

内蒙古阿尔哈达地区花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、稀土元素、Hf 同位素组成及其地质意义

柯亮亮^{1,2}, 翟德高^{1,2}, 刘家军^{1,2}, 许永旺³, 杨婕坤^{1,2}, 谭强³, 张梅³

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 内蒙古阿尔哈达地区位于西伯利亚板块东南缘查干敖包-奥尤特-朝不楞岩浆岩带东段, 该区发育大量晚古生代花岗岩, 主要岩石类型为似斑状花岗岩和中细粒花岗岩。对该区 1 件似斑状花岗岩、2 件中细粒花岗岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年, 获得成岩年龄分别为 319.0 ± 5.0 Ma (MSWD=4.9)、 324.0 ± 2.0 Ma (MSWD=1.3) 和 332.0 ± 8.5 Ma (MSWD=5.7)。定年结果显示所有花岗岩的形成时代均为早石炭世, 属于海西中期。锆石的原位微区稀土元素分析表明, 所有花岗岩中的锆石具有轻稀土元素亏损、重稀土元素富集、强烈的正 Ce 异常和负 Eu 异常特征, 与岩浆锆石的特点一致。Lu-Hf 同位素测试结果显示, 锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-0.71 \sim +10.21$, 二阶段模式年龄为 709~1436 Ma, 表明其主要起源于中新元古代增生的地壳。根据已获得的同位素年龄和锆石稀土元素数据, 结合野外地质调查和区域构造演化, 可以推测阿尔哈达地区可能存在时限为 310~330 Ma 的构造岩浆活动。

关键词: 阿尔哈达; 花岗岩; 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄; 稀土元素; Lu-Hf 同位素

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)04-0597-20

Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and REE and Hf isotope compositions of the granite in the Arehada area, Inner Mongolia, and their geological significance

KE Liang-liang^{1,2}, ZHAI De-gao^{1,2}, LIU Jia-jun^{1,2}, XU Yong-wang³, YANG Jie-kun^{1,2}, TAN Qiang³ and ZHANG Mei³

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot 010020, China)

Abstract: Located in the eastern part of the Chagan Obo-Aoyoute-Chaobuleng magmatic belt at the southeastern edge of the Siberian plate, the Arehada area has wide distribution of Late Paleozoic granite, comprising mainly porphyritic and medium-fine grained granite. Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating indicates that the petrogenetic ages are 319.0 ± 5.0 Ma (MSWD = 4.9), 324.0 ± 2.0 Ma (MSWD = 1.3) and 332.0 ± 8.5 Ma (MSWD = 5.7). The results show that all the granites are of early Carboniferous, belonging to middle Hercynian period. In situ rare earth elements analyses of zircons show the depletion of LREE and enrichment of HREE

收稿日期: 2015-10-25; 接受日期: 2016-04-20

基金项目: 中国地质调查局整装勘查项目(12120114077001); 内蒙古自治区院士项目(2014-01-YS01); 高等学校科技创新引智计划(B07011)

作者简介: 柯亮亮(1992-), 男, 汉族, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 191006915@qq.com; 通讯作者: 刘家军(1963-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学研究与教学工作, E-mail: liujiajun@cugb.edu.cn。

as well as the obvious existence of positive Ce anomaly and negative Eu anomaly, suggesting that zircons are of typical magmatic origin. Analyses of zircon Lu-Hf isotopes show that these granites have $\epsilon\text{Hf}(t)$ values of $-0.71 \sim +10.21$ with Hf modal ages of $709 \sim 1\,436$ Ma, indicating that the granite in Arehada area was derived from mantle during Meso-Neoproterozoic period. Based on the isotopic ages and zircon rare earth elements data in combination with geological survey and regional tectonic evolution, the authors hold that a tectonic-magmatic activity occurred during 310 to 330 Ma in the Arehada area.

Key words: Arehada; granite; zircon LA-ICP-MS U-Pb; rare earth elements; Lu-Hf isotopes

Fund support: China Geological Survey Exploration Project (12120114077001); Inner Mongolia Academician Project (2014-01-YS01); Chinese “111” Project (B07011)

阿尔哈达矿区位于内蒙古自治区中北部的东乌旗,该区已发现朝不楞大型铁多金属矿床、查干敖包大型铁锌矿床、迪彦钦阿木大型钼多金属矿床、吉林宝力格中型银矿床、高尔旗中型铅锌银矿床、1017 高地中型铅锌矿床、额尔登陶勒盖中型铅锌矿床、沙麦中型钨矿床、奥尤特小型铜矿等及大量矿点,区域内矿床(点)多与岩浆活动关系密切(张万益等, 2013; 常春郊等, 2014)。区内花岗岩体分布广泛,时间跨度从加里东期一直到燕山期。海西期侵入岩发育有闪长岩和花岗岩,其中海西晚期发育后碰撞伸展环境下的碱性花岗岩(洪大卫等, 1994; 刘建峰等, 2009; 刘翼飞等, 2010; 王治华等, 2013; 梁玉伟等, 2013; 程银行等, 2014; 王治华等, 2015); 印支期继承了海西晚期后碰撞伸展的构造环境,发育石英闪长岩和正长花岗岩等(张万益等, 2008; 杨俊泉等, 2012); 燕山期是本区另一个岩浆活动爆发期,发育富钾、碱性偏高的钙碱性花岗岩(王建平等, 2003; 常春郊等, 2014)。

前人对本区的研究主要集中在印支期和燕山期花岗岩类(杨俊泉等, 2012; 张健等, 2013),而对海西期的侵入岩还缺乏足够精确的年代学厘定。本次工作对该区北部及西北部的似斑状和中细粒花岗岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学、稀土元素组成及 Hf 同位素分析,为进一步认识该区花岗岩的地质背景、岩浆源区性质和区域岩浆-构造演化均具有重要的意义。

1 区域地质背景

阿尔哈达地区位于西伯利亚板块东南缘查干敖包-奥尤特-朝不楞晚古生代和中生代构造-岩浆岩带东段,位于东乌旗-二连浩特复背斜北东部的东乌旗褶皱束内,其东南侧就是西伯利亚板块与华北板

块的缝合带——二连浩特-贺根山深大断裂(张万益等, 2007; 黄再兴等, 2013)。本区主要出露三叠纪的宾巴勒查干岩体,呈北东东向岩株状产出,其次为石炭-二叠纪侵入岩(图 1)。岩体与围岩的主要接触关系有:其南部侵入泥盆纪地层中,内部见有侏罗纪火山岩不整合覆盖于其上,两侧被同时代稍晚就位的细粒似斑状正长花岗岩、中细粒似斑状正长花岗岩及后期的侏罗纪花岗岩侵入,北部与粗中粒二长花岗岩渐变过渡接触。本区出露的泥盆系为安格爾音乌拉组,是由细碎屑岩组成的类复理石建造,为本区的主要容矿围岩(陶则熙, 2006; 钱明等, 2006); 侏罗系为满克头鄂博组陆相火山碎屑岩沉积(杨俊泉等, 2012)。

区域内岩浆活动强烈,以海西期与燕山期为主,并与矿床具有密切时空分布关系(金岩等, 2005; 黄再兴等, 2013; 常春郊等, 2014)。海西晚期有 3 次岩浆活动,岩浆岩分布于本区的中西部,其中海西晚期侵入岩分布广泛,大多数岩体呈岩株和岩基状产出,总体与北东向区域构造线方向大体一致(聂凤军等, 2007)。海西期侵入岩以闪长岩和花岗岩为主,局部有不等粒二长花岗岩和辉长岩,从闪长岩-花岗岩-碱性花岗岩-辉长岩,显示了俯冲-碰撞-后伸展的演化历史(洪大卫等, 1994; 张玉清等, 2009; 刘翼飞等, 2010; 程银行等, 2012, 2014, 2015; 王治华等, 2013; 王治华等, 2015)。印支期宾巴勒查干岩体和查干敖包岩体仅在查干敖包矿区北部和阿尔哈达矿区北东部零星分布(张万益等, 2008; 杨俊泉等, 2012)。海西晚期和印支期的岩浆活动,形成了东乌旗一带大面积分布的碱性花岗岩(洪大卫等, 1994)。燕山期岩浆在本区活动强烈,大规模岩浆活动主要发生在燕山早期,侵入岩沿褶皱轴部分布形成岩浆岩带,在区域的中北部和北东部大面积出露。由西向东与多金属矿化关系密切的代表性岩体有敖

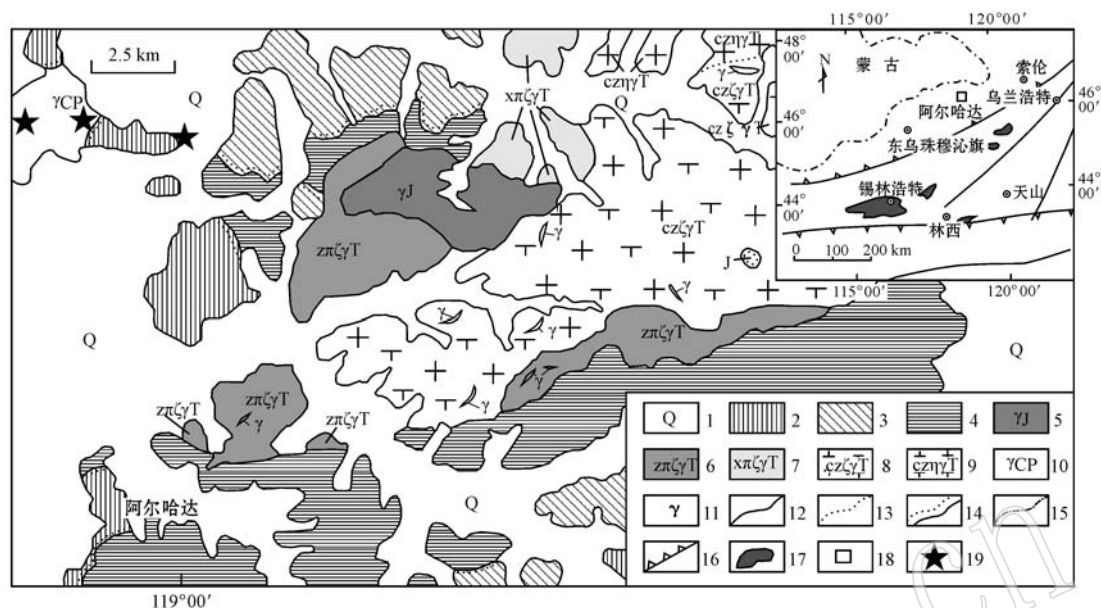


图1 东乌珠穆沁旗阿尔哈达地区区域地质简图(据杨俊泉等, 2012)

Fig. 1 Sketch geological map of the Arelhada area in Dong Ujimqin Banner (modified after Yang Junquan *et al.*, 2012)

1—第四系; 2—白垩系; 3—侏罗系; 4—泥盆系; 5—侏罗纪侵入岩; 6—三叠纪中细粒似斑状正长花岗岩; 7—三叠纪细粒似斑状正长花岗岩; 8—三叠纪粗中粒正长花岗岩; 9—三叠纪粗中粒二长花岗岩; 10—石炭—二叠纪侵入岩; 11—脉岩; 12—侵入界线或第四系界线;

13—渐变过渡界线; 14—角度不整合界线; 15—国界线; 16—古板块缝合线; 17—前寒武纪中间地块; 18—研究区; 19—样品采集点
1—Quaternary; 2—Cretaceous; 3—Jurassic; 4—Jurassic intrusive rocks; 5—Jurassic intrusive rocks; 6—Triassic medium-fine grained porphyritic syenogranite; 7—Triassic fine-grained porphyritic syenogranite; 8—Triassic coarse-medium grained syenogranite; 9—Triassic coarse-medium grained monzonitic granite; 10—Carboniferous-Permian intrusive rocks; 11—dikes; 12—boundary of intrusive rocks or Quaternary; 13—boundary of transition; 14—unconformity; 15—national boundaries; 16—plate suture line; 17—Precambrian intermediate land mass; 18—location of the study area; 19—sampling site

包特岩体、查干敖包岩体、朝不楞岩体、阿钦楚鲁岩体和安儿基乌拉岩体, 侵入岩表现为深成相的富钾、碱性偏高的钙碱性花岗质岩石。区内从古生代至新生代火山活动频繁, 火山岩往往在空间上与同期同源的侵入岩相伴产出, 岩浆具有多期多阶段的活动特征(王建平, 2003; 常春郊等, 2014)。

区域内断裂构造发育, 北东向、北北东、北西向3组深断裂构成该区的基本地质构造格架, 主要发育北东向二连浩特—贺根山深断裂和查干敖包—东乌旗深大断裂(黄再兴等, 2013)。区内褶皱发育, 轴向与区内主要断裂走向一致, 以古生界火山—沉积地层中北东向复式背斜和复式向斜构造为主, 其中额仁高比复式向斜翼部是赋矿的有利部位(张万益等, 2007)。阿尔哈达矿区位于东乌旗褶皱束额仁高比复式向斜的东南翼, 受多期构造运动影响, 区内褶皱、断裂以及节理、劈理构造发育, 后期(成矿期)构造对早期断裂构造的叠加改造作用强烈。断裂构造复杂多样, 具多期活动的特点。其中北西向断裂为

矿区主要的容矿构造, 形成了一系列北西走向的矿化带或矿体密集带(陶则熙, 2006)。

2 样品采集和分析测试方法

花岗岩主要呈岩株状产出, 侵入上侏罗统布拉根哈达组及白垩系中, 出露地表。3件样品呈肉红色, 风化严重, 无矿化。其中1件似斑状花岗岩(D001)地理坐标为东经 119°00′33″, 北纬 46°27′22″, 2件中细粒花岗岩(D002、D003)地理坐标分别为东经 118°55′36″、北纬 46°30′25″和东经 118°50′04″、北纬 46°29′35″。D001 似斑状结构, 块状构造, 主要由石英(40%~45%)、长石(40%)和云母(10%)组成, 绢云母化严重。长石主要由钾长石和斜长石组成; 云母主要由黑云母和绢云母组成; 石英主要呈他形粒状结构, 粒度一般为 0.1~0.5 mm, 粒度大小不等; 钾长石具有较为明显的卡氏双晶(图2), 粒度一般为 0.5~1 mm。D002 和 D003 矿物组成

和结构构造基本一致, D003 较 D002 绢云母化更为严重。二者均为中细粒结构, 块状构造, 主要由石英(45%~50%)、长石(35%)和云母(10%)组成, 绢云母化严重。长石主要由钾长石和斜长石组成; 云母主要

由黑云母和绢云母组成; 石英主要呈他形粒状结构, 粒度一般为 0.3~0.5 mm, 粒度大小不等; 长石呈自形、半自形结构, 呈长条状或长板状, 钾长石具有较为明显的卡氏双晶(图 2), 粒度一般为 0.5~1 mm。

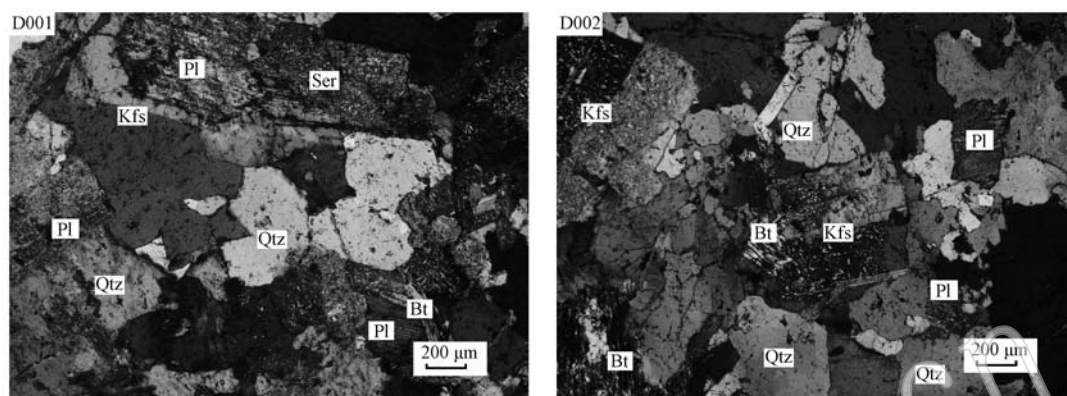


图 2 阿尔哈达地区花岗岩镜下矿物组成

Fig. 2 Mineral compositions of the granite in the Archada area

Qtz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Ser—绢云母

Qtz—quartz; Kfs—K-feldspar; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Ser—sericite

锆石挑选在廊坊宇能矿物分选公司完成, 将样品人工破碎后, 按常规重力和磁选方法分选出锆石, 然后在双目镜下挑选。将分选出纯净的锆石颗粒和标样一同置于环氧树脂中制成靶, 并打磨抛光至锆石中心部位暴露出来。在显微镜下进行透射光和反射光观察及照相。进行阴极发光(CL)研究, 观察锆石内部的生长环带及结构, CL 图像在北京大学电子探针分析室完成。通过锆石透反射及阴极发光图像, 选择晶体特征良好的锆石进行进一步年代学分析。

锆石 LA-ICP-MS 分析在中国地质大学(北京)科学研究院 LA-ICP-MS 实验室完成。仪器型号为美国 New Wave 公司 UP193SS 型激光器, 激光波长为 193 nm。束斑直径为 36 μm , 激光频率为 10 Hz; 预剥蚀时间和剥蚀时间分别为 5 s 和 45 s。实验过程使用 He 作为载气, 流速为 0.8 L/min。等离子质谱(ICP-MS)型号为美国 Agilent 公司生产的 7500a 型质谱仪, 元素积分时间 U、Th、Pb 为 20 min, Si、Zr 为 6 min, 其他元素为 10 min。数据处理软件使用 Glitter4.4.1。年龄计算时以标准锆石 TEM 为外标进行同位素比值校正, 标准锆石 91500 和 Qinghu 为监控盲样。元素含量以国际标样 NIST610 为外标, Si 为内标计算, NIST612 和 NIST614 做监控盲样。普通铅校正采用 Andersen 的方法(Andersen, 2002), 锆

石 U-Pb 年龄计算和谐和图的绘制用 Isoplot3.0 完成(Ludwig, 2003)。

锆石的 Lu-Hf 同位素测试在中科院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室 LA-ICP-MS 实验室完成。使用仪器为 Neptune Plus 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 RESOLUTION M-50 激光剥蚀系统。Neptune Plus 采用能量聚焦和质量聚焦的双聚焦设计, 并采用动态变焦将质量色散扩大至 17%。仪器配有 9 个法拉第杯接收器和 8 个离子计数器接收器。采用了虚拟放大器专利技术, 有效地消除因各放大器的增益不同所造成的同位素比值误差, 提高同位素比值测量精度。

3 分析结果

3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年

从似斑状花岗岩(D001)和两件中细粒花岗岩(D002、D003)中挑选出来的锆石主要呈柱状或长柱状, 部分为不规则粒状, 且部分晶棱、晶锥不完整。长轴约 50~300 μm , 短轴约 8~80 μm , 长宽比主要集中在 2~5 之间。阴极发光成像(图 3)显示出锆石发育良好的震荡环带, 表明锆石为岩浆结晶成因(Hoskin and Black, 2000; Hoskin and Schaltegger, 2003)。部分锆石内部具有继承核, CL 较亮, 晶形以

棱柱状为主(图3)。前人研究表明,不同成因的锆石具有不同的 Th、U 含量与 Th/U 值。一般情况下,岩浆锆石的 Th、U 含量较高, Th/U 值较大(通常大于 0.1); 而变质锆石的 Th、U 含量低, Th/U 值小(一般 <0.1) (Hoskin and Schaltegger, 2003; 吴元保等, 2004)。分析样品中锆石的 Th 和 U 含量变化较大, 似斑状花岗岩(D001) Th 的变化范围为 $(44.66 \sim 405.55) \times 10^{-6}$, U 的变化范围为 $(199.55 \sim$

$1420.28) \times 10^{-6}$, Th/U 值变化范围为 0.08~1.10 (表1); 中细粒花岗岩(D002、D003) Th 的变化范围为 $(48.09 \sim 3372.42) \times 10^{-6}$, U 的变化范围为 $(125.41 \sim 1713.27) \times 10^{-6}$, Th/U 值变化范围为 0.08~2.40 (表1)。3 件样品除了 2 个测试点 Th/U 值为 0.08 外, 其余测试点的 Th/U 值均大于 0.1, 且 Th 与 U 具有较好的正相关性, 反映了岩浆成因锆石的特点, 进一步表明它们是岩浆成因锆石。

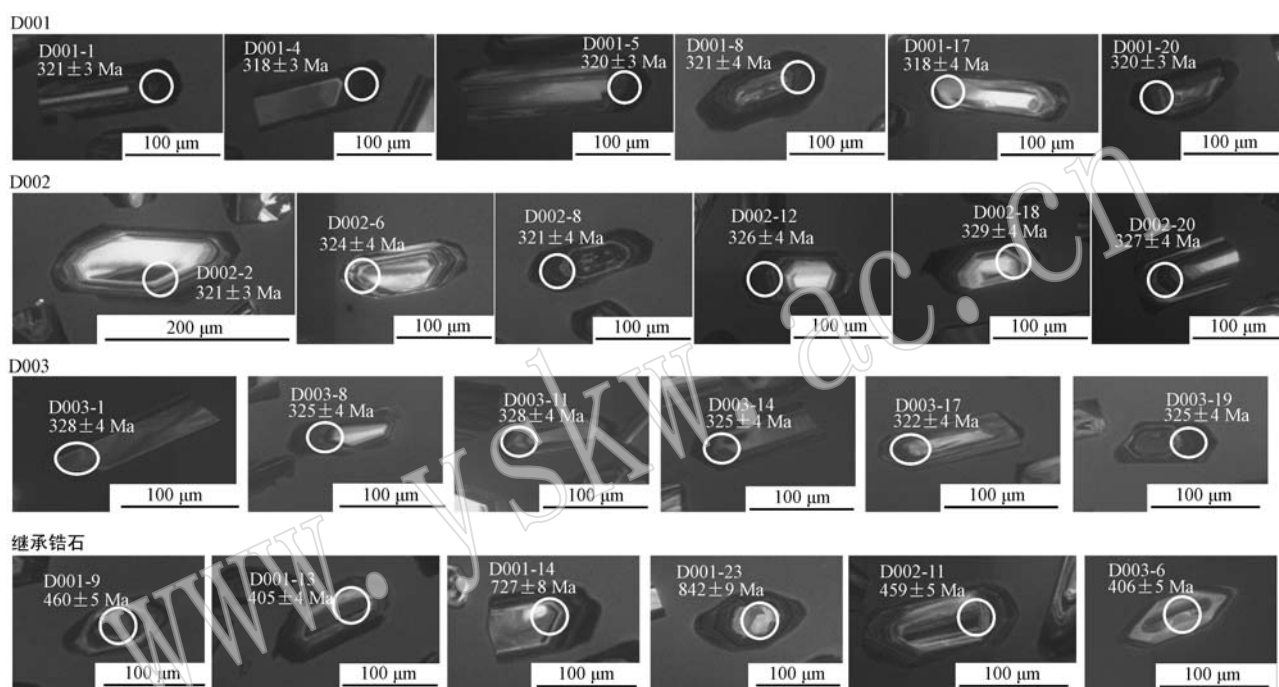


图3 阿尔哈达地区花岗岩锆石阴极发光(CL)图像及测试位置

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images and measuring positions of representative zircons from the granite in the Arehada area

似斑状花岗岩和两件中细粒花岗岩分别测了 25 个点, 从锆石测年数据(表1)可以看出, 个别点年龄相差较大, 分布于新元古代(976 Ma)至石炭纪(293 Ma)。年龄较大的锆石具有岩浆锆石的特征, 它们可能是岩浆上侵过程中混染了地壳中一些地层或岩浆的锆石。还有个别锆石粒径较小, 混合有核部较老 U-Pb 体系数据。排除上述非岩浆成因、继承和混合成因锆石数据, 样品 D001 的 17 个测点的年龄范围为 $313 \pm 4 \sim 347 \pm 4$ Ma, 加权平均年龄值为 319.0 ± 5.0 Ma (95% 可信度, MSWD = 4.9); D002 的 17 个测点的年龄范围为 $319 \pm 4 \sim 332 \pm 4$ Ma, 加权平均年龄值为 324.0 ± 2.0 Ma (95% 可信度, MSWD = 1.3); D003 的 17 个测点的年龄范围为 $293 \pm 3 \sim 328 \pm 4$ Ma, 加权平均年龄值为 332.0 ± 8.5 Ma (95% 可

信度, MSWD = 5.7)。获得的加权平均年龄具有较好的一致性和内在联系, 能够代表岩体的结晶年龄和形成时代, 由此可确定成岩时代为早石炭世, 属海西期。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上, 其分析点均分布在谐和线上(图4), 显示出良好的谐和性, 表明锆石形成后 U-Pb 同位素体系基本封闭, 无明显的 U、Pb 同位素交换(王喜龙等, 2013)。

3.2 锆石稀土元素特征

似斑状花岗岩(D001)和两件中细粒花岗岩(D002、D003)锆石稀土元素总量相对较高(表2), 其中 D001 的 ΣREE 为 $1178.15 \times 10^{-6} \sim 3612.08 \times 10^{-6}$, 平均为 2092.19×10^{-6} , LREE/HREE 值为 0.003~0.055; D002 的 ΣREE 为 $978.32 \times 10^{-6} \sim 3134.44 \times 10^{-6}$, 平均为 1939.81×10^{-6} , LREE/HREE

表 1 阿尔哈达地区花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from the granite in the Arehada area

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma	
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
似斑状花岗岩 D001											
D001-01	200.78	1 045.67	0.19	0.053 0	0.000 81	0.373 33	0.005 7	0.051 06	0.000 56	321	3
D001-02	44.66	251.92	0.18	0.052 8	0.001 02	0.374 96	0.007 1	0.051 49	0.000 59	324	4
D001-03	140.12	662.76	0.21	0.059 0	0.000 93	0.419 57	0.006 6	0.051 53	0.000 57	324	3
D001-04	176.57	743.92	0.24	0.052 8	0.000 82	0.368 05	0.005 7	0.050 59	0.000 56	318	3
D001-05	49.40	598.78	0.08	0.052 9	0.000 87	0.371 31	0.006 1	0.050 94	0.000 57	320	3
D001-06	110.11	949.29	0.12	0.053 9	0.000 84	0.381 30	0.005 9	0.051 27	0.000 57	322	3
D001-07	203.52	266.45	0.76	0.052 5	0.001 13	0.359 98	0.007 6	0.049 77	0.000 58	313	4
D001-08	118.05	509.35	0.23	0.052 8	0.000 91	0.371 51	0.006 3	0.050 98	0.000 58	321	4
D001-11	166.07	541.71	0.31	0.058 4	0.001 01	0.436 97	0.007 5	0.054 27	0.000 62	341	4
D001-12	89.70	375.63	0.24	0.064 7	0.001 21	0.457 56	0.008 4	0.051 26	0.000 59	319	4
D001-15	147.93	1 420.28	0.10	0.052 3	0.000 80	0.367 65	0.005 6	0.051 00	0.000 56	321	3
D001-16	168.77	573.51	0.29	0.092 3	0.001 49	0.738 81	0.011 7	0.058 02	0.000 66	347	4
D001-17	82.95	199.55	0.42	0.052 7	0.001 35	0.367 35	0.009 2	0.050 54	0.000 6	318	4
D001-19	102.70	270.13	0.38	0.058 7	0.001 17	0.445 65	0.008 7	0.055 06	0.000 64	346	4
D001-20	86.55	489.7	0.18	0.054 7	0.000 97	0.383 98	0.006 7	0.050 91	0.000 58	320	4
D001-21	105.74	723.53	0.15	0.054 0	0.000 91	0.379 13	0.006 3	0.050 93	0.000 57	320	3
D001-24	220.82	951.59	0.23	0.054 9	0.000 89	0.386 18	0.006 2	0.050 99	0.000 57	320	3
D001-25	94.12	706.48	0.13	0.061 2	0.000 99	0.428 59	0.006 8	0.050 76	0.000 57	317	3
D001-09	101.82	747.26	0.14	0.064 8	0.001 01	0.665 96	0.010 3	0.074 50	0.000 83	460	5
D001-10	258.17	235.21	1.10	0.056 7	0.001 17	0.541 20	0.011 0	0.069 22	0.000 81	431	5
D001-13	114.79	700.38	0.16	0.068 5	0.001 12	0.620 78	0.010 0	0.065 76	0.000 74	405	4
D001-14	144.79	519.09	0.28	0.068 2	0.001 08	1.127 07	0.017 6	0.119 91	0.001 34	727	8
D001-18	405.55	423.68	0.96	0.110 8	0.001 79	0.951 07	0.015 1	0.062 22	0.000 71	383	5
D001-22	144.90	612.14	0.24	0.112 1	0.001 70	2.585 10	0.038 8	0.167 18	0.001 86	976	10
D001-23	167.80	217.96	0.77	0.067 2	0.001 08	1.291 65	0.020 6	0.139 45	0.001 57	842	9
中细粒花岗岩 D002											
D002-01	91.79	319.46	0.29	0.053 7	0.001 01	0.408 64	0.007 6	0.055 21	0.000 63	346	4
D002-02	165.29	611.58	0.27	0.052 8	0.000 88	0.371 35	0.006 1	0.051 03	0.000 57	321	3
D002-03	124.48	704.27	0.18	0.052 8	0.000 87	0.371 14	0.006 0	0.050 95	0.000 57	320	3
D002-04	69.66	481.06	0.14	0.064 2	0.001 07	0.512 91	0.008 5	0.057 96	0.000 65	360	4
D002-06	109.46	310.01	0.35	0.052 8	0.000 98	0.376 00	0.006 9	0.051 60	0.000 59	324	4
D002-07	191.69	545.09	0.35	0.075 5	0.001 24	0.559 84	0.009 1	0.053 76	0.000 61	332	4
D002-08	168.35	897.88	0.19	0.056 3	0.000 92	0.397 31	0.006 5	0.051 20	0.000 58	321	4
D002-09	304.75	704.74	0.43	0.070 0	0.001 15	0.494 72	0.008 0	0.051 25	0.000 58	319	4
D002-12	72.73	551.67	0.13	0.052 9	0.001 01	0.378 48	0.007 1	0.051 86	0.000 60	326	4
D002-13	48.09	125.41	0.38	0.053 0	0.001 64	0.376 14	0.011 4	0.051 47	0.000 67	324	4
D002-14	84.74	997.35	0.08	0.062 3	0.001 09	0.444 25	0.007 7	0.051 73	0.000 59	322	4
D002-15	106.18	543.82	0.20	0.054 4	0.001 06	0.390 23	0.007 5	0.052 04	0.000 60	327	4
D002-16	129.12	299.08	0.43	0.053 5	0.001 27	0.413 16	0.009 6	0.056 02	0.000 68	351	4
D002-17	137.43	495.31	0.28	0.066 1	0.001 26	0.475 26	0.008 9	0.052 16	0.000 61	325	4
D002-18	60.36	207.30	0.29	0.052 1	0.001 48	0.376 84	0.010 4	0.052 42	0.000 67	329	4
D002-19	69.81	173.03	0.40	0.053 0	0.001 47	0.374 91	0.010 2	0.051 34	0.000 64	323	4
D002-20	130.97	724.32	0.18	0.053 7	0.000 98	0.385 43	0.007 0	0.052 07	0.000 60	327	4
D002-21	98.14	488.3	0.20	0.099 5	0.001 73	0.681 89	0.011 6	0.049 68	0.000 57	296	3
D002-22	75.68	173.27	0.44	0.058 5	0.001 52	0.414 24	0.010 5	0.051 32	0.000 64	323	4
D002-23	257.74	1 055.83	0.24	0.059 3	0.001 06	0.418 62	0.007 4	0.051 21	0.000 59	321	4
D002-24	161.52	981.05	0.16	0.053 0	0.000 96	0.384 84	0.006 9	0.052 61	0.000 60	331	4

续表 1
Continued Table 1

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值						年龄/Ma	
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
D002-25	109.95	364.37	0.30	0.052 8	0.001 16	0.372 63	0.008 0	0.051 19	0.000 61	322	4
D002-05	121.83	250.07	0.49	0.058 9	0.001 00	0.743 24	0.012 4	0.091 54	0.001 04	565	6
D002-10	294.23	461.11	0.64	0.056 7	0.000 95	0.599 59	0.010 0	0.076 73	0.000 87	477	5
D002-11	465.09	665.75	0.70	0.056 1	0.000 92	0.571 19	0.009 3	0.073 82	0.000 83	459	5
中细粒花岗岩 D003											
D003-01	95.37	351.07	0.27	0.053 0	0.001 08	0.381 84	0.007 6	0.052 20	0.000 61	328	4
D003-02	565.24	1 115.32	0.51	0.069 2	0.001 18	0.488 39	0.008 2	0.051 18	0.000 58	322	4
D003-03	3 372.40	1 713.27	1.97	0.118 6	0.001 97	0.958 01	0.015 7	0.058 58	0.000 66	367	4
D003-04	185.06	887.71	0.21	0.054 4	0.001 00	0.356 07	0.006 4	0.047 48	0.000 55	299	3
D003-05	222.25	759.95	0.29	0.069 6	0.001 23	0.497 93	0.008 7	0.051 88	0.000 60	326	4
D003-08	131.13	646.37	0.20	0.052 9	0.001 04	0.377 80	0.007 3	0.051 76	0.000 60	325	4
D003-09	55.98	194.58	0.29	0.054 9	0.001 61	0.384 64	0.011 0	0.050 79	0.000 65	319	4
D003-10	1 127.60	1 304.75	0.86	0.086 0	0.001 52	0.554 02	0.009 7	0.046 71	0.000 54	294	3
D003-11	193.86	497.64	0.39	0.059 8	0.001 22	0.430 02	0.008 6	0.052 18	0.000 62	328	4
D003-12	173.75	450.76	0.39	0.064 3	0.001 21	0.462 31	0.008 5	0.052 13	0.000 61	327	4
D003-13	1 999.10	1 475.95	1.35	0.105 4	0.001 86	0.753 66	0.013 1	0.051 84	0.000 60	326	4
D003-14	468.78	1 371.49	0.34	0.059 9	0.001 08	0.427 07	0.007 6	0.051 72	0.000 60	325	4
D003-15	216.11	669.37	0.32	0.068 3	0.001 30	0.501 28	0.009 4	0.053 25	0.000 62	332	4
D003-16	785.00	859.96	0.91	0.117 8	0.002 16	0.786 33	0.014 1	0.048 39	0.000 57	305	4
D003-17	150.51	374.80	0.40	0.081 9	0.001 63	0.593 67	0.011 6	0.052 54	0.000 62	322	4
D003-18	215.94	1 049.84	0.21	0.060 3	0.001 09	0.432 91	0.007 7	0.052 02	0.000 60	326	4
D003-19	106.13	512.27	0.21	0.053 5	0.001 14	0.380 99	0.008 0	0.051 66	0.000 61	325	4
D003-20	146.43	307.35	0.48	0.099 8	0.001 97	0.692 82	0.013 3	0.050 34	0.000 60	304	4
D003-21	244.12	728.33	0.34	0.055 7	0.001 07	0.456 53	0.008 7	0.059 46	0.000 70	372	4
D003-22	125.73	248.90	0.51	0.053 0	0.001 41	0.364 75	0.009 5	0.049 87	0.000 62	314	4
D003-23	786.11	327.14	2.40	0.126 4	0.002 45	0.811 17	0.015 3	0.046 53	0.000 56	293	3
D003-24	55.38	132.86	0.42	0.053 1	0.001 70	0.374 42	0.011 7	0.051 11	0.000 66	321	4
D003-25	534.74	565.21	0.95	0.123 8	0.002 22	0.887 41	0.015 7	0.051 99	0.000 60	327	4
D003-06	148.77	550.26	0.27	0.066 8	0.001 27	0.603 35	0.011 3	0.065 51	0.000 77	406	5
D003-07	178.92	379.12	0.47	0.061 0	0.001 15	0.855 09	0.015 9	0.101 64	0.001 18	624	7

值为 $0.005 \sim 0.045$; D003 的 ΣREE 为 $1\,159.69 \times 10^{-6} \sim 5\,462.26 \times 10^{-6}$, 平均为 $2\,472.65 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 $0.008 \sim 0.390$ 。3 件样品均具有重稀土元素明显富集、轻稀土元素显著亏损的特征, 配分曲线为斜率较大的左倾的 HREE 富集型(图 5)。D001 样品的 δEu 变化范围为 $0.05 \sim 0.46$, δCe 变化范围为 $0.70 \sim 31.12$, 平均值为 7.51; D002 样品的 δEu 变化范围为 $0.06 \sim 0.54$, δCe 变化范围为 $1.01 \sim 51.04$, 平均值为 8.03; D003 样品的 δEu 变化范围为 $0.06 \sim 0.52$, δCe 变化范围为 $0.65 \sim 11.09$, 平均值为 2.92; 均显示出明显的负 Eu 异常和正 Ce 异常。值得注意的是, 古老的继承锆石 HREE 质量分数总体要比年轻岩浆锆石低, Ce 异常不明显。部分锆石的 Ce 异常幅度较小或无异常, 同时 LREE 相

对富集, 可能是包裹体(如磷灰石)造成的。总体上, 样品锆石显示出较高的稀土元素含量、强烈正 Ce 异常和负 Eu 异常, 表现出岩浆锆石的特点(MUNOZ *et al.*, 2012; 陈伟等, 2012; 雷玮琰等, 2013)。

3.3 Hf 同位素特征

Hf 同位素分析结果(表 3)显示, 51 个测试点中 18 个数据点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值小于 0.002, 其余数据点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值也均小于 0.004, 说明由 ^{176}Lu 衰变产生的 ^{176}Hf 极少, 所以测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值基本代表了其形成时 Hf 体系的同位素组成(Amelin *et al.*, 2000; 侯可军等, 2007; 吴福元等, 2007)。所有测试点 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 值介于 $-0.97 \sim -0.88$ 之间, 明显小于铁镁地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 值(-0.34 , Amelin *et al.*, 1999)和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ 值(-0.72 , Amelin *et al.*,

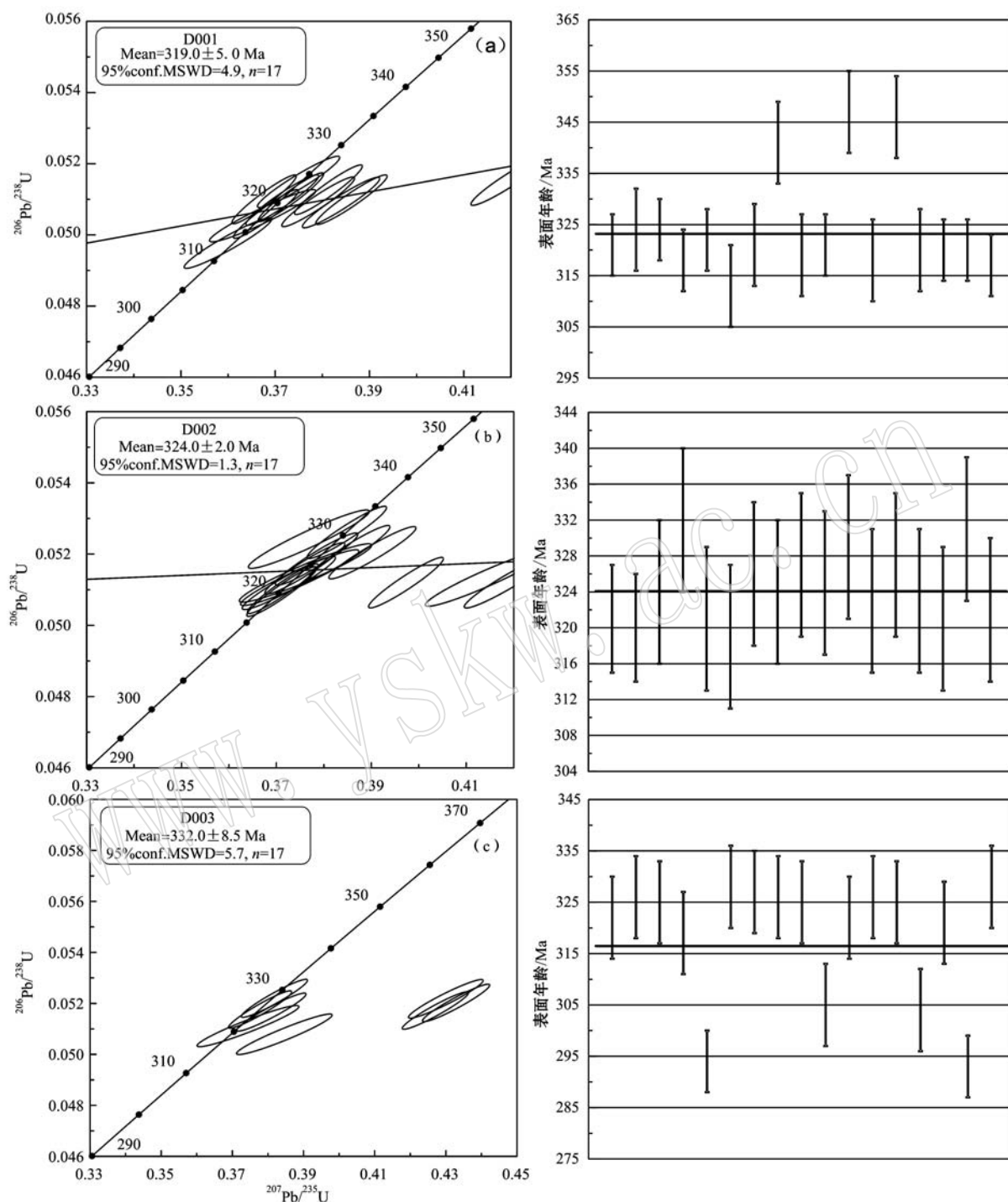


图 4 阿尔哈达地区花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagram of zircon LA-ICP-MS U-Pb age of granite in the Arehada area

1999), 故二阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间或其源区物质在地壳的平均存留年龄。锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,511 \sim 0.282\,856$, 平均值为 $0.282\,739$ (表 3)。继承锆石 D001-13 (405 Ma) $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值表现为负值 (-0.71),

亏损地幔二阶段模式年龄 t_{DM2} 显示出较老的年龄 (1 436 Ma)。其余岩浆锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值变化于 $+1.60 \sim +10.21$ 之间, 平均值为 $+6.41$, 亏损地幔二阶段模式年龄 t_{DM2} 变化范围为 $709 \sim 1\,436$ Ma, 平均值为 923 Ma。

表 2 阿尔哈达地区花岗岩锆石的稀土元素数据

Table 2 Rare earth elements data of zircons from the granite in the Arelhada area

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	L/H	δEu	δCe
D001-01	0.05	8.58	0.08	1.41	5.18	0.51	34.07	17.30	244.58	98.60	464.61	121.24	1414.62	261.70	2717.66	2672.53	15.81	2656.72	0.01	0.09	26.57
D001-02	0.09	1.68	0.13	2.03	5.41	0.37	28.49	11.59	142.25	49.30	209.11	50.04	577.05	100.60	1348.87	1178.15	9.72	1168.43	0.01	0.07	3.05
D001-03	3.44	13.70	1.31	8.31	7.55	0.68	34.32	15.92	227.58	90.80	431.73	116.98	1355.95	248.12	2522.47	2556.39	34.99	2521.40	0.01	0.11	1.58
D001-04	0.82	7.53	0.32	2.63	5.61	0.57	30.89	13.90	189.31	74.11	341.79	87.02	1010.97	189.53	2048.25	1955.00	17.48	1937.52	0.01	0.10	3.58
D001-05	0.08	1.13	0.06	1.19	3.39	0.21	22.62	11.58	166.92	66.86	318.45	87.20	1066.04	199.81	1873.69	1945.53	6.05	1939.48	0.00	0.05	4.03
D001-06	0.45	4.32	0.30	2.79	5.56	0.55	33.50	16.68	240.58	98.34	463.88	125.08	1488.93	279.18	2745.27	2760.15	13.98	2746.17	0.01	0.10	2.77
D001-07	0.76	14.37	0.71	9.32	19.54	4.35	82.66	28.62	317.84	109.46	432.45	94.67	1006.03	175.20	2789.39	2295.98	49.05	2246.93	0.02	0.28	4.40
D001-08	0.36	9.08	0.46	2.23	4.61	0.50	26.97	12.12	159.50	62.37	281.26	71.68	857.87	154.83	1715.45	1643.84	17.24	1626.60	0.01	0.11	4.68
D001-09	0.07	3.39	0.07	1.36	4.57	0.29	29.20	15.11	202.66	77.32	356.54	91.25	1126.54	197.04	2163.55	2105.40	9.74	2095.66	0.01	0.06	10.96
D001-10	0.09	22.37	0.40	7.01	14.77	4.88	56.00	19.63	221.63	79.37	333.66	80.44	953.41	173.43	2154.07	1967.09	49.52	1917.57	0.03	0.46	15.88
D001-11	25.80	46.93	4.99	19.30	11.29	1.43	43.78	18.94	246.38	91.92	408.27	102.42	1222.47	213.37	2549.09	2457.29	109.74	2347.55	0.05	0.17	0.95
D001-12	0.14	5.14	0.19	2.46	5.83	0.62	28.71	12.31	157.78	57.13	251.69	61.82	701.72	124.29	1574.21	1409.83	14.38	1395.45	0.01	0.12	6.49
D001-13	0.75	16.41	0.81	5.87	8.60	1.68	32.28	14.37	184.87	70.43	317.54	82.41	986.86	178.19	1883.62	1900.22	34.12	1866.10	0.02	0.27	4.59
D001-14	0.28	10.09	0.36	3.33	5.16	0.67	27.42	11.74	149.58	57.36	248.78	60.48	699.95	115.13	1506.33	1390.33	19.89	1370.44	0.02	0.14	6.64
D001-15	0.15	3.66	0.15	0.63	2.72	0.21	21.92	11.94	184.21	79.25	387.23	103.6	1274.68	239.45	2180.41	2309.81	7.52	2302.28	0.00	0.06	5.32
D001-16	6.84	44.60	2.84	22.75	25.22	4.38	76.82	28.07	317.08	107.62	464.70	118.77	1445.84	251.84	2841.04	2917.37	106.63	2810.74	0.04	0.28	2.48
D001-17	0.07	6.61	0.17	3.01	7.70	1.12	36.66	14.18	167.10	59.95	250.19	59.79	668.86	117.57	1595.4	1392.97	18.67	1374.30	0.01	0.17	10.55
D001-18	55.26	61.44	4.95	35.13	28.43	3.62	99.50	37.73	477.17	164.07	690.20	158.85	1495.10	300.63	4113.04	3612.08	188.83	3423.25	0.06	0.19	0.70
D001-19	0.39	6.64	0.33	5.30	11.74	1.98	48.91	18.19	223.88	79.00	332.16	82.55	912.85	155.01	2013.09	1878.92	26.38	1852.55	0.01	0.22	4.25
D001-20	0.15	5.81	0.18	1.84	4.20	0.49	23.75	11.13	146.46	55.30	250.24	62.91	738.35	132.81	1552.91	1433.62	12.67	1420.95	0.01	0.12	7.40
D001-21	0.07	5.35	0.12	1.55	4.12	0.48	26.35	12.81	180.40	70.95	337.09	89.09	1070.06	196.79	1959.73	1995.23	11.69	1983.54	0.01	0.11	11.59
D001-22	1.25	50.93	1.60	11.23	13.19	2.79	38.41	15.26	176.53	59.79	260.84	66.34	794.80	138.77	1617.19	1631.73	80.99	1550.74	0.05	0.35	7.53
D001-23	0.06	22.36	0.20	3.47	6.38	2.12	28.25	10.34	125.30	47.29	216.83	55.75	675.90	132.62	1358.47	1326.87	34.59	1292.28	0.03	0.41	31.12
D001-24	0.46	9.33	0.26	2.82	7.02	0.72	38.06	17.75	246.12	97.34	448.68	116.16	1391.74	249.41	2676.34	2625.87	20.61	2605.26	0.01	0.11	6.56
D001-25	0.70	14.09	0.79	6.43	10.91	1.44	54.62	24.52	320.31	118.12	529.97	130.69	1466.30	263.62	3239.91	2942.60	34.36	2908.24	0.01	0.15	4.09
D002-01	0.05	5.37	0.11	2.16	5.80	0.60	31.36	13.25	172.12	62.56	269.81	65.51	716.49	128.79	1628.69	1473.98	14.09	1459.89	0.01	0.11	13.04
D002-02	0.03	13.13	0.17	3.36	8.81	0.67	45.49	19.63	246.18	89.22	386.33	93.49	1044.38	181.21	2375.97	2132.09	26.16	2105.93	0.01	0.08	22.76
D002-03	0.03	2.88	0.11	2.54	7.97	0.58	47.08	21.17	278.40	104.31	447.94	111.39	1198.15	212.63	2797.76	2435.18	14.11	2421.07	0.01	0.07	7.40
D002-04	2.48	8.64	1.67	10.68	10.42	2.30	36.89	15.00	172.24	55.88	227.93	54.55	610.69	107.58	1568.52	1316.95	36.19	1280.76	0.03	0.32	1.01
D002-05	0.08	16.45	0.07	0.95	2.26	1.18	12.37	5.02	65.94	27.65	139.84	39.90	542.49	124.12	836.84	978.32	20.99	957.33	0.02	0.54	51.04
D002-06	0.33	5.58	0.28	4.07	8.59	0.85	40.78	16.22	196.41	71.70	312.69	75.89	849.80	153.60	1876.12	1736.79	19.70	1717.09	0.01	0.11	4.21
D002-07	1.76	50.25	1.98	14.30	17.84	3.73	59.59	22.76	267.72	88.24	361.06	85.74	927.34	165.68	2409.2	2067.99	89.86	1978.13	0.05	0.32	5.81
D002-08	1.23	10.20	1.39	5.78	7.80	1.06	39.53	18.87	254.81	97.25	445.33	115.41	1294.46	233.16	2673.89	2526.27	27.45	2498.82	0.01	0.15	1.69
D002-09	2.83	38.09	2.47	16.46	18.31	3.56	58.27	23.13	275.11	95.91	401.41	97.04	1092.80	193.10	2527.26	2318.49	81.72	2236.77	0.04	0.30	3.28
D002-10	0.31	16.88	0.47	5.13	9.06	2.99	39.12	13.98	167.68	59.93	258.44	65.40	762.36	142.40	1701.54	1544.15	34.84	1509.31	0.02	0.41	8.85
D002-11	0.08	21.38	0.45	7.67	14.90	4.70	59.71	21.60	251.86	89.95	389.25	97.52	1113.30	208.26	2522.74	2280.63	49.18	2231.45	0.02	0.42	13.73
D002-12	0.03	2.45	0.05	1.57	4.68	0.33	28.20	13.43	182.06	73.59	328.42	87.94	1042.68	190.60	1924.86	1956.04	9.12	1946.92	0.01	0.07	11.48
D002-13	0.05	1.75	0.20	3.98	9.41	0.63	39.97	15.09	177.48	60.15	252.50	59.14	651.50	115.91	1587.14	1387.76	16.01	1371.74	0.01	0.08	2.49

 $\times 10^{-6}$

续表 2
Continued Table 2

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	L/H	δEu	δCe
D002-14	1.66	12.72	1.19	7.80	8.99	1.47	39.35	19.51	272.00	106.87	307.25	138.39	1613.28	301.37	2 975.95	3 031.85	33.83	2 998.02	0.01	0.20	2.13
D002-15	0.18	7.34	0.23	2.45	4.98	1.23	23.73	10.40	143.18	55.15	258.46	68.38	810.71	149.68	1 507.14	1 536.10	16.41	1 519.69	0.01	0.29	7.52
D002-16	0.12	6.29	0.20	3.38	7.19	0.80	33.37	12.23	142.98	49.31	208.37	49.18	532.97	94.60	1 337.82	1 141.02	17.98	1 123.04	0.02	0.13	7.78
D002-17	1.06	31.91	1.02	7.79	9.18	2.00	34.08	14.26	178.19	64.75	293.93	74.25	841.50	155.19	1 746.25	1 709.11	52.96	1 656.15	0.03	0.31	6.88
D002-18	0.10	2.80	0.16	2.89	7.29	0.57	33.56	13.12	163.14	59.57	256.40	62.96	727.30	132.52	1 570.08	1 462.37	13.80	1 448.57	0.01	0.09	4.47
D002-19	0.09	2.13	0.26	5.60	11.80	0.82	51.91	18.67	215.62	75.20	305.12	72.12	783.57	137.53	1 879.34	1 680.44	20.70	1 659.74	0.01	0.09	2.27
D002-20	0.08	3.91	0.17	3.29	9.31	0.58	52.88	24.13	319.87	122.42	556.97	142.50	1 612.80	285.53	3 295.40	3 134.44	17.34	3 117.10	0.01	0.06	6.05
D002-21	4.63	42.25	3.26	22.21	23.34	5.42	72.93	27.62	320.53	107.26	444.75	107.06	1 187.28	208.68	2 832.23	2 577.22	101.11	2 476.11	0.04	0.37	2.56
D002-22	0.30	4.25	0.57	8.48	16.14	1.27	68.72	24.13	275.01	92.64	370.15	83.29	880.15	155.51	2 382.25	1 980.61	31.01	1 949.60	0.02	0.10	1.91
D002-23	1.65	22.13	1.46	9.85	10.47	2.37	38.61	17.03	220.54	85.79	389.66	98.31	1 151.70	216.89	2 349.09	2 266.46	47.93	2 218.53	0.02	0.32	3.24
D002-24	0.33	7.77	0.31	3.27	5.75	0.89	30.75	14.99	208.80	82.43	380.05	0.00	1 158.62	220.91	2 286.26	2 114.86	18.31	2 096.55	0.01	0.16	5.50
D002-25	0.11	2.81	0.19	3.60	10.93	0.71	54.28	20.85	246.48	84.11	341.31	80.14	880.39	155.16	2 210.90	1 881.08	18.35	1 862.72	0.01	0.07	3.70
D003-01	0.14	3.86	0.10	2.65	7.02	0.83	35.57	14.70	185.24	68.81	297.45	74.08	824.71	150.00	1 831.55	1 665.15	14.59	1 650.56	0.01	0.13	7.84
D003-02	19.06	46.77	14.10	72.07	38.79	5.50	68.20	24.52	291.03	104.51	467.81	118.79	1 398.34	258.81	2 820.94	2 928.30	196.29	2 732.01	0.07	0.32	0.67
D003-03	133.63	350.31	113.09	571.68	307.10	57.73	380.34	106.40	879.98	194.69	641.99	137.13	1 365.98	222.21	5 362.43	5 462.26	1 533.54	3 928.72	0.39	0.52	0.65
D003-04	0.87	7.84	0.93	5.80	6.65	0.80	28.66	13.19	192.76	75.79	366.57	98.19	1 216.01	225.48	2 066.04	2 239.54	22.89	2 216.65	0.01	0.15	1.90
D003-05	4.33	10.18	2.61	13.37	12.08	1.39	49.32	21.94	287.82	106.98	476.27	119.56	1 399.75	251.95	2 960.14	2 757.55	43.96	2 713.59	0.02	0.15	0.73
D003-06	2.46	12.52	1.30	7.21	6.01	0.80	21.09	9.53	127.01	49.15	232.86	61.93	728.33	144.13	1 400.63	1 404.33	30.30	1 374.03	0.02	0.19	1.70
D003-07	0.67	19.43	0.29	3.49	5.80	1.54	27.26	9.90	118.00	43.01	191.60	48.42	570.93	119.35	1 212.82	1 159.69	31.22	1 128.47	0.03	0.31	10.87
D003-08	0.29	4.43	0.28	3.73	8.86	0.50	44.66	18.34	229.57	84.48	357.23	86.71	976.68	176.47	2 298.95	1 992.22	18.09	1 974.14	0.01	0.06	3.49
D003-09	0.07	2.06	0.24	4.13	9.89	0.61	45.97	18.19	220.53	79.72	338.99	80.99	918.67	166.79	2 127.92	1 886.85	17.00	1 869.85	0.01	0.07	2.40
D003-10	30.90	189.18	34.68	178.40	101.30	14.69	134.72	47.59	517.81	176.04	779.91	204.36	2 355.13	437.13	4 905.12	5 201.84	549.15	4 652.69	0.12	0.38	1.25
D003-11	0.36	7.88	0.32	4.50	10.82	1.12	55.43	23.19	284.40	105.51	456.65	108.51	1 210.62	219.28	2 823.05	2 488.60	25.00	2 463.59	0.01	0.11	5.22
D003-12	0.94	9.07	0.66	5.22	8.28	1.18	40.65	16.95	223.10	82.24	367.34	91.59	1 061.19	187.57	2 209.09	2 095.98	25.34	2 070.63	0.01	0.16	2.73
D003-13	42.88	191.43	39.55	217.09	116.72	18.25	158.55	48.70	471.74	138.27	553.52	131.68	1 462.19	250.40	3 682.42	3 840.97	625.92	3 215.05	0.20	0.41	1.05
D003-14	4.86	24.02	3.98	21.29	15.61	2.23	48.92	21.27	278.39	107.07	494.83	130.74	1 501.95	274.99	3 024.98	2 930.15	71.99	2 858.16	0.03	0.23	1.26
D003-15	4.25	15.00	2.65	15.84	11.73	1.52	43.49	18.06	229.91	86.31	385.00	94.77	1 111.28	200.45	2 305.76	2 220.26	50.99	2 169.27	0.02	0.18	1.07
D003-16	23.05	110.02	20.33	105.20	61.02	9.55	102.31	37.23	428.55	147.03	658.94	168.83	1 970.22	357.12	3 942.16	4 199.40	329.17	3 870.23	0.09	0.37	1.16
D003-17	1.10	9.63	0.48	4.18	8.84	1.22	38.18	15.17	184.19	67.85	288.42	71.22	808.88	145.12	1 802.54	1 644.47	25.45	1 619.03	0.02	0.17	3.25
D003-18	5.21	21.65	4.28	20.78	13.62	1.96	37.87	16.59	221.45	85.67	402.42	107.43	1 264.27	231.45	2 335.06	2 434.65	67.50	2 367.15	0.03	0.25	1.06
D003-19	0.13	3.07	0.18	2.85	8.09	0.72	42.27	18.24	227.83	79.89	335.14	82.06	902.06	158.08	2 176.14	1 860.60	15.04	1 845.57	0.01	0.10	4.10
D003-20	3.34	13.81	1.95	13.24	15.06	1.50	58.79	22.43	253.66	85.79	354.10	82.21	921.14	157.11	2 250.81	1 984.16	48.90	1 935.26	0.03	0.13	1.30
D003-21	0.44	9.96	0.46	3.78	5.87	0.54	25.35	11.21	143.93	54.24	243.56	62.87	746.87	131.37	1 480.77	1 440.44	21.04	1 419.40	0.02	0.11	4.89
D003-22	0.08	6.97	0.17	3.77	8.36	0.94	38.77	14.82	182.06	63.24	258.78	61.79	685.47	119.02	1 627.97	1 444.22	20.28	1 423.95	0.01	0.13	11.09
D003-23	6.59	35.82	5.88	37.95	31.26	5.33	74.87	26.48	280.06	88.81	354.83	83.34	911.76	156.83	2 275.73	2 099.81	122.83	1 976.98	0.06	0.32	1.30
D003-24	0.68	4.13	1.22	12.09	16.94	0.90	67.77	21.84	251.02	84.23	336.51	76.94	818.62	144.67	2 170.04	1 837.55	35.95	1 801.60	0.02	0.07	0.86
D003-25	21.45	80.02	12.67	70.47	43.53	6.38	68.84	24.34	282.73	95.64	408.23	106.70	1 171.91	204.41	2 459.56	2 597.32	234.52	2 362.80	0.10	0.36	1.17

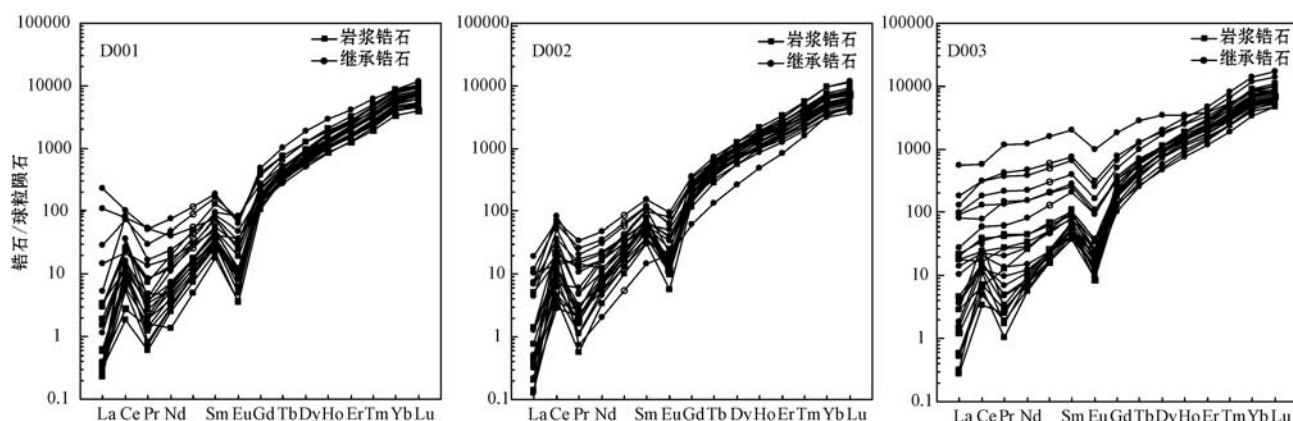


图5 阿尔哈达地区花岗岩锆石稀土元素标准化配分曲线

Fig. 5 Standardized partition curve of zircon REE from the granite in the Arehada area

4 讨论

阿尔哈达及邻区经历了加里东期、海西期和印支期构造旋回,西伯利亚板块、古亚洲洋壳和华北陆台之间经历了长时期和多阶段的俯冲-碰撞作用,最终形成了构造岩浆最复杂的一条巨型造山带(Badarch *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2003; 李益龙等, 2009)。

矿区的似斑状和中细粒花岗岩锆石 CL 图像表明,锆石具明显的震荡环带结构。LA-ICP-MS 分析结果显示, Th/U 值基本大于 0.1, 且 Th 与 U 具有较好的正相关性, 反映了岩浆成因锆石的特点。锆石 LA-ICP-MSU-Pb 测年结果分别为 319.0 ± 5.0 、 324.0 ± 2.0 和 332.0 ± 8.5 Ma, 平均年龄 325 Ma 左右, 代表成岩年龄。800~900 Ma 锆石年龄结果与额尔古纳地块上的新元古代花岗岩的年龄一致, 可能是新元古代花岗岩锆石的残留或岩浆捕获新元古代花岗岩的锆石所致(葛文春等, 2005); 565~727 Ma 锆石年龄结果可能与额尔古纳被动陆缘阶段(550~780 Ma)产生的古老基底或蛇绿岩带有关(余宏全等, 2012); 420~480 Ma 锆石年龄结果与西侧额尔古纳兴安地块拼合阶段的年龄范围一致, 可能是拼合阶段的花岗岩或花岗片麻岩锆石的残留或岩浆捕获花岗岩的锆石年龄(余宏全等, 2012)。

早古生代时期, 西伯利亚板块与华北板块处于洋盆对峙的构造格局, 形成了大面积呈串珠分布的蛇绿岩带(张臣等, 1999; 刘敦一等, 2003; 陶继雄等, 2004; 聂凤军等, 2007), 随后进入大洋消减的构造阶

段。但是华北板块与西伯利亚板块最终闭合时间一直是中外学者争论的焦点。部分学者认为晚泥盆世一早石炭世已经开始闭合(Chen *et al.*, 2000; Windley *et al.*, 2007; 聂凤军等, 2007; 徐备等, 2014); 另一部分学者认为华北板块与西伯利亚板块在中二叠世之后才开始闭合, 并一直延续到三叠纪晚期(尚庆华, 2004; 王惠等, 2005; 李锦轶等, 2007; 李益龙等, 2009; 孟庆鹏等, 2013), 最终沿西拉木伦-索伦一带形成缝合带。由于西伯利亚与华北板块之间被多个微板块分割、面积较广、时间跨度大、构造演化复杂, 不同地区呈现不同的演化历史(Windley *et al.*, 2007; 孟庆鹏等, 2013)。

晚古生代后期, 华北板块与西伯利亚板块沿二连浩特—东乌旗一带发生俯冲、对接和碰撞作用。余宏全等(2009)研究认为早二叠世晚期, 大兴安岭中北段与西乌旗穆沁旗碰撞对接, 进入碰撞造山阶段。近期研究表明, 在晚石炭世前, 华北板块与西伯利亚板块沿二连浩特—东乌旗一带已经发生闭合(刘洪利等, 2011)。320 Ma 之前, 二连浩特—东乌旗一带发生俯冲碰撞, 形成一系列火山弧特征的岩浆岩。锡林浩特地区拜仁达坝矿区闪长岩 SHRIMP U-Pb 定年获得 326.5 ± 1.6 Ma(刘翼飞等, 2010)、西乌旗南部达其浑迪和金星石英闪长岩获得 325 ± 3 和 322 ± 3 Ma 的定年结果(表 4)(刘建峰等, 2009), 岩石地球化学特征皆指示了俯冲的火山弧环境。莫合尔图一带闪长岩的 337.1 ± 1.9 Ma 年龄也对应该时期发生的构造热事件(杨俊泉等, 2014)。随着俯冲作用的不断进行, 320~300 Ma 期间东乌旗及邻区总体进入挤压碰撞造山阶段, 局部处于后碰撞伸展

表 3 阿尔哈达地区花岗岩锆石的 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Lu-Hf isotopic analyses of zircons from the granite in the Ahehada area

测点号	年龄/Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	εHf(0)	εHf(t)	t _{DM1} /Ma	t _{DM2} /Ma	f _{Lu/Hf}
D001-1	321	0.10	0.001 919	0.002 734	0.000 053	0.282 769	0.000 009	-0.11	6.37	718	923	-0.92
D001-2	324	0.06	0.000 263	0.001 554	0.000 003	0.282 831	0.000 010	2.10	8.89	605	765	-0.95
D001-3	324	0.06	0.000 666	0.001 853	0.000 023	0.282 755	0.000 009	-0.62	6.12	721	942	-0.94
D001-4	318	0.07	0.000 510	0.002 072	0.000 014	0.282 722	0.000 009	-1.75	4.81	772	1 020	-0.94
D001-5	320	0.07	0.001 471	0.001 919	0.000 043	0.282 802	0.000 010	1.04	7.68	654	839	-0.94
D001-6	322	0.10	0.001 219	0.002 971	0.000 035	0.282 832	0.000 010	2.13	8.58	628	783	-0.91
D001-7	313	0.06	0.001 573	0.001 790	0.000 040	0.282 799	0.000 009	0.95	7.47	656	847	-0.95
D001-8	321	0.08	0.000 333	0.002 441	0.000 012	0.282 776	0.000 010	0.15	6.69	701	903	-0.93
D001-11	341	0.08	0.000 941	0.002 567	0.000 039	0.282 729	0.000 010	-1.53	5.39	773	1 001	-0.92
D001-13	405	0.05	0.000 871	0.001 424	0.000 026	0.282 511	0.000 008	-9.24	-0.71	1 060	1 436	-0.96
D001-15	321	0.06	0.000 790	0.001 830	0.000 019	0.282 809	0.000 009	1.30	7.97	643	821	-0.94
D001-17	318	0.06	0.000 473	0.002 053	0.000 017	0.282 774	0.000 013	0.07	6.63	697	904	-0.94
D001-19	346	0.08	0.000 699	0.002 651	0.000 021	0.282 754	0.000 013	-0.65	6.36	739	943	-0.92
D001-20	320	0.06	0.000 142	0.001 819	0.000 005	0.282 856	0.000 009	2.97	9.62	574	715	-0.95
D001-24	320	0.07	0.000 283	0.002 309	0.000 007	0.282 804	0.000 011	1.12	7.67	658	840	-0.93
D001-25	317	0.07	0.000 878	0.002 091	0.000 030	0.282 726	0.000 008	-1.61	4.92	767	1 012	-0.94
D002-1	346	0.08	0.001 148	0.002 747	0.000 034	0.282 701	0.000 016	-2.51	4.47	818	1 063	-0.92
D002-2	321	0.06	0.001 158	0.001 655	0.000 024	0.282 768	0.000 011	-0.15	6.56	699	911	-0.95
D002-3	320	0.08	0.000 717	0.002 690	0.000 039	0.282 634	0.000 022	-4.86	1.60	915	1 225	-0.92
D002-4	360	0.08	0.001 400	0.002 843	0.000 054	0.282 856	0.000 018	2.96	10.21	591	709	-0.91
D002-6	324	0.08	0.000 309	0.002 125	0.000 010	0.282 792	0.000 010	0.70	7.37	672	862	-0.94
D002-8	321	0.10	0.000 609	0.003 035	0.000 023	0.282 745	0.000 014	-0.96	5.46	760	981	-0.91
D002-12	326	0.07	0.000 164	0.002 198	0.000 003	0.282 795	0.000 009	0.82	7.52	669	854	-0.93
D002-14	322	0.07	0.000 585	0.002 034	0.000 015	0.282 657	0.000 009	-4.08	2.57	867	1 165	-0.94
D002-15	327	0.05	0.000 702	0.001 345	0.000 018	0.282 777	0.000 009	0.19	7.09	679	882	-0.96
D002-16	351	0.04	0.000 486	0.001 143	0.000 014	0.282 739	0.000 009	-1.15	6.31	729	950	-0.97
D002-17	325	0.06	0.001 203	0.001 784	0.000 036	0.282 801	0.000 008	1.02	7.79	653	836	-0.95
D002-18	329	0.06	0.000 354	0.002 261	0.000 015	0.282 746	0.000 010	-0.91	5.83	742	964	-0.93
D002-20	327	0.11	0.000 344	0.003 681	0.000 013	0.282 825	0.000 010	1.89	8.29	651	806	-0.89
D002-21	296	0.08	0.000 673	0.002 402	0.000 025	0.282 829	0.000 011	2.03	8.07	622	796	-0.93
D002-23	321	0.06	0.000 794	0.001 973	0.000 023	0.282 803	0.000 009	1.09	7.73	653	836	-0.94
D002-24	331	0.07	0.000 480	0.002 335	0.000 015	0.282 849	0.000 009	2.73	9.51	592	731	-0.93
D002-25	322	0.05	0.000 510	0.001 721	0.000 013	0.282 815	0.000 009	1.53	8.25	631	805	-0.95
D003-1	328	0.05	0.000 942	0.001 725	0.000 030	0.282 833	0.000 010	2.14	8.98	606	762	-0.95
D003-2	322	0.12	0.000 377	0.003 951	0.000 016	0.282 809	0.000 014	1.30	7.54	682	850	-0.88
D003-4	299	0.08	0.000 199	0.002 649	0.000 011	0.282 793	0.000 010	0.73	6.78	681	880	-0.92
D003-5	326	0.10	0.000 802	0.003 320	0.000 040	0.282 663	0.000 016	-3.86	2.60	889	1 166	-0.90
D003-8	325	0.08	0.000 410	0.002 678	0.000 012	0.282 742	0.000 013	-1.07	5.51	757	981	-0.92
D003-9	319	0.06	0.000 236	0.001 986	0.000 007	0.282 744	0.000 008	-0.99	5.61	739	970	-0.94
D003-10	294	0.09	0.000 500	0.002 796	0.000 020	0.282 728	0.000 012	-1.57	4.35	780	1 031	-0.92
D003-12	327	0.09	0.000 371	0.003 271	0.000 012	0.282 698	0.000 024	-2.62	3.86	835	1 087	-0.90
D003-13	326	0.11	0.000 480	0.003 509	0.000 030	0.282 657	0.000 017	-4.05	2.36	902	1 181	-0.89
D003-14	325	0.09	0.000 241	0.002 781	0.000 006	0.282 818	0.000 011	1.62	8.18	646	811	-0.92
D003-15	332	0.10	0.000 693	0.003 288	0.000 024	0.282 707	0.000 018	-2.31	4.27	822	1 065	-0.90
D003-16	305	0.05	0.000 993	0.001 757	0.000 030	0.282 797	0.000 009	0.90	7.25	657	855	-0.95
D003-17	322	0.09	0.001 457	0.002 902	0.000 046	0.282 750	0.000 016	-0.78	5.68	749	968	-0.91
D003-18	326	0.08	0.000 566	0.002 473	0.000 027	0.282 763	0.000 010	-0.33	6.31	722	931	-0.93
D003-19	325	0.06	0.000 555	0.001 782	0.000 022	0.282 657	0.000 010	-4.05	2.71	860	1 159	-0.95
D003-21	372	0.07	0.000 428	0.002 128	0.000 019	0.282 648	0.000 016	-4.39	3.27	882	1 159	-0.94
D003-22	314	0.06	0.000 434	0.001 724	0.000 012	0.282 788	0.000 011	0.57	7.12	670	870	-0.95
D003-24	321	0.10	0.000 780	0.003 462	0.000 032	0.282 824	0.000 022	1.82	8.15	650	810	-0.90

的构造环境。同期发育有阿木古楞岩体(314.2 ± 2.2 Ma)、拜仁达坝花岗闪长岩(319 ± 3 Ma)、维拉斯托石英闪长岩(310 ± 2 Ma)、道伦达坝英安质晶屑凝灰岩(300 ± 5 Ma)等侵入岩及陆相喷出岩(表 4)(薛怀民等, 2010; 何付兵等, 2013)。这些花岗岩及花

岗闪长岩,均是挤压环境下的产物。本次阿尔哈达铅锌银矿区 3 件花岗岩样品锆石 LA-ICP-MS 测年结果属于中石炭世,说明其为海西期岩浆活动的产物,是对该时期岩浆活动的响应,但其是火山弧还是碰撞造山背景下的产物?还需要地球化学特征的研究。

表 4 东乌珠穆沁旗地区岩体成岩年龄表
Table 4 Petrogenetic ages of rocks in Dong Ujimqin Banner

序号	矿床名称或岩体名称	岩性	测试对象	测试方法	年龄/Ma	资料来源
1	拜仁达坝	闪长岩	锆石	SHRIMP	326.5 ± 1.6	刘翼飞等(2010)
2	达其浑迪	石英闪长岩	锆石	LA-ICP-MS	325 ± 5	刘建峰等(2009)
3	金星	石英闪长岩	锆石	LA-ICP-MS	322 ± 3	刘建峰等(2009)
4	阿木古楞	二长花岗岩	锆石	LA-ICP-MS	314.2 ± 2.2	何付兵等(2013)
5	维拉斯托	石英闪长岩	锆石	SHRIMP	310 ± 2	薛怀民等(2010)
6	道伦达坝	晶屑凝灰岩	锆石	SHRIMP	300 ± 5	薛怀民等(2010)
7	阿尔哈达	似斑状花岗岩	锆石	LA-ICP-MS	319.5 ± 2.2	本文
		中细粒花岗岩			324.1 ± 2.7	
		中细粒花岗岩			322.0 ± 3.3	
8	狼麦温都尔	二长花岗岩	锆石	SHRIMP	307.0 ± 1.9	程银行等(2012)
		正长花岗岩			299.7 ± 5.3	
9	阿钦楚鲁	二长花岗岩	锆石	SHRIMP	296.8 ± 4.1	王治华等(2013)
					296.3 ± 3.8	王治华等(2015)
10	京格斯台	碱性花岗岩	锆石	同位素稀释法	284.8 ± 1.1	张玉清等(2009)
11	东乌旗西部窑勒-扎拉嘎	碱性花岗岩	锆石	LA-MC-ICP-MS	272.3 ± 0.7	程银行等(2014)
		石英正长岩			271.7 ± 0.7	
12	东乌旗西部育种场-窑勒	角闪石辉长岩	锆石	LA-MC-ICP-MS	280.8 ± 1.5	程银行等(2015)

究才有望解决这一问题。随着俯冲到挤压造山演化的不断进行,岩浆岩岩性及岩石地球化学特征也逐渐发生变化。岩性上从闪长岩-花岗闪长岩(石英闪长岩)-花岗岩演化;岩石地球化学特征上,由于俯冲作用的不断进行,地壳物质不断混入,氧逸度逐渐升高。这是由于区域性碰撞造山挤压作用,先期新生地壳加厚并发生重熔,沿着构造薄弱地带侵入到上地壳近地表(刘建峰等, 2009; 刘翼飞等, 2010; 何付兵等, 2013; 梁玉伟等, 2013)。

300 Ma 之后,东乌旗地区由挤压碰撞发展为后碰撞伸展的构造环境。东乌旗狼麦温都尔地区二长花岗岩和正长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 307.0 ± 1.9 和 299.7 ± 5.3 Ma(程银行等, 2012), 1017 高地银多金属矿区阿钦楚鲁二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 296.8 ± 4.1 和 296.3 ± 3.8 Ma(表 4),均属高钾钙碱性花岗岩,具有典型的后碰撞特征,可能为后碰撞伸展阶段的产物(王治华等, 2015)。该研究区同期广泛发育造山期后的碱性花岗岩,如东乌旗西部窑勒至扎拉嘎一带碱性侵入岩获得 272.3 ± 0.7 和 271.7 ± 0.7 Ma 的定年结果,京格斯台地区碱性花岗岩获得 284.8 ± 1.1 Ma 的年龄等(表 4),构成了一条重要的碱性岩带,很好地指示了后造山伸展体制下的岩浆作用(洪大卫等, 1994; 张玉清等, 2009; 程银行等, 2014)。近期在东乌旗研究发现的 280.8 ± 1.5 Ma 的角闪石辉长岩更是伸展体制下岩浆活动的最有利证据(表 4)

(程银行等, 2015)。从早石炭世至晚石炭世,直至早二叠世,阿尔哈达及邻区由碰撞挤压向后碰撞伸展阶段转换,并诱发中亚造山挤压大地构造背景下的同碰撞晚期构造-岩浆事件(程银行等, 2012)。东乌旗穆沁旗地区广泛发育海西期侵入岩,并形成了大量与海西期侵入岩有关的矿床(点),包括吉林宝力格银金矿床、1017 高地银多金属矿床、花脑特铅锌银矿床、奥尤特铜矿床、乌兰陶勒盖铜矿床及查干陶勒盖铅锌矿点、麦特温都尔铅锌银矿点和哈达呼都格铜铅锌矿点等(张万益等, 2008; 刘洪利等, 2011)。中晚二叠世至早三叠世,二连浩特—东乌珠穆沁旗一带及邻区各类古大洋盆地先后闭合,华北陆块与西伯利亚板块最终结合为一个整体。从此,研究区进入一个崭新的地壳演化阶段(聂凤军等, 2007; 常春郊等, 2013; 常春郊等, 2014)。

近年来,岩浆岩锆石的稀土元素特征及 Hf 同位素特征成为判定岩浆源区性质和岩浆来源的手段之一(Griffin *et al.*, 2002; Hoskin and Schaltegger, 2003; Bouvier *et al.*, 2008; Munoz *et al.*, 2012)。强烈的正 Ce 异常是由于 Ce^{4+} 在锆石中强烈富集造成的。 Ce^{3+} 在锆石中是被强烈排斥的,而 Ce^{4+} 原子半径 $0.97 \text{ \AA}$ 接近 Zr^{4+} 的 $0.84 \text{ \AA}$,且 Ce^{4+} 与 Zr^{4+} 具有相同的电荷数,所以容易取代锆石中的锆离子,表现出强烈的正异常(Ballard *et al.*, 2002),更大程度地显示了上部地壳物质的混染及高氧逸度岩浆的特征,与区域上由俯冲到挤压造山演化、岩浆不断混入

地壳物质相对应(Ballard *et al.*, 2002; 辛洪波等, 2008; 丛峰等, 2011; 段超等, 2012)。研究表明, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值落入亏损地幔线以下, 且大多数 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为正值, 表明花岗岩类源于新生地壳物质的部分熔融(吴福元等, 2007)。大兴安岭地区晚古生代花岗岩呈带状形式分布, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值多为正值, t_{DM2} 范围为 495~1 515 Ma(林强等, 2004; 隋振民等, 2007; 张健等, 2011; 刘 燊等, 2012; 王新宇等, 2013)。 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 频率直方图(图 6)显示, 阿尔哈达地区花岗岩 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值分布较为分散, 主要集中在 +4.0~+8.0 之间, 反映花岗岩质岩石多组分来源的特征(葛文春

等, 2007; 隋振民等, 2009; Ravikant *et al.*, 2011; 吴才来等, 2014)。在 $\epsilon\text{Hf}(t)$ -锆石 U-Pb 年龄图解(图 6)中, 除了一颗捕获锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为负值, 指示源区有古老地壳(1 436 Ma)的混入之外, 其余样品的分析结果较为分散, 但均落在亏损地幔和球粒陨石之间, 反映其源区物质主要为新增生的年轻地壳物质(Amelin *et al.*, 1999; Ravikant *et al.*, 2011)。根据前人资料及本次 Hf 同位素研究结果, 我们认为兴安地块在中元古代开始地壳增生, 并一直持续到早古生代(葛文春等, 2007; 张健等, 2011; 刘 等, 2012; 王新宇等, 2013)。

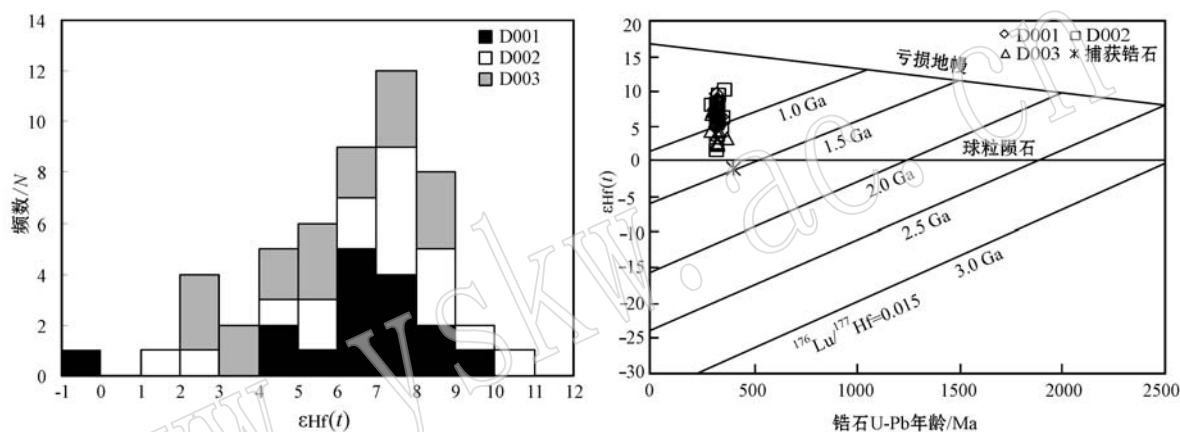


图 6 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 频率直方图及 $\epsilon\text{Hf}(t)$ -锆石 U-Pb 年龄图解

Fig. 6 Histogram of $\epsilon\text{Hf}(t)$ and $\epsilon\text{Hf}(t)$ -zircon U-Pb age diagram

5 结论

通过对阿尔哈达地区出露的似斑状和中细粒花岗岩的锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年、稀土元素和 Hf 同位素分析, 主要得到以下结论:

(1) 似斑状和中细粒花岗岩的锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄结果分别为 319.0 ± 5.0 、 324.0 ± 2.0 和 332.0 ± 8.5 Ma, 成岩时代为早石炭世, 属海西中期。确定了矿区海西期岩浆活动时限, 指示该时期存在构造-岩浆活动。

(2) 花岗岩锆石稀土元素配分曲线表现亏损轻稀土元素、富集重稀土元素、强烈的正 Ce 异常和负 Eu 异常, 暗示岩浆受到地壳物质的混染。锆石 Lu-Hf 同位素研究表明, 锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值较为分散, 主要集中在 +4.0~+8.0 之间, 反映阿尔哈达地区花岗岩源岩以新增生的年轻地壳物质为主。

致谢 感谢中国地质大学(北京)科学研究院 LA-ICP-MS 实验室张红雨老师在测试分析方面给予的帮助, 感谢中国地质大学(北京)地球科学与资源学院王雷、程峰、刘华南硕士, 宓奎峰、杨尚松和刘冲昊博士等在论文完成过程中给予的指导和帮助。

References

- Amelin Y, Lee D C and Halliday A N. 2000. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (24): 4 205~4 225.
- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, *et al.* 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 399 (6 733): 252~255.

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.
- Badarch G, Cunningham W D and Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 87~110.
- Ballard J R, Palin J M and Campbell I H. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from $\text{Ce(IV)}/\text{Ce(III)}$ in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144: 347~364.
- Bouvier A, Vervoort J D and Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273: 48~57.
- Chang Chunjiao, Cong Runxiang, Liu Guige, *et al.* 2013. Geological characteristics and prospecting targets of the Qagan Obo Fe-Zn polymetallic deposit in Inner Mongolia[J]. *Geology and Resources*, 22(5): 371~375(in Chinese with English abstract).
- Chang Chunjiao, Wang Zhihua, Wang Liang, *et al.* 2014. Types and metallogenic regularities of polymetallic ore deposit in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Mineral Resources and Geology*, 28(5): 536~545(in Chinese with English abstract).
- Chen Bin, Jahn Borming, Wilde S, *et al.* 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 328: 157~182.
- Chen Wei, Wang Liqiang, Hu Zhenghua, *et al.* 2012. Zircon U-Pb ages, Hf isotope and REE of quartz monzonite porphyry in the Bangpu Pb-Zn mining area of Tibet and their geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 569~578(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Li Min, Zhang Tianfu, *et al.* 2015. Late Paleozoic crustal extensional regime on the southeastern Siberian Plate: New evidences from geochronology and geochemistry of the bojite in Dong Ujimqi [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 262~271(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Li Yanfeng, Li Min, *et al.* 2014. Geochronology and petrogenesis of the alkaline pluton in Dong Ujimqi, Inner Mongolia and its tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2086~2096(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Teng Xuejian, Xin Houtian, *et al.* 2012. SHRIMP zircon U-Pb dating of granites in Mahonondor area, East Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(3): 323~334(in Chinese with English abstract).
- Cong Feng, Lin Shiliang, Zou Guangfu, *et al.* 2011. Magma mixing of granites at Lianghe: In-situ zircon analysis for trace elements, U-Pb ages and Hf isotopes[J]. *Sci. China Earth Sci.*, 41(4): 468~481(in Chinese with English abstract).
- Duan Chao, Li Yanhe, Mao Jingwen, *et al.* 2012. Zircon trace element characteristics of intrusions in the Washan iron deposit of Ningwu volcanic basin and their geological significance[J]. *Geology in China*, 39(6): 1874~1884(in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Sui Zhenmin, Wu Fuyuan, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern DaHinggan Mts., northeastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 423~440(in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, *et al.* 2005. Zircon U-Pb ages its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749~762(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61: 237~269.
- He Fubing, Xu Jixiang, Gu Xiaodan, *et al.* 2013. Ages, origin and geological implications of the Amuguleng composite granite in East Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geological Review*, 59(6): 1150~1164(in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Huang Huaizeng, Xiao Yijun, *et al.* 1994. The permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(3): 219~230(in Chinese with English abstract).
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solidstate recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *J. Metamorphic Geol.*, 18: 423~439.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27~62.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595~2604(in Chinese with English abstract).
- Huang Zaixing, Wang Zhihua, Chang Chunjiao, *et al.* 2013. Prospecting direction and metallogenic regularities of the polymetallic deposit in Dong Ujimqin Banner metallogenic belt, Inner Mongolia[J]. *Geological survey and research*, 36(3): 205~212(in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Jin Yan, Liu Yutang and Xie Yuling. 2005. Relationship between magmatism and polymetal mineralization in Dongwuqi area, Inner Mongolia[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1: 8~12 (in Chinese with English abstract).
- Lei Weiyan, Shi Guanghai and Liu Yingxin. 2013. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 273~284 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, *et al.* 2007. Shuangjinzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565~582 (in Chinese with English abstract).
- Li Yilong, Zhou Hanwen, Zhong Zengqiu, *et al.* 2009. Collision processes of North China and Siberian Plates: Evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb age on deformed granite in Xar Moron suture zone [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 931~938 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yuwei, Yu Cunlin, Shen Guozhen, *et al.* 2013. Geochemical characteristics of granites in the Suonaga Pb-Zn-Ag deposit of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and their tectonic and ore-forming implications[J]. *Geology in China*, 40(3): 767~779 (in Chinese with English abstract).
- Lin Qiang, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, *et al.* 2004. Geochemistry of Mesozoic granites in Da Hinggan Ling ranges[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 403~412 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qi, *et al.* 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317~327 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongli, Chen Man, Chen Peng, *et al.* 2011. Ore-forming characteristics and prospecting orientation of gold-polymetallic mineralization in Dongwuqi area of Daxing'anling[J]. *Gold Science and Technology*, 19(2): 56~60 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Zhang Xingzhou, *et al.* 2009. Geochemical characteristic of Carboniferous quartz-diorite in the southern Xiwuqi area, Inner Mongolia and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 365~376 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shen, Feng Caixia, Hu Ruizhong, *et al.* 2012. Zircon U-Pb age, Hf isotope character of the Hercynian granite in the eastern Jilin Province and the crustal growth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3 715~3 720 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yifei, Jiang Sihong and Zhang Yi. 2010. The SHRIMP zircon U-Pb dating and geological features of Bairendaba diorite in the Xilinhaote area, Inner Mongolia, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 688~696 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.00: A Geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 1~70.
- Meng Qingpeng, He Yuankai, Zhang Wen, *et al.* 2013. Time constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean on the northern margin of North China Craton: Evidence from Xihouhaozysyn-collisional granites in Siziwang Qi area[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(11): 1 749~1 759 (in Chinese with English abstract).
- Munoz M, Charrier R, Fanning C M, *et al.* 2012. Zircon trace element and O-Hf isotope analyses of mineralized intrusions from El teniente ore deposit, Chilean Andes: Constraints on the source and magmatic evolution of porphyry Cu-Mo related magmas[J]. *Journal of Petrology*, 53(6): 1 091~1 122.
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhang Yi, *et al.* 2007. Metallogenic Studies and Prospecting Orientation in Central and Eastern Segment along China-Mongolia Border[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~574 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Zhang Wanyi, Du Andao, *et al.* 2007. Re-Os isotopic age dating of molybdenite separates from the Chaobuleng skarn iron-polymetallic deposit, Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 28(4): 315~323 (in Chinese with English abstract).
- Qian Ming and Gao Qunxue. 2006. The discussion about genesis of Arhada Lead and Zinc deposit in Dongwuqi county, Inner Mongolia, China[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21(Suppl.): 70~73 (in Chinese with English abstract).
- Ravikant V, Wu Fuyuan and Ji Weiqiang. 2011. U-Pb age and Hf isotopic constraints of detrital zircons from the Himalayan foreland Subathu sub-basin on the Tertiary palaeogeography of the Himalaya [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 304: 356~368.
- Shang Qinghua. 2004. The discovery and significance of the Permian Radiolaria of the middle and eastern region of Inner Mongolia, the northern orogenic belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(24): 2 573~2 579 (in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Honghong, Li Jinwen, *et al.* 2009. The metallogenetical characteristics and prospecting direction of the copper-lead

- zinc polymetal deposits in the northern-central Daxing'anling Mountain, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1456~1472(in Chinese with English abstract).
- She Hongquan, Li Jinwen, Xiang Anping, *et al.* 2012. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 571~594(in Chinese with English abstract).
- Sui Zhenmin, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, *et al.* 2007. Zircon U-Pb ages, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in north-eastern part of the Da Hinggan Mts. [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 461~480(in Chinese with English abstract).
- Sui Zhenmin, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, *et al.* 2009. Hf isotopic Characteristics and Geological Significance of the Chahayan Pluton in Northern Daxing'anling Mountains[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(5): 849~867(in Chinese with English abstract).
- Tao Jixiong, Su Maorong, Baoyin Wuliji, *et al.* 2004. Characteristics and tectonic significance of the Solon Mountain ophiolitic mélange in the Mandula area, Darhan Muminggan, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1238~1242(in Chinese with English abstract).
- Tao Zexi. 2006. Geological characteristics of Arhada Lead&Zinc deposit in Dongwug county, Inner Mongolia, China[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21(suppl.): 74~76(in Chinese with English abstract).
- Wang Hui, Wang Yujing, Chen Zhiyong, *et al.* 2005. Discovery of the Permian Radiolarians from the Bayanaobao area, Inner Mongolia [J]. *Journal of Stratigraphy*, 29(4): 368~371(in Chinese with English abstract).
- Wang Jianping. 2003. Metallogeny of Dongwu Banner copper and silver poly-metallic ore zone of Inner Mongolia[J]. *Mineral Resources and Geology*, 17(2): 133~135(in Chinese with English abstract).
- Wang Xilong, Liu Jiajun, Zhai Degao, *et al.* 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemistry of the intrusive rocks from the Bianjiadayuan Pb-Zn-Ag deposit, Inner Mongolia, China and tectonic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 730~742(in Chinese with English abstract).
- Wang Xinyu, Hou Qingye, Wang Jin, *et al.* 2013. SHRIMP geochronology and Hf isotope of zircons from granitoids of the Weilasituo deposit in Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 27(1): 67~78(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhihua, Chang Chunjiao, Cong Runxiang, *et al.* 2015. SHRIMP zircon U-Pb age and geochemical characteristics of the Achieng Qulu monzogranite in Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(1): 166~187(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhihua, Sun Lei, Huang Zaixing, *et al.* 2013. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology and geochemical characteristics of monzonitic granite in the 1017 Gaodi Ag-polymetallic mining field, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 33(2): 72~84(in Chinese with English abstract).
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao Wenjiao, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 164: 31~47.
- Wu Cailai, Gao Yuanhong, Lei Min, *et al.* 2014. Zircon SHRIMP U-Pb dating, Lu-Hf isotopic characteristics and petrogenesis of the Palaeozoic granites in Mangya area, southern Altun, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2297~2323(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185~220(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on the of U-Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589~1604(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, *et al.* 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1~20.
- Xin Hongbo and Qu Xiaoming. 2008. Relative oxidation sates of ore-bearing porphyries inferred from Ce(IV)/Ce(III) ratio in Zircon application to the porphyry copper belt at Gangdese, Tibet[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 152~160(in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, *et al.* 2014. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1841~1857(in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Guo Lijun, Hou Zengqian, *et al.* 2010. SHRIMP zircon U-Pb ages of the middle Neopaleozoic unmetamorphosed magmatic rocks in the southwestern slope of the Da Hinggan Mountains, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 811~823(in Chinese with English abstract).
- Yang Junquan, Liu Yongshun, Teng Xuejian, *et al.* 2012. Geochronol-

ogy and geochemistry of the coarse-medium grained syenogranites in the Binbalechagan area, Inner Mongolia[J]. Geological Survey and Research, 35(2): 128~135(in Chinese with English abstract).

Yang Junquan, Zhang Surong, Liu Yongshun, *et al.* 2014. Discovery of Carboniferous diorite from Moheertu in Dongwuqi area, Inner Mongolia: Evidence from zircon U-Pb geochronology [J]. Geoscience, 28(3): 472~477(in Chinese with English abstract).

Zhang Chen and Wu Tairan. 1999. Features and tectonic implications of the ophiolitic mélange in the southern Suzuqi, Inner Mongolia[J]. Scientia Geologica Sinica, 34(3): 381~389(in Chinese with English abstract).

Zhang Jian, Chen Jingsheng, Li Boyang, *et al.* 2011. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of Late Paleozoic granites in Taerqi area, Inner Mongolia[J]. Global Geology, 30(4): 521~531(in Chinese with English abstract).

Zhang Jian, Wang Shouxu, Xie Yuling, *et al.* 2013. Geochemical characteristics and geological significance of quartz monzonite porphyry porphyry and fine-grained granite from the Arehada, Inner Mongolia[J]. Acta Mineralogica Sinica, (suppl.): 369~370(in Chinese with English abstract).

Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Jiang Sihong, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb age of quartz diorite in Qagan Obo of Inner Mongolia and its geological significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 27(3): 177~184(in Chinese with English abstract).

Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Liu Shuwen, *et al.* 2013. Characteristics and metallogenic regularities of ore deposits on the western slope of the southern section of the Da Hinggan Mountains metallogenic belt [J]. Geology in China, 40(5): 1 583~1 599(in Chinese with English abstract).

Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Liu Yan, *et al.* 2007. Studies on sulfur and lead isotope of the Arehada Pb-Zn-Ag deposit, Dong Ujimqin Qi(County), Inner Mongolia[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 37(5): 868~883(in Chinese with English abstract).

Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Liu Yan, *et al.* 2008. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology of the Aououte Cu-Zn deposit in Inner Mongolia and its significance[J]. Acta Geoscientia Sinica, 29(5): 592~598(in Chinese with English abstract).

Zhang Yuqing, Xu Liquan, Kang Xiaolong, *et al.* 2009. Age dating of alkali granite in Jingsitai area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and its significance[J]. Geology in China, 36(5): 988~995(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

常春郊, 从润祥, 刘桂阁, 等. 2013. 内蒙古查干敖包铁-锌多金属矿床的地质特征及找矿方向[J]. 地质与资源, 22(5): 371~375.

常春郊, 王治华, 王梁, 等. 2014. 内蒙古东乌珠穆沁旗地区多金属矿床类型与成矿规律[J]. 矿产与地质, 28(5): 536~545.

陈伟, 王立强, 胡正华, 等. 2012. 西藏邦铺铅锌矿区石英二长斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和稀土元素特征及其地质意义[J]. 地球学报, 33(4): 569~578.

程银行, 李敏, 张天福, 等. 2015. 西伯利亚板块东南缘晚古生代伸展体制新证据: 东乌旗角闪辉长岩年代学及地球化学研究[J]. 地质学报, 89(2): 262~271.

程银行, 李艳锋, 李敏, 等. 2014. 内蒙古东乌旗碱性侵入岩的时代、成因及地质意义[J]. 地质学报, 88(11): 2 086~2 096.

程银行, 滕学建, 辛后田, 等. 2012. 内蒙古东乌旗狼麦温都尔花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 31(3): 323~334.

丛峰, 林仕良, 邹光富, 等. 2011. 梁河花岗岩岩浆混合作用: 锆石微量元素、U-Pb 和 Hf 同位素示踪[J]. 中国科学: 地球科学, 41(4): 468~481.

段超, 李延河, 毛景文, 等. 2012. 宁芜火山岩盆地凹山铁矿床侵入岩锆石微量元素特征及其地质意义[J]. 中国地质, 39(6): 1 874~1 884.

葛文春, 隋振民, 吴福元, 等. 2007. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J]. 岩石学报, 23(2): 423~440.

葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石学报, 23(3): 749~762.

何付兵, 徐吉祥, 谷晓丹, 等. 2013. 内蒙古东乌珠穆沁旗阿木古楞复式花岗岩体时代、成因及地质意义[J]. 地质论评, 59(6): 1 150~1 164.

洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等. 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 68(3): 219~230.

侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 地质锆石 Hf 同位素的分析方法及应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2 595~2 604.

黄再兴, 王治华, 常春郊, 等. 2013. 内蒙古东乌珠穆沁旗成矿带多金属成矿规律与找矿方向[J]. 地质调查与研究, 36(3): 205~212.

- 金 岩, 刘玉堂, 谢玉玲. 2005. 内蒙古乌旗地区岩浆活动与多金属成矿的关系[J]. 华南地质与矿产, 1: 8~12.
- 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 2013. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. 地学前缘, 20(4): 273~284.
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. 岩石学报, 23(3): 565~582.
- 李益龙, 周汉文, 钟增球, 等. 2009. 华北与西伯利亚板块的对接过程: 来自西拉伦缝合带变形花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄证据[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 34(6): 931~938.
- 梁玉伟, 余存林, 沈国珍, 等. 2013. 内蒙古东乌旗索纳嘎铅锌银矿区花岗岩地球化学特征及其构造与成矿意义[J]. 中国地质, 40(3): 767~779.
- 林 强, 葛文春, 吴福元, 等. 2004. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学[J]. 岩石学报, 20(3): 403~412.
- 刘敦一, 简 平, 张 旗, 等. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据[J]. 地质学报, 77(3): 317~327.
- 刘洪利, 陈 满, 陈 鹏, 等. 2011. 大兴安岭东乌旗地区金及多金属成矿特征与找矿方向[J]. 黄金科学技术, 19(2): 56~60.
- 刘建峰, 迟效国, 张兴洲, 等. 2009. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 83(3): 365~376.
- 刘 燊, 冯彩霞, 胡瑞忠, 等. 2012. 吉林东部海西期花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征与地壳增生[J]. 岩石学报, 28(11): 3715~3720.
- 刘翼飞, 江思宏, 张 义. 2010. 内蒙古锡林浩特地区拜仁达坝矿区闪长岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 29(5): 688~696.
- 孟庆鹏, 贺元凯, 张 文, 等. 2013. 华北板块北缘古大洋闭合时间的限定——来自四子王旗西后壕子同碰撞花岗岩的证据[J]. 地质通报, 32(11): 1749~1759.
- 聂凤军, 江思宏, 张 义, 等. 2007. 中蒙边境中东段金属矿床成矿规律和找矿方向[M]. 北京: 地质出版社.
- 聂凤军, 张万益, 杜安道, 等. 2007. 内蒙古朝不楞砂卡岩型铁多金属矿床辉钼矿-锍-钼同位素年龄及地质意义[J]. 地球学报, 28(4): 315~323.
- 钱 明, 高群学. 2006. 内蒙古东乌旗阿尔哈达铅锌矿区矿床成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 21(增刊): 70~73.
- 尚庆华. 2004. 北方造山带内内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义[J]. 科学通报, 49(24): 2573~2579.
- 余宏全, 李红红, 李进文, 等. 2009. 内蒙古大兴安岭中北段铜铅锌金银多金属矿床成矿规律与找矿方向[J]. 地质学报, 83(10): 1456~1472.
- 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 2012. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系[J]. 岩石学报, 28(2): 571~594.
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 等. 2009. 大兴安岭北部察哈彦岩体的 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 39(5): 849~867.
- 隋振民, 葛文春, 吴福元, 等. 2007. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩类岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 23(2): 461~480.
- 陶继雄, 苏茂荣, 宝音乌力吉, 白立兵. 2004. 内蒙古达尔罕茂明安联合旗满都拉地区索伦山蛇绿混染岩的特征及构造意义[J]. 地质通报, 23(12): 1238~1242.
- 陶则熙. 2006. 内蒙古自治区阿尔哈达铅锌矿床地质特征[J]. 地质找矿论丛, 21(增刊): 74~76.
- 王 惠, 王玉静, 陈志勇, 等. 2005. 内蒙古巴彦敖包二叠纪放射虫化石的发现[J]. 地层学杂志, 29(4): 368~371.
- 王建平. 2003. 内蒙古东乌旗铜、银多金属成矿带成矿类型分析[J]. 矿产与地质, 17(2): 133~135.
- 王喜龙, 刘家军, 翟德高, 等. 2013. 内蒙古边家大院铅锌银矿区侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 37(4): 730~742.
- 王新宇, 侯青叶, 王 瑾, 等. 2013. 内蒙古维拉斯托矿床花岗岩类 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素研究[J]. 现代地质, 27(1): 67~78.
- 王治华, 常春郊, 丛润祥, 等. 2015. 内蒙古阿钦楚鲁二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 45(1): 166~187.
- 王治华, 孙 磊, 黄再兴, 等. 2013. 内蒙古 1017 高地银多金属矿区二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 矿物岩石, 33(2): 72~84.
- 吴才来, 邵源红, 雷 敏, 等. 2014. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石 SHRIMPS U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. 岩石学报, 30(8): 2297~2323.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高 山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 353~388.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589~1604.
- 辛洪波, 曲晓明. 2008. 西藏冈底斯斑岩铜矿带含矿岩体的相对氧化状态: 来自锆石 Ce(IV)/Ce(III) 比值的约束[J]. 矿物学报, 28(2): 152~160.

- 徐 备, 赵 盼, 鲍庆中, 等. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探[J]. 岩石学报, 30(7): 1 841~1 857.
- 薛怀民, 郭利军, 侯增谦, 等. 2010. 大兴安岭西南坡成矿带晚古生代中期未变质岩浆岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 811~823.
- 杨俊泉, 刘永顺, 滕学建, 等. 2012. 内蒙古宾巴勒查干粗中粒正长花岗岩年代学及岩石地球化学[J]. 地质调查与研究, 35(2): 128~135.
- 杨俊泉, 张素荣, 刘永顺, 等. 2014. 内蒙古东乌旗莫合尔图石炭纪闪长岩的发现: 来自锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 现代地质, 28(3): 472~477.
- 张 臣, 吴泰然. 1999. 内蒙古苏左旗南部早古生代蛇绿混杂岩特征及其构造意义[J]. 地质科学, 34(3): 381~389.
- 张 健, 陈井胜, 李泊洋, 等. 2011. 内蒙古塔尔气地区晚古生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征[J]. 世界地质, 30(4): 521~531.
- 张 健, 王守旭, 谢玉玲, 等. 2013. 内蒙阿尔哈达矿区石英二长斑岩和细粒花岗岩的地球化学特征及地质意义[J]. 矿物学报(增刊): 369~370.
- 张万益, 聂凤军, 江思宏, 等. 2008. 内蒙古查干敖包石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 27(3): 177~184.
- 张万益, 聂凤军, 刘树文, 等. 2013. 大兴安岭南段西坡金属矿床特征及成矿规律[J]. 中国地质, 40(5): 1 583~1 599.
- 张万益, 聂凤军, 刘 妍, 等. 2007. 内蒙古东乌旗阿尔哈达铅-锌-银矿床硫和铅同位素研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(5): 868~877.
- 张万益, 聂凤军, 刘 妍, 等. 2008. 内蒙古奥尤特铜-锌矿床绢云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄及地质意义[J]. 地球学报, 29(5): 592~598.
- 张玉清, 许立权, 康小龙, 等. 2009. 内蒙古东乌珠穆沁旗京格斯台碱性花岗岩年龄及意义[J]. 中国地质, 36(5): 988~995.