

doi:10.3799/dqkx.2017.553

# 中国阿尔泰东北部哈拉尔次花岗岩的 年龄、成因及构造意义

田红彪<sup>1,2</sup>, 陈有焯<sup>3</sup>, 杨永强<sup>1\*</sup>, 李 伦<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国人民武装警察部队黄金第八支队, 新疆乌鲁木齐 830057

3. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054

**摘要:** 在岩石地球化学研究基础上, 揭示哈拉尔次花岗岩的成因、侵位时代及构造背景, 进行锆石 U-Pb 及 Nd 同位素测试, 并与阿尔泰造山带内其他花岗岩进行对比, 有助于为阿尔泰造山带构造演化提供依据。出露于中阿尔泰构造带的哈拉尔次花岗岩主要岩石类型有花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究表明, 其形成时代为  $454.8 \pm 2.4$  Ma (MSWD=0.32), 为晚奥陶世岩浆活动产物。地球化学研究表明, 岩石具有高硅、富碱、高钾 ( $K_2O/Na_2O > 1$ )、低钛、低镁及低磷等地球化学特征, 铝饱和指数 (A/CNK) 平均为 1.05, CIPW 计算中刚玉分子含量大于 1, 显示出高钾钙碱性过铝质花岗岩的特征; 岩石轻稀土相对富集、重稀土平坦, 有显著的 Eu 负异常, 富集 Th、Rb, 亏损 Sr、Ti、P 等元素, 有明显的 Nb、Ta、Ti 负异常, 显示出火山弧花岗岩的特征; 其接近于 0 的  $\epsilon_{Nd}(t)$  ( $-2.0 \sim +0.5$ ) 和较老的两阶段模式 ( $T_{DM2}$ ) 年龄 (1.15~1.35 Ga) 暗示其源区含有较多的壳源组分并有一定量幔源物质加入。综合分析研究表明, 哈拉尔次花岗岩可能由富含白云母和黑云母的含泥质杂砂岩在较低压力和较高温度下经历部分熔融形成, 其源区有斜长石、钛铁矿和磷灰石的残留, 同时幔源物质有一定的混入, 形成于活动大陆边缘挤压背景下, 局部伸展减压以及异常地幔不均匀上升提供热量, 导致中上地壳沉积物发生部分熔融并有少量的幔源物质混入, 形成哈拉尔次花岗岩。

**关键词:** 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 构造意义; 花岗岩; 阿尔泰。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2017)10-1658-15

收稿日期: 2017-06-12

## Ages, Origin and Tectonic Significance of Halaerci Granites from Northeastern Part of Chinese Altay Mountains

Tian Hongbiao<sup>1,2</sup>, Chen Youxin<sup>3</sup>, Yang Yongqiang<sup>1\*</sup>, Li Lun<sup>1</sup>

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. No.8 Gold Geological Party of Chinese People's Armed Police Force, Urumqi 830057, China

3. The School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

**Abstract:** In order to study the chronological, geochemical characteristics and tectonic setting of the Halaerci granite from Altay area, the LA-MC-ICPMS zircons U-Pb dating method was employed to assess the ages and Nd isotope composition, preceded by their petrological and geochemical studies. In addition, the authors aim to provide more evidences for the structural evolution of Altay tectonic belt by making a comparison with other granites from central Altay orogenic belt. The exposed Halaerci granites of central Altay tectonic belt are dominated by granodiorite, monzonite and syenogranite. LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology study suggests that formation age is from  $454.8 \pm 2.4$  Ma (MSWD=0.32), which belongs to the Late Ordovician magma activity. The study of geochemistry indicates that rock is characterized by high silicon, enriched alkali and high potassium ( $K_2O/Na_2O > 1$ ) and low titanium, low magnesium and low phosphorus. Average (A/CNK) is 1.5 and corundum molecular

**基金项目:** 中国地质调查局地质调查项目 (No.12120113071900)。

**作者简介:** 田红彪 (1969—), 男, 高级工程师, 主要从事区调研究。ORCID: 0000-0001-6154-9097. E-mail: 1814642728@qq.com

\* **通讯作者:** 杨永强, ORCID: 0000-0003-2048-8309. E-mail: yangyongq@cugb.edu.cn

**引用格式:** 田红彪, 陈有焯, 杨永强, 等, 2017. 中国阿尔泰东北部地区哈拉尔次花岗岩的年龄、成因及构造意义. 地球科学, 42(10): 1658-1672.

content of CIPW calculation is greater than 1, which shows a high potassium calc-alkaline peraluminous granite characteristics. The granites are relatively enriched in light rare earth elements, while flat in heavy rare earth elements, with significant Eu negative anomaly, enrichment of Th and Rb, depletion of Sr, Ti and P elements, pronounced Nb, Ta and Ti negative anomalies, which shows the initial arc characteristic of magmatic rocks. Its  $\epsilon_{Nd}(t)$  is close to 0 (-2.0 to 0.5) and old two-phase model ( $T_{DM2}$ ) age (1.15 to 1.35) Ga indicate its source area contains more crust-derived source components with a certain amount mantle source materials. Comprehensive analysis and study suggest that Halaerci granites may be composed of partial melting of argillaceous sandstone enriched with muscovite and biotite under low pressure and high temperature. Its source area has residual plagioclase, ilmenite and apatite and mixed with mantle source materials at the same time. It is concluded that Halaerci granites formed in the active continental margin squeezing environment when the heat by local extensional stress reduction and abnormal uneven mantle materials rise led to partial melting of upper crust to mix with mantle source materials.

**Key words:** zircon U-Pb dating; geochemistry; tectonic significance; granite; Altay.

一直以来,增生造山和陆壳生长是地球科学的两大前沿课题,中亚造山带作为全球最大的显生宙增生造山带(Sengor *et al.*, 1993; 刘金龙等, 2016)和陆壳生长区(Jahn *et al.*, 2000a, 2000b; Patchett and Samson, 2003; 杨钢等, 2015),其增生造山和陆壳生长一直是研究的重要内容.阿尔泰造山带地处中国、蒙古、俄罗斯和哈萨克斯坦四国的交界处,是中亚造山带的重要组成部分,占据特殊的地理位置和构造位置,与整个中亚造山带一样,阿尔泰造山带出露大面积侵入岩,尤其是花岗岩类较为发育,约占全区总面积的 40%以上(王中刚等, 1998; 王涛等, 2010).前人对出露于阿尔泰造山带的花岗岩做了大量的研究工作,研究资料显示这些花岗岩具有多时代、多类型、多成因、多来源等特征,形成于多种构造环境(王广耀和许培春, 1983; 刘伟, 1990; 赵振华等, 1993; 王中刚等, 1998; 袁峰等, 2001; 王登红等, 2002; 王涛等, 2005, 2010; 童英, 2006; Wang *et al.*, 2006, 2007; 周刚等, 2007; 杨富全等, 2008; 刘锋等, 2009; 孙桂华等, 2009; 孙敏等, 2009; 柴凤梅等, 2010; 董连慧等, 2012; 沈晓明等, 2013; 刘锋等, 2014; 张志欣等, 2014; 张亚峰等, 2015).阿尔泰造山带南缘古生代是被动大陆边缘还是活动大陆边缘的争议一直存在(韩宝福和何国琦, 1991; 陈毓川等, 1996; 童英等, 2007; 杨富全等, 2008; 刘锋等, 2009).近些年来,同位素年代学研究结果显示阿尔泰造山带花岗岩年代学结构主要有 460 Ma、408 Ma、375 Ma 和 265 Ma(Wang *et al.*, 2006; 曾乔松等, 2007),较完整的记录了早古生代以来的俯冲—碰撞—造山过程,尤其是~400 Ma 的花岗岩浆活动最为剧烈,一系列成果极大地促进了阿尔泰造山带大地构造环境、构造演化、造山作用和陆壳增生研究工作进展。

依托在阿尔泰乌齐里克他乌一带开展的区域地质矿产调查项目,笔者对出露于该地区的花岗岩进

行详细的调查研究.本文通过详细的岩相学、同位素年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素研究,精确限定哈拉尔次花岗岩体形成时代,并进一步探讨其岩石成因及构造环境,为进一步探讨阿尔泰造山带早古生代构造演化提供新的约束。

## 1 区域地质背景与岩体特征

中国阿尔泰造山带呈北西—南东向展布,是中亚造山带的重要组成部分(图 1a),大地构造位置位于西伯利亚板块、哈萨克斯坦—准噶尔板块之间,是典型的显生宙造山带(Sengor *et al.*, 1993),北至中—蒙、中—俄及中—哈边境,南以额尔齐斯断裂与哈萨克斯坦准噶尔板块北缘相邻(何国琦等, 1990).阿尔泰造山带以红嘴山—诺尔特断裂、阿巴宫—库尔提断裂和额尔齐斯断裂带为界,由北向南可以简单的划分为北阿尔泰、中阿尔泰、南阿尔泰 3 个构造带(或块体)(Li *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004)(图 1b).北阿尔泰构造带主要由震旦系—寒武系、上泥盆统—下石炭统火山—沉积岩组成,并出露晚加里东期花岗岩;中阿尔泰构造带主要由元古界—下古生界深变质岩系和奥陶纪—二叠纪侵入岩组成,其中泥盆纪花岗岩最为发育,具有微陆块的特点(Windley *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006);南阿尔泰构造带主要由元古界片麻岩和志留纪—石炭纪火山—沉积岩系组成(Windley *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2004).前人综合区域资料研究认为:阿尔泰造山带于晚前寒武纪晚期到早古生代早期为稳定大陆边缘阶段;大致从晚寒武纪开始发生俯冲、增生,其中早古生代(奥陶纪—泥盆纪)为洋壳俯冲阶段;之后可能发生碰撞造山作用,于中石炭纪基本奠定了阿尔泰造山带的构造格架;而额尔齐斯以南即准噶尔造山带,在石炭纪

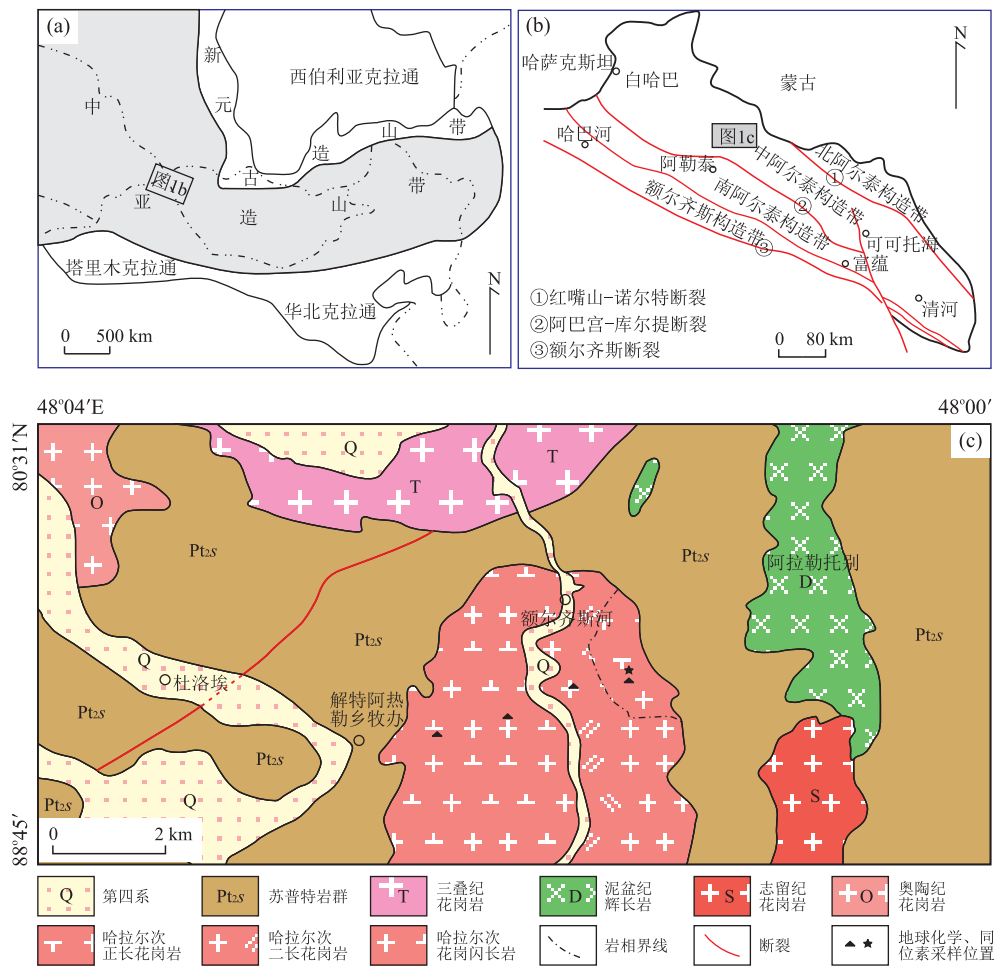


图 1 中亚造山带构造位置(a)、阿尔泰造山带构造分区(b)及哈拉尔次花岗岩地质简图(c)

Fig.1 Tectonic position of Central Asian Orogenic Belt (a), tectonic division for Altay Orogenic Belt (b) and geological sketch of Halaerqi granites in Altay Orogenic Belt (c)

图 a 据何国琦等(1990);图 b 据 Windley *et al.*(2002)

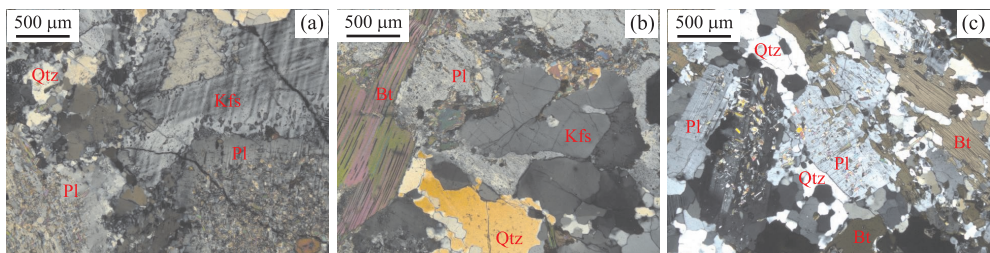


图 2 阿尔泰地区哈拉尔次花岗岩显微特征

Fig.2 Microscopic characteristics of Halaerqi granites in Altay area

a.二长花岗岩;b.正长花岗岩;c.花岗闪长岩.Bt.黑云母;Kfs.钾长石;Pl.斜长石;Qtz.石英

可能仍发生有俯冲碰撞作用(何国琦等, 1990; Windley *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004; 王涛等, 2005; Wang *et al.*, 2006).

不同时代的花岗岩广泛出露于阿尔泰造山带的不同构造单元,研究成果表明阿尔泰造山带花岗岩主要由早古生代-晚古生代及少量中生代花岗岩体

构成,主要岩石类型为英云闪长岩、花岗闪长岩、黑云母花岗岩、二云母花岗岩、白云母花岗岩等,其成因类型多样,如有 S、I 和 A 型(王涛等, 2005).本文以出露于中阿尔泰构造带的哈拉尔次花岗岩为例对早古生代花岗岩的岩石成因及构造环境进行研究(图 2).

该岩体出露于中阿尔泰构造带额尔齐斯河两侧(图 1),呈不规则椭圆状分布,出露面积约 25 km<sup>2</sup>,侵位于中元古界苏普特岩群,在岩体中可见黑云母变砂岩捕虏体,呈似椭圆状,直径约 8~10 cm。哈拉尔次花岗岩岩石类型相对单一,野外观察及室内镜下观察研究显示岩体主要岩石类型有花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩,其中花岗闪长岩出露于额尔齐斯河西岸,出露面积最大,其次为二长花岗岩,出露于额尔齐斯河东岸,正长花岗岩出露面积最小,出露于岩体最东侧。

花岗闪长岩呈灰白色,具有中细粒花岗结构、块状构造,主要由斜长石、钾长石、石英及少量黑云母等矿物组成,其中钾长石含量为 8%~10%,呈半自形板柱状,粒径多为 0.7~5.0 mm,具格子双晶和卡式双晶,多为微斜长石及条纹长石,部分边缘可见与石英形成的文象结构;斜长石含量为 50%~55%,呈半自形板状,发育聚片双晶和部环带结构,粒径为 2~5 mm,个别达 6.5 mm,具较强绢白云母化、高岭土化;石英呈他形粒状,粒径多小于 2.5 mm,含量为 25%~30%;黑云母呈片状,片径多小于 2.5 mm,含量为 5%~10%。

二长花岗岩呈灰白色,发育中细粒花岗结构、块状构造,主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母等矿物组成。钾长石呈半自形板柱状,粒径多为 0.3~3.0 mm,具条纹及格子双晶,多为微斜长石及条纹长石,含量 18%~25%;斜长石呈半自形板状,发育聚片双晶和环带结构,粒径 2.0~4.0 mm,矿物表面有明显的绢云母化,含量 35%~40%;石英呈他形粒状,粒径 1~2 mm,部分为变质重结晶作用形成,含量 30%~35%;黑云母呈片状,片径多小于 2.0 mm,含量 8%~10%。

正长花岗岩呈灰白色,具有细粒花岗结构、块状构造,主要由钾长石、斜长石、石英及少量黑云母等矿物组成。钾长石呈半自形板柱状,粒径多为 0.7~2.0 mm,发育条纹、格子双晶、卡式双晶,多为微斜长石及条纹长石,含量 40%~45%。斜长石呈半自形板状,发育聚片双晶,部分具有环带结构,粒径 1~2 mm,矿物表面绢白云母化和高岭土化比较强烈,含量 15%~20%;石英呈他形粒状,粒径多小于 1 mm,具变质重结晶特征,含量 30%~35%;黑云母呈片状,片径多小于 1.5 mm,含量 3%~5%。

## 2 锆石 U-Pb 年代学

### 2.1 测试方法

锆石挑选、制靶、阴极发光照相及 LA-ICP-MS 测试工作均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。锆石的 CL 图像分析,采用 FEI 公司 XL30 型 SFEG 电子束进行锆石内部结构显微照相。锆石的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位 U-Pb 定年实验采用等离子质谱仪为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a,激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M,激光剥蚀斑束直径为 32 μm,频率为 10 Hz。以 <sup>29</sup>Si 作为内标元素进行校正,以国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标,分析方法及仪器参数见文献(Yuan *et al.*, 2004;柳小明等,2007)。样品同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER(ver4.0, Macquarie University)程序处理,采用 Andersen 方法对普通 Pb 进行校正(Anderson, 2002),加权平均年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot(ver2.49)完成(Ludwig, 2001)。

### 2.2 锆石特征及测试结果

用于锆石 U-Pb 同位素测定的样品是采于中阿尔泰构造带的哈拉尔次花岗岩体的细粒正长花岗岩(PM5-TW20),样品采集位置经纬度坐标为 48°01'42"N,88°39'54"E。从样品中选取的锆石以浅黄色、无色为主,透明一半透明,呈棱角状或次棱角状,晶体长宽比为 3:1~2:1,晶面光滑,晶棱晶面界线清晰。在阴极发光图像中(图 3),锆石多呈双锥状或单锥状,发育典型岩浆锆石生长韵律环带,表现出典型岩浆成因锆石特征(Rubatto, 2002;吴元保和郑永飞,2004)。本次测试共完成 20 粒锆石 21 个测点的 LA-ICP-MS U-Pb 分析,结果见表 1。由测试

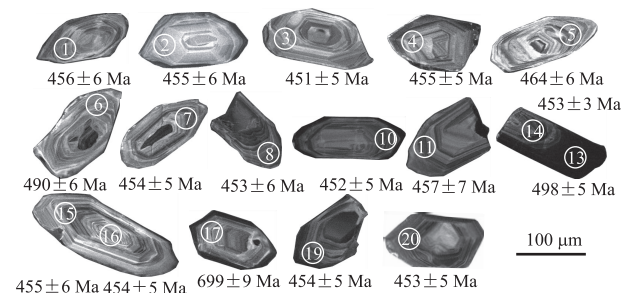


图 3 哈拉尔次花岗岩中代表性锆石阴极发光图像  
Fig. 3 Cathode light images of representative zircons from Halaerqi granites in Altay area



表 1 阿尔泰山地区哈拉次花岗岩体 (PM5-TW20) 锆石 U-Pb 同位素测试结果 (LA-ICP-MS)  
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb isotopic data of zircon from Halaerqi granites (PM5-TW20) in Altay area

点号	元素含量( $10^{-6}$ )				同位素比值				表面年龄(Ma)											
	Pb <sub>Total</sub>	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	Th/ U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1 $\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 $\sigma$	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 $\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1 $\sigma$	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1 $\sigma$	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1 $\sigma$				
1	85	223	533	0.42	0.0531	0.0026	0.5342	0.0252	0.0733	0.0011	0.0223	0.0008	332	111	435	17	456	6	446	16
2	74.9	177	528	0.34	0.0583	0.0025	0.5889	0.0255	0.0731	0.0009	0.0230	0.0009	539	94	470	16	455	6	459	17
3	126	267	1020	0.26	0.0568	0.0021	0.5681	0.0203	0.0725	0.0008	0.0236	0.0008	483	47	457	13	451	5	472	15
4	90.7	148	947	0.16	0.0553	0.0022	0.5551	0.0208	0.0731	0.0009	0.0240	0.0010	433	87	448	14	455	5	478	20
5	134	318	833	0.38	0.0571	0.0022	0.5858	0.0225	0.0746	0.0011	0.0240	0.0008	494	85	468	14	464	6	480	15
6	136	297	941	0.32	0.0542	0.0021	0.5928	0.0236	0.0789	0.0010	0.0246	0.0009	389	82	473	15	490	6	490	17
7	181	276	1969	0.14	0.0568	0.0017	0.5732	0.0178	0.0729	0.0007	0.0236	0.0008	483	69	460	11	454	4	471	16
8	50.8	106	408	0.26	0.0547	0.0031	0.5497	0.0308	0.0727	0.0010	0.0235	0.0013	398	94	445	20	453	6	469	25
9	76.6	93.6	937	0.10	0.0582	0.0021	0.5902	0.0217	0.0733	0.0008	0.0232	0.0014	600	80	471	14	456	5	464	27
10	58.9	125	535	0.23	0.0543	0.0024	0.5466	0.0247	0.0727	0.0008	0.0216	0.0010	383	100	443	16	452	5	432	20
11	99	254	647	0.39	0.0563	0.0022	0.5669	0.0216	0.0734	0.0008	0.0217	0.0007	465	85	456	14	457	5	434	14
12	244	432	2553	0.17	0.0542	0.0013	0.5485	0.0138	0.0728	0.0006	0.0213	0.0006	389	57	444	9	453	4	426	12
13	884	1211	9553	0.13	0.0549	0.0013	0.6126	0.0140	0.0803	0.0008	0.0226	0.0006	406	52	485	9	498	5	452	11
14	350	555	2316	0.24	0.0709	0.0026	0.7207	0.0274	0.0728	0.0008	0.0339	0.0016	954	76	551	16	453	5	674	31
15	121.1	203	1338	0.15	0.0539	0.0018	0.5504	0.0191	0.0732	0.0010	0.0209	0.0008	369	71	445	13	455	6	417	17
16	233	782	798	0.98	0.0529	0.0019	0.5346	0.0194	0.0729	0.0009	0.0213	0.0006	324	83	435	13	454	5	427	12
17	241	411	798	0.51	0.0618	0.0020	0.9824	0.0317	0.1146	0.0016	0.0362	0.0011	665	75	695	16	699	9	719	21
18	107	217	856	0.25	0.0517	0.0019	0.5323	0.0205	0.0742	0.0009	0.0246	0.0009	272	92	433	14	461	6	490	17
19	118	236	1174	0.20	0.0543	0.0017	0.5519	0.0174	0.0730	0.0008	0.0207	0.0008	383	64	446	11	454	5	414	16
20	90.5	161	976	0.16	0.0559	0.0022	0.5668	0.0224	0.0727	0.0008	0.0217	0.0010	450	119	456	15	453	5	434	20
21	161	492	679	0.73	0.0553	0.0025	0.5647	0.0252	0.0736	0.0010	0.0230	0.0008	433	102	455	16	458	6	459	15

表 2 阿尔泰地区哈拉尔次花岗岩主量元素(%)、微量元素( $10^{-6}$ )含量

Table 2 Major (%) and trace element ( $10^{-6}$ ) concentration of Halaerci granites in Altay area

样品	PM5-GS5	PM5-GS20	PM6-GS4	PM6-GS15
岩性	二长花岗岩	正长花岗岩	花岗闪长岩	花岗闪长岩
SiO <sub>2</sub>	66.37	67.12	64.03	65.73
TiO <sub>2</sub>	0.66	0.65	1.22	0.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.79	15.07	14.52	15.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.42	4.32	7.06	5.70
FeO	3.05	3.05	4.99	4.07
MnO	0.07	0.07	0.11	0.09
MgO	1.55	1.42	1.87	1.96
CaO	2.86	2.46	3.81	3.11
Na <sub>2</sub> O	3.28	3.05	2.81	2.96
K <sub>2</sub> O	3.77	4.18	2.82	3.53
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.16	0.30	0.20
A/NKC	1.08	1.08	0.99	1.07
AR	2.22	2.41	1.89	2.09
σ43	2.16	2.19	1.56	1.92
Rb	158.64	178.10	162.27	155.80
Ba	453.12	474.51	227.30	522.41
Th	14.65	15.62	15.10	17.24
U	1.76	2.16	4.53	2.14
Ta	1.16	1.22	1.17	1.28
Nb	11.69	12.57	12.85	13.79
Sr	150.00	125.37	149.23	155.46
Zr	198.33	199.61	370.78	209.74
Hf	5.54	5.66	9.87	5.72
Sc	13.22	13.06	17.73	16.49
V	76.95	71.54	128.16	100.22
Cr	31.27	27.53	12.55	41.54
Mn	597.28	583.74	857.85	686.87
Co	89.69	116.93	73.09	118.10
Ni	23.34	21.03	13.79	29.32
Ga	19.10	18.38	21.78	19.46
Mo	0.09	0.11	0.21	0.64
Cs	12.23	12.53	10.89	10.26
Pb	26.87	28.20	18.39	23.14
La	32.24	31.54	35.57	41.80
Ce	71.11	68.32	77.74	87.88
Pr	8.54	8.37	9.89	10.55
Nd	32.98	33.00	41.29	42.23
Sm	7.65	7.90	10.30	9.07
Eu	1.45	1.34	1.87	1.60
Gd	7.38	7.39	11.05	8.39
Tb	1.23	1.32	1.88	1.33
Dy	7.85	8.45	11.64	7.96
Ho	1.61	1.77	2.41	1.66
Er	4.70	5.12	7.01	4.51
Tm	0.68	0.76	0.99	0.64
Yb	4.39	4.66	6.20	3.98
Lu	0.68	0.71	0.96	0.62
Y	46.04	50.03	67.03	45.07
ΣREE	182.49	180.64	218.80	222.22
δEu	0.58	0.53	0.53	0.55
(La/Yb) <sub>N</sub>	4.95	4.56	3.87	7.07

结果可以看出,除了个别测点外,大多数锆石具有较低的 Th、U 含量,分别为  $93.6 \times 10^{-6} \sim 1.211 \times$

$10^{-6}$ 、 $408 \times 10^{-6} \sim 9.553 \times 10^{-6}$ , Th/U = 0.10 ~ 0.98,显示出岩浆锆石的特点。

由测试结果可以看出,06、13、14 点测试结果谐和度较差,在  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄图中明显偏离谐和线,17 测点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄为  $699 \pm 9$  Ma,可能是岩体形成过程中捕获的或者继承的年龄更老锆石残留,是对阿尔泰地区早期岩浆事件的记录.剩余 17 个点在  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄图中表现出较好的谐和性(图 4a),其交点年龄为  $454 \pm 3$  Ma(MSWD=0.29),对  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄进行加权计算(图 4b),加权平均年龄为  $454.8 \pm 2.4$  Ma(MSWD=0.32),时代为晚奥陶世,代表哈拉尔次花岗岩体岩浆结晶年龄。

### 3 地球化学

#### 3.1 测试方法

本次研究用样品的主量元素、稀土及微量元素分析在中国地质调查局西安地质调查中心完成.主量元素除 FeO、LOI 采用标准分析为湿化学法分析外,其他采用 PW4400 型 X 荧光光谱仪(XRF)测定;微量元素和稀土元素采用 X-SeriesII 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,检测限优于  $5 \times 10^{-9}$ ,相对标准偏差优于 5%。

Sr-Nd 同位素的全岩测试、化学分离和同位素比值测定在中国科学院地质与地球物理所稳定同位素地球化学实验室完成,测试仪器为德国 Finnigan 公司 MAT-262 热电质谱计.分别采用  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$  和  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  对 Sr 和 Nd 同位素比值进行质量分馏校正.Rb-Sr 和 Sm-Nd 的全流程本底为 250 pg 和 100 pg.浓度 ( $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  和  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值)误差小于 0.5%。Rb/Sr 和 Sm/Nd 比值的不确定度分别小于  $\pm 2\%$  和  $\pm 0.5\%$ 。测试过程中分别对 Sr 标准溶液 NBS-987 和 Nd 标准溶液 JNdi-1 测得  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710261 \pm 0.000012$  ( $n = 5, 2\sigma$ ) 和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512119 \pm 0.000011$  ( $n = 5, 2\sigma$ ),均与参考值吻合.对 USGS 标准物质 BCR-2 进行了测试,结果为  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705020 \pm 0.000014$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512623 \pm 0.000011$ ,分别与参考值基本一致.化学流程和同位素比值测试详见参考文献(Li et al., 2012, 2015)。

#### 3.2 主量元素

本次研究采集哈拉尔次花岗岩不同岩性 9 件样品进行岩石地球化学分析,测试结果见表 2.由测试

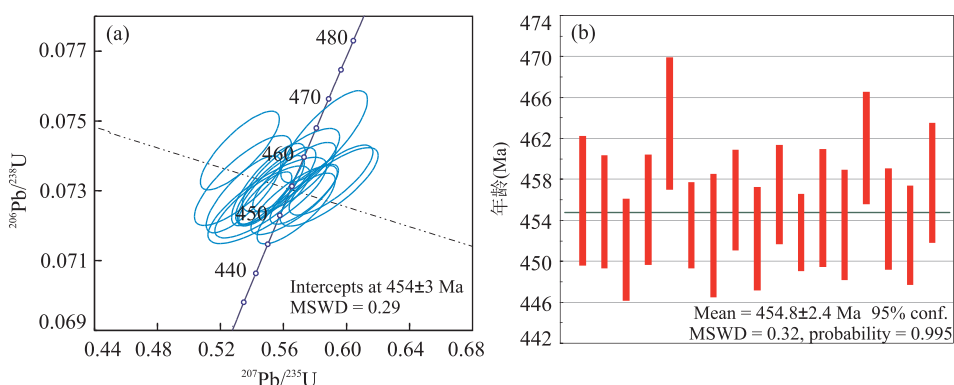


图 4 哈拉尔次花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

Fig.4 LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Halaerqi granites in Altay area

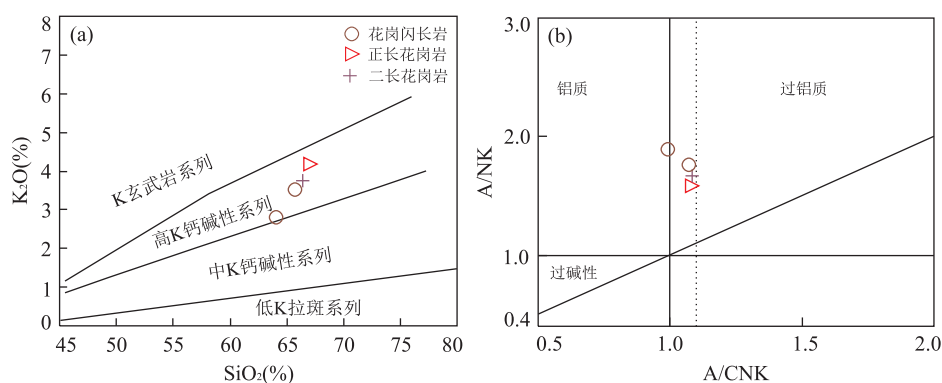


图 5 阿尔泰地区哈拉尔次花岗岩体主量元素判别图解

Fig.5 Major element diagram of Halaerqi granites in Altay area

图 a 据 Peccerillo and Taylor(1976); 图 b 据 Maniar and Piccoli(1989)

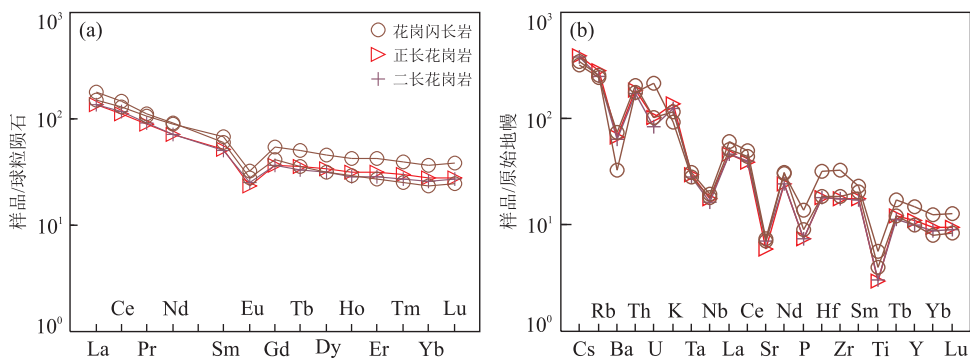


图 6 阿尔泰地区哈拉尔次花岗岩稀土配分模式和微量元素蛛网图

Fig.6 Chondrite-normalized REE pattern and primitive mantle-normalized trace elements patterns for Halaerqi granites in Altay area

a. 球粒陨石标准化值据 Boynton(1984); b. 原始地幔标准值据 Sun and McDonough (1989)

结果可以看出, 岩石具有高硅 ( $\text{SiO}_2 = 64.03\% \sim 67.12\%$ , 平均为  $65.81\%$ )、全碱含量中等 ( $\text{ALK} = 5.63\% \sim 7.23\%$ , 平均为  $6.60\%$ )、高钾低钠 ( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.00 \sim 1.37$ , 平均为  $1.18$ )、低钛 ( $\text{TiO}_2 = 0.13\% \sim 0.50\%$ , 平均为  $0.32\%$ )、低锰 ( $\text{MnO} = 0.07\% \sim 0.11\%$ , 平均为  $0.09\%$ )、低镁 ( $\text{MgO} = 1.42\% \sim 1.96\%$ , 平均为  $1.70\%$ ) 及低磷 ( $\text{P}_2\text{O}_5 =$

$0.16\% \sim 0.30\%$ , 平均为  $0.21\%$ ) 等特征, 里特曼指数 ( $\sigma$ ) 平均值为  $1.96$ , 表明岩石具有亚碱性岩石特征. 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解中样品落入高钾钙碱性系列区域 (图 5a). 岩石  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高 (平均为  $15.17\%$ ), 铝饱和指数 ( $\text{A}/\text{CNK}$ ) 平均为  $1.05$ , 属于弱过铝质花岗岩, 与  $\text{A}/\text{CNK}$ - $\text{A}/\text{NK}$  图解判别结果一致 (图 5b).

表 3 阿尔泰地区哈拉尔次花岗岩 Sr-Nd 组成

Table 3 Sr-Nd isotope compositions for Halaerci granites in Altay area

样品	PM5-GS5	PM5-GS20	PM6-GS4	PM6-GS15
Rb	161.3	181.5	167.4	153.7
Sr	144.8	125.8	149.8	152.3
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	3.229	4.187	3.240	2.928
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.728 359	0.732 172	0.726 449	0.725 822
$2\sigma$	0.000 011	0.000 014	0.000 011	0.000 015
$f_{\text{Rb/Sr}}$	38.04	49.63	38.18	34.40
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.707 43	0.705 03	0.705 45	0.706 84
Sm	7.341	7.947	10.406	8.936
Nd	32.65	33.80	42.34	42.01
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.136 1	0.142 3	0.148 8	0.128 8
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 357	0.512 425	0.512 519	0.512 393
$2\sigma$	0.000 009	0.000 012	0.000 011	0.000 010
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-2.0	-1.0	+0.5	-0.8
$T_{\text{DM}}$	1 559	1 549	1 484	1 359
$T_{\text{DM2}}$	1 351	1 271	1 154	1 258
$f_{\text{Sm/Nd}}$	-0.31	-0.28	-0.24	-0.35
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.511 951	0.512 001	0.512 075	0.512 010

注:球粒陨石均一储库(CHUR)值为: $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0.082 7$ , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.704 5$ , $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.196 7$ , $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512 638$ , $\lambda_{\text{Rb}}=1.39 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ , $\lambda_{\text{Sm}}=6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$ , $t=455 \text{ Ma}$

### 3.3 微量元素及稀土元素

岩石稀土元素含量变化较大, $\Sigma \text{REE} = 180.64 \times 10^{-6} \sim 222.225 \times 10^{-6}$  (平均值为  $201.04 \times 10^{-6}$ ),轻、重稀土元素分异不明显( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 3.87 \sim 7.07$ ,平均值为 5.11)且轻稀土相对重稀土略有富集( $\Sigma \text{LREE}/\Sigma \text{HREE} = 4.19 \sim 6.64$ ,平均值为 5.30),轻稀土分异相对明显( $\text{La}_N/\text{Sm}_N = 2.17 \sim 2.90$ ,平均值为 2.56)而重稀土分异相对较弱( $\text{Ga}_N/\text{Yb}_N = 1.28 \sim 1.70$ ,平均值为 1.44),球粒陨石标准化配分曲线中所用样品体现出相似的轻稀土相对富集而重稀土平缓的右倾型分布模式(图 6a),显示有弱一中等程度负 Eu 异常( $\delta \text{Eu} = 0.53 \sim 0.58$ ,平均值为 0.55),指示岩浆在部分熔融过程中源区有斜长石的残留或岩浆在结晶过程中存在斜长石的分离结晶作用。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 6b),哈拉尔次花岗岩 4 件样品具有较一致的微量元素特征,整体表现为类似岛弧花岗岩的特征,即相对富集大离子亲石元素(LILE:Rb、Th),亏损高场强元素(HFSE:Nb、Ta、Sr、P、Ti),Zr、Hf 相对富集,而 Ba 相对于 Rb、Th 有明显的亏损,指示该花岗岩具有俯冲作用岛弧花岗岩的地球化学特征.Sr、Ba 及 Eu 的亏损可能指示源区斜长石呈结晶分离相或残留相存在,即岩浆结晶过程中存在斜长石的分离结晶作用或在熔融过程中斜长石没有耗尽;P 元素强烈亏损说明源区可能存在磷灰石的结晶分离作用;而 Ti 的

强烈亏损可能与分异演化过程中钛铁矿的分离结晶作用有关,同时也暗示岩浆物质来源于地壳,因为 Ti 不容易进入熔体而残留在源区;另外 Nb、Ta、Ti 元素的亏损可能与大陆地壳物质的混染有关,而 Ti 亏损更强烈可能与钛铁矿的分离结晶有关。

### 3.4 Sr-Nd 同位素

选自哈拉尔次花岗岩体 4 件样品的 Sr-Nd 同位素组成见表 3.计算时采用的年龄是本文新测得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 455 Ma.样品的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  (2.928 ~ 4.187)、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.725 822 ~ 0.732 172)变化较小,Sr 的初始值低(0.705 03 ~ 0.707 43),没有出现异常低的情况,所测结果可用于有关问题的讨论.样品的 Nd 同位素组成相对均一, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  为 0.128 8 ~ 0.148 8, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  为 0.512 357 ~ 0.512 519,Sm/Nd 比值为 0.21 ~ 0.25, $f_{\text{Sm/Nd}}$  变化于 -0.24 ~ -0.35,表明它们没有发生明显的 Sm、Nd 同位素分异,所测结果可以用于有关问题的讨论. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  (-2.0 ~ +0.5) 接近于 0,两阶段模式( $T_{\text{DM2}}$ ) 年龄为 1.15 ~ 1.35 Ga,显示其含有较多的壳源组分,其源区可能主要为一套中元古代的物质并有一定量幔源物质加入,这与区域上晚奥陶世花岗岩具有相似的 Sr-Nd 同位素组成(Wang *et al.*, 2009;王涛等,2009).



## 4 讨论

### 4.1 岩体的时代

本次研究对中阿尔泰构造带内的哈拉尔次花岗岩体的细粒正常花岗岩进行锆石 U-Pb 测年, 获得  $454 \pm 3$  Ma 的上交点年龄, 对  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄进行加权计算, 加权平均年龄为  $454.8 \pm 2.4$  Ma (MSWD=0.32). 所用测年锆石样品发育典型岩浆锆石生长韵律环带, 表现出典型岩浆成因锆石特征, 因此该年龄代表岩浆锆石的结晶年龄, 亦即哈拉尔次花岗岩体的年龄, 限定哈拉尔次花岗岩的时代为晚奥陶世.

### 4.2 岩石成因

岩石具有高硅、富碱、高钾 ( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  平均为 1.18)、低钛、低镁及低磷等地球化学特征, 铝饱和指数 (A/CNK) 平均为 1.05, CIPW 计算中刚玉分子含量大于 1, 指示哈拉尔次花岗岩属于高钾钙碱性过铝质花岗岩.

研究表明, Rb/Sr 比值能较好地记录源区物质的属性, 当  $\text{Rb}/\text{Sr} < 0.9$  时, 为 I 型花岗岩, 而  $\text{Rb}/\text{Sr} > 0.9$  时, 为 S 型花岗岩 (王德滋和刘昌实, 1993), 哈拉尔次花岗岩  $\text{Rb}/\text{Sr} = 1.00 \sim 1.42$ , 平均值 1.14, 显示 S 型花岗岩的特征, 这与  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$  和花岗岩 ACF 判别图解结论一致 (图 7a, 7b). 岩石具有低 Cr (平均为  $3.77 \times 10^{-6}$ )、Ni (平均为  $4.42 \times 10^{-6}$ ) 特征, 暗示其由受地壳混染的富集幔源岩浆形成的可能性很小 (Riley *et al.*, 2001). 另外, 样品 Rb/Nb 比值 ( $11.30 \sim 14.17$ , 平均为 12.92) 明显高于全球上地壳的 Rb/Nb 比值 4.5 (Taylor *et al.*, 1985), 进一步表明哈拉尔次花岗岩的形成与地壳物质部分熔融密切相关, 这与 Nb-Nb/Ta 图解判别结果一致 (图 8).

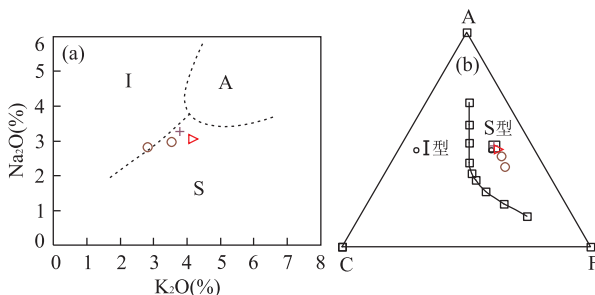


图 7 阿尔泰地区哈拉尔次花岗岩  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$  图解和 ACF 图解  
Fig.7  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$  diagram and ACF diagram for Halaer granites in Altay area  
据 Collins (1982)

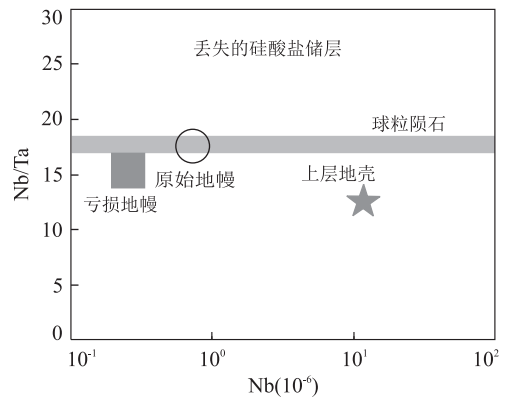


图 8 阿尔泰地区哈拉尔次花岗岩 Nb-Nb/Ta 图解  
Fig.8 Nb-Nb/Ta diagram for Halaer granites in Altay area  
据 Barth *et al.* (2000)

研究认为大量过铝质花岗岩只有泥砂质沉积岩类部分熔融可能形成, 不可能由基性源岩部分熔融产生 (Chappell and White, 1974; Vielzeuf and Montel, 1994). 过铝质 S 型花岗岩  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  主要依赖于斜长石/粘土比值,  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  小于 0.3 为泥质岩石的局部熔融, 大于 0.3 为杂砂岩的局部熔融 (Patino-Douce and Johnston, 1991; Skjerlie and Johnston, 1996). 同时, 有研究认为 Rb/Sr 大于 0.1、Rb/Ba 大于 0.3, 源岩为泥质岩 (Sylvester, 1998). 哈拉尔次花岗岩  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} = 0.11 \sim 1.35$  (平均为 1.03),  $\text{Rb}/\text{Sr} = 1.00 \sim 1.42$  (平均为 1.14),  $\text{Rb}/\text{Ba} = 0.30 \sim 0.71$  (平均为 0.43), 显示哈拉尔次花岗岩主要为杂砂岩的部分熔融形成的, 可能还有少量的泥质岩.

研究表明, 地壳部分熔融形成的强过铝质花岗岩熔体的不同特征能反映其源区的不同成分, 如由云母类脱水形成的熔体富含 Rb、Cs 并具有较高的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值特征, 而由角闪石脱水熔融形成的熔体富含 Na、Ca 并且具有较低的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值特征 (Altherr and Siebel, 2002; 赵永久等, 2007). 哈拉尔次花岗岩富集 Rb、Cs 并具有高钾低钠的特征, 指示可能与云母的源区脱水熔融有关. 实验研究认为, 白云母的脱水熔融只能产生少量的岩浆, 黑云母的脱水熔融能产生大量的岩浆, 而且变泥质岩类在水不饱和的条件下产生的过铝质熔体具有较高 Rb/Sr (3~6)、低 Sr/Ba (0.2~0.1) 的特征, 而在水饱和状态时产生的岩浆具有低 Rb/Sr (0.7~1.6)、高 Sr/Ba (0.5~1.6) 的特征 (Clemens and Vielzeuf, 1987; Harris and Inger, 1992; Stevens *et al.*, 1997). 哈拉尔次花岗岩具有低 Rb/Sr (平均值 1.14)、高 Sr/Ba (平均值 0.39) 的特征, 结合岩体源区高温熔融条

件和高钾的地球化学特征,指示花岗质熔体可能是在水饱和条件下由富含白云母和黑云母的含泥质杂砂岩脱水熔融形成。

花岗岩的 Nd 模式年龄反映了源区物质的平均地壳存留年龄,哈拉尔次花岗岩两阶段模式( $T_{DM2}$ )年龄为 1.15~1.35 Ga,表明其源区可能为一套中元古代的物质。岩石的 Nb/Ta(10.11~10.94,平均为 10.53)与原始地幔值(17.8)相差较大,而与平均地壳值(11)相近,表明岩石受地壳组分影响较大。岩石 Sr 初始值(0.705 03~0.707 43)比壳源花岗岩低, $\epsilon_{Nd}(t)$ (-2.0~+0.5)接近于 0,比壳源花岗岩高,Th/U 比值(平均 6.74)高于地壳平均值 3.8(Taylor and Mclennan, 1985),暗示成岩过程有地幔物质的加入。岩石高 Y 和 Yb 含量及高 Zr/Sm 比值(平均 27.58)暗示部分熔融位于石榴石稳定区之上,并且在较低的压力下发生的部分熔融。岩石的低 Sr、Eu、Ti、P 的负异常暗示哈拉尔次花岗岩源区有斜长石、钛铁矿及磷灰石的残留。

综上所述,哈拉尔次花岗岩可能由富含白云母和黑云母的含泥质杂砂岩在较低压力和较高温度下经历部分熔融形成,其源区有斜长石、钛铁矿和磷灰石的残留,同时幔源物质有一定的混入。

#### 4.3 构造环境及地质意义

古亚洲洋的演化研究近年来有了新的资料(王键等,2016)。近些年来,随着对阿尔泰造山带内不同时期花岗岩进行精细年代学和构造属性深入研究,认为古生代花岗岩主要发生在 460 Ma、410 Ma、380 Ma 和 265 Ma 四个主要岩浆事件峰期,其时间跨度长、岩石成因复杂,较完整地记录了早古生代以来的俯冲—碰撞—造山过程,其中 400 Ma 是主要

岩浆活动时期,并认为阿尔泰造山带是早古生代造山带,而不是晚古生代造山带(童英等,2007)。本文研究的哈拉尔次花岗岩是位于中阿尔泰构造带的早古生代早期(455 Ma)的岩浆活动物质记录,为阿尔泰造山带的构造演化提供新的依据。

过铝质花岗岩不仅可以形成于碰撞造山过程中的挤压构造环境,与加厚地壳的部分熔融有关,也可以形成于碰撞后与岩石圈伸展作用有关的张性环境,与岩石圈的拆沉或幔源岩浆的底侵作用有关(钟长汀等,2006)。岩石地球化学特征指示哈拉尔次花岗岩是由富含白云母和黑云母的含泥质杂砂岩在低压高温条件下部分熔融形成,那么导致部分熔融的诱因是什么?

阿尔泰造山带大面积发育早古生代晚期的花岗岩,如铁木尔特花岗岩(459 Ma)、阿巴宫岩体(462 Ma)、铁克列克岩体(462 Ma)、阿维滩岩体(400 Ma)、库尔提岩体(416 Ma)、可可托海岩体(409 Ma、411 Ma)、蒙库岩体(404 Ma)、切木尔切克岩体(462 Ma)、禾木岩体(466 Ma)及布尔津岩体(425 Ma)等,分布于不同构造带内,以南阿尔泰和中阿尔泰地区最为发育(王涛等,2010)。Wang *et al.* (2006)曾对阿尔泰造山带内早古生代的花岗岩进行过研究,认为这些花岗岩属于拉斑系列和钙碱性系列,且大多数都为 I 型花岗岩,地球化学及同位素特征表明这些花岗岩为陆缘弧背景下陆源与年轻幔源物质融合形成,俯冲碰撞过程开始于约 460 Ma;张亚峰等(2015)认为阿尔泰南缘可可托海地区中生代的阿拉尔花岗岩体为后碰撞造山向板内环境的转换阶段背景下,由含泥质的变质砂岩地壳熔融形成的 S 型花岗岩,侧面说明阿尔泰造山带在早古生代具

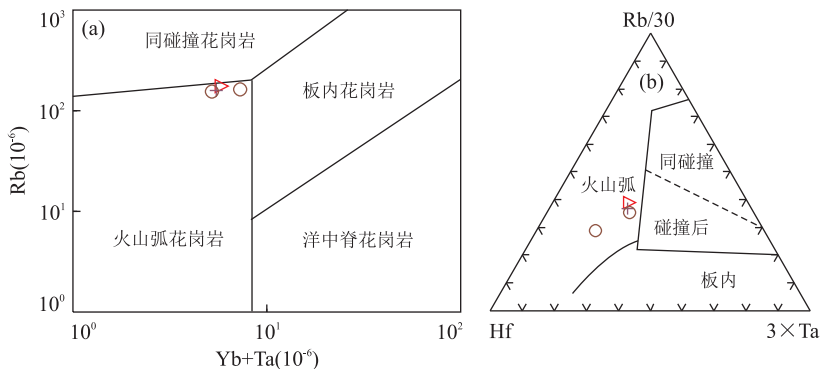


图 9 阿尔泰地区哈拉尔次花岗岩构造环境判别图解

Fig.9 Diagrams of the tectonic setting for Halaerqi granites in Altay area

图例如图 7.a.据 Pearce *et al.*(1984);b.据 Harris *et al.*(1986)

有俯冲的构造性质。哈拉尔次花岗岩是晚奥陶世岩浆活动的产物,出露于中阿尔泰构造带,同位素组成上与阿尔泰造山带内早古生代晚期花岗岩具有相似的特征,即具有接近 0 的  $\epsilon_{Nd}(t)$  和较老的 Nd 模式年龄,微量元素体现出活动大陆边缘陆缘弧特征,指示该时期古亚洲洋已经开始向北俯冲于阿尔泰微陆块之下。在构造环境判别图解中,哈拉尔次花岗岩均落入火山弧花岗岩区域(图 9)。上述不同时期的早古生代均具有火山弧花岗岩的特征,由于微量元素在其形成过程中因壳幔物质组分的贡献不同及岛弧演化不同阶段而体现出不同的特征,因此早古生代花岗岩表现为不同构造演化阶段的产物。哈拉尔次花岗岩大离子亲石元素和高场强元素含量均比较低,显示出初始弧岩岩浆的特征,这与前人关于阿尔泰造山带这一时期正处于俯冲—碰撞—造山早期阶段的认识一致(Wang *et al.*, 2006)。

因此笔者可以推测早古生代早期,古亚洲洋向北俯冲于阿尔泰微陆块之下,后期随着板块进一步俯冲,局部伸展减压以及异常地幔不均匀上升提供热量,导致中上地壳沉积物发生部分熔融并有少量的幔源物质混入,形成哈拉尔次花岗岩初始岩浆,经后期结晶分异和岩浆上升侵位形成大面积分布的早古生代晚期花岗岩。

## 5 结论

(1)哈拉尔次花岗岩体主要岩石类型有花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩,其中正长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $454.8 \pm 2.4$  Ma (MSWD=0.32),即形成于晚奥陶世。

(2)岩石具有高硅、富碱高钾( $K_2O/Na_2O > 1$ )、低钛、低镁及低磷等地球化学特征,铝饱和指数(A/CNK)平均为 1.05, CIPW 计算中刚玉分子含量大于 1,指示哈拉尔次花岗岩属于高钾钙碱性过铝质花岗岩。岩石具有明显的 Sr、Ti、P 亏损和 Nb、Ta 负异常,富集 Th、Rb 和轻稀土元素,有显著的 Eu 负异常,同位素具有接近 0 的  $\epsilon_{Nd}(t)$  和较老的 Nd 模式年龄。

(3)地球化学特征暗示哈拉尔次花岗岩可能由富含白云母和黑云母的含泥质杂砂岩在较低压力和较高温度下经历部分熔融形成,其源区有斜长石、钛铁矿和磷灰石的残留,同时幔源物质有一定的混入。

(4)哈拉尔次花岗岩形成于活动大陆边缘挤压背景下,局部伸展减压以及异常地幔不均匀上升提

供热量,导致中上地壳沉积物发生部分熔融并有少量的幔源物质混入,形成哈拉尔次花岗岩。

## References

- Altherr, R., Siebel, W., 2002. I-Type Plutonism in a Continental Back-Arc Setting: Miocene Granitoids and Monzonites from the Central Aegean Sea, Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(4): 397–415. doi:10.1007/s00410-002-0352-y
- Anderson, T., 2002. Correction of Common Pb in U-Pb Analyses that do not Report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79. doi:10.1016/S0009-2541(02)00195-X
- Barth, M.G., McDonough, W.F., Rudnick, R.L., 2000. Tracking the Budget of Nb and Ta in the Continental Crust. *Chemical Geology*, 165(3/4): 197–213. doi:10.1016/S0009-2541(99)00173-4
- Boynnton, W.V., 1984. Geochemistry of the Rare Earth Element: Meteorite Studies. In: Henderson, P., ed., *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 63–114.
- Chai, F.M., Dong, L.H., Yang, F.Q., et al., 2010. Age, Geochemistry and Petrogenesis of Tiemierte Granites in the Kelang Basin at the the Southern Margin of Altay, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 377–386 (in Chinese with English abstract).
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 1974. Two Contrasting Granite Types. *Pacific Geology*, 8: 173–174.
- Chen, Y.C., Ye, Q.T., Mou, C.L., et al., 1996. The Metallogenic Conditions and Metallogenic Prediction of Ashele Copper-Zinc Ore. Geological Publishing House, Beijing, 1–85 (in Chinese).
- Clemens, J.D., Vielzof, D., 1987. Constraints on Melting and Magma Production in the Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 86: 287–306. doi:10.1016/0012-821X(87)90227-5
- Collins, W.J., 1982. Nature and Origin of a Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200. doi:10.1007/BF00374895
- Dong, L.H., Qu, X., Zhao, T.Y., et al., 2012. Magmatic Sequence of Early Palaeozoic Granitic Intrusions and Its Tectonic Implications in North Altay Orogen, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2307–2316 (in Chinese with English abstract).
- Han, B.F., He, G.Q., 1991. The Tectonic Nature of Devonian Volcanic Rocks Belt of the Southern Altay. *Xinjiang Geological Science*, 3: 89–100 (in Chinese).
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A., Tindle, A.G., 1986. Geochemi-

- cal Characteristics of Collision-Zone Magmatism. *Geological Society, London, Special Publications*, 19(5): 67—81. doi: 10.1144/GSL.SP.1986.019.01.04
- Harris, N. B. W., Inger, S., 1992. Trace Element Modelling of Pelite-Derived Granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(1): 46—56. doi: 10.1007/BF00310881
- He, G. Q., Han, B. F., Yue, Y. J., et al., 1990. Structural Zoning and Crustal Evolution in the Altay Orogenic Belt, China. *Xinjiang Geological Science*, 2(9): 9—20 (in Chinese).
- Jahn, B. M., Wu, F., Chen, B., 2000a. Massive Granitoid Generation in Central Asia: Nd Isotopic Evidence and Implication for Continental Growth in the Phanerozoic. *Epi-sodes*, 23(2): 82—92.
- Jahn, B. M., Wu, F., Hong, D., 2000b. Important Crustal Growth in the Phanerozoic: Isotopic Evidence of Granitoids from East-Central Asia. *Journal of Earth System Science*, 109(1): 5—20. doi: 10.1007/BF02719146
- Li, C. F., Chu, Z. Y., Guo, J. H., et al., 2015. A Rapid Single Column Separation Scheme for High Precision Sr-Nd-Pb Isotopic Analysis in Geological Samples Using Thermal Ionization Mass Spectrometry. *Analytical Methods*, 7(11): 4793—4802. doi: 10.1039/C4AY02896A
- Li, C. F., Li, X. H., Li, Q. L., et al., 2012. Rapid and Precise Determination of Sr and Nd Isotopic Ratios in Geological Samples from the Same Filament Loading by Thermal Ionization Mass Spectrometry Employing a Single-Step Separation Scheme. *Analytical Chimica Acta*, 727(10): 54—60. doi: 10.1016/j.aca.2012.03.040
- Liu, F., Cao, F., Zhang, Z. X., et al., 2014. Chronology and Geochemistry of the Granite near the Keketuohai No. 3 Pegmatite in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F., Yang, F. Q., Mao, J. W., et al., 2009. Study on Chronology and Geochemistry for Abagong Granite in Altay Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 1416—1425 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Xiao, W. J., Wang, K. Z., et al., 2003. Neoproterozoic-Paleozoic Tectonostratigraphy, Magmatic Activities and Tectonic Evolution of Eastern Xinjiang, NW China. In: Mao, J. W., Goldfarb, R. J., Seltman, R., et al., eds., Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan. IAGOD Guidebook Series 10 CERCAM/NHM, London, 31—74.
- Liu, J. L., Sun, F. Y., Zhang, Y. J., et al., 2016. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotope of Nankouqian Granitic Intrusion in Qingyuan Region, Liaoning Province. *Earth Science*, 41(1): 55—66 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., 1990. Petrogenetic Epochs and Peculiarities of Genetic Types of Granitoids in the Altai Mts, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 14(1): 43—56 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Gao, S., Diwu, C. R., et al., 2007. Simultaneous In-Situ Determination of U-Pb Age and Trace Elements in Zircon by LA-ICP-MS in 20  $\mu\text{m}$  Spot Size. *Chinese Science Bulletin*, 52(2): 228—235 (in Chinese).
- Ludwig, K. R., 2001. Isoplot/Ex Version 2.49; A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 1—56.
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Bulletin of the Geological Society of America*, 101(5): 635—643. doi: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635
- Patchett, P. J., Samson, S. D., 2003. Rudnick Treatise of Geochemistry 3. Elsevier Pergamon, Oxford, 321—348.
- Patino-Douce, A. E., Johnston, A. D., 1991. Phase Equilibria and Melt Productivity in the Pelitic System: Implications for the Origin of Per-Aluminous Granitoids and Aluminous Granulites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2): 202—218. doi: 10.1007/BF00310707
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. doi: 10.1093/Petrology/25.4.956
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonuarea, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63—81. doi: 10.1007/BF00384745
- Riley, T. R., Leat, P. T., Pankhurst, R. J., et al., 2001. Origins of Large Volume Rhyolitic Volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by Crustal Melting. *Journal of Petrology*, 42(6): 1043—1065. doi: 10.1093/Petrology/42.6.1043
- Rubatto, D., 2002. Zircon Trace Element Geochemistry: Partitioning with Garnet and the Link between U-Pb Ages and Metamorphism. *Chemical Geology*, 184: 123—138. doi: 10.1016/S0009-2541(01)00355-2
- Sengor, A. M., Natalin, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Paleozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299—307.
- Shen, X. M., Zhang, H. X., Ma, L., 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating for Jieerkuduke Acidic Dykes in the Southern Altay Range. *Xinjiang Geology*, 31(3): 157—161 (in Chinese with English abstract).
- Skjerlie, K. P., Johnston, A. D., 1996. Vapour-Absent Melting



- from 10 to 20 kbar of Crustal Rocks that Contain Multiple Hydrous Phases; Implications for Anatexis in the Deep to Very Deep Continental Crust and Active Continental Margins. *Journal of Petrology*, 37 (3): 661 — 691. doi:10.1093/Petrology/37.3.661
- Stevens, G., Clemens, J. D., Droop, G. R. T., 1997. Melt Production during Granulite-Facies Anatexis: Experimental Data from “Primitive” Metasedimentary Protolith. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128(4): 352 — 370. doi:10.1007/s004100050314
- Sun, G. H., Li, J. Y., Yang, T. N., et al., 2009. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Two Linear Granite Plutons in Southern Altay Mountains and Its Tectonic Implications. *Geology in China*, 36(5): 976 — 987 (in Chinese with English abstract).
- Sun, M., Long, X. P., Cai, K. D., et al., 2009. Early Paleozoic Ridge Subduction in the Chinese Altai: Insight from the Abrupt Change in Zircon Hf Isotopic Compositions. *Science China Earth Sciences*, 39(7): 935 — 948 (in Chinese).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Process. In: Sunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins, Geological Society, London, Special Publication*, 42(1): 313 — 345.
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1): 29 — 44. doi:10.1016/S0024 — 4937(98)00024 — 3
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford Press, Blackwell, 1 — 312.
- Tong, Y., 2006. *Geochronology, Origin of the Late Paleozoic Granitoids from the Altai Orogen in China and Their Geological Significance (Dissertation)*. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 12 — 101 (in Chinese with English abstract).
- Tong, Y., Wang, T., Hong, D. W., et al., 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).
- Vielzeuf, D., Montel, J. M., 1994. Partial Melting of Metagreywackes. Part I: Fluid-Absent Experiments and Phase Relationships. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117(4): 375 — 393. doi:10.1007/BF00307272
- Wang, D. Z., Liu, C. S., Shen, W. Z., et al., 1993. The Contrast between Tonglu I-Type and Xiangshan S-Type Clastic Porphyritic Lava. *Acta Petrologica Sinica*, 9(1): 44 — 54 (in Chinese).
- Wang, D. H., Chen, Y. C., Xu, Z. G., et al., 2002. *Metallogenic Series and Regularities in Altai Metallogenic Province*. Atomic Energy Press, Beijing, 114 — 185 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. Y., Xu, P. C., 1983. Magmatites in the Altai Area, Xinjiang and Its Relation to Mineralization. *Northwest Geology*, (1): 8 — 21 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2016. Age, Petrogenesis and Tectonic Implications of Permian Hornblendite in Turgurige, Urad Zhongqi, Inner Mongolia. *Earth Science*, 41(5): 792 — 808 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Hong, D. W., Jahn, B. M., et al., 2006. Timing, Petrogenesis and Setting of Paleozoic Syn-Orogenic Intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the Tectonic Evolution of an Accretionary Orogen. *The Journal of Geology*, 114(6): 735 — 751. doi:10.1086/507617
- Wang, T., Hong, D. W., Tong, Y., et al., 2005. Zircon U-Pb SHRIMP Age and Origin of Post-Orogenic Lamazhao Granitic Pluton from Altai Orogen: Its Implications for Vertical Continental Growth. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 640 — 650 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Tong, Y., Jahn, B. M., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Altai No. 3 Pegmatite, NW China and Its Implications for the Origin and Tectonic Setting of the Pegmatite. *Ore Geology Reviews*, 32(1): 325 — 336. doi:10.1016/j.oregeorev.2006.10.001
- Wang, T., Jahn, B. M., Kovach, V. P., et al., 2009. Nd-Sr Isotopic Mapping of the Chinese Altai and Implications for Continental Growth in the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 110(1): 359 — 372. doi:10.1016/j.lithos.2009.02.001
- Wang, T., Tong, Y., Li, S., et al., 2010. Spatial and Temporal Variations of Granitoids in the Altai Orogen and Their Implications for Tectonic Setting and Crustal Growth: Perspectives from Chinese Altai. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 595 — 618 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Wang, X. X., Tian, W., et al., 2009. North Qinling Paleozoic Granite Associations and Their Variation in Space and Time: Implications for Orogenic Processes in the Orogens of Central China. *Science China Earth Sciences*, 39(7): 947 — 971 (in Chinese).
- Wang, Z. G., Zhao, Z. H., Zou, T. R., 1998. *Geochemistry of Granitoids in Altai, Xinjiang*. Science Press, Beijing, 1 — 152 (in Chinese).
- Windley, B. F., Krner, A., Guo, J. H., et al., 2002. Neoproterozoic to Palaeozoic Geology of the Altai Orogen, NW

- China; New Zircon Age Data and Tectonic Evolution. *The Journal of Geology*, 110(6): 719—737. doi: 10.1086/342866
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Zircon Minerageny and Its Restriction on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604 (in Chinese).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Badarch, G., et al., 2004. Palaeozoic Accretionary and Convergent Tectonics of the Southern Altai: Implications for the Growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 161(3): 339—342. doi: 10.1144/0016-764903-165
- Yang, F. Q., Mao, J. W., Yan, S. H., et al., 2008. Geochronology, Geochemistry and Geological Implications of the Mengku Synorogenic Plagiogranite Pluton in Altay, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 485—499 (in Chinese with English abstract).
- Yang, G., Xiao, L., Wang, G. C., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry and Zircon Lu-Hf Study of Granites in Western Section of Xiemisitai Area, Western Junggar. *Earth Science*, 40(3): 548—562 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, F., Zhou, T. F., Yue, S. C., 2001. The Ages and the Genetic Types of the Granites in the Nurt Area, Altay. *Xinjiang Geology*, 19(4): 292—296 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Geostandards & Geoanalytical Research*, 28(3): 353—370. doi: 10.1111/j.1751-908X.2004.tb00755.x
- Zeng, Q. S., Chen, G. H., Wang, H., et al., 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, Y. F., Lin, X. W., Guo, Q. M., et al., 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of Aral Granitic Plutons in Koktokay Area in the Southern Altay Margin and Their Source Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 339—354 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. X., Chai, F. M., Wang, L. F., et al., 2014. Geochemical Characteristics and Its Significance of Biotite Monzogranite in the Keyinbulake Copper-Zinc Deposit at the Southern Margin of Altay, Xinjiang. *Geoscience*, 28(3): 461—471 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. J., Yuan, C., Zhou, M. F., et al., 2007. Geochemistry and Petrogenesis of Laojungou and Mengtonggou Granites in Western Sichuan, China: Constraints on the Nature of Songpan-Ganzi Basement. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 995—1006 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. H., Wang, Z. G., Zou, T. R., 1993. The REE, Isotopic Compositons of O, Pb, Sr and Nd Diagenetic Model of Granitoids in Altay Region. In: Tu, G. Z., ed., New Improvement of Solid Geosciences in Northern Xinjiang. Science Press, Beijing, 239—266 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, C. T., Deng, J. F., Wu, Y. P., et al., 2006. Geochemical Characteristics and Tectonic Significations of Paleoproterozoic Strongly Peraluminous Granitoids in the Central Segment of the Northern Margin of the North China Craton. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 389—397 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, G., Zhang, Z. C., Luo, S. B., et al., 2007. Confirmation of High-Temperature Strongly Peraluminous Mayin'ebo Granites in South Margin of Altay, Xinjiang: Age, Geochemistry and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1909—1920 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 柴凤梅,董连慧,杨富全,等,2010.阿尔泰南缘克朗盆地铁木尔特花岗岩体年龄、地球化学特征及成因.岩石学报, 26(2): 377—386.
- 陈毓川,叶庆同,牟传龙,等,1996.阿舍勒铜锌矿带成矿条件和成矿预测.北京:地质出版社,1—85.
- 董连慧,屈迅,赵同阳,等,2012.新疆北阿尔泰造山带早古生代花岗岩类侵入序列及其构造意义.岩石学报, 28(8): 2307—2316.
- 韩宝福,何国琦,1991.阿尔泰山南缘泥盆纪火山岩带的大地构造性质.新疆地质科学, 3: 89—100.
- 何国琦,韩宝福,岳永君,等,1990.中国阿尔泰造山带的构造分区和地壳演化.新疆地质科学, 2(9): 9—20.
- 刘锋,曹峰,张志欣,等,2014.新疆可可托海近 3 号脉花岗岩成岩时代及地球化学特征研究.岩石学报, 30(1): 1—15.
- 刘锋,杨富全,毛景文,等,2009.阿尔泰造山带阿巴宫花岗岩体年代学及地球化学研究.岩石学报, 25(3): 1416—1425.
- 刘金龙,孙丰月,张雅静,等,2016.辽宁省清原县南口前岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素.地球科学, 41(1): 55—66.
- 刘伟,1990.中国新疆阿尔泰花岗岩的时代及成因类型特征.大地构造与成矿学, 14(1): 43—56.
- 柳小明,高山,第五春荣,等,2007.单颗粒锆石的 20  $\mu\text{m}$  小斑束原位微区 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和微量元素的同时测定.科学通报, 52(2): 228—235.

- 沈晓明, 张海祥, 马林, 2013. 阿尔泰山南缘杰尔库杜克酸性岩脉 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年. 新疆地质, 31(3): 157-161.
- 孙桂华, 李锦轶, 杨天南, 等, 2009. 阿尔泰山脉南部线性花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 中国地质, 36(5): 976-987.
- 孙敏, 龙晓平, 蔡克人, 等, 2009. 阿尔泰山早古生代末期洋中脊俯冲: 锆石 Hf 同位素组成突变的启示. 中国科学: 地球科学, 39(7): 935-948.
- 童英, 2006. 阿尔泰山带晚古生代花岗岩年代学、成因及其地质意义(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院, 12-101.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等, 2007. 中国阿尔泰山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.
- 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等, 1993. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比. 岩石学报, 9(1): 44-54.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等, 2002. 阿尔泰山成矿省的成矿系列及成矿规律. 北京: 原子能出版社, 114-185.
- 王广耀, 许培春, 1983. 新疆阿尔泰山地区岩浆岩的特征及其与成矿的关系. 西北地质, (1): 8-21.
- 王键, 孙丰月, 李碧乐, 等, 2016. 内蒙乌拉特中旗图古日格二叠纪角闪岩年龄、岩石成因及构造背景. 地球科学, 41(5): 792-808.
- 王涛, 洪人卫, 童英, 等, 2005. 中国阿尔泰山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义. 岩石学报, 21(3): 640-650.
- 王涛, 童英, 李舫, 等, 2010. 阿尔泰山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰山为例. 岩石矿物学杂志, 29(6): 595-618.
- 王涛, 王晓霞, 田伟, 等, 2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示. 中国科学: 地球科学, 39(7): 949-971.
- 王中刚, 赵振华, 邹天人, 1998. 阿尔泰山花岗岩类地球化学. 北京: 科学出版社, 1-152.
- 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. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 杨富全, 毛景文, 闫升好, 等, 2008. 新疆阿尔泰山蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. 地质学报, 82(4): 485-499.
- 杨钢, 肖龙, 王国灿, 等, 2015. 西准噶尔谢米斯台西段花岗岩午代学、地球化学、锆石 Lu-Hf 同位素特征及大地构造意义. 地球科学, 40(3): 548-562.
- 袁峰, 周涛发, 岳书仓, 2001. 阿尔泰山诺尔特地区花岗岩形成时代及成因类型. 新疆地质, 19(4): 292-296.
- 曾乔松, 陈广浩, 王核, 等, 2007. 阿尔泰山冲乎尔盆地花岗岩质类的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报, 23(8): 1921-1932.
- 张亚峰, 蔺新望, 郭岐明, 等, 2015. 阿尔泰山南缘可可托海地区阿拉尔花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其地质意义. 地质学报, 89(2): 339-354.
- 张志欣, 柴凤梅, 王丽芬, 等, 2014. 新疆阿尔泰山南缘克因布拉克铜锌矿区黑云母二长花岗岩地球化学特征及意义. 现代地质, 28(3): 461-471.
- 赵永久, 袁超, 周美夫, 等, 2007. 川西老君沟和孟通沟花岗岩的地球化学特征、成因机制及对松潘-甘孜地体基底性质的制约. 岩石学报, 23(5): 995-1006.
- 赵振华, 王中刚, 邹天人, 1993. 阿尔泰山花岗岩类型与成岩模型的 REE 及 O、Pb、Sr、Nd 同位素组成依据. 见: 涂光炽主编, 新疆北部固体地球科学新进展. 北京: 科学出版社, 239-266.
- 钟长汀, 邓晋福, 武永平, 等, 2006. 华北克拉通北缘中段古元古代强过铝质花岗岩地球化学特征及其构造意义. 地质通报, 25(3): 389-397.
- 周刚, 张招崇, 罗世宾, 等, 2007. 新疆阿尔泰山南缘玛因鄂博高温型强过铝花岗岩: 年龄、地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 23(8): 1909-1920.