952
伟晶岩 I 号脉									
J17									
1	0.282967	0.000008	0.000197	0.000004	218.0	+11.7	394	507	-1.000
2	0.282938	0.000009	0.000083	0.000002	218.0	+10.7	433	571	-1.000
3	0.282984	0.000009	0.000897	0.000020	218.0	+12.3	369	466	-0.999
4	0.282935	0.000008	0.001278	0.000031	218.0	+10.6	437	578	-0.999
5	0.282974	0.000009	0.001142	0.000028	218.0	+11.9	384	491	-0.999
6	0.282940	0.000008	0.000225	0.000005	218.0	+10.7	431	567	-1.000
7	0.282952	0.000008	0.000285	0.000006	218.0	+11.1	415	541	-1.000
8	0.282985	0.000009	0.000232	0.000005	218.0	+12.3	369	465	-1.000

注:  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = \left( \frac{({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{2t} - 1)}{({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} - ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{2t} - 1)} - 1 \right) \times 10000$ ;  $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln(1 + (({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - ({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}) / (({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}))$ ;  $t_{\text{DM2}} = t + 1/\lambda \times \ln(1 + (({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - ({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}) / (({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{LC}} - ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}))$ ;  $f_{\text{Lu/Hf}} = ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / ({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$ 。  $({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$  和  $({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$  为样品测定值,  $t$  为样品形成时间;  $({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$ ;  $({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} = 0.282772$ ;  $({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$ ,  $({}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ ;  $({}^{176}\text{Lu}/{}^{177}\text{Hf})_{\text{LC}} = 0.015$ ;  ${}^{176}\text{Lu}$  的衰变常数  $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$  [45]

点均落在代表高分异演化的 I 型和 S 型花岗岩内(图 8d)。镜儿泉的花岗岩分异指数(DI)均大于 90, 指示了其经历了高分异; 白云母花岗岩显示 Ba、Sr、Eu 和 Ti 亏损, 指示了斜长石和金红石等矿物的

分异结晶<sup>[50]</sup>; 在 Rb/Sr-Sr 图解(图 9a)<sup>[47]</sup>中, Sr 与 Rb/Sr 比值之间存在负相关关系, 指示黑云母和斜长石分离结晶。在 K/Rb-Rb 图解(图 9b)和 K/Cs-Cs 图解(图 9c)中, 随着岩浆演化的进行, Rb、Cs 含量逐



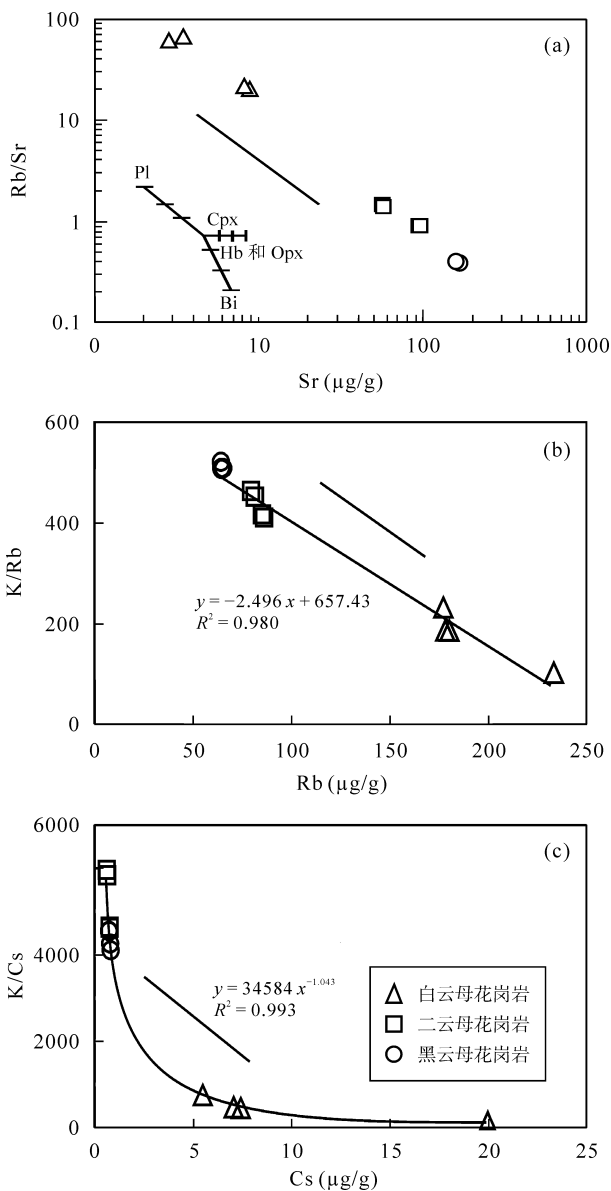


图 9 镜儿泉花岗岩 Rb/Sr-Sr 图解、K/Rb-Rb 和 K/Cs-Cs 图解(据文献[50-51])

Fig.9 Rb/Sr vs. Sr, K/Rb vs. Rb and K/Cs vs. Cs diagrams of the Jingerquan granites (after ref. [50-51])

在 Rb-Hf-Ta 三角图解(图 11)上, 除 1 个黑云母花岗岩数据点落在同碰撞区域外, 所研究的黑云母花岗岩、二云母花岗岩和白云母花岗岩数据点主要投在后碰撞区域, 由此可以推断, 镜儿泉花岗岩是在后碰撞伸展背景下加厚的新生地壳减压熔融形成。

### 4.3 镜儿泉伟晶岩的成因模式及意义

岩浆分异模式是目前被广泛接受的花岗伟晶岩的成因模式, 该模式提出在后碰撞伸展张拉环境下, 壳源沉积物减压熔融形成 S 型花岗质岩浆, 经过高度分异后的残余岩浆固结形成花岗伟晶岩<sup>[59-60]</sup>。

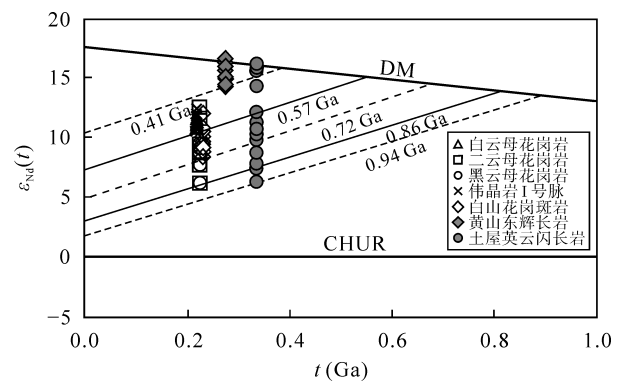


图 10 镜儿泉伟晶岩和花岗岩锆石  $\epsilon_{Nd}(t)$  值与结晶年龄相关图

Fig.10 Correlation diagram of  $\epsilon_{Nd}(t)$  vs. crystallization ages for the Jingerquan pegmatite and granites  
白山数据据文献[55]; 黄山东数据据文献[56]; 土屋数据据文献[55]  
Data of Baishan from ref. [55], data of East Huangshan from ref. [56], and data of Tuwu from ref. [55]

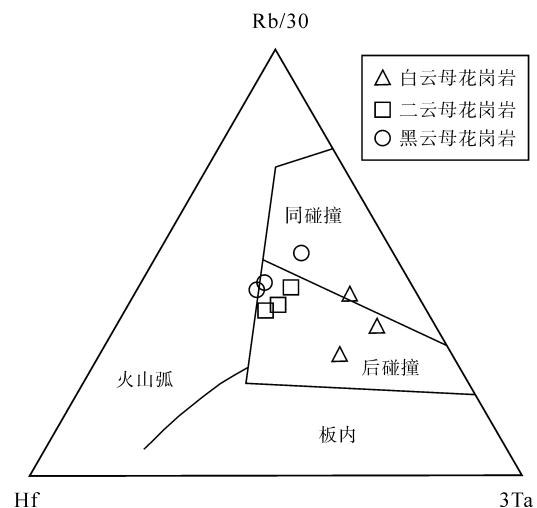


图 11 镜儿泉花岗岩 Rb-Hf-Ta 三角图解(据文献[58])  
Fig.11 Rb-Hf-Ta diagram of Jingerquan granites (after ref. [58])

LCT 型伟晶岩与造山带之间存在着耦合关系<sup>[3-5]</sup>, 伟晶岩形成一般晚于同构造期的花岗岩, 大规模 LCT 型伟晶岩侵入可能反映了后碰撞大陆岩石圈伸展的动力学背景<sup>[27]</sup>, 由此, LCT 型伟晶岩形成对造山带的构造演化具有重要的指示意义<sup>[61]</sup>。对阿尔泰伟晶岩研究表明, 二叠纪-三叠纪伟晶岩(205~280 Ma)形成于后碰撞构造背景<sup>[12-14, 62-65]</sup>, 但由于缺乏同时代的 S 型花岗岩, 由此提出阿尔泰造山带中 LCT 型伟晶岩不可能是花岗质岩浆在深部岩浆房中高度分异演化的产物<sup>[12-14]</sup>。不同于阿尔泰造山带中二叠纪-三叠纪伟晶岩, 镜儿泉矿区中伟晶岩与花岗岩均具有相似的形成时代、同位素组成以及相对年轻的模式年龄 ( $t_{DM2} = 453\sim 864$  Ma), 表明镜儿泉伟晶岩与花岗岩有成因上的联系, 镜儿泉伟晶岩成因应是后

碰撞造山背景下新生地壳部分熔融形成的花岗质岩浆高度分异演化的产物。

镜儿泉花岗岩形成于三叠纪(锆石 U-Pb 年龄为 220.2~223.6 Ma), 指示花岗岩形成于伸展背景下的新生地壳的减压部分熔融产物, 代表着东天山造山带构造演化中的后碰撞的时限。已有研究表明, 位于镜儿泉东部的白山钼矿床花岗斑岩形成时代为 225~229 Ma<sup>[23]</sup>, 与东天山-北山其它钼矿床形成时间一致, 如北山花黑滩钼矿(辉钼矿 Re-Os 年龄 225 Ma)、小狐狸山钼矿(辉钼矿 Re-Os 年龄 222 Ma)等<sup>[66-67]</sup>, 东天山-北山形成规模化的钼矿床, 很可能与大规模的岩浆活动及构造环境的转变有关, 多数学者认为东天山在三叠纪进入了板内环境<sup>[23,33,68]</sup>。在东天山地区, 形成于三叠纪鄯善花岗岩(230~252.7 Ma)、天湖花岗闪长岩(209.7~220 Ma)、尾亚岩体(220~246 Ma)均被认为形成于后碰撞背景下<sup>[24-26]</sup>。此外, 在康古尔韧性剪切带中形成时代为 240~270 Ma 金矿床, 与 Zhang *et al.*<sup>[69]</sup>研究认为的东天山的后碰撞阶段时间范围(245~280 Ma)一致, 应属于后碰撞构造环境<sup>[25,69]</sup>。由于镜儿泉地区所处的觉罗塔格构造带在早二叠世进入了后碰撞伸展阶段<sup>[18]</sup>, 前人通过对构造带内黄山地区的早二叠世角闪辉长岩(281 Ma)的研究, 认为其与先期存在的古亚洲洋板片俯冲导致洋壳消失和陆陆碰撞后的伸展背景有关<sup>[70]</sup>, 由此, 结合已有的花岗岩及相关矿床的研究, 本文通过对镜儿泉花岗岩、伟晶岩研究揭示, 东天山造山带的后碰撞造山运动很可能从二叠纪一直持续到了三叠纪, 镜儿泉花岗岩的形成与吐哈地块和中天山地块碰撞后的伸展背景有关。

## 5 结 论

(1) 镜儿泉花岗岩属于高分异演化过铝质花岗岩, 白云母花岗岩、二云母花岗岩与黑云母花岗岩之间存在明显的演化关系;

(2) 锆石 U-Pb 定年结果显示, 镜儿泉矿区黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩及伟晶岩的形成时代分别为(223.6±1.5) Ma、(223.2±1.3) Ma、(220.2±1.4) Ma 和(218.0±1.8) Ma, 均形成于三叠纪;

(3) 镜儿泉花岗岩与伟晶岩显示相似的锆石 Hf 同位素组成和模式年龄, 指示形成花岗岩与伟晶岩的岩浆起源于后碰撞造山背景下不成熟新生地壳的部分熔融, 是花岗质岩浆高度分异演化后残余岩浆

固结的产物。

## 参考文献(References):

- [1] London D. The origin of primary textures in granitic pegmatites [J]. *Can Mineral*, 2009, 47(4): 697-724.
- [2] Shmakin B M. Geochemistry and origin of granitic pegmatites [J]. *Geochem Int*, 1983, 20(6): 1-8.
- [3] Tkachev A V. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geological time [M]. *Geol Soc London Spec Publ*, 2011, 350: 7-23.
- [4] Bradley D, McCauley A. A preliminary deposit model for lithium-cesium-tantalum (LCT) pegmatites [R]. *US Geological Survey Open-File Report*, 2013: 1-7.
- [5] 张鑫. 新疆北部晚古生代至早中生代岩浆作用和构造演化研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.  
Zhang Xin. Magmatism and tectonic evolution of the Altay-Junggar during the late Paleozoic to early Mesozoic, northern Xinjiang [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [6] Černý P. Rare-element granite pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits [J]. *Geosci Can*, 1991, 18(2): 49-67.
- [7] 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 Mining Geol*, 2005, 14(1/4): 1-30.
- [8] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 高分异花岗岩的识别与研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(7): 745-765.  
Wu Fuyuan, Liu Xiaochi, Ji Weiqiang, Wang Jiamin, Yang Lei. Highly fractionated granites: Recognition and research [J]. *Sci China Earth Sci*, 2017, 47(7): 745-765 (in Chinese).
- [9] Černý P, Ercit T S. The classification of granitic pegmatites revisited [J]. *Can Mineral*, 2005, 43(6): 2005-2026.
- [10] Shannon Z, Pete H, 周涛发, 王世伟. 花岗质岩浆和矿化之间的关系: 重要概念和关键特征[J]. *岩石学报*, 2017, 33(5): 1541-1553.  
Shannon Z, Pete H, Zhou Tao-fa, Wang Shi-wei. Exploring the links between granitic magmas and mineralization: Key concepts and critical features [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2017, 33(5): 1541-1553 (in Chinese with English abstract).
- [11] 邹天人, 李昌庆. 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).
- [12] 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).
- [13] Lü Z H, Zhang H, Tang Y, Guan S J. 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.
- [14] 马占龙, 张辉, 唐勇, 吕正航, 张鑫, 赵景宇. 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[J]. *地球化学*, 2015, 44(1): 9–26.  
Ma Zhan-long, Zhang Hui, Tang Yong, Lü Zheng-hang, Zhang Xin, Zhao Jing-yu. 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 [J]. *Geochimica*, 2015, 44(1): 9–26 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘宏. 新疆阿尔泰阿拉尔花岗岩地球化学特征及其与可可托海3号脉演化关系[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.  
Liu Hong. Geochemical study on petrogenesis of Aral granite and the Keketuohai No.3 pegmatite vein, Altay Xinjiang [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈郑辉, 王登红, 龚羽飞, 陈毓川, 陈世平. 新疆哈密镜儿泉伟晶岩型稀有金属矿床  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2006, 25(4): 470–476.  
Chen Zheng-hui, Wang Deng-hong, Gong Yu-fei, Chen Yu-chuan, Chen Shi-ping.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  isotope dating of muscovite from Jingerquan pegmatite rare metal deposit in Hami, Xinjiang, and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(4): 470–476 (in Chinese with English abstract).
- [17] 吴华. 东天山地壳演化及内生金属成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.  
Wu Hua. Crustal evolution and endogenic metallogenesis in eastern Tianshan orogenic belt [D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2006 (in Chinese).
- [18] 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 王银喜, 唐俊华, 汪传胜, 郝爱华, 郑远川. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1103–1120.  
Gu Lian-xing, Zhang Zun-zhong, Wu Chang-zhi, Wang Yin-xi, Tang Jun-hua, Wang Chuan-sheng, Xi Ai-hua, Zheng Yuan-chuan. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2006, 22(5): 1103–1122 (in Chinese with English abstract).
- [19] 毛亚晶, 秦克章, 唐冬梅, 薛胜超, 冯宏业, 田野. 东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用——以黄山铜镍矿床为例[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1575–1594.  
Mao Ya-jing, Qin Ke-zhang, Tang Dong-mei, Xue Sheng-chao, Feng Hong-ye, Tian Ye. Multiple stages of magma emplacement and mineralization of eastern Tianshan, Xinjiang: Exemplified by the Huangshan Ni-Cu deposit [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2014, 30(6): 1575–1594 (in Chinese with English abstract).
- [20] Zhang L C, Xiao W J, Qin K Z, Qu W, Du A. Re-Os isotopic dating of molybdenite and pyrite in the Baishan Mo-Re deposit, eastern Tianshan, NW China, and its geological significance [J]. *Miner Deposita*, 2005, 39(8): 960–969.
- [21] 李华芹, 陈富文, 李锦铎, 屈文俊, 王登红, 吴华, 邓刚, 梅玉萍. 再论东天山白山钼矿床成矿时代[J]. *地质通报*, 2006, 25(8): 916–922.  
Li Hua-qin, Chen Fu-wen, Li Jin-yi, Qu Wen-jun, Wang Deng-hong, Wu Hua, Deng Gang, Mei Yu-ping. Age of mineralization and host rocks in the Baishan rhenium-molybdenum district, East Tianshan, Xinjiang: Revisited [J]. *Geol Bull China*, 2006, 25(8): 916–922 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张达玉, 周涛发, 袁峰, 范裕, 刘帅, 屈文俊. 新疆东天山地区白山钼矿床的成因分析[J]. *矿床地质*, 2009, 28(5): 663–672.  
Zhang Da-yu, Zhou Tao-fa, Yuan Feng, Fan Yu, Liu Shuai, Qu Wen-jun. A genetic analysis of Baishan molybdenum deposit in East Tianshan area, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(5): 663–671 (in Chinese with English abstract).
- [23] 刘彬, 王学求. 东天山白山斑岩钼矿床深部斑岩体锆石 SIMS U-Pb 定年、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2016, 23(5): 291–300.  
Liu Bin, Wang Xue-qiu. SIMS U-Pb dating and Hf isotope of zircons from the deep granite porphyry in Baishan Mo deposit, eastern Tianshan, Northwest China, and their geological significance [J]. *Earth Sci Front*, 2016, 23(5): 291–300 (in Chinese with English abstract).
- [24] Li H Q, Chen F W, Lu Y F, Yang H M, Guo J, Mei Y P. New chronological evidence for Indosinian diagenetic mineralization in eastern Xinjiang, NW China [J]. *Acta Geol Sinica (English ed)*, 2005, 79(2): 264–275.
- [25] 李文明, 任秉琛, 杨兴科, 李有柱, 陈强. 东天山中酸性侵入岩浆作用及其地球动力学意义[J]. *西北地质*, 2002, 35(4): 41–64.  
Li Wen-ming, Ren Bing-chen, Yang Xing-ke, Li You-zhu, Chen Qiang. The intermediate-acid intrusive magmatism and its geodynamic significance in eastern Tianshan region [J]. *Northwest Geol*, 2002, 35(4): 41–64 (in Chinese with English abstract).
- [26] 王玉往. 新疆北部与后碰撞镁铁-超镁铁质杂岩有关的成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.  
Wang Yu-wang. Mineralization related to post-collisional mafic-ultramafic complex in North Xinjiang [D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2009 (in Chinese with English abstract).
- [27] Zagorsky V Ye, Vladimirov A G, Makagon V M, Kuznetsova L G, Smirnov S Z, D□yachkov B A, Annikova I Yu, Shokalsky S P, Uvarov A N. Large fields of spodumene pegmatites in the settings of rifting and postcollisional shear-pull-apart dislocations of continental lithosphere [J]. *Russ Geol Geophys*, 2014, 55: 237–251.
- [28] Mao J W, Goldfarb R J, Wang Y T, Hart C J, Wang Z L, Yang J M. Late Paleozoic base and precious metal deposits, East Tianshan, Xinjiang, China: Characteristics and geodynamic setting [J]. *Episodes*, 2005, 28(1): 23–36.
- [29] Sengör A M C, Natal□in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299–307.
- [30] 张方方. 东天山斑岩型钼矿床成矿动力学背景与成矿机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.  
Zhang Fang-fang. Geodynamic setting and metallogenic mechanism of porphyry molybdenum deposits in eastern Tianshan, NW China [D]. Beijing: China University of

- Geoscience (Beijing), 2016 (in Chinese with English abstract).
- [31] Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, Tang D M, Li X H, Sun H, Xiao Q H, Liu P P. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume [J]. *Am J Sci*, 2011, 311(3): 237–260.
- [32] Huang X W, Qi L, Gao J F, Zhou M F. First reliable Re-Os ages of pyrite and stable isotope compositions of Fe(-Cu) deposits in the Hami region, eastern Tianshan Orogenic Belt, NW China [J]. *Resour Geol*, 2013, 63(2): 166–187.
- [33] 周涛发, 袁峰, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. *岩石学报*, 2010, 25(2): 478–502. Zhou Tao-fa, Yuan Feng, Zhang Da-yu, Fan Yu, Liu Shuai, Peng Ming-xing, Zhang Jian-dian. Geochronology, tectonic setting and mineralization of granitoids in Jueluotage area, eastern Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2010, 26(2): 478–502 (in Chinese with English abstract).
- [34] Han B F, He G Q, Wang X C, Guo Z J. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the northern Xinjiang, western China [J]. *Earth Sci Rev*, 2011, 109(3/4): 74–93.
- [35] 新疆地质矿产局区域地质调查大队. 1:20万矿产图: 梧桐窝子泉幅地质图及报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆工农兵印刷厂, 1965: 15–20. Regional Geological Survey of Xinjiang Bureau of Geo-Exploration and Mineral Development. 1:20000 map of Wutongwoziqian Mineral Area [M]. 1965: 15–20 (in Chinese).
- [36] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, 51: 507–513.
- [37] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003: 1–71.
- [38] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report Pb-204 [J]. *Chem Geol*, 2002, 192(1): 59–79.
- [39] Zhang L, Ren Z, Nichols A R L, Zhang Y, Zhang Y, Qian S, Liu J. Lead isotope analysis of melt inclusions by LA-MC-ICP-MS [J]. *J Anal Atom Spect*, 2014, 29(8): 1393–1405.
- [40] Segal I, Halicz L, Platzner I T. Accurate isotope ratio measurements of ytterbium by multiple collection inductively coupled plasma mass spectrometry applying erbium and hafnium in an improved double external normalization procedure [J]. *J Anal Atom Spect*, 2003, 18(10): 1217–1223.
- [41] Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. *Chem Geol*, 2006, 234(1/2): 105–126.
- [42] Zhang L, Ren Z Y, Xia X P. IsotopeMaker: A Matlab program for isotopic data reduction [J]. *Int J Mass Spect*, 2015, 392: 118–124.
- [43] Slama J, Kosler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hancher J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N, Whitehouse M J. Plesovice zircon — A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chem Geol*, 2008, 249(1/2): 1–35.
- [44] Sun S-s, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geol Soc London Spec Publ*, 1989, 42(1): 313–345.
- [45] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185–220. Wu Fu-yuan, Li Xian-hua, Zheng Yong-fei, Gao Shan. Lu-Hf isotopic system and applications in petrology [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2007, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- [46] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth Sci Rev*, 1994, 37(3/4): 215–224.
- [47] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247–263.
- [48] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geol Soc Am Bull*, 1989, 101(5): 635–643.
- [49] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geo-chemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1987, 95(4): 407–419.
- [50] Han B F, Wang S G, Jahn B M, Hong D W, Kagami H, Sun Y L. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth [J]. *Chem Geol*, 1997, 138(3/4): 135–159.
- [51] Geng H Y, Sun M, Yuan C, Xian W S, Zhao G C, Wong K. Geochemical, Sr-Nd and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for ridge subduction [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73(13, Suppl): A426.
- [52] Allège C J, Ben O D. Nd-Sr isotopic relationship in granitoid rocks and continental crust development: A chemical approach to orogenesis [J]. *Nature*, 1980, 286(5771): 335–342.
- [53] Peter D K, Roland M. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon [J]. *Rev Mineral Geochem*, 2003, 53(1): 327–341.
- [54] Jahn B M, Wu F, Hong D. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia [J]. *J Earth System Sci*, 2000, 109(1): 5–20.
- [55] 刘彬. 东天山白山斑岩铜矿地质地球化学特征及成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015. Liu Bin. Geology, geochemistry and genesis of the Baishan molybdenum deposit in eastern Tianshan, NW China [D]. Beijing: China University of Geoscience, 2016 (in Chinese).
- [56] 王银宏, 薛春纪, 刘家军, 王建平, 杨俊弢, 张方方, 赵泽南, 赵云江. 新疆东天山土屋斑岩铜矿床地球化学、年代学、Lu-Hf 同位素及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3383–3399. Wang Yin-hong, Xue Chun-ji, Liu Jia-jun, Wang Jian-ping, Yang Jun-tao, Zhang Fang-fang, Zhao Ze-nan, Zhao Yun-jiang. Geochemistry, geochronology, Hf isotope, and geological significance of the Tuwu porphyry copper deposit in eastern

- Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Petrol Sinica*, 2014, 30(11): 3383–3399 (in Chinese with English abstract).
- [57] 钱壮志, 张江江, 孙涛, 段俊, 姜超, 夏明哲. 新疆黄山东岩体 Hf-Nd 同位素特征及其地质意义[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 145–154.
- Qian Zhuang-zhi, Zhang Jiang-jiang, Sun Tao, Duan Jun, Jiang Chao, Xia Ming-zhe. Hf-Nd isotopic characteristics of the Huangshandong mafic-ultramafic intrusion, eastern Xinjiang, and their geological implications [J]. *Northwest Geol*, 2012, 45(4): 145–154 (in Chinese with English abstract).
- [58] Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism [J]. *Collis Tecton*, 1986, 19(5): 67–81.
- [59] Chappell B W. Aluminium saturation in I-and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 535–551.
- [60] Patiño Douce A E, Johnston A D. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: Implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1991, 107(2): 202–218.
- [61] McCauley A, Bradley D C. The global age distribution of granite pegmatites [J]. *Can Mineral*, 2014, 52(2): 183–190.
- [62] 陈剑锋. 阿尔泰 3 号伟晶岩脉缓倾斜部分岩浆的形成与演化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.
- Chen Jian-feng. Geochemistry of the plate part in Altai No.3 Pegmatite and its formation and evolution [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [63] 刘文政, 张辉, 唐红峰, 唐勇, 吕正航. 新疆阿斯特格尔特铍钼矿床中辉钼矿 Re-Os 定年及成因意义[J]. *地球化学*, 2015, 44(2): 145–154.
- Liu Wen-zheng, Zhang Hui, Tang Hong-feng, Tang Yong, Lü Zheng-hang. Molybdenite Re-Os dating of the Asikaerte Be-Mo deposit in Xinjiang, China and its implications [J]. *Geochimica*, 2015, 44(2): 145–154 (in Chinese with English abstract).
- [64] Lv Z H, Zhang H, Tang Y, Liu Y L, Zhang X. Petrogenesis of syn-orogenic rare metal pegmatites in the Chinese Altai: Evidences from geology, mineralogy, zircon U-Pb age and Hf isotope [J]. *Ore Geol Rev*, 2018, 95: 161–181.
- [65] Zhang X, Zhang H, Ma Z L, Tang Y, Lv Z H, Zhao J Y, Liu Y L. A new model for the granite-pegmatite genetic relationship in the Kaluan-Azubai-Qiongkuer pegmatite-related ore fields, the Chinese Altay [J]. *J Asian Earth Sci*, 2016, 124: 139–155.
- [66] 朱江, 吕新彪, 陈超, 曹晓峰, 胡庆成. 东天山东段-北山地区三叠纪钼矿床地质特征、时空分布及含矿花岗岩成岩-成矿构造背景[J]. *新疆地质*, 2013, 31(1): 21–28.
- Zhu Jiang, Lü Xin-biao, Chen Chao, Cao Xiao-feng, Hu Qing-cheng. Geological characteristics, metallogenic time and tectonic setting of the Triassic molybdenum deposits in the east part of the East Tianshan and the Beishan Area, NW China [J]. *Xinjiang Geol*, 2013, 31(1): 21–28 (in Chinese with English abstract).
- [67] 彭振安, 李红红, 屈文俊, 张诗启, 丁海军, 陈晓日, 张斌, 张永正, 徐明, 蔡明海. 内蒙古北山地区小狐狸山钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2010, 29(3): 510–516.
- Peng Zhen-an, Li Hong-hong, Qu Wen-jun, Zhang Shi-qi, Ding Hai-jun, Chen Xiao-ri, Zhang Bin, Zhang Yong-zheng, Xu Ming, Cai Ming-hai. Molybdenite Re-Os age of Xiaohulishan molybdenum deposit in Beishan area, Inner Mongolia [J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(3): 510–516 (in Chinese with English abstract).
- [68] 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 461–469.
- Wang Jing-bin, Wang Yu-wang, He Zhi-jun. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the East Tianshan Mountains, NW China [J]. *Geol China*, 2006, 33(3): 461–468 (in Chinese with English abstract).
- [69] Zhang L C, Qin K Z, Xiao W J. Multiple mineralization events in the eastern Tianshan district, NW China: Isotopic geochronology and geological significance [J]. *J Asian Earth Sci*, 2008, 32(2/4): 236–246.
- [70] 崔亚川, 于介江, 杨万志, 张元厚, 崔策, 于介禄. 东天山觉罗塔格带黄山地区角闪辉长岩体的年代学、地球化学特征及岩石成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, 48(4): 1105–1120.
- Cui Ya-chuan, Yu Jie-jiang, Yang Wan-zhi, Zhang Yuan-hou, Cui Ce, Yu Jie-lu. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of hornblende gabbro in Huangshan area of Jueluotage Belt, eastern Tianshan [J]. *J Jinlin Univ (Earth Sci Ed)*, 2018, 48(4): 1105–1120 (in Chinese with English abstract).