

# 阿尔泰山南缘阿舍勒盆地泥盆纪火山岩中古老锆石的 U-Pb 年龄、Hf 同位素和稀土元素特征及其地质意义\*

宋国学 秦克章\*\* 刘铁兵 李光明 申萍

SONG GuoXue, QIN KeZhang\*\*, LIU TieBing, LI GuangMing and SHEN Ping

中国科学院地质与地球物理研究所 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2009-12-25 收稿, 2010-04-29 改回.

Song GX, Qin KZ, Liu TB, Li GM and Shen P. 2010. The U-Pb ages, Hf isotope and REE patterns of older zircons from Devonian volcanic rocks in Ashele basin on the southern margin of Altai orogen and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (10): 2946–2958

**Abstract** There are four Devonian marine volcano-sedimentary basins on the southern margin of Altai orogenic belt. The Ashele large-scale Cu-Zn deposit occurred in the Ashele basin which located in the northwest of Altai, and lots of research works have been down on it, but the age of its ore-hosting volcanic rock has not been clearly determined so far. In this paper, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, zircon Hf isotopes and REE patterns were used for researching on the Devonian volcanic rocks in Ashele Cu-Zn district. The concordant age of  $1985 \pm 8.9$  Ma and the weighted age of  $2005 \pm 30$  Ma of a group of older zircons from volcanic rocks by the zircon U-Pb dating represent the forming age of the Precambrian crystalline basement in Altai region, their Th/U values range is 0.25 ~ 0.90, and the  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values range is  $-1.4 \sim +8.5$ , with an average value of 3.3; Another group of new zircons have the age of  $408 \pm 8$  Ma, and have a typical features of magmatic zircons with the  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  value of 9.3 and Th/U value of 0.49, on behalf of the age of a volcanic activity in the peak time of the Early Devonian magmatism. The  $\Sigma$  REE of old zircons changed from the lowest of  $1015 \times 10^{-6}$  to the highest  $3486 \times 10^{-6}$ , show the characteristics of depleting in LREE and enriching in HREE; the emergence of negative anomalies of Ce element is the salient feature which is different from normal magmatic zircon in this group of zircons. Zircon U-Pb ages, Hf isotopes and Ce negative anomaly implied that Altai Precambrian crystalline basement may be formed in the background of gathering together of Columbia super-continent, and its source material came from the non-uniform mixing of the reducing mantle materials and oxidized crustal materials.

**Key words** Altai orogenic belt; Dacite sample; Zircon U-Pb dating; Hf isotope; Ce negative anomaly; Precambrian crystalline basement; Columbia super-continent

**摘要** 阿尔泰山南缘发育有 NW 向斜列的四个泥盆纪海相火山岩沉积盆地, 位于北西端的阿舍勒盆地产有阿舍勒大型铜锌矿床, 前人对该矿床开展了大量研究, 但其容矿火山岩的年龄尚未明确厘定。本文应用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和锆石 Hf 同位素、微量元素, 对阿舍勒铜锌矿区内出露的泥盆纪火山岩进行了研究。由锆石 U-Pb 定年获得了一组火山岩老锆石谐和年龄为  $1985 \pm 8.9$  Ma, 加权年龄为  $2005 \pm 30$  Ma, 代表了阿尔泰山地区前寒武纪结晶基底的形成时代, 其 Th/U 值在 0.25 ~ 0.90 之间,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $-1.4 \sim 8.5$ , 平均值为 3.3; 另外一组新锆石年龄为  $408 \pm 8$  Ma, 其  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 9.3, Th/U 值为 0.49, 具有典型岩浆锆石特征, 代表了早泥盆世岩浆活动高峰期一次火山活动时代。老锆石  $\Sigma$  REE 从最低的  $1015 \times 10^{-6}$  变化到最高的  $3486 \times 10^{-6}$ , 表现为轻稀土亏损, 重稀土富集特征; 本组锆石不同于正常岩浆锆石的显著特征是部分出现 Ce 元素负异常。锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及稀土元素 Ce 负异常特征综合显示, 阿尔泰山前寒武纪结晶基底可能形成于 Columbia 超大陆拼合聚集背景下, 其物源来自强还原性地幔物质与氧化性地壳物质的不均匀混合。

\* 本文受中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-107) 和国家“十一五”科技支撑计划新疆 305 项目 (2006BAB07B03-01、2006BAB07B01-01) 联合资助。

第一作者简介: 宋国学, 男, 1981 年生, 博士后, 矿床学专业, E-mail: sngoxu@qq.com

\*\* 通讯作者: 秦克章, 男, 1964 年生, 研究员, 从事造山带成矿作用研究, E-mail: kzq@mail.iggcas.ac.cn

**关键词** 阿尔泰山造山带; 英安岩样品; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; Ce 负异常; 前寒武纪基底; Columbia 超大陆

**中图法分类号** P597.3

## 1 引言

阿尔泰山造山带是显生宙增生而成的造山带 (Sengör *et al.*, 1993), 它以复杂的构造、岩浆活动, 以及丰富的有色金属和稀有金属矿产而闻名于天下, 其形成与演化一直是国内外学者的研究热点。近年来岩浆岩的地球化学、年代学及 Sr、Nd 同位素研究揭示出北疆阿尔泰山存在明显的显生宙陆壳垂向增生和侧向增生 (秦克章, 2000; Windley *et al.*, 2002; Jahn *et al.*, 2004; Xiao *et al.*, 2004), 但是有关北疆阿尔泰山造山带是否存在前寒武纪结晶基底的争论也从来没有间断过 (何国琦等, 1990; 曲国胜等, 1991; 肖序常等, 1992; 陈毓川等, 1996; 胡霁琴等, 1997, 2002; 王京彬等, 1998; 李锦轶等, 1999, 2004; Chen and Jahn, 2002; Windley *et al.*, 2002; 王登红等, 2002; 陈哲夫, 2004; Xiao *et al.*, 2004; Wei *et al.*, 2007; 郭正林等, 2007)。阿舍勒铜锌矿床是新疆规模最大、品位最高的大型火山岩块状硫化物矿床, 前人对该矿床开展了大量研究, 但容矿火山岩的年龄尚未明确厘定。本文报道了阿尔泰山西南缘阿舍勒铜锌矿区内泥盆系火山岩中发现的古老锆石, 分

析测试了其 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成以及稀土元素, 以期对阿尔泰山前寒武纪结晶基底的存在及其特征作进一步制约。

## 2 研究区地质概况

### 2.1 区域地质概况

阿尔泰山造山带位于新疆北部, 呈北西向展布, 大地构造上位于西伯利亚板块南部大陆边缘 (图 1), 区域古生代地层、构造和岩浆活动发育。早期研究认为阿尔泰山造山带南至阿尔曼泰-扎河坝-科克森套蛇绿混杂岩带, 北至中-蒙、中-俄及中-哈边境 (何国琦等, 1990)。但由于额尔齐斯断裂带以南部分实际已经属于准噶尔地体 (Windley *et al.*, 2002), 因而本文所涉及的阿尔泰山造山带仅指额尔齐斯断裂带以北到中-蒙、中-俄及中-哈边境以内的广大地区 (龙晓平, 2007) (图 1)。区内出露地层有下-中元古界、寒武系-奥陶系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、第三系及第四系, 其中泥盆系地层分布广泛, 是阿舍勒-可可塔勒多金属成矿带中的主要赋矿层位 (陈毓川等, 1996; 秦克章等, 1998; 秦克章,

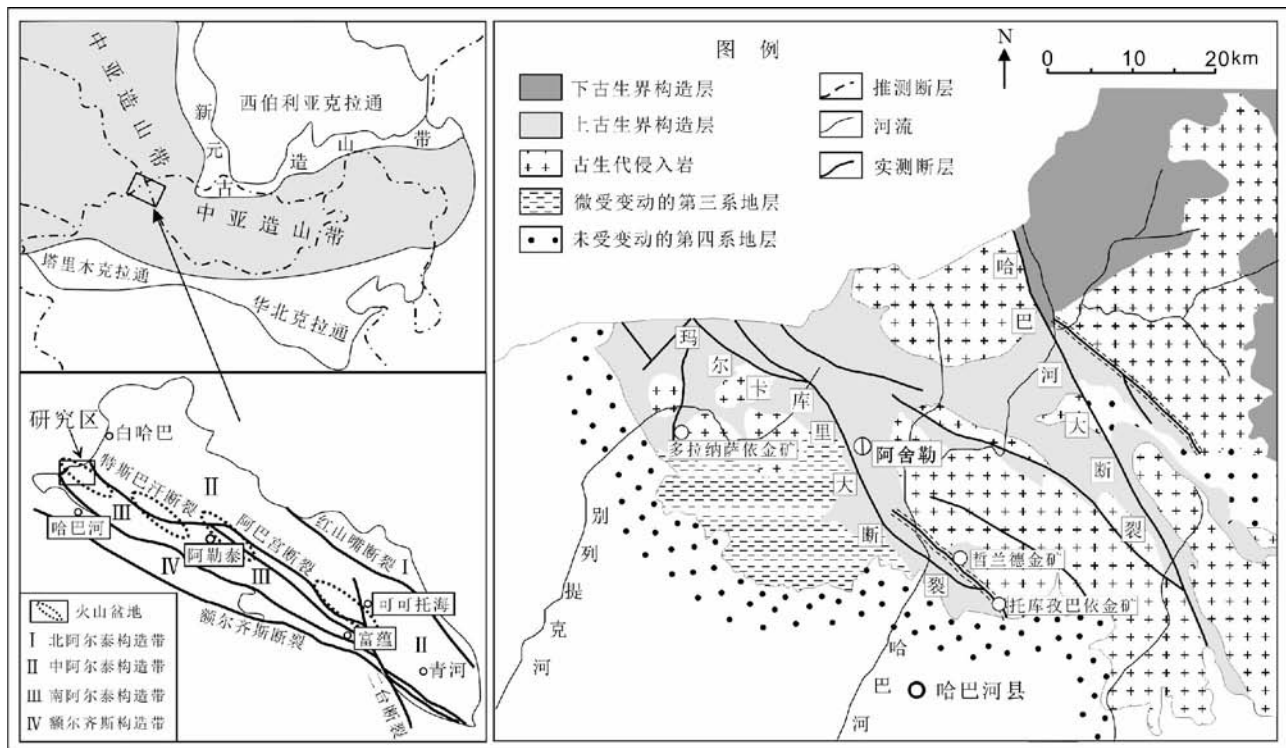


图 1 新疆阿尔泰山造山带构造分区及研究区地质简图 (据何国琦等, 1990; Windley *et al.*, 2002; Yuan *et al.*, 2007; 龙晓平, 2007 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of studying area and the tectonic division of Altai orogen, Xinjiang (after He *et al.*, 1990; Windley *et al.*, 2002; Yuan *et al.*, 2007; Long, 2007)

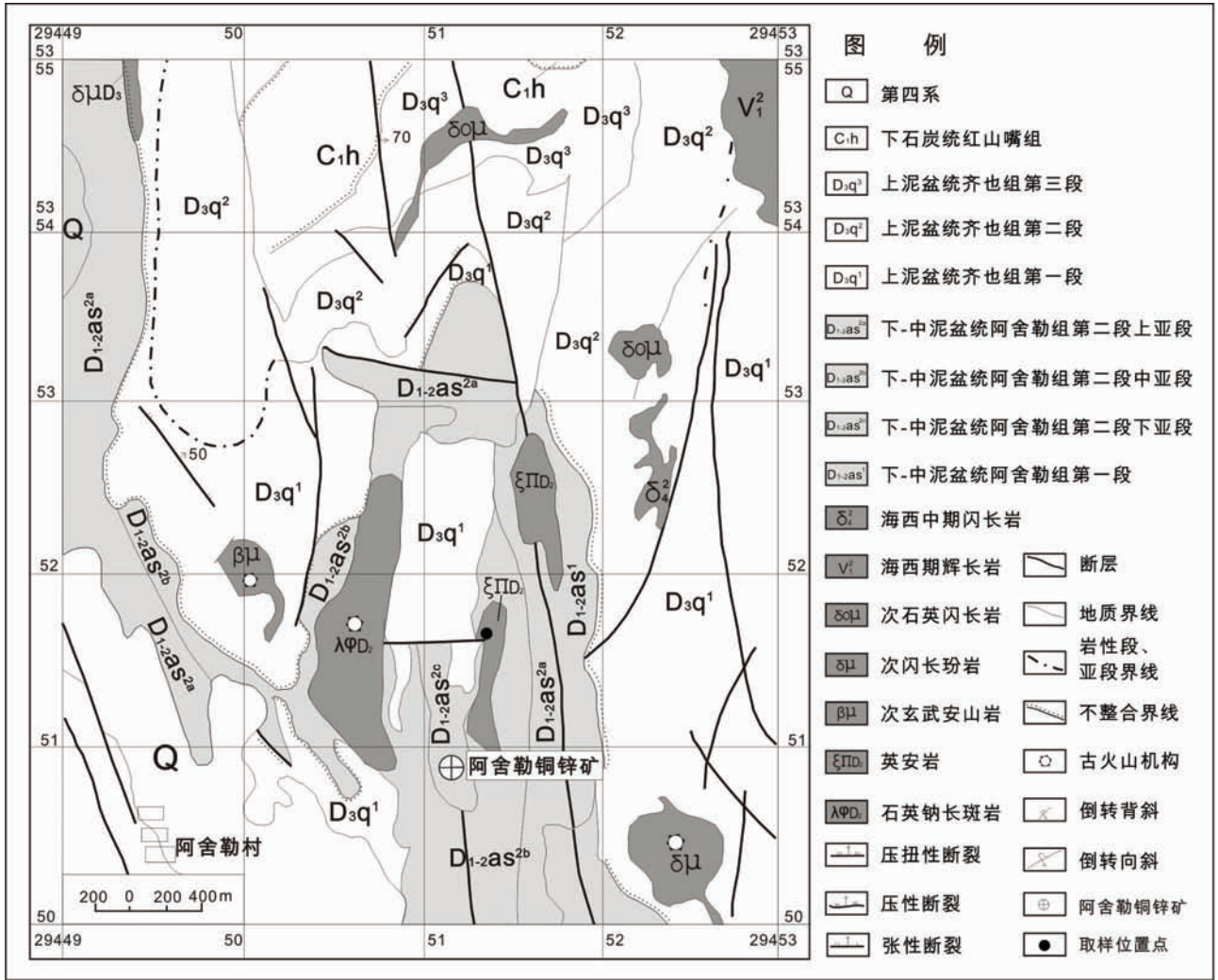


图2 阿舍勒铜锌矿区地质图(据新疆地矿局第四地质大队,1998<sup>①</sup>修改)

Fig. 2 Geological map of Ashele Cu-Zn deposit

2000;王登红等,2002;郭正林等,2007)。泥盆纪海相火山岩主要分布在四个斜列的火山沉积盆地中,从北西至南东依次为阿舍勒盆地、冲乎尔盆地、克朗盆地和麦兹盆地,构成了阿尔泰山南缘与泥盆纪海相火山作用有关的多金属成矿带。

阿尔泰山造山带内北西向断层比较发育,根据地层及岩浆岩发育情况,将阿尔泰山造山带划分为四个构造带(龙晓平,2007;Yuan *et al.*,2007)(图1),即北阿尔泰山构造带、中阿尔泰山构造带、南阿尔泰山构造带和额尔齐斯构造带。本文研究涉及的区域位于我国境内阿尔泰山造山带的西缘,中阿尔泰山构造带以南,南阿尔泰山构造带以北,行政规划属于北疆哈巴河县。

## 2.2 阿舍勒矿区出露泥盆系地层概况

在阿舍勒矿区出露地层有上古生界下-中泥盆统托克萨

雷组( $D_{1-2}t$ ),下-中泥盆统阿舍勒组( $D_{1-2}as$ )和上泥盆统齐也组( $D_3q$ )、下石炭统红山嘴组( $C_1h$ ),新生界第三系和第四系在区内零星分布(图2)。

下-中泥盆统托克萨雷组( $D_{1-2}t$ ):仅分布于玛尔卡库里大断裂西侧,所见岩性为千枚岩、片理化砂岩、粉砂岩和少量结晶灰岩透镜体。

下-中泥盆统阿舍勒组( $D_{1-2}as$ ):主要分布于矿区中部、南部及北西部(图2),与上覆上泥盆统齐也组呈角度不整合接触。是一套以火山岩和火山碎屑岩为主体的火山-沉积岩夹碳酸盐岩建造。根据岩石组合不同,划分为两个岩性段,自下而上:第一岩性段( $D_{1-2}as^1$ )和第二岩性段( $D_{1-2}as^2$ )。其中第二岩性段依据岩石组合又可划分为三个亚段,分述如下:下亚段( $D_{1-2}as^{2a}$ )主要分布于矿区中部偏东和阿舍勒村附近及床阿依一带,为中性火山碎屑岩,以变凝灰岩、角砾凝灰岩

<sup>①</sup> 新疆地矿局第四地质大队,1998.哈巴河县阿舍勒铜矿区一号铜锌矿床勘探地质报告

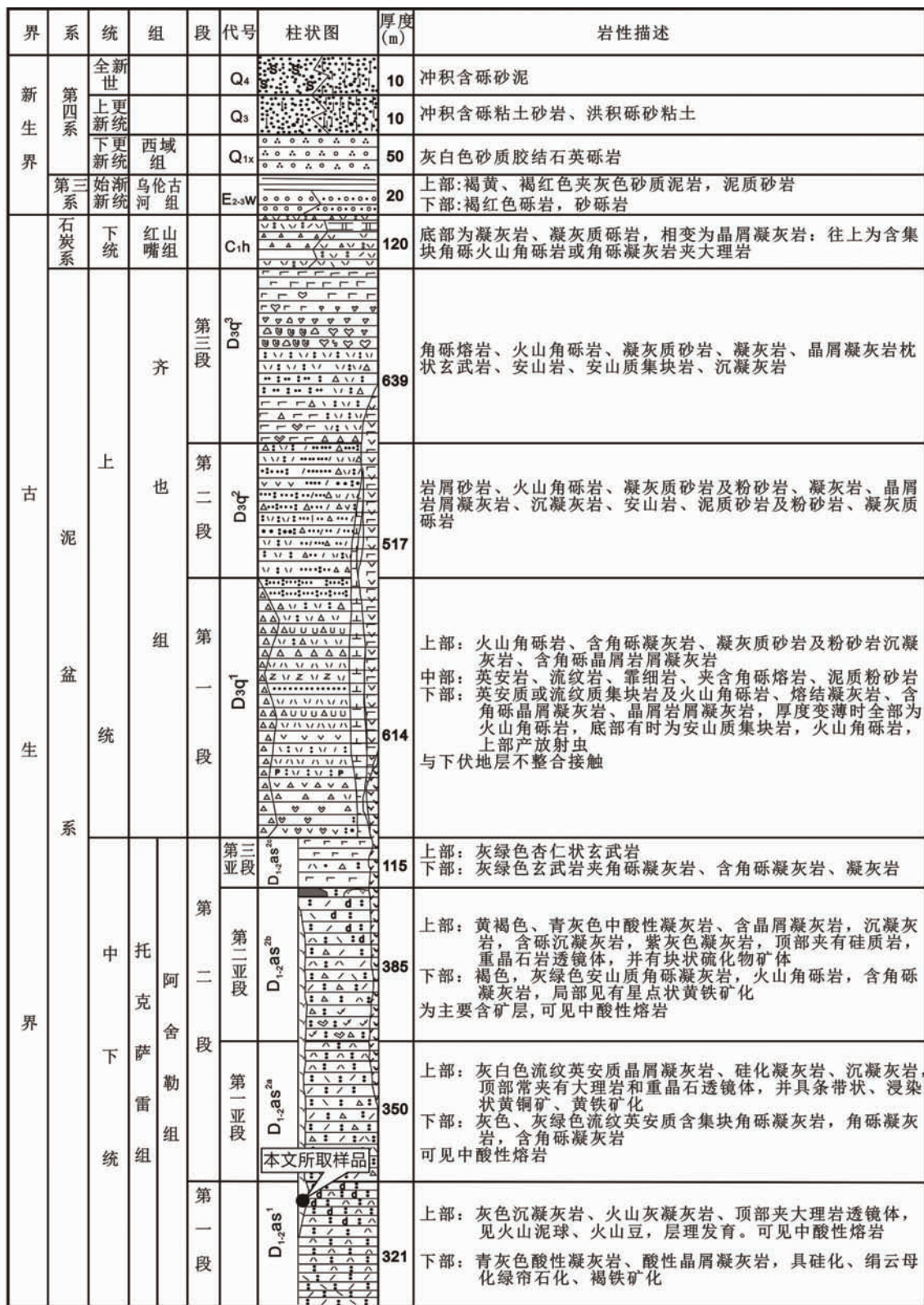


图3 阿舍勒矿区地层柱状图(据新疆地矿局第四地质大队,1998,结合实测剖面修改)

Fig.3 Stratigraphic column of Ashele Cu-Zn deposit

为主。局部有片理化集块岩、含集块角砾凝灰岩等粗粒级火山碎屑岩。中亚段(D<sub>1,2as<sup>2b</sup></sub>)在阿舍勒村北有少量出露。总

体来看该亚段以基性到酸性火山岩和火山-沉积碎屑岩类为主,基性和酸性火山岩互层产出,夹有少量结晶灰岩,绢云千

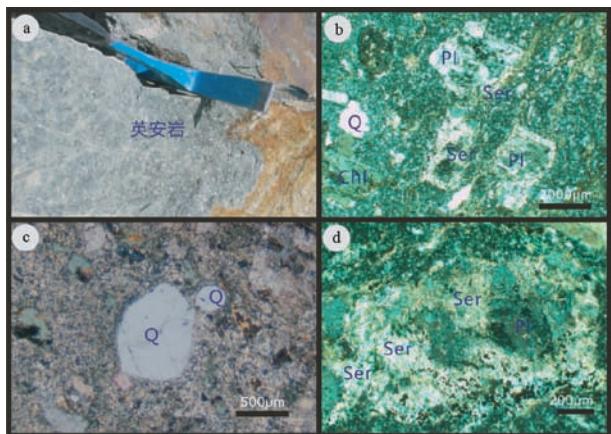


图4 阿舍勒矿区英安岩野外露头及其镜下照片

Q-石英;Pl-斜长石;Ser-绢云母;Chl-绿泥石

Fig. 4 The rock outcrop photographs and microphotographs of dacite in Ashele ore district

枚岩。上亚段( $D_{1,2}as^{2c}$ )仅见于4号向斜核部,部分被齐也组第一段( $D_3q^2$ )不整合覆盖。岩性主要为玄武岩(有块状,角砾状及杏仁状构造)夹少量沉凝灰岩及金属硫化物薄矿层或透镜体。本文所研究英安岩样品取自阿舍勒矿区北东部下中泥盆统阿舍勒组地层中。

上泥盆统齐也组( $D_3q$ ):主要分布于矿区的北部之东侧,矿区中部和南部有少量残留(图2)。主要由角砾集块级的粗火山碎屑岩和中酸性火山熔岩(包括碎屑熔岩)、火山-沉积碎屑岩组成。

下石炭统红山嘴组( $C_1h$ ):分布于矿区北部,其主体在矿区外,与下伏上泥盆统呈角度不整合接触。未见上覆地层。其岩性自下而上为凝灰质砾岩、晶屑凝灰岩、火山角砾岩,角砾凝灰岩夹灰岩透镜体。详见矿区地层柱状图(图3)。

### 3 样品与分析方法

#### 3.1 样品

本文研究样品取自阿尔泰西南缘阿舍勒铜锌矿区泥盆纪阿舍勒组火山岩中。英安岩样品(As50)为灰红色,块状构造(图4a),斑状结构,斑晶包括斜长石、钾长石、少量石英等。斜长石、钾长石经历了强烈蚀变作用(图4b-d),发生粘土化和绢云母化,镜下已很难辨认;部分石英斑晶具熔蚀边(图4c, d)结构,黑云母全被碳酸盐矿物、绿泥石和磁铁矿替代,角闪石几乎全部绿泥石化。基质主要由细粒长石、石英、绿泥石、绢云母和火山灰泥组成。副矿物有黄铁矿、磁铁矿、锆石等。取样位置见图2、图3。

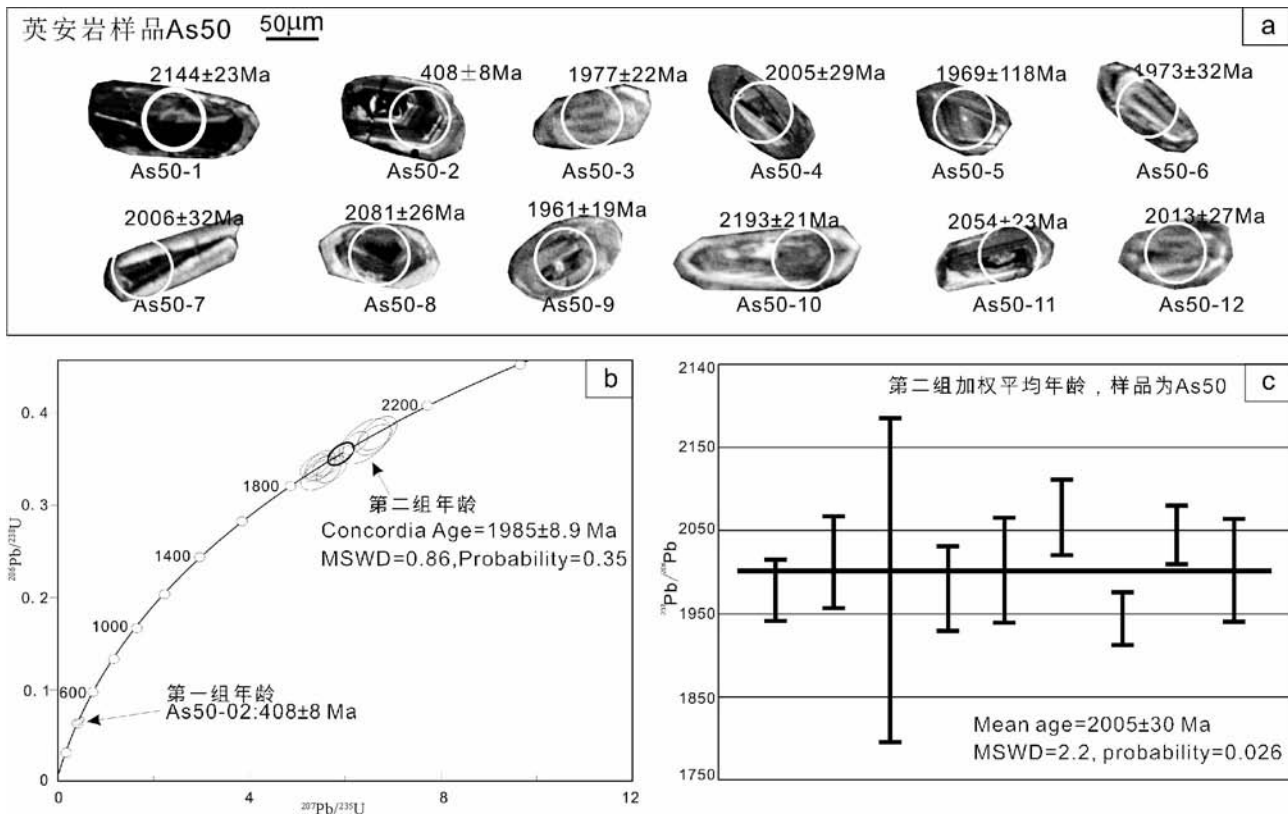


图5 阿舍勒铜锌矿区英安岩样品锆石 CL 图像、锆石谐和曲线图及锆石加权平均年龄图

Fig. 5 Zircon cathodoluminescence (CL) images and zircon U-Pb concordia diagram of dacite sample in Ashele ore district

### 3.2 分析方法

样品的锆石挑选在河北省区域地质矿产调查研究所进行。笔者在双目镜下将锆石样品置于环氧树脂内,挑选大颗粒锆石并按大小顺序排列,树脂凝固后进行研磨,研磨至锆石露出一半,抛光、清洗制成样品靶,以用于阴极发光(CL)研究及锆石 U-Pb 年龄测定。CL 图像和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定是在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成(图 5)。实验采用的 ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a。激光剥蚀系统为德国 Lambda Physik 公司的 CompPex102 ArF 准激光器(波长 193nm)与 MicroLas 公司的光学系统组成。采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,在本次研究中激光剥蚀半径为 40 $\mu\text{m}$ 。锆石年龄测定采用国际标准 91500 锆石作为外标,元素含量采用美国国家标样技术研究院的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 为外标,<sup>29</sup>Si 作为内标。91500 锆石年龄值、人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 为外标和<sup>29</sup>Si 含量分别见参考文献 Wiedenbeck *et al.* (1995) 和 Ancziewicz *et al.* (2001)。实验过程中具体的测试方法及流程见袁洪林等(2003)。数据处理采用 ISOPLLOT3.0 程序(Ludwig,2001)。

## 4 分析结果

### 4.1 锆石特征及锆石 U-Pb 年龄

本次共计测定 12 个分析点,测试数据见表 1。英安岩(样品 As50)的 11 颗锆石<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 模式年龄范围为 1961 ~ 2173Ma,谐和年龄为 1985  $\pm$  8.9Ma (MSWD = 0.86),代表前寒武纪一次岩浆结晶事件;另外一颗锆石的<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 模式年龄 408  $\pm$  8Ma,代表泥盆纪岩浆结晶年龄。锆石的晶体形态多为半自形短柱状(图 5a),部分锆石呈长条状,它形粒状,粒径在 70 ~ 150 $\mu\text{m}$  之间,长宽比值变化较大,其 CL 图像显示大部分锆石具有明显的环带结构,只有少量颗粒环带结构不明显(如图 5,As50-02 号)。个别锆石表面还有裂纹出现(如图 5,As50-02 号)。依据获得的锆石年龄结果和锆石的形态、内部结构特征,可以划分出两组锆石。

第一组:该组只有一颗锆石,为 As50-02(图 5a),呈不规则短柱状,长约 80 $\mu\text{m}$ ,具有清晰的环带结构,放射铅含量为 49  $\times 10^{-6}$ ,Th/U 值为 0.49,具有典型岩浆锆石特征,锆石 U-Pb 年龄为 408  $\pm$  8Ma。

第二组:该组锆石数量较多,晶形主要为半自形短柱状、长条状和它形粒状(图 5a),长宽比变化很大,粒度在 60 ~ 140 $\mu\text{m}$  之间;环带结构较为发育;该组锆石放射铅含量 Pb\* 在 95  $\times 10^{-6}$  ~ 149  $\times 10^{-6}$  之间,变化不大,Th/U 值在 0.25 ~ 0.90 之间,具有岩浆锆石特征;测得 10 个点都落在谐和线上或是在谐和线附近,加权年龄为 2005  $\pm$  30Ma (MSWD = 2.2) (图 5c),谐和年龄为 1985  $\pm$  8.9Ma (MSWD = 0.86) (图 5b)。

### 4.2 Hf 同位素组成

英安岩样品锆石 Hf 同位素分析结果见表 2。除了样点 As 50-02 的<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值为 0.003213 外,其余所有锆石的<sup>176</sup>Lu/<sup>177</sup>Hf 比值均小于 0.003000,其平均值为 0.001467,表明锆石在形成后具有极低量的放射成因 Hf 积累。 $f_{\text{Lu/Hf}}$  变化范围为 -0.92 ~ 0.99,平均值为 -0.96。锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  变化范围为 -1.41 ~ 8.5,平均值为 3.3,具有壳幔混染特征,但总体以幔源为主。测点 As 50-02 的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为最高值 9.3,反映其源区更加富地幔物质的特征。Hf 同位素一阶段模式年龄  $t_{\text{DM1}}$  和二阶段模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  如表 2,后者分别用铁镁质地壳 ( $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.34$ ; Amelin *et al.*, 2000) 和硅铝质地壳 ( $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.72$ ; Vervoort *et al.*, 1996) 的 Lu/Hf 比分别计算。由于锆石的 Lu/Hf 比值 ( $f_{\text{Lu/Hf}} = -0.96$ ) 显著小于大陆地壳 Lu/Hf 比值,因此二阶段模式年龄能更真实地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。

### 4.3 稀土元素

英安岩样品的锆石稀土元素分析结果见表 3。稀土总量变化范围大(表 3),从最低的 1015  $\times 10^{-6}$  变化到最高的 3486  $\times 10^{-6}$ 。如图 6 所示,锆石样品均表现为轻稀土亏损,重稀土富集特征,配分曲线左倾。英安岩锆石具有强烈的负 Eu 异常(图 6), $\delta\text{Eu}$  为 0.01 ~ 0.07,表明斜长石是岩浆中 Eu 的主要载体,在斜长石分离结晶的岩浆体系中,结晶生长的锆石出现明显的负 Eu 异常。锆石  $\delta\text{Ce}$  介于 0.47 ~ 1.78 之间,数据范围较宽说明变化大;大部分测点 Ce 为正异常,部分测点如 As50-01、As50-03、As50-06、As50-08 和 As50-12 则表现为负异常,表明锆石中 Ce 元素具有离散特征,Pr 表现为与 Ce 相反的异常行为。样品测点 As50-2 显示出与众不同的稀土配分特征, $\delta\text{Eu}$  值为 0.01,具有更加强烈的负 Eu 异常,表明测点 As50-2 所代表的锆石形成环境与其它锆石不同。

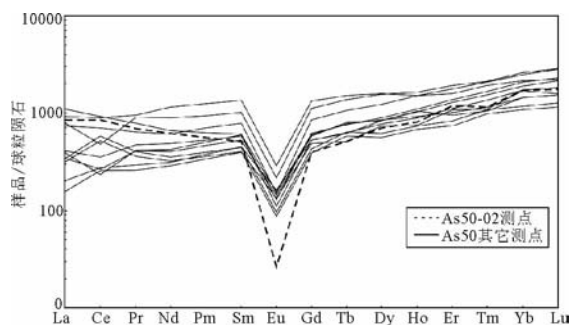


图 6 英安岩样品锆石球粒隕石标准化稀土元素配分图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for zircons from dacite sample

表1 阿舍勒铜锌矿区泥盆纪英安岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analysis of dacite sample from Devonian volcanic rocks in Ashele Cu-Zn district

分析 点号	含量( $\times 10^{-6}$ ) 及比值			同位素比值				表面年龄(Ma)						
	Pb*	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$1\sigma$
As50-01	99.5	0.69	0.1334	0.0044	6.99	0.2083	0.3804	0.0097	2144	23	2111	26	2078	45
As50-02	48.9	0.49	0.0547	0.0022	0.492	0.0177	0.065	0.0013	400	45	406	12	408	8
As50-03	118	0.25	0.1214	0.0036	5.98	0.1617	0.3574	0.0080	1977	22	1973	24	1970	38
As50-04	122	0.61	0.1234	0.0048	6.05	0.2143	0.3558	0.0102	2005	29	1983	31	1962	49
As50-05	103	0.87	0.1209	0.0078	5.99	0.3486	0.3594	0.0097	1969	118	1974	51	1979	46
As50-06	95.5	0.79	0.1211	0.0052	5.83	0.2266	0.3493	0.0108	1973	32	1951	34	1931	52
As50-07	96.4	0.63	0.1234	0.0060	5.94	0.2619	0.3493	0.0122	2006	36	1967	38	1931	58
As50-08	149	0.86	0.1289	0.0047	6.62	0.2189	0.3727	0.0101	2081	26	2061	29	2042	47
As50-09	100	0.26	0.1203	0.0032	5.76	0.1297	0.3475	0.0061	1961	19	1941	19	1923	29
As50-10	104	0.90	0.1357	0.0041	7.20	0.1878	0.3849	0.0080	2173	21	2137	23	2099	37
As50-11	123	0.25	0.1268	0.0041	6.56	0.1833	0.3753	0.0081	2054	23	2054	25	2054	38
As50-12	125	0.49	0.1239	0.0046	6.26	0.2044	0.3663	0.0091	2013	27	2013	29	2012	43

Note: Pb\* indicates radiogenic portions

表2 阿舍勒铜锌矿区泥盆纪英安岩锆石 Hf 同位素数据

Table 2 LA-ICP-MS zircon Hf isotopic analysis of dacite sample from Devonian volcanic rocks in Ashele Cu-Zn district

分析点号	年龄 (Ma)	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	$2\sigma$	$\left(\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}\right)_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
AS50-01	2144	0.0496	0.00155	0.281675	0.000033	0.281612	-38.8	6.9	2244	2301	-0.95
AS50-02	408	0.0994	0.00321	0.282807	0.000032	0.282782	1.2	9.3	671	802	-0.90
AS50-03	1977	0.0139	0.00040	0.281604	0.000027	0.281589	-41.3	2.3	2273	2456	-0.98
AS50-04	2005	0.0285	0.00083	0.28156	3.4E-05	0.28153	-42.9	0.7	2362	2576	-0.97
AS50-05	1969	0.0728	0.00209	0.28169	3.6E-05	0.28161	-38.3	2.9	2256	2412	-0.93
AS50-06	1973	0.057	0.00171	0.28155	3.9E-05	0.28149	-43.2	-1.4	2426	2680	-0.94
AS50-08	2081	0.0968	0.00260	0.2818	5.4E-05	0.2817	-34.4	8.5	2130	2156	-0.92
AS50-09	1961	0.0087	0.00023	0.28164	2.6E-05	0.28163	-40.1	3.3	2219	2380	-0.99
AS50-10	2173	0.0687	0.00214	0.28162	4.4E-05	0.28153	-40.9	4.5	2366	2470	-0.93
AS50-11	2054	0.0127	0.00040	0.28151	3.1E-05	0.2815	-44.5	0.8	2397	2608	-0.98
AS50-12	2013	0.0382	0.00101	0.28166	4.7E-05	0.28162	-39.4	4.2	2236	2368	-0.97

表3 阿舍勒铜锌矿区泥盆纪英安岩锆石稀土元素含量表( $\times 10^{-6}$ )Table 3 LA-ICP-MS zircon REE data of dacite sample from Devonian volcanic rocks in Ashele Cu-Zn district ( $\times 10^{-6}$ )

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma\text{REE}$	$\delta\text{Ce}$	$\delta\text{Eu}$
As50-01	58.2	108	29.3	140	67.5	4.45	100	28.3	200	60.2	158	27.2	276	45.1	1304	0.64	0.053
As50-02	190	500	58.3	253	63.2	0.49	61.3	15.6	160	44.2	211	31.1	350	54.2	1996	1.16	0.008
As50-03	68.0	90.6	29.9	150	77.9	4.95	105.4	27.1	207	51.9	168	30.8	280	44.6	1339	0.49	0.054
As50-04	268	561	69.4	273	80.5	3.22	89.2	20.2	199	58.8	232	45	396	71.4	2369	1.01	0.038
As50-05	159	388	53.8	244	114	4.75	165	41.1	336	97.8	359	68.1	573	98.9	2708	1.03	0.034
As50-06	72.7	159	35.8	182	75.1	3.94	110	26.7	221	65.2	254	50.0	453	75.4	1786	0.77	0.043
As50-07	29.3	112	15.9	101	54.4	5.31	89.7	20.6	181	48.5	192	38.4	349	56.0	1296	1.27	0.074
As50-08	176.3	234	84.3	405	154	7.76	241	57.9	460	108.2	395	69.1	607	100	3104	0.47	0.039
As50-09	58.9	298	28.5	119	53.2	2.65	68.0	20.8	136	38.5	108	28.7	155	35.0	1153	1.78	0.044
As50-10	20.8	103	11.8	92.4	45.3	4.18	80.6	15.5	172	39.4	183	29.3	340	46.9	1185	1.61	0.066
As50-11	51.9	262	25.1	105	46.8	2.33	59.9	18.3	120	33.9	95.8	25.2	136	30.8	1015	1.78	0.044
As50-12	216	528	91.3	566	228	11.3	300	64.2	470	98.5	304	61.1	473	71.6	3486	0.92	0.043

## 5 讨论

### 5.1 Ce 负异常意义

锆石 Ce 正异常是一般岩浆岩中锆石的典型特征,其原因是 Ce 主要有  $Ce^{3+}$  和  $Ce^{4+}$  两种电价,其中  $Ce^{3+}$  的离子半径为  $1.03\text{\AA}$ ,高于  $Ce^{4+}$  的离子半径  $0.92\text{\AA}$ ,而  $Zr^{4+}$  的离子半径  $0.84\text{\AA}$ ,在氧化状态下,岩浆中的  $Ce^{3+}$  被氧化成  $Ce^{4+}$ , $Ce^{4+}$  与  $Zr^{4+}$  具有相似的化学性质和近似的离子半径,因此极易取代  $Zr^{4+}$  进入锆石中,造成 Ce 的正异常。但是引起锆石中 Ce 负异常的原因前人研究很少涉及,Hoskin *et al.* (2003, 2005) 认为 Ce 负异常具有不同于正常岩浆锆石具有 Ce 正异常的特征。辛洪波等(2008)认为冈底斯斑岩铜矿带的形成是深部岩浆在上升侵位过程中受到上部地壳物质的混染,使岩浆的氧逸度增加,从而出现锆石中 Ce 正异常。开阔大洋海水及深海沉积物显示出明显的负 Ce 异常;在洋脊及附近两翼,热液的作用可造成 Ce 负异常的增大和轻稀土相对重稀土的强烈亏损(German *et al.*, 1990; Elderfield *et al.*, 1990; 丁林等, 1995)。曾令森等(2005)认为岩石的 Ce 负异常反映了较还原的浅海沉积环境;具有 Ce 负异常的变泥质岩的发现表明,如果俯冲带中的沉积岩在俯冲过程中发生部分熔融作用并且所产生的熔体参与岛弧岩浆作用,最终可以导致形成具有 Ce 负异常的基性岩浆。目前关于岛弧型岩浆中的 Ce 负异常的成因有两种观点:一种观点认为具 Ce 异常的深海沉积物或表壳物质随俯冲作用进入原岩区,参与部分熔融,形成具 Ce 负异常的基性岩浆(Hole *et al.*, 1984);另一种观点则认为俯冲带发生部分熔融的地幔楔受到来自俯冲岩片的脱水交代作用,导致岩浆的源区具有 Ce 负异常(White and Patchett, 1984)。刘晓峰等(1999)通过研究锰结核稀土元素认为,Ce 元素的离散性反映了结核生长过程中氧化-还原条件的波动。冯洪真等(2001)和吴凯等(2006)认为氧化还原条件对海相沉积物中的 Ce 异常具有明显的控制作用。

无论是沉积岩、岩浆岩中出现 Ce 负异常,还是矿物颗粒(锰结核等)中出现 Ce 负异常,氧化-还原条件起了关键性作用。在还原性条件下,岩浆中的  $Ce^{3+}$  未被氧化成  $Ce^{4+}$ ,岩浆中  $Ce^{4+}$  含量很少,Ce 不能取代  $Zr^{4+}$  进入锆石中,因而造成 Ce 的负异常;氧化条件下则相反,结晶出具有 Ce 正异常的锆石。本文英安岩中古老锆石稀土元素 Ce 大部分测点表现为正异常,部分表现为负异常,可见锆石中 Ce 元素具有离散特征;Ce 负异常与 Ce 正异常的同时出现(图 6),反映锆石结晶于氧化-还原性不均一的环境。

### 5.2 U-Pb-Hf 同位素及稀土元素 Ce 对岩浆物源的约束

对锆石进行原位 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析已经成为我们进行地质研究的重要工具,近二十年来,锆石的 Lu-Hf 同位素分析已经成功的用于示踪原岩来源和地壳、地幔随时间的演化(Amelin *et al.*, 1999, 2000; Bodet and Scharer, 2000;

Griffin *et al.*, 2000, 2002; 赵平等, 2004; 杨进辉等, 2005; 郑永飞等, 2007; 吴福元等, 2007)。阿舍勒铜锌矿区泥盆纪英安岩古老锆石的  $\epsilon_{Hf}(t)$  值范围为  $-1.41 \sim 8.46$ ,变化范围大,平均值为 3.26,锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  值并没有呈现出良好的正态分布特征,推测是由于锆石所在岩浆具有不均一性所致;老锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值在 0.001 左右变化,表明锆石形成后具有极低量的放射成因 Hf 积累,从而能够保存其从岩浆获得的 Hf 同位素组成,因此锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  值一般能够较好地记录新生地壳熔融所形成岩浆的同位素组成(郑永飞等, 2007)。

锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  值大部分为正值(图 7),表明其源区主要由地幔物质或者新生地壳物质组成;只有测点 As50-6 测点为负值,表明其源区受地壳物质混染(第五春荣等, 2007; 吴福元等, 2007)。 $\epsilon_{Hf}(t)$  值的降低趋势是连续的,表明岩浆源区是地幔物质或者新生地壳物质与地壳物质的不完全混合,正是由于不完全混合使得锆石具有离散的 Ce 元素特征,也使得锆石  $\epsilon_{Hf}(t)$  值不能呈现出良好的正态分布特征。古老锆石的结晶年龄为  $1985 \pm 8.9\text{Ma}$ ,  $t_{DM1}$  (Ma) 年龄平均值为  $2291\text{Ma}$ ,  $t_{DM2}$  (Ma) 年龄平均值为  $2441\text{Ma}$ ,表明老锆石记录了  $2441\text{Ma}$  左右地幔物质(亏损地幔)加入地壳引起新生地壳的增长,约  $2291\text{Ma}$  左右新生地壳发生了重结晶作用,  $1985 \pm 8.9\text{Ma}$  左右再次受到地幔物质的加热改造形成前寒武结晶老基底。结合前文已经讨论过的古老锆石中 Ce 元素负异常的成因,可见古老锆石所在的岩浆源区来自具强还原性地幔物质或新生地壳物质与具氧化性地壳物质的不均匀混合。

### 5.3 阿尔泰山南缘泥盆纪火山活动

阿尔泰山南缘泥盆纪火山-沉积岩是新疆北疆重要的含矿层位(陈毓川等, 1996; 秦克章等, 1998; 王京彬等, 1998; 秦克章, 2000),一系列大型矿床如阿舍勒铜锌矿、可可塔勒铅锌矿、铁木尔特铜铅锌矿、蒙库铁(铜)矿和乔夏哈拉铜铁金矿

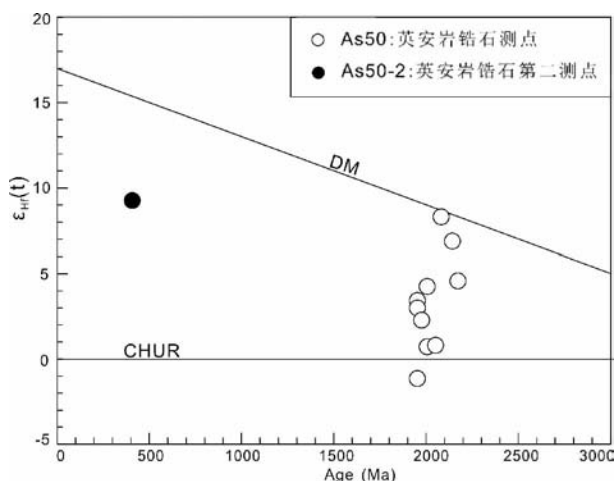


图 7 阿舍勒铜锌矿床英安岩锆石 Hf 同位素特征

Fig. 7 Zircon Hf isotopic features of dacite sample from Ashele ore district



等块状硫化物型矿床均产于这个层位,因此对该套火山岩成因的研究是阿尔泰地区地质工作的一个重点。近几年较为准确的锆石 U-Pb 年代学研究表明,古生代岩浆侵入活动存在 4 个峰值:460Ma、408Ma、375Ma 和 265Ma(Wang *et al.*, 2006;曾乔松等,2007)。

陈汉林等(2006)通过对阿尔泰南缘阿舍勒盆地附近长英质火山岩样品的 Rb-Sr 同位素年代学研究,得出其 Rb-Sr 等时线年龄为  $405 \pm 57$ Ma,为早泥盆世。柴凤梅等(2008)应用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法,获得阿尔泰南缘克朗盆地内阿巴宫铁矿区内泥盆统康布铁堡组地层中变质流纹岩的形成年龄为  $412 \pm 3.5$ Ma(MSWD = 1.4),证明了阿尔泰南缘克朗盆地内泥盆纪早期存在着强烈的火山活动。克朗盆地内及其周缘出露大量的同时代花岗岩,如琼库尔岩体  $399 \pm 4$ Ma(童英等,2007)、冲乎尔盆地北岩体  $413 \pm 3.8$ Ma(曾乔松等,2007)、可可托海岩体  $409 \pm 7$ Ma(Wang *et al.*, 2006)。张进红等(2000)通过单颗粒锆石 U-Pb 法年龄测定,获得了可可塔勒铅锌矿区康布铁堡组火山岩的年龄为  $407.3 \pm 9.2$ Ma,属早泥盆世。

综合以上分析可知本次研究的泥盆纪火山岩是古生代岩浆活动高峰期的产物,本文通过对英安岩锆石样品 U-Pb 年龄测定得出  $408 \pm 8$ Ma 的年龄,该锆石(As50-2)具有清晰的环带结构,放射铅含量为  $49 \times 10^{-6}$ ,Th/U 值为 0.49,具有典型岩浆锆石特征,代表岩浆结晶的年龄,指示阿舍勒矿区的火山岩形成于早泥盆世。指示阿舍勒矿区的火山岩形成于早泥盆世,与下泥盆统康布铁堡组相当。前人所定阿舍勒组为下-中泥盆统,可能要下推至下泥盆统。该锆石(As50-2)  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 9.34,万博等(2006)测得阿舍勒盆地火山岩( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 值为 0.704969 ~ 0.708536,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  变化范围为 1.0 ~ 6.7,综合表明阿舍勒矿区泥盆纪火山岩成岩物质以幔源为主。

#### 5.4 Columbia 超大陆拼合背景下阿尔泰造山带前寒武纪结晶基底的形成

关于阿尔泰造山带是否存在前寒武系结晶基底一直存在争议。前人根据微古植物化石和地层、岩石特征等对比研究,认为阿尔泰造山带中存在前寒武纪大陆地块(高振家,1993),而厘定这些前寒武纪基底的年代是研究中亚造山带显生宙地壳增生的前提。胡霭琴等(1997,2002,2006)通过对前寒武地质体同位素年代学研究,提出阿尔泰造山带具有早-中元古代的基底。阿尔泰富蕴县乌恰沟变质基性岩 Nd 模式年龄为 1435 ~ 1580Ma 相当于中元古代长城纪,代表了阿尔泰地区下-中元古界克木齐群形成的时代(方同辉等,2002),证明了阿尔泰地区存在前寒武纪构造、岩浆活动。赵振华等(1991<sup>①</sup>)获得的阿尔泰南缘片麻状花岗岩 Nd 模式年龄为 1.1 ~ 0.7Ga。李天德(1996)、陈毓川等(1996)随后对青河县城西南阿热勒托别北东地区的克木齐群变质岩中的锆石做了 U-Pb 年龄测定,获得锆石的 U-Pb 年龄为  $1375 \pm$

24Ma,胡霭琴等(2002)用“ISOPLOT”程序(Ludwig,1996)重新做了计算,其上交点年龄为  $1673 \pm 674$ Ma,下交点年龄为  $420 \pm 106$ Ma。富蕴县石榴石片麻岩锆石 U-Pb 年龄为  $2349 \pm 226$ Ma(胡霭琴等,2002),表明该区域存在前寒武纪构造层。成守德等(2000)提出中亚地壳在辛格勒运动后(2500 ~ 1800Ma),进入了相对稳定的以沉积为主、并围绕陆核地壳增生、发展成为原始古陆的重要时期。李会军等(2006)通过对哈巴河县白哈巴村附近加里东期花岗岩和额尔齐斯混杂岩带的玄武岩进行单颗粒锆石 U-Pb 年龄测定,获得四组年龄,分别为 2145 ~ 2276Ma(3 个颗粒)、1664Ma(1 个颗粒)、943 ~ 977Ma(2 个颗粒)、749 ~ 758Ma(2 个颗粒),年龄谐和性较好,表明前寒武纪该区域曾发生过地壳增生。周刚等(2006)在玛因鄂博断裂北侧的片麻岩进行锆石 U-Pb SHRIMP 测定时,发现了一些元古代锆石年龄信息,并肯定了阿尔泰地区前寒武纪地层存在的可能。哈萨克斯坦东南部与我国阿尔泰山区接壤,同属于阿尔泰造山带,本区的大部分被具有前寒武纪基底的微大陆所占据(阿佛杰耶夫,1994;转引自何国琦,2004),最老的锆石 U-Pb 同位素年龄是从石英岩中的碎屑锆石得来(2600Ma),与卡列里构造(裂谷或者碰撞)相关的数据有  $2000 \pm 100$ Ma 和  $1800 \pm 100$ Ma。赫拉斯科娃(2001;转引自何国琦,2004)提出在哈萨克斯坦巴斯堪城以东我国境内,发育有格林维尔阶段的岛弧型火山变质岩,其时代为 1400 ~ 1900Ma。Kröner *et al.* (2007)对哈萨克斯坦南部出露的古元古代片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年,得出精确的年龄为 1789Ma。李继磊等(2009)测得西天山阿吾拉勒西段麻岩相片麻岩中锆石的 Cameca 离子探针年龄为  $1609 \pm 40$ Ma,推断在伊犁-哈萨克斯坦板块存在前寒武纪结晶基底。但也有学者否认阿尔泰造山带存在老基底,如最近 Yuan *et al.* (2007)通过对阿尔泰南缘花岗岩系统的岩石地球化学研究,认为加里东期岩浆活动在阿尔泰占有相当比例,自寒武纪以来阿尔泰一直处于活动的陆缘环境,没有古老的大陆基底,而是一个以增生物质为主构成的新生块体。同时,通过对区内沉积岩中碎屑锆石年代学和锆石 Hf 同位素组成的研究,提出区内早古生代沉积岩主要形成于活动的大陆边缘环境(Yuan *et al.*, 2007)。

本文英安岩样品 U-Pb 年龄测试得到的第二组锆石 U-Pb 年龄范围为 1961 ~ 2144Ma,平均值为 2035Ma;得到精确的锆石 U-Pb 谐和年龄为  $1985 \pm 8.9$ Ma(MSWD = 0.86),其加权平均年龄为  $2005 \pm 30$ Ma(MSWD = 2.2),为阿尔泰造山带南缘存在着前寒武纪结晶基底提供了有力证据,且该老基底的物源为弱亏损地幔或者新生地壳与少量地壳物质的不完全混合。

在漫长的演化历史中,地球至少发生过四次超大陆的汇聚和裂解,包括 20 ~ 18.5 亿年的 Columbia 超大陆、11 亿年的

① 赵振华等. 1991. 新疆阿尔泰花岗岩 Sr-Nd 同位素研究. 国家“305”项目科研报告

Rodinia 大陆, 5 亿年的 Gondwana 超大陆和 2 亿年的 Pangea 泛大陆。Columbia 超大陆的概念是由加拿大著名超大陆研究学者 Rogers (1996)、Rogers and Santosh (2002) 提出的, Zhao *et al.* (2000)、赵国春等 (2002)、侯廷贵等 (2005) 随后提出了哥伦比亚超大陆的新模式。Columbia 超大陆是由 20 ~ 18.5 亿年的造山带将太古宙所有克拉通汇聚在一起而形成的一个古元古代的超大陆。西伯利亚板块内部的 1.9 ~ 1.8Ga Akitkan 碰撞造山带便是 Columbia 超大陆造山带的一部分 (赵国春等, 2002)。本文研究的阿尔泰山缘泥盆纪火山岩中的老锆石记录了古元古代一次岩浆活动事件 ( $1985 \pm 8.9\text{Ma}$ ), 与 Columbia 超大陆的汇聚主要峰期相一致, 表明本文研究区所在的阿尔泰山缘在  $1985 \pm 8.9\text{Ma}$  时可能为西伯利亚板块的一部分, 该前寒武纪结晶基底同样可能为西伯利亚板块古元古代碰撞造山带的一部分。由于对 Columbia 超大陆的研究还处在起步阶段, 所以本文研究区域当时所在的位置还不是十分清楚, 这里只能做出简单推论。可以肯定的是, 阿尔泰山造山带前寒武纪结晶基底形成于 Columbia 超大陆拼合聚集的背景下, 对阿舍勒矿区泥盆纪火山岩中古老锆石的研究, 也为探讨 Columbia 超大陆的拼合、拉张裂解和重建提供了新的线索, 对于探讨泥盆纪火山岩块状硫化物矿床的形成构造背景也有借鉴意义。

## 6 结论

(1) 本文对阿舍勒矿区英安岩中古老锆石的定年为阿尔泰山造山带存在前寒武纪结晶基底提供了新的有力的证据。泥盆纪火山岩中古老锆石记录了  $2441\text{Ma}$  左右地幔物质 (亏损地幔) 加入地壳引起新生地壳的增长事件, 约  $2291\text{Ma}$  左右新生地壳发生了重结晶作用事件,  $1985 \pm 8.9\text{Ma}$  左右再次受到地幔物质的加热改造事件, 并形成前寒武纪结晶基底。

(2)  $1985 \pm 8.9\text{Ma}$  时, Columbia 超大陆处于拼合汇聚主峰期, 研究区所在的阿尔泰山缘造山带当时可能为西伯利亚板块边缘碰撞造山带的一部分, 此时形成了阿尔泰山前寒武纪结晶基底。

(3) 具有强还原性地幔物质与具氧化性地壳物质不完全混合是阿尔泰山缘泥盆纪火山岩中老锆石所代表岩浆的物源区, 不完全混合特性表现在锆石 Ce 元素的离散和锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值较大的变化范围, 并使得锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值不具有良好的正态分布特征。锆石 Ce 元素的负异常与正异常同时出现是岩浆岩具有不均一氧化-还原性条件的表现。

(4) 阿尔泰山缘泥盆纪火山岩形成于古生代岩浆活动高峰期 (约  $408\text{Ma}$ ), 当时处于海相火山盆地环境, 地幔物质或者新生地壳加热熔融了古老地壳 (老基底), 并与之发生混合作用, 上侵喷出形成海相火山-沉积岩, 最后在有利盆地洼地形成块状硫化物矿床。

致谢 野外工作期间得到新疆哈巴河县政府有关领导, 新

疆阿舍勒铜锌矿生产部王刚工程师及其他地质人员的大力支持; 锆石年代学分析测试得到中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室杨岳衡副研究员的帮助和指导; 论文写作过程中与李金祥博士、毛启贵博士进行了深入探讨; 徐兴旺副研究员和匿名审稿人悉心审稿, 并提出宝贵意见, 在此一并感谢。

## References

- Avdeev AB. 1994. Geodynamic map of South Kazakhstan. *Geology and geophysics*, 35(7-8): 111-115. In: He GQ (trans. and ed.). 2004. *New Progresses on Geology and Mine of Xinjiang and Its Neighbour*, 255-256 (in Chinese)
- Amelin Y, Lee DC, Halliday AN and Pidgeon RT. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399: 252-255
- Amelin Y, Lee DC and Halliday AN. 2000. Early-Middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 4205-4225
- Anczkiewicz R, Oberli F, Burg JP, Villa IM, Gunther D and Meier M. 2001. Timing of normal faulting along the Indus Suture in Pakistan Himalaya and a case of major  $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$  initial disequilibrium in zircon. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 191: 101-114
- Bodet F and Schärer U. 2000. Evolution of the SE-Asian continent from U-Pb and Hf isotopes in single grains of zircon and baddeleyite from large rivers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 2067-2091
- Cai FM, Mao JW, Dong LH, Yang FQ, Liu F, Geng ZX and Huang CK. 2009. SHRIMP zircon U-Pb dating for metarhyolites of the Kangbutiebao Formation at the Abagong iron deposit in the southern margin of the Altai, Xinjiang and its petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1403-1415 (in Chinese with English abstract)
- Chen B and Jahn BM. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of NW China and their tectonic implications. *Geol. Mag.*, 139(1): 1-13
- Chen HL, Yang SF, Li ZL, Xiao WJ, Li JL, Dong CW and Yu X. 2006. Geochemistry and tectonic setting of Early Late Paleozoic felsic volcanic rocks from the Altai Orogenic Belt, North Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 38-42 (in Chinese with English abstract)
- Chen YC, Ye QT and Feng J. 1996. *The Ore-Forming Conditions and Mineralization Predictions in Ashele Copper-Zinc Belt*. Beijing: Geological Publishing House, 1-85 (in Chinese)
- Chen ZF. 2004. Some problems about opening-closing tectonic and metallogenic characteristics in Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 23(3): 214-221 (in Chinese)
- Cheng SD and Wang YL. 2000. The evolution and mining of central Asia crust. *Paper Corpus of the Fourth Academic Discussion on Geology and Mine Resource of Tianshan*, 238-240 (in Chinese)
- Ding L and Zhong DL. 1995. The characters of REE and Ce anomalies of siliceous rocks from Paleo-Tethys Ocean in Changning-Menglian belt in western Yunnan. *Science in China (Series B)*, 25(1): 93-100 (in Chinese)
- Diwu CR, Sun Y, Lin CQ, Liu XM and Wang HL. 2007. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of Yiyang TTG gneisses from Henan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 253-262 (in Chinese with English abstract)
- Elderfield H, Goddard RU and Sholkovitz ER. 1990. The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal seas and their significance to the composition of ocean water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 971-991
- Fang TH, Wang JB, Zhang JH and Ding RF. 2002. Proterozoic basaltic magma intrusion event in the Altai, Xinjiang. *Chinese Geology*, 29(1): 48-54 (in Chinese with English abstract)

- Feng HZ, Wallis E, Liu JR and Yao SP. 2001. Cerium anomalies in the Ashgillian strata in southwestern Sichuan, China and their paleoceanographical significance. *Volcanology & Mineral Resources*, 22(2): 126–134 (in Chinese with English abstract)
- Gao ZJ. 1993. Precambrian in Northern Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 35–36 (in Chinese)
- German CR, Klinkhamer GP and Edmond JM. 1990. Hydrothermal scavenging of rare earth elements in the ocean. *Nature*, 345: 516–518
- Griffin WL, Pearson NJ and Belousova E. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICP MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 133–147
- Griffin WL, Wang X and Jackson SE. 2002. Zircon chemistry and magma genesis, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61: 237–269
- Guo ZL, Guo XJ, Wang SL and Qin KZ. 2007. Characteristics and Pb-Zn, Fe and Au exploration potentials of the Maize Devonian volcano-sedimentary basin on the southern margin of Altay. *Mineral Deposits*, 26(1): 128–138 (in Chinese with English abstract)
- He GQ, Han BF and Yue SJ. 1990. The tectonic divisions and tectonic evolution of Chinese Altai Orogen belt. *Xinjiang Geological Sciences*, 2: 9–20 (in Chinese)
- Hole MJ, Saunders AD, Marriner GF and Tarney J. 1984. Subduction of pelagic sediments: Implications for the origin of Ce-anomalous basalts from the Mariana Islands. *Journal of Geological Society, London*, 141: 453–472
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hancher JM and Hoskin PWO (eds.). *Zircon. Rev. Mineral. Geochem.*, 53: 27–62
- Hoskin PWO. 2005. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637–648
- Hou GT, Li JH, Liu YL and Qian XL. 2005. The extensional events in North China Craton by the end of Paleoproterozoic: Aulacogen and swarm dikes. *Advance in Earth Sciences*, 15(11): 1366–1373 (in Chinese)
- Hu AQ, Wang ZG and Tu GZ. 1997. The Geological Evolution and the Rules of Diagenesis and Mineralization in Northern Xinjiang. Beijing: Science Press, 9–105 (in Chinese)
- Hu AQ, Zhang GX, Zhang QF, Li TD and Zhang JB. 2002. A review on ages of precambrian metamorphic rocks from Altai orogen in Xinjiang, NW China. *Scientia Geologica Sinica*, 37(2): 129–142 (in Chinese)
- Hu AQ, Wei GJ, Deng WF and Chen LL. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating and its significance for gneisses from the southwest area to Qinghe County in the Altai, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 1–10 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic. In: Malpas J, Fletcher CJN, Ali JR and Aitchison JC (eds.). *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. Special Publications, London, 226: 73–100
- Kröner A, Windley BF and Badarch G. 2007. Accretionary growth and crust formation in the Central Asian orogenic belt and comparison with the Arabian-Nubian shield. *Geological Society of America Memoir*, 200: 181–209
- Li HJ, He GQ, Wu TR and Wu B. 2006. Confirmation of Altai-Mongolia microcontinent and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1369–1379 (in Chinese with English abstract)
- Li JL, Su W, Zhang X and Liu X. 2009. Zircon Cameca U-Pb dating and its significance for granulite-facies gneisses from the western Awulale Mountain, West Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1852–1862 (in Chinese)
- Li JY and Xiao XC. 1999. Brief reviews on some issues of framework and tectonic evolution of Xinjiang Crust, NW China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 405–419 (in Chinese)
- Li JY and Xu X. 2004. Major problems on geologic structures and metallogenesis of northern Xinjiang, Northeast China. *Xinjiang Geology*, 22(2): 11–124 (in Chinese)
- Li TD and Qi ZM. 1996. The New Progress of Geology and Mineralization Research in China and Kazakhstan Altai. Beijing: Metallurgical Industry Press, 256–259 (in Chinese)
- Liu XF and Lv GF. 1999. Rare earth element geochemistry of manganese nodules in Duguan area of West Henan Province. *China's Manganese Industry*, 17(1): 24–29 (in Chinese with English abstract)
- Long XP. 2007. The sedimentary timing, source provenance and tectonic setting of Paleozoic clastic sedimentary rocks in the Altai Orogen, Xinjiang. Ph. D. Thesis. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–18 (in Chinese with English summary)
- Ludwig RK. 1996. ISOPLOT: A Plotting and Regression Program for Radiogenic-Isotope Data (Ver. 2. 90). U. S. Geol. Survey, Open File Rept, 91 (445): 1–47
- Ludwig KR. 2001. ISOPLOT 2. 49: A geochronological toolkit for Microsoft excel. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 1a, 58
- Qin KZ, Wang JB, Zhang JH and Deng JN. 1998. The analysis of ore-forming conditions of Keketale-type large-scale lead-zinc deposits on the southern Altai margin. *Non-Ferrous Minerals and Exploration*, 7(2): 65–74 (in Chinese)
- Qin KZ. 2000. Metallogenesis in relation to Central-Asia Style Orogeny of northern Xinjiang. Report of Post-Doctoral Research. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English summary)
- Qu GS and Chong MY. 1991. Lead isotope geology and its tectonic implications in Altaides, China. *Geoscience*, 5(1): 100–110 (in Chinese with English abstract)
- Rogers J. 1996. A history of continents in past three billion years. *J. Geol.*, 104: 91–107
- Rogers J and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Res.*, 5: 5–22
- Sengör AMC, Natalin BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altai tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eur-Asia. *Nature*, 364: 299–307
- Tong Y, Wang T, Hong DW, Dai YJ, Han BF and Liu XM. 2007. Ages and origin of the Early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1933–1944 (in Chinese with English abstract)
- Vervoort JD and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 533–556
- Wan B and Zhang LC. 2006. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry and tectonic setting of Devonian polymetallic metallogenic belt on the southern margin of Altai, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 145–152 (in Chinese with English abstract)
- Wang DH, Chen YC and Xu ZG. 2002. Minerogenic Series and Metallogenic Regularity of the Altai Metallogenic Province, Xinjiang, China. Beijing: Atomic Energy Press, 1–493 (in Chinese)
- Wang JB, Qin KZ, Wu ZL, Deng JN and Hu JH. 1998. Volcanic-Exhalative-Sedimentary Lead Zinc Deposits in the Southern Margin of the Altai, Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 1–210 (in Chinese)
- Wang T, Hong DW, Jahn BM, Tong Y, Wang YB, Han BF and Wang XX. 2006. Timing, petrogenesis, and setting of Paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen. *J. Geology*, 114: 735–751
- Wei C, Clarke G, Tian W and Qiu L. 2007. Transition of metamorphic series from the Kyanite- to andalusite-types in the Altai orogen, Xinjiang, China: Evidence from petrography and calculated KFMASH and KFMASH phase relations. *Lithos*, 96: 353–374
- White WM and Pachtett J. 1984. Hf-Nd-Sr isotopes and incompatible element abundances in island arcs: Implications for magma origins and crust-mantle relations. *Earth and Planetary Science Letters*, 67:

167-185

Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Ober F, Vonquandt A, Roddick JC and Spiegel J. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandard Newsletter*, 19: 1-23

Windley BF, Krner A and Guo J. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution. *The Journal of Geology*, 110: 711-733

Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-212 (in Chinese with English abstract)

Wu K, Ma DS, Pan JY, Nie WM, Zhou J, Xia F and Liu L. 2006. The geochemistry of phosphorite of Doushantuo Formation in Weng'an, China: Insights from trace elements and REE. *Journal of East China Institute of Technology*, 29(2): 108-114 (in Chinese with English abstract)

Xepackoba TH. 2001. Problems on Geology and Ural-Mongolia Drape of Kazakstan. 25-35. In: He GQ (trans. and ed.). 2004. *New Progresses on Geology and Mine of Xinjiang and It's Neighbour*, 230-237 (in Chinese)

Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li JL, Qin KZ and Wang ZH. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: Implications for the growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161: 339-342

Xiao XC, Tang YQ, Feng YM, Zhu BJ, Li JT and Zhao M. 1992. *Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions*. Beijing: Geological Publishing House, 1-162 (in Chinese)

Xin HB and Qu XM. 2008. Relative oxidation states of ore-bearing porphyries inferred from CE(IV)/CE(III) ratio in zircon: Application to the porphyry copper belt at gangdese, Tibet. *Acta Mineralogica Sinica*, 128(12): 152-160 (in Chinese with English abstract)

Xu P, Wu FY, Xie LW and Yang YH. 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49: 1642-1648

Yang JH, Wu FY, Liu XM and Xie LW. 2005. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of the Miyun rapakivi granites from Beijing, China. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 1633-1644 (in Chinese with English abstract)

Yuan C, Sun M, Xiao W, Li X, Chen H, Lin S, Xia X and Long X. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids. *Chemical Geology*, 242: 22-39

Yuan HL, Wu FY, Gao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. The laser probe zircon U-Pb dating and REE composition analysis of zircon from Cenozoic intrusions in northeastern China. *Chinese Science Bulletin*, 14(7): 1511-1520 (in Chinese)

Zeng LS, Mihai D and Jason S. 2005. The formation of leucosomes with pronounced negative Ce anomalies from metasediment partial melting: Implications for the origins of Ce anomalies in oceanic island arc lavas. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 24(5): 425-430 (in Chinese with English abstract)

Zeng QS, Chen GH, Wang H and Shan Q. 2007. Geochemical characteristic, SHRIMP zircon U-Pb dating and tectonic implication for granitoids in Chonghuer basin, Altai, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1921-1932 (in Chinese with English abstract)

Zhang JH, Wang JB and Ding RF. 2000. Characteristics and U-Pb ages of zircon in metavolcanics from the Kangbutiebao Formation in the Altai orogen, Xinjiang. *Regional Geology of China*, 19(3): 281-287 (in Chinese with English abstract)

Zhao GC, Cawood PA and Wilde SA. 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implication for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precam. Res.*, 107: 45-73

Zhao GC, Sun M and Wilde SA. 2002. Reconstruction of a pre-Rodinia Supercontinent: New advances and perspectives. *Chinese Science Bulletin*, 47(18): 1361-1364 (in Chinese)

Zheng YF, Chen RX, Zhang SB, Tang J, Zhao ZF and Wu YB. 2007. Zircon Lu-Hf isotope study of ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 317-

330 (in Chinese with English abstract)

Zhou G, Zhang SC, He B, Wang X, Li JG, He YK, Zheng KP and Luo SB. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating of gneisses in the Mayino'bo fault belt, northern Xinjiang, and its significance. *Geology in China*, 33(6): 1209-1216 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

阿佛杰耶夫. 1994. 南哈萨克斯坦地球动力学图. *地质与地球物理*, 35(7-8): 111-115. 见: 何国琦编译. 2004. *新疆毗邻地区地质矿产研究新进展*, 255-256

柴凤梅, 毛景文, 董连慧, 杨富全, 刘锋, 耿新霞, 张志欣, 黄承科. 2009. 阿尔泰山缘克朗盆地康布铁堡组变质火山岩年龄及岩石成因. *岩石学报*, 25(6): 1403-1415

陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 肖文交, 李继亮, 董传万, 余星. 2006. 阿尔泰晚古生代早期长英质火山岩的地球化学特征及构造背景. *地质学报*, 80(1): 38-42

陈毓川, 叶庆同, 冯京. 1996. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测. 北京: 地质出版社, 1-85

陈哲夫. 2004. 新疆开合构造与成矿特征的有关问题. *地质通报*, 23(3): 214-221

成守德, 王元龙. 2000. 中亚地壳发展演化与成矿. 第四届天山地质矿产资源学术讨论会论文集, 238-240

第五春荣, 孙勇, 林慈妻, 柳小明, 王洪亮. 2007. 豫西宜阳地区 TTG 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和同位素地质学. *岩石学报*, 23(2): 253-262

丁林, 钟大赉. 1995. 滇西昌宁-孟连带古特提斯洋陆质岩稀土元素和铈异常特征. *中国科学(B辑)*, 25(1): 93-100

方同辉, 王京彬, 张进红, 丁汝福. 2002. 新疆阿尔泰元古代基性岩浆侵入事件. *中国地质*, 29(1): 48-54

冯洪真, Wallis E, 刘家润, 姚素平. 2001. 川西南阿什及尔期地层中的 Ce 异常及其古海洋学意义. *火山地质与矿产*, 22(2): 126-134

高振家. 1993. 新疆北部前寒武系. 北京: 地质出版社, 35-36

郭正林, 郭旭吉, 王书来, 秦克章. 2007. 阿尔泰山缘麦兹泥盆纪火山-沉积盆地成矿特点及其铅锌、铁、金找矿潜力分析. *矿床地质*, 26(1): 128-138

何国琦, 韩宝富, 岳永君. 1990. 中国阿尔泰山造山带的构造分区及构造演化. *新疆地质科学*, 2: 9-20

赫拉斯科娃. 2001. 哈萨克斯坦地质和乌拉尔-蒙古褶皱区问题. 莫斯科大学出版社, 25-35. 见: 何国琦编译. 2004. *新疆毗邻地区地质矿产研究新进展*, 230-237

侯贵廷, 李江海, 刘玉琳等. 2005. 华北克拉通古元古代末的伸展事件: 拗拉谷与岩墙群. *自然科学进展*, 15(11): 1366-1373

胡霭琴, 王中刚, 涂光炽. 1997. 新疆北部地质演化及其成岩成矿规律. 北京: 科学出版社, 9-105

胡霭琴, 张国新, 张前锋, 李天德, 张积斌. 2002. 阿尔泰造山带变质岩系时代问题的讨论. *地质科学*, 37(2): 129-142

胡霭琴, 韦刚健, 邓文峰, 陈林丽. 2006. 阿尔泰地区青河县西南片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 22(1): 1-10

李会军, 何国琦, 吴泰然, 吴波. 2006. 阿尔泰-蒙古微大陆的确定及其意义. *岩石学报*, 22(5): 1369-1379

- 李继磊, 苏文, 张喜, 刘新. 2009. 西天山阿吾拉勒西段麻粒岩相片麻岩锆石 Cameca U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 28(12): 1852 - 1862
- 李锦轶, 肖序常. 1999. 对新疆地壳结构与构造演化几个问题的简要评述. 地质科学, 34(4): 405 - 419
- 李锦轶, 徐新. 2004. 新疆北部地质构造和成矿作用的主要问题. 新疆地质, 22(2): 11 - 124
- 李天德, 祁志明, 肖世录, 吴柏青. 1996. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰地质及成矿研究的新进展. 见: 中国地质学会编. 献给三十届国际地质大会“八五”地质科技重要成果学术交流会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 256 - 259
- 刘晓峰, 吕国芳. 1999. 豫西杜关锰结核稀土元素地球化学. 中国锰业, 17(1): 24 - 29
- 龙晓平. 2007. 新疆阿尔泰古生代碎屑沉积岩的沉积时代、物质来源及其构造背景. 博士学位论文. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 1 - 18
- 秦克章, 王京彬, 张进红, 邓吉牛. 1998. 阿尔泰南缘可可塔勒式大型铅锌矿床的成矿条件分析. 有色金属矿产与勘查, 7(2): 65 - 74
- 秦克章. 2000. 新疆北部中亚型造山与成矿作用. 博士后科研报告. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 39 - 60
- 曲国胜, 崇美英. 1991. 阿尔泰造山带的铅同位素地质及其构造意义. 现代地质, 5(1): 100 - 110
- 童英, 王涛, 洪大卫, 代雅建, 韩宝福, 柳晓明. 2007. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义. 岩石学报, 23(8): 1933 - 1944
- 万博, 张连昌. 2006. 新疆阿尔泰南缘泥盆纪多金属成矿带 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学与构造背景探讨. 岩石学报, 22(1): 145 - 152
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚等. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律. 北京: 原子能出版社, 1 - 493
- 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 邓吉牛, 胡剑辉等. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床. 北京: 地质出版社, 1 - 210
- 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. 岩石学报, 23(2): 185 - 212
- 吴凯, 马东升, 潘家永, 聂文明, 周健, 夏菲, 刘莉. 2006. 贵州瓮安磷矿陡山沱组地层元素地球化学特征. 华东理工学院学报, 29(2): 108 - 114
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 1 - 162
- 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. 矿物学报, 128(12): 152 - 160
- 徐平, 吴福元, 谢烈文, 杨岳衡. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素. 科学通报, 49: 1403 - 1412
- 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 谢烈文. 2005. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义. 岩石学报, 21: 1633 - 1644
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 14(7): 1511 - 1520
- 曾令森, Mihai D, Jason S. 2005. 变泥质岩的深熔作用与具铈 (Ce) 负异常熔体的成因. 岩石矿物学杂志, 24(5): 425 - 430
- 曾乔松, 陈广浩, 王核, 单强. 2007. 阿尔泰冲乎尔盆地花岗岩类的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报, 23(8): 1921 - 1932
- 张进红, 王京彬, 丁汝福. 2000. 阿尔泰造山带康布铁堡组变质火山岩锆石特征和铀-铅年龄. 中国区域地质, 19(3): 281 - 287
- 赵国春, 孙敏, Wilde SA. 2002. 早-中元古代 Columbia 超级大陆研究进展. 科学通报, 47(18): 1361 - 1364
- 郑永飞, 陈仁旭, 张少兵, 唐俊, 赵子福, 吴元保. 2007. 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究. 岩石学报, 23(2): 317 - 330
- 周刚, 张招崇, 何斌等. 2006. 新疆北部玛因鄂博断裂带中片麻岩锆石 U-Pb SHRIMP 定年及其地质意义. 中国地质, 33(6): 1209 - 1216