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*

柴凤梅[1,2] 董连慧[3] 杨富全[1] 刘锋[1] 耿新霞[1] 黄承科[4]

CHAI FengMei[1,2], DONG LianHui[3], YANG FuQuan[1], LIU Feng[1], GENG XinXia[1] and HUANG ChengKe[4]

1. 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037
2. 新疆大学地质与勘查工程学院,乌鲁木齐 830046
3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局,乌鲁木齐 830000
4. 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局706队,阿尔泰 830065

1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
2. *College of Geology & Prospecting Engineering Program, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*
3. *Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi* 830000, *China*
4. *No.* 706 *Geological Team of the Xinjiang Nonferrous Geoexploration Bureau, Altay* 830065, *China*

2009-07-17 收稿,2009-11-12 改回.

Chai FM, Dong LH, Yang FQ, Liu F, Geng XX and Huang CK. 2010. Age, geochemistry and petrogenesis of Tiemierte granites in the Kelang basin at the southern margin of Altay, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2):377 – 386

Abstract SHRIMP U-Pb zircon ages and geochemical data of whole rocks are reported for Tiemierte biotite granite in the Kelang basin at the southern margin of Altay orogenic belt. The zircons with well-defined oscillatory zoning from granite samples yielded mean $^{206}Pb/^{238}U$ ages of 459 ± 4.9Ma, which is a good evidence to explain the magmatic event during the Early Paleozoic at the southern margin of Altay. The granites are high in the concentrations of SiO_2 (71.92% to 76.58%), total alkali ($Na_2O + K_2O$) (7.09% to 8.11%) and Al_2O_3 (13.05% to 14.74%), and low in the concentrations of P_2O_5 (< 0.14%) and MgO + FeO (< 5%). In addition, they are enriched in potassic ($K_2O/Na_2O = 1.1$ to 1.62) with high A/CNK values (1.13 to 1.34), and low Al_2O_3/TiO_2 (< 100) ratios and high CaO/Na_2O (> 0.3) ratios, which are defined as high-K calalkaline high-temperature strongly peraluminious granites. They display noticeable negative anomaly of Ti, P, Sr, Ba and δEu (0.33 to 0.53), obvious enrichment of LREE and Th, U, Pb characteristics. They have near-zero or negative $\varepsilon_{Nd}(t)$ values (−1.43 to −0.98) and high Sr isotopic compositions (initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ values = 0.7018 ~ 0.7099) with corresponding to Nd model ages of 1.2 ~ 1.3Ga, indicating a mixture of old components and juvenile mantle material. The granitic melts were probably derived from dehydration melting of a biotite-bearing pelite within middle to upper crust (above the granet stability field) upper 875℃ temperature and water-undersaturated condition, with limited assimilation of mantle material. Conbined with the tectonic evolution of the southern magin of the Altay, we suggest that the Tiemierte gratites in the Kelang basin probably have been generated in initial continental arc environment by increasing heat from decreasing pressure in local extentional, ascending of anomalous mantle and heat flow under compressional environment.

Key words Biotite granites; SHRIMP zircon U-Pb dating; Geochemistry; Southern margin of the Altay

摘 要 铁木尔特黑云母花岗岩出露于阿尔泰造山带南缘克朗盆地北西侧,岩体主要为黑云母花岗岩。锆石的SHRIMP U-Pb定年结果表明该岩体结晶年龄为459 ± 4.9Ma。岩石具有高的SiO_2(71.92% ~ 76.58%)和Al_2O_3(12.92% ~ 14.55%)含量,富碱($K_2O + Na_2O$ = 7.09% ~ 8.11%)、高钾(K_2O/Na_2O = 1.1 ~ 1.62)、低P_2O_5(< 0.14%)和MgO + FeO(< 5%)含量,强

* 本文受国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411302)、"十一五"国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B02-01 和 2006BAB07B02-05)、国家自然科学基金项目(40672065)、国土资源大调查项目(1212010786006)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(K0808)的联合资助.

第一作者简介:柴凤梅,女,1971年生,副教授,主要从事岩石学、矿床学的教学与研究工作,E-mail: cfmjjs@126.com

过铝质(ACNK=1.13~1.34);富集 LREE 和 Th、U、Pb,贫 Ba、P、Sr、Ti、Nb,呈现明显的 Eu 负异常(δEu=0.33~0.53);并具有低的 Al_2O_3/TiO_2(<100)比值和高的 CaO/Na_2O(>0.3)比值。以上特征表明该岩体属高钾钙碱性高温型强过铝花岗岩。同时岩石具有低的 Sr 初始值($^{87}Sr/^{86}Sr$=0.701727~0.709951)和相对高的 ε_{Nd}(459Ma)(-1.43~-0.98)值,两阶段 Nd 模式年龄较为均一(t_{2DM}=1.2~1.3Ga)。岩体的原始岩浆可能是富含白云母和黑云母的变泥质岩在大于 875℃的条件下脱水熔融的产物,在部分熔融过程中有磷灰石、斜长石、钛铁矿等矿物的残留,并混入少量的幔源物质。结合阿尔泰南缘的区域地质背景综合分析,推测岩体形成于俯冲作用的初期,可能是在挤压背景下由于局部伸展减压以及异常地幔和深部热流不均匀上升提供的热影响发生的部分熔融产生。

关键词 黑云母花岗岩;SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄;地球化学;阿尔泰南缘

中图法分类号 P588.121;P597.3

1 引言

阿尔泰造山带是中亚造山带的重要组成部分,因其独特的地质构造特征和丰富的矿产资源一直是人们关注的热点地区之一。同时,阿尔泰造山带出露大面积的古生代花岗岩(约23000km^2,占基岩出露面积的40%),岩石类型复杂(王涛等,2005;曾乔松等,2007),在时间、空间上与有关矿产关系密切。因此,对阿尔泰造山带内的花岗岩年代学格架、岩石成因及其形成的构造背景进行研究,对了解阿尔泰地区造山作用和大陆地壳的形成与演化以及与成矿的关系具有重要意义。前人对阿尔泰地区的花岗岩的形成时代、岩石学特征、地球化学特征、岩石成因、构造环境以及成矿作用等方面进行了研究,并取得了丰硕的成果(赵振华等,1993;王中刚等,1998;王涛等,2005;Wang *et al.*, 2006;张招崇等,2006;童英等,2007;周刚等,2007)。近年来随着高精度定年方法的应用,在中国境内的阿尔泰造山带识别出了大量的早-中古生代花岗岩(Wang *et al.*, 2006;Yuan *et al.*, 2007; 曾乔松等,2007;童英等,2007; Sun *et al.*, 2008;刘锋等,2009),这极大地促进了阿尔泰造山带地质演化研究工作的进展。尤其是早古生代奥陶纪火山弧花岗岩的发现(Wang *et al.*, 2006;刘锋等,2009),使得对阿尔泰造山带的构造演化有了新的认识,为深入研究阿尔泰造山带南缘的构造演化提供了新的线索。

本文旨在通过对阿尔泰南缘克朗盆地铁木尔特早古生代奥陶纪花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征的研究,探讨其岩石成因、源区及动力学机制问题,为进一步探讨阿尔泰南缘早古生代的构造演化提供新的约束资料。

2 地质概况和岩相学特征

阿尔泰造山带位于中亚造山带的西南部,呈北西-南东向横贯于中、俄、哈、蒙四国。构造上处于西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块接合部位。带内主体构造格架呈北西-南东向,主要断裂有额尔齐斯断裂、玛尔卡库里断裂、克兹加尔断裂、冲乎尔断裂、阿巴宫-库尔特断裂、巴寨断裂、卡拉先格尔断裂等,将阿尔泰造山带大致分为北、中、南3个块体(Li *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2006)或者6个构造块体(windley *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2008)。研究区位于南阿尔泰块体(Li *et al.*, 2003)或者琼库尔-阿巴宫块体(windley *et al.*, 2002)内的克朗盆地,即阿尔泰市北西的巴寨断裂与阿巴宫-库尔提断裂之间的区域。盆地内出露的地层有中上志留统库鲁姆提群变质岩;上志留统一下泥盆统康布铁堡组变质中酸性火山熔岩-火山碎屑岩-陆源碎屑岩-碳酸盐岩,其与上覆地层呈断裂接触;中泥盆统阿勒泰镇组浅-中等变质的浅海及滨海相碎屑岩-基性火山岩-碳酸盐岩。盆地内已发现有铁木尔特铁矿、阿巴宫铁矿、铁木尔特铅锌矿、阿巴宫铅锌矿、恰夏铅锌矿、恰夏铁矿、萨热阔布金矿等(图1)。早古生代(Wang *et al.*, 2006;童英等,2007;刘锋等,2009)和晚古生代花岗岩(王涛等,2005)均有出露。

铁木尔特岩体出露于克朗盆地东北部,与志留纪地层呈断层接触(图2),且接触处未见明显变形。岩体为中细粒黑云母花岗岩,呈灰白色,具有典型的花岗结构,块状构造。主要矿物有钾长石(45%~50%)、斜长石(15%~20%)、石英(20%~25%)、黑云母(5%~10%)和少量白云母(5%)。其中钾长石为微斜长石,粒度大小不等,一般1.8mm左右,最大达4.5mm。卡钠复合双晶法测定斜长石牌号 An=35,为中长石,呈半自形板状,多具细密聚片双晶,个别见简单双晶和卡钠复合连晶,大小约1~1.8mm。黑云母多呈片状,一般约0.18mm,多呈聚合体分布。白云母呈细长片状产出。主要副矿物有磁铁矿、锆石、榍石、磷灰石。

3 锆石 U-Pb 年代学

用于锆石定年的样品均为采自铁木尔特岩体天然露头的新鲜样品。样品的破碎和锆石的挑选工作由廊坊市科大技术服务公司实验室完成。定年所用样品靶、阴极发光(CL)图像及锆石 U、Th 和 Pb 同位素组成分析均在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的 SHRIMPII 上进行,离子束斑直径为25~30μm。详细分析流程和原理参考文献(宋彪等,2002)。每测定3个样品点,测定一次标准锆石 TEMORA(年龄417Ma),用于元素分馏校正。数据采用 Ludwig (2001)的 Isoplot 软件处理,单次测量数据点的误差为1σ。普通铅根据实测^{204}Pb校正,年龄值选用$^{206}Pb/^{238}U$年

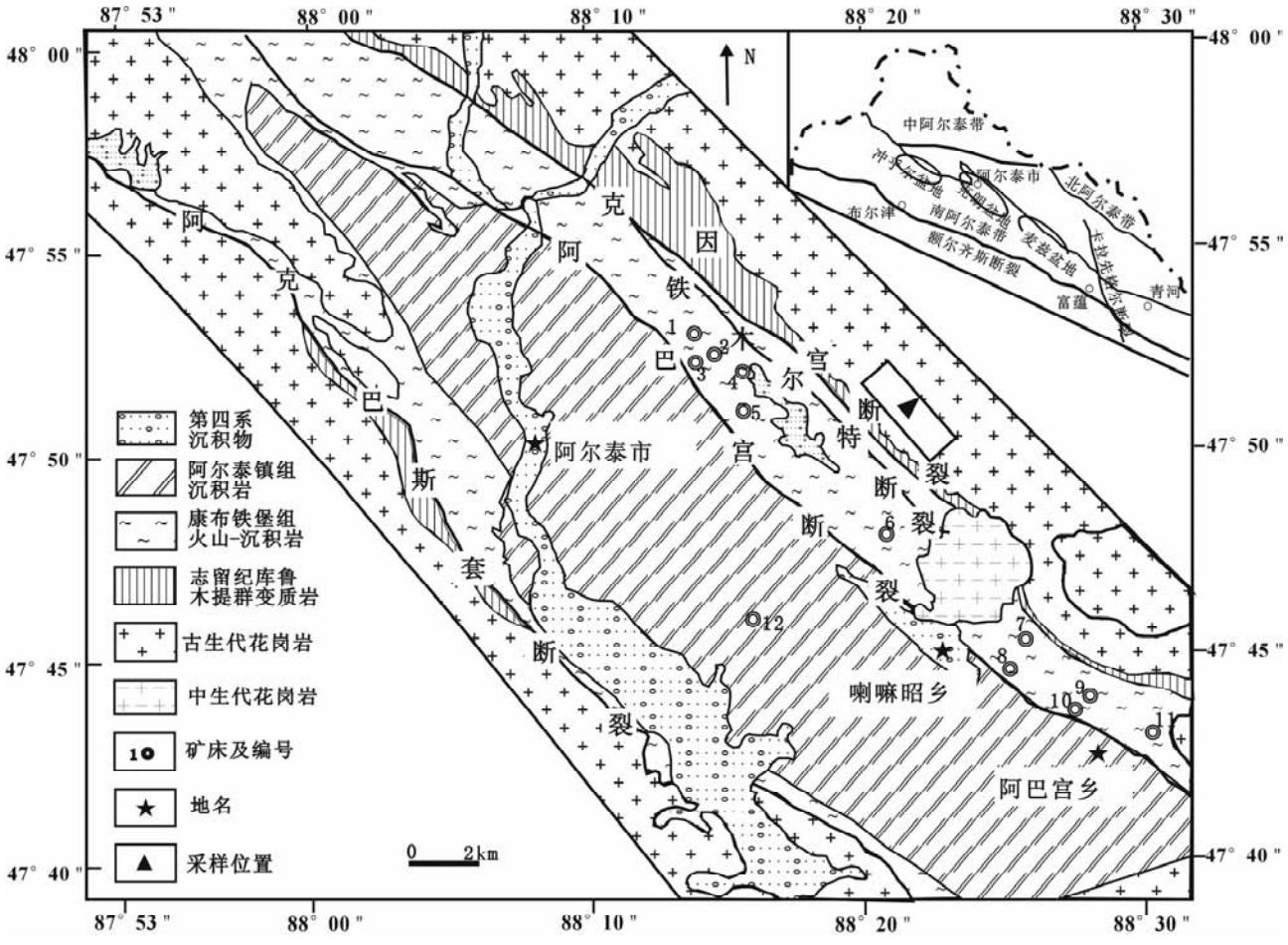


图1 阿尔泰造山带南缘区域地质简图及克朗盆地地质略图(据 Windley *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; 王京彬等,1998;有色地质勘查局706队,2003①,修改)

1-恰夏铁矿;2-恰夏铅锌矿;3-萨热阔布金矿;4-恰夏铜矿;5-铁木尔特铅锌矿;6-铁木尔特铁矿;7-小铁山铅锌矿;8-小铁山铁矿;9-阿巴宫铅锌矿;10-阿巴宫铁矿;11-塔拉特铅锌矿;12-红墩铅锌矿

Fig. 1 Regional geological sketch maps of the southern margin of the Altay orogenic belt and geological sketch map of the Kelang Basin (modified from Windley *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 1998)

1-Qiaxia iron deposit; 2-Qiaxia Pb-Zn deposit; 3-Sarekuobu gold deposit; 4-Qiaxia copper deposit; 5-Tiemierte Pb-Zn deposit; 6-Tiemierte iron deposit; 7-Xiaotieshan Pb-Zn deposit; 8-Xiaotieshan iron deposit; 9-Abagong Pb-Zn deposit; 10- Abagong iron deposit; 11-Talate Pb-Zn deposit; 12-Hongdun Pb-Zn deposit



图2 铁木尔特花岗岩与围岩接触关系照片

Fig. 2 Field photographs for Tiemierte granites and its contact with the country rocks

① 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局706队. 2003. 新疆阿尔泰市铁木尔特地区区域地质报告

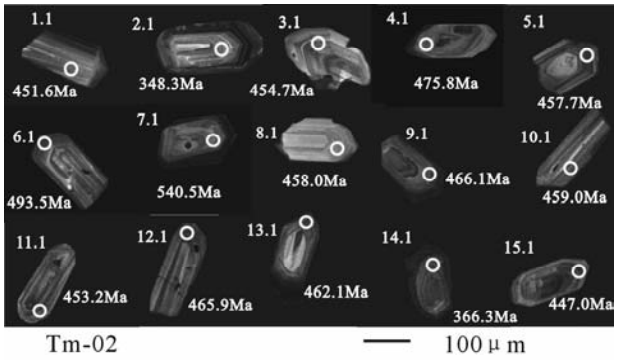


图 3 克朗盆地铁木尔特花岗岩中代表性锆石的阴极发光图

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircons from the Tiemierte granite pluton in the Kelang basin

龄,其加权平均值具有 95% 的置信度。

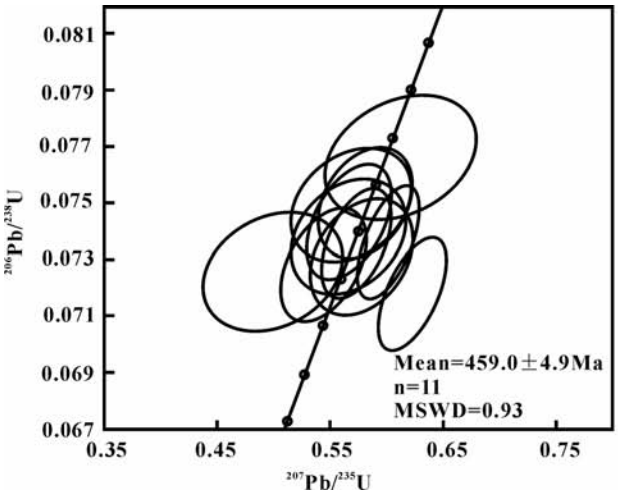
测试的锆石颗粒多呈半自形-自形短柱状及双锥状晶体,晶棱及晶面清楚,粒度较小,长轴多变化于 150 ~ 200μm 之间,长短轴比一般为 1.5∶1 ~ 2∶1 左右。在阴极发光照片中,大多数锆石具有清晰的岩浆振荡环带结构(图 3)。15 粒锆石的 SHRIMP U-Pb 分析结果列于表 1。可以看出,除个别点(6.1 和 7.1)外,大多数锆石的 Th 和 U 含量较低,分别介于 56×10^{-6} ~ 270×10^{-6} 和 205×10^{-6} ~ 665×10^{-6} 之间,其 Th/U 的值分别为 0.18 ~ 0.54,显示了岩浆锆石的特点(Rubatto, 2002),与它们的形态特征一致。15 个分析结果中的 11 个年龄变化范围较小,在误差范围内有一致的 $^{207}Pb/^{206}Pb$, $^{206}Pb/^{238}U$ 和 $^{207}Pb/^{235}U$ 比值,其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的加权平均值为 459 ± 4.9Ma(MSWD = 0.93)(图 4),代表了岩体的形成年龄。另有 2 个年龄较老的锆石(540.5 ± 8.5Ma 和 493.5 ± 8Ma),具有岩浆震荡环带,Th 和 U 含量及 Th/U 比值较高,可能代表了岩体捕获或继承的早期岩浆锆石。测点 2.1 显示了明显的 Pb 丢失,其 Th/U 比较高(0.66),而且有很高的普通 Pb(2.98%),其 U-Pb 年龄明显偏年轻(348.3 ± 6Ma)。测点 14.1 具有较高的 U 含量(1114×10^{-6})和相对低的 Th/U 比(0.16),造成年龄偏低(366.3 ± 6Ma)的原因尚待进一步研究。

4 地球化学

铁木尔特岩体的主量、微量元素和 Sr、Nd 同位素测定在中科院地质与地球物理研究所国家重点实验室完成,结果列于表 2 和表 3。主量元素采用熔片 XRF 方法(国家标准 GB/T 14506.28—1993 监控)在 X 荧光光谱仪 3080E 上测定。稀土和微量元素含量采用 Finnigan MAT 公司生产的双聚焦高分辨 ICP-MS 测定(标准 DZ/T 0223—2001 监控)。Sr、Nd 同位素组成采用 MAT-262 同位素质谱仪测定,测试时采用标样 NBS-987 的 $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.710239 \pm 0.00009$ (2σ),标样 Jndi-1 的 $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512109 \pm 0.000011$ (2σ)。Sr 和 Nd 同位素比值质量分馏校正采用 $^{86}Sr/^{87}Sr = 0.1194$ 和 $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$。全程实验室本底控制在 Rb、Sr 为 1 ~ 2ng,Sm、Nd 为 5 ~ 7ng。详细分析方法见 Qiao(1998)。岩石地球化学数据处理及作图采用路远发的 Geokit 软件(路远发,2004)。

4.1 主量元素

由表 2 可以看出,岩体富硅(SiO_2 = 70.98% ~ 75.83%)和铝(Al_2O_3 = 12.92% ~ 14.55%),全碱含量中等($K_2O + Na_2O$ = 7.09% ~ 8.11%),相对富钾(K_2O/Na_2O = 1.11 ~ 1.62);低镁(MgO = 0.83% ~ 1.35%)、钙(CaO = 0.2% ~ 1.47%)、铁($Fe_2O_3^T$ = 1.5% ~ 2.73%)和磷(P_2O_5 < 0.14%)。在 SiO_2-K_2O 图解上位于高钾钙碱性岩区(图 5)。铝饱和指数较高(A/CNK = 1.13 ~ 1.34),在强过铝质花岗岩的划分标准之内(A/CNK > 1.1),在 A/CNK-A/NK 图解中位



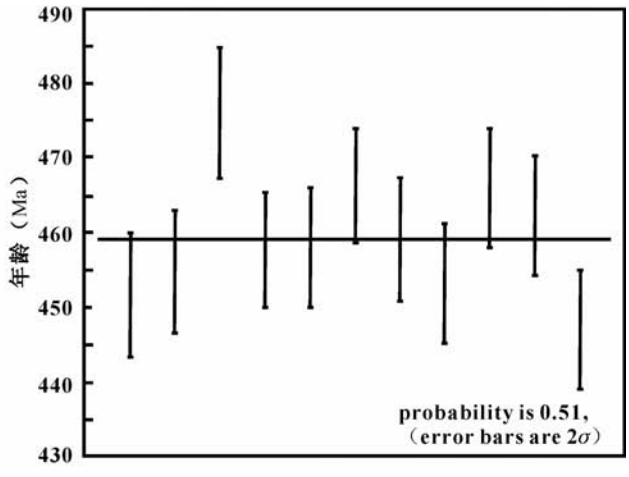


图 4 克朗盆地铁木尔特花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 SHRIMP zircon U-Pb concordia diagrams of the Tiemierte granite pluton in the Kelang basin

表 1　克朗盆地铁木尔特花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 1　SHRIMP zircon U-Pb dating data of the Tiemierte granite pluton in the Kelang basin

测点	含量和比值						同位素比值						表面年龄(Ma)					
	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	$^{232}Th/^{238}U$	$^{206}Pb_c$(%)	$^{206}Pb^*$ ($\times10^{-6}$)		$^{206}Pb^*/^{238}U$		$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$		$^{207}Pb^*/^{235}U$		$^{206}Pb/^{238}U$		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{208}Pb/^{232}Th$	
							测值	±%	测值	±%	测值	±%	测值	±%	测值	±%	测值	±%
1.1	257	105	0.42	1.31	16.2		0.0726	1.9	0.0499	8.0	0.499	8.2	451.6	8.3	188	190	358	32
2.1	706	453	0.66	2.98	34.7		0.05552	1.8	0.0597	6.2	0.457	6.5	348.3	6.0	591	130	256	19
3.1	244	101	0.43	0.88	15.5		0.0731	1.9	0.0573	4.9	0.577	5.3	454.7	8.2	503	110	438	24
4.1	205	56	0.28	1.19	13.7		0.0766	1.9	0.0579	6.9	0.612	7.2	475.8	8.8	527	150	449	34
5.1	729	188	0.27	0.29	46.2		0.0736	1.7	0.0565	3.2	0.573	3.6	457.7	7.6	471	71	461	26
6.1	1275	191	0.16	0.12	87.2		0.0796	1.7	0.05683	1.5	0.623	2.3	493.5	8.0	485	34	478	22
7.1	5241	2642	0.52	1.05	398		0.0875	1.6	0.05655	1.7	0.682	2.3	540.5	8.5	474	37	114	10
8.1	528	94	0.18	0.30	33.5		0.0736	1.8	0.0592	2.4	0.601	3.0	458.0	8.0	573	53	460	35
9.1	665	270	0.42	0.51	43.1		0.0750	1.7	0.0561	4.3	0.580	4.7	466.1	7.8	455	96	425	26
10.1	316	150	0.49	0.87	20.2		0.0738	1.8	0.0557	5.6	0.566	5.9	459.0	8.2	439	120	432	26
11.1	435	216	0.51	0.72	27.4		0.0728	1.8	0.0542	4.2	0.545	4.5	453.2	8.0	381	94	450	19
12.1	506	187	0.38	0.80	32.9		0.0749	1.8	0.0550	6.0	0.569	6.3	465.9	8.0	413	130	430	30
13.1	382	198	0.54	0.89	24.6		0.0743	1.8	0.0553	3.9	0.566	4.3	462.1	8.0	423	88	438	19
14.1	1114	172	0.16	0.46	56.2		0.05846	1.7	0.0558	2.4	0.450	2.9	366.3	6.0	446	53	391	25
15.1	318	121	0.39	0.17	19.6		0.0718	1.9	0.0628	2.7	0.622	3.3	447.0	8.0	702	57	543	20

注：Pb_c 和 Pb^* 分别表示普通 Pb 和放射性 Pb 含量；普通 Pb 用测定的 ^{204}Pb 校正

表 2　克朗盆地铁木尔特花岗岩的主量(wt%)、微量元素($\times10^{-6}$)组成

Table 2　Major (wt%) and trace ($\times10^{-6}$) element data for Tiemierte granites in the Kelang basin

样品号	TM01	TM03	TM04	TM05	TM06	TM07	TM07P
SiO_2	74.17	70.98	71.93	72.79	75.83	73.11	73.07
TiO_2	0.22	0.38	0.37	0.36	0.16	0.34	0.34
Al_2O_3	13.83	14.55	14.33	13.57	12.92	13.55	13.46
$Fe_2O_3^T$	1.83	2.71	2.73	2.70	1.50	2.65	2.66
MnO	0.03	0.05	0.06	0.06	0.02	0.05	0.04
MgO	0.88	1.08	0.83	0.77	0.51	1.35	1.32
CaO	0.20	0.80	1.47	1.37	0.27	0.50	0.52
Na_2O	3.23	3.05	3.41	3.35	3.49	3.03	3.06
K_2O	4.50	4.95	3.83	3.72	4.26	3.96	3.95
P_2O_5	0.07	0.13	0.11	0.11	0.07	0.11	0.11
LOI	0.76	0.78	0.52	0.54	0.62	0.90	0.84
Total	99.72	99.47	99.59	99.34	99.65	99.54	99.36
A/CNK	1.32	1.24	1.16	1.14	1.20	1.34	1.32
A/NK	1.37	1.41	1.48	1.43	1.26	1.47	1.46
Sc	9.11	10.63	9.96	9.71	7.24	8.86	8.85
V	14.25	35.08	36.80	33.85	10.99	29.80	30.64
Cr	4.84	10.94	11.47	10.64	2.04	9.36	9.79
Co	2.98	5.18	5.46	5.09	2.39	4.53	4.67
Ni	4.24	9.78	8.09	9.09	2.49	9.81	9.00
Cu	1.06	4.08	14.34	10.58	2.00	2.64	2.90
Zn	19.22	30.72	49.11	47.26	12.39	29.46	26.85
Ga	17.79	17.14	16.48	15.98	15.19	15.10	15.34
Rb	186	171	136	132	159	134	135
Sr	57.3	85.1	114	107	64.8	66.9	67.6
Y	49.22	41.09	37.52	35.20	40.10	39.68	
Zr	138	155	159	153	126	149	159
Nb	14.24	12.37	12.18	11.49	12.29	10.84	11.21
Mo	0.06	0.07	0.18	0.20	0.10	0.05	0.04
Ba	370	658	474	456	387	396	405
Hf	4.92	4.97	5.06	4.69	4.47	4.77	5.21
Ta	1.31	1.20	1.16	1.09	1.65	1.10	1.16
Pb	16.70	21.61	28.70	27.52	15.73	18.31	18.30
Th	18.45	14.90	16.21	14.04	14.59	15.43	16.00
U	2.32	2.48	1.91	1.69	2.26	2.40	2.53
La	33.12	33.18	23.71	21.03	23.90	28.49	28.56
Ce	68.86	68.26	60.43	44.10	53.50	60.00	59.84
Pr	8.84	8.82	7.05	5.72	6.50	7.64	7.65
Nd	34.68	34.48	27.08	21.88	25.64	29.89	30.48
Sm	7.51	7.59	5.98	4.73	5.98	6.71	6.69
Eu	0.83	1.20	1.01	0.82	0.72	1.01	1.04
Gd	7.90	7.20	5.70	4.60	6.04	6.61	6.78
Tb	1.44	1.20	1.00	0.83	1.07	1.08	1.10
Dy	8.36	7.41	6.44	5.55	6.94	6.95	6.95
Ho	1.84	1.47	1.38	1.25	1.48	1.44	1.43
Er	5.04	4.12	3.98	3.61	4.15	4.01	4.02
Tm	0.77	0.59	0.61	0.56	0.62	0.59	0.61
Yb	5.15	3.77	3.85	3.54	3.91	3.75	3.87
Lu	0.73	0.55	0.58	0.52	0.58	0.56	0.57
∑REE	185.1	179.9	148.8	118.8	141.0	158.7	159.6
L/H	4.93	5.84	5.32	4.80	4.69	5.35	5.30
$(La/Yb)_N$	4.61	6.32	4.42	4.26	4.38	5.45	5.30
$(La/Sm)_N$	2.85	2.82	2.56	2.87	2.58	2.74	2.76
$(Gd/Yb)_N$	1.27	1.58	1.22	1.07	1.28	1.46	1.45
δEu	0.33	0.49	0.52	0.53	0.36	0.46	0.47

注：$A/CNK = Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$，其中 A，C，N，K 为摩尔数

表 3 克朗盆地铁木尔特花岗岩的 Sr-Nd 组成

Table 3 Representative Sr-Nd isotope compositions for Tiemierte granites from in the Kelang basin

样品号	TM01	TM03	TM04	TM05	TM06	TM07
Rb($\times 10^{-6}$)	193.32	186.92	154.35	147.32	175.10	150.36
Sr($\times 10^{-6}$)	47.57	81.38	115.78	108.27	58.14	59.24
$^{87}Rb/^{86}Sr$	11.847638	6.671032	3.868715	3.948256	8.767155	7.375976
$^{87}Sr/^{86}Sr$	0.78248	0.74398	0.73391	0.73406	0.76607	0.74894
(2σ)	0.000011	0.000011	0.000011	0.000012	0.000010	0.000010
$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$	0.7067	0.7013	0.7092	0.7088	0.7100	0.7017
Sm($\times 10^{-6}$)	8.62	7.51	5.82	4.62	5.73	6.43
Nd($\times 10^{-6}$)	37.34	32.62	25.00	20.30	23.43	27.39
$^{147}Sm/^{144}Nd$	0.139618	0.139137	0.140681	0.137537	0.147946	0.142033
$^{143}Nd/^{144}Nd$	0.512406	0.512415	0.512396	0.512387	0.512422	0.512393
(2σ)	0.000010	0.000011	0.000012	0.000012	0.000011	0.000015
$\varepsilon_{Nd}(t)$	−1.18	−0.98	−1.43	−1.43	−1.43	−1.57
t_{2DM}(Ga)	1.29	1.27	1.31	1.31	1.30	1.32
$f_{Sm/Nd}$	−0.29	−0.29	−0.28	−0.30	−0.25	−0.28

注:球粒陨石均一储库(CHUR)值为:$^{87}Rb/^{86}Sr = 0.0827$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7045$, $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1967$, $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512638$。$\lambda_{Rb} = 1.39 \times 10^{-11}\,year^{-1}$, $\lambda_{Sm} = 6.54 \times 10^{-12}\,year^{-1}$ (Steiger and Jäger, 1977; Lugmair and Marti, 1978), $t = 459Ma$

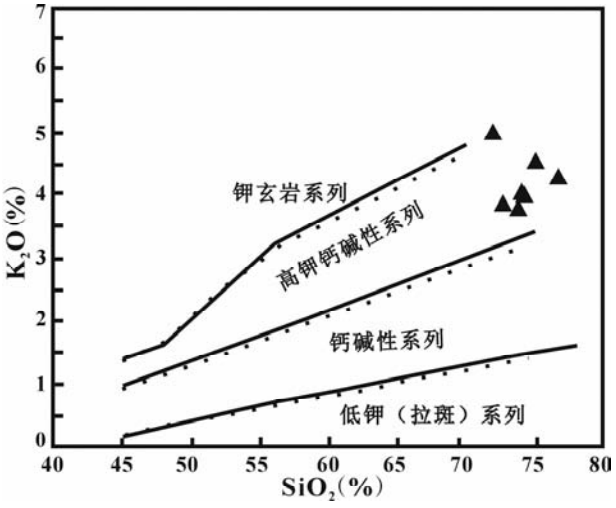


图 5 克朗盆地铁木尔特花岗岩 SiO_2-K_2O 图解(据 Rickwood, 1989)

Fig. 5 Whole-rock SiO_2 versus K_2O diagram of the Tiemierte granite pluton in the Kelang basin (after Rickwood, 1989)

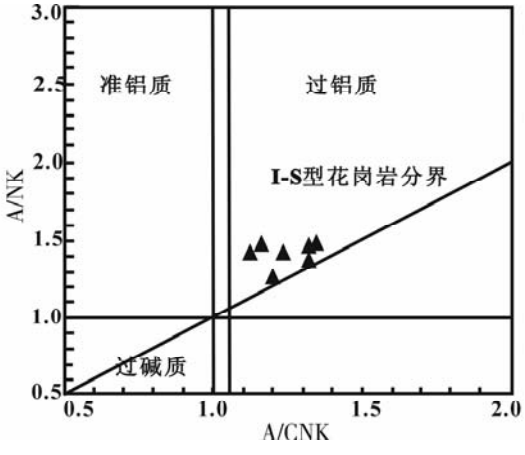


图 6 铁木尔特花岗岩 A/NK-A/CNK 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 6 A/NK vs. A/CNK plot of Tiemierte granite pluton (after Maniar and Piccoli, 1989)

于过铝质岩区(图 6),但较一般的强过铝质花岗岩,其 Al_2O_3 含量偏低。

4.2 微量元素

岩石的高场强元素(HFSE,如 Th、U、Nb、Ta、Zr 和 Hf)含量较高,Th 为 $14.04 \times 10^{-6} \sim 18.45 \times 10^{-6}$, U 为 $1.69 \times 10^{-6} \sim 2.53 \times 10^{-6}$,Zr 为 $138.4 \times 10^{-6} \sim 159.3 \times 10^{-6}$, Hf 为 $4.47 \times 10^{-6} \sim 5.21 \times 10^{-6}$, Pb 为 $15.7 \times 10^{-6} \sim 28.7 \times 10^{-6}$,但 Nb ($10.84 \times 10^{-6} \sim 14.24 \times 10^{-6}$)与 Ta ($1.09 \times 10^{-6} \sim 1.65 \times 10^{-6}$)的含量相对较低,Nb/Ta 比值较高(7.5 ~ 1.08);Sr 的含量明显偏低,为 $57.28 \times 10^{-6} \sim 114.24 \times 10^{-6}$。岩石还具有高的 Yb($3.54 \times 10^{-6} \sim 5.15 \times 10^{-6}$)及 Y($35.2 \times 10^{-6} \sim 49.22 \times 10^{-6}$)和低的 Cr($2.03 \times 10^{-6} \sim 11.47 \times 10^{-6}$)及 Ni ($2.49 \times 10^{-6} \sim 9.80 \times 10^{-6}$)。在原始地幔标准化蛛网图中(图 7a),总体显示了较为一致的分布模式,Ti、P、Sr、Ba 呈现明显的负异常,Th、U、K、Pb、Zr、Hf 的正异常。岩石稀土元素总量高,变化不大,其 ∑REE 介于 $118.8 \times 10^{-6} \sim 185.1 \times 10^{-6}$之间;轻稀土相对富集(LREE/HREE = 4.7 ~ 5.8,$(La/Yb)_N$ = 4.3 ~ 6.32);轻稀土较重稀土分馏明显($(La/Sm)_N$ 介于 2.56 ~ 2.87 之间,$(Gd/Yb)_N$ 值介于 1.07 ~ 1.58 之间)。在球粒陨石标准化配分图解中(图 7b),所有样品体现了相似的轻稀土富集重稀土平缓的右倾型 REE 配分模式,并因明显的负铕异常($\delta Eu = 0.33 \sim 0.53$)而呈"V"型谷状。

4.3 Sr-Nd 同位素

岩体 6 个样品的 Sr-Nd 同位素组成列于表 3。计算时采

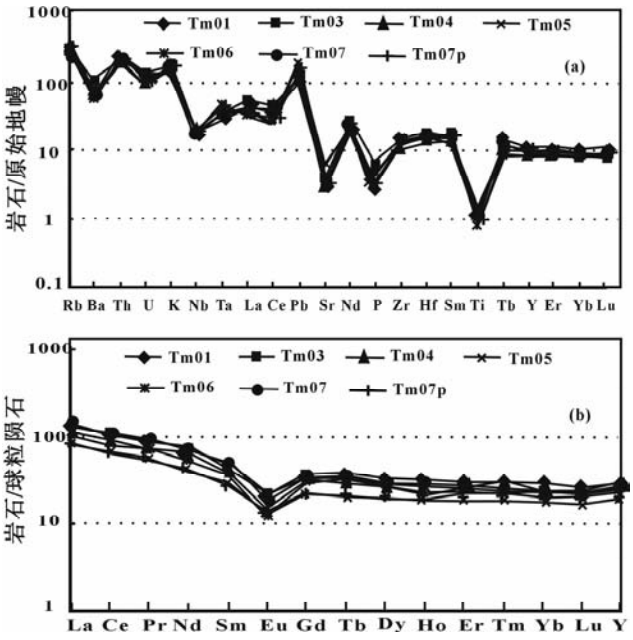


图 7 铁木尔特花岗岩微量元素原始地幔配分模式图(a)和稀土元素配分模式图(b)(原始地幔和球粒陨石值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Plots of primitive mantle-normalized trace elements patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) for the Tiemuerte granite pluton in the Kelang basin (primitive mantle-normalized values and Chondrite-normalized values are from Sun and McDonough, 1989)

用的年龄是新测得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 459Ma。样品的 $^{87}Rb/^{86}Sr$(3.87 ~ 11.85),$^{87}Sr/^{86}Sr$(0.733907 ~ 0.782480)变化较大,Sr 的初始值低(0.701285 ~ 0.709951),暗示它们的 Rb-Sr 同位素体系可能受到了扰动。它们的 Nd 同位素组成相对均一,$^{147}Sm/^{144}Nd$ 为 0.1375 ~ 0.1479,$^{143}Nd/^{144}Nd$ 为 0.512387 ~ 0.512422,Sm/Nd 比值为 0.227 ~ 0.245,$f_{Sm/Nd}$ 变化于 -0.25 ~ -0.28 之间,表明它们没有发生明显的 Sm、Nd 同位素的分异。t_{2DM}两阶段模式年龄范围集中分布在 1.27 ~ 1.32Ga,说明其源区可能为一套区域上的中元古代的物质。$\varepsilon_{Nd}(t)$(-1.43 ~ -0.98)接近于零,这与中亚造山带具有高的正 $\varepsilon_{Nd}(t)$花岗岩特征不同,但与产于寒武纪基底或微陆块及其周边的花岗岩特征相似(童英等,2007)。

5 讨论

5.1 岩石成因

目前,对于花岗质岩体的形成主要有幔源岩浆的结晶分异作用,混合岩化作用和地壳岩石的深熔作用等观点(路凤香和桑隆康,2002)。花岗岩的地球化学特征主要受源岩特征、部分熔融程度、温度、压力等方面的制约(张旗等,2008)。

铁木尔特花岗岩中见有黑云母和白云母组合,富 SiO_2、富碱高钾($K_2O > Na_2O$),贫 FeO、MgO 和 TiO_2,CaO 含量低,并具强过铝质花岗岩特征(A/CNK > 1.1,CIPW 计算中刚玉分子含量(1.81% ~ 3.51%)大于 1),因此,铁木尔特花岗岩应属高钾钙碱性强过铝质花岗岩。实验研究结果表明,强过铝质花岗岩主要是富含铝的地壳物质部分熔融的产物(Green, 1995),其 Al_2O_3/TiO_2 比值可以反映部分熔融时的温度,$Al_2O_3/TiO_2 > 100$ 指示熔融温度小于 875℃(称为高压型),$Al_2O_3/TiO_2 < 100$ 指示熔融温度大于 875℃(称为高温型)(Sylvester,1998)。铁米尔特花岗岩样品的 $Al_2O_3/TiO_2 < 100$(介于 39 ~ 78 之间),表明熔融温度大于 875℃,属高温型强过铝质花岗岩。

研究表明,不同成分的地壳物质部分熔融形成的强过铝质花岗岩熔体具有不同的特征(Altherr and Siebel, 2002),如由云母类脱水熔融形成的熔体富含 Rb、Cs 并具有较高的 K_2O/Na_2O 比值;由角闪石脱水熔融形成的熔体富含 Na、Ca 并具有较低的 K_2O/Na_2O 比值(赵永久等,2007),铁木尔特花岗岩高钾与低钠钙的特性,暗示可能与含云母的源区脱水熔融有关。岩体的 Ba 相对于 Th、Rb 亏损明显,Nd 的两阶段模式年龄为 1.27 ~ 1.32Ga,体现了成熟度高的陆壳岩石的特征(马昌前等,2004)。另有研究表明,SiO_2 含量在 67% ~ 77%之间的强过铝质花岗岩,其 CaO/Na_2O 比值对源区的成分具有很好的指示意义,$CaO/Na_2O > 0.3$ 表明源区为砂岩、正变质岩,$CaO/Na_2O < 0.3$ 指示源区为泥质岩(Sylvester, 1998)。铁木尔特花岗岩体大多数样品的 $CaO/Na_2O < 0.3$(0.06 ~ 0.26),两个样品的 $CaO/Na_2O < 0.3$(分别为 0.43 和 0.40),在 $CaO/(MgO + FeO^T)$ 与 $Al_2O_3/(MgO + FeO^T)$ 关系

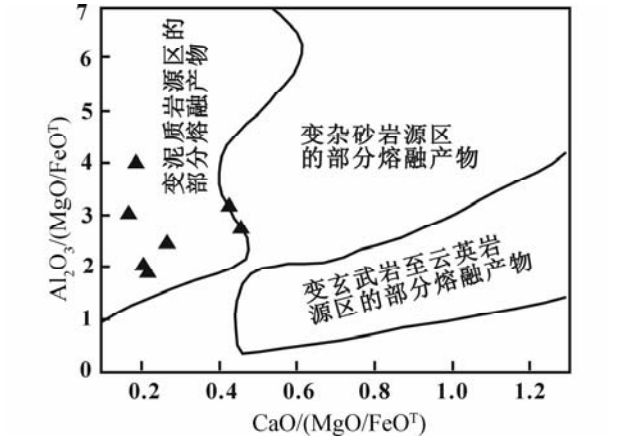


图 8 铁木尔特岩体 $CaO/(MgO + FeO^T)$-$Al_2O_3/(MgO + FeO^T)$关系图(据 Altherr *et al.*, 2000)

Fig. 8 $CaO/(MgO + FeO^T)$-$Al_2O_3/(MgO + FeO^T)$ diagram for the Tiemierte granites (after Altherr *et al.*, 2000)

图上,大部分分布于变泥质岩区,2 个样品位于变泥质岩与变质杂砂岩的重叠区(图 8),表明了源岩主要为成熟度高的泥质岩,可能也有少量的砂岩或正变质岩;此外,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够产生高达

40%的岩浆,而花岗岩从源区分离出来的临界熔融比例为30% ~40%,而且变泥质岩类在水不饱和时产生的过铝质熔体具有高的 Rb/Sr(3 ~6)、低的 Sr/Ba(0.2 ~0.1)比值,反之,在水饱和状态时产生的岩浆具有低的 Rb/Sr(0.7 ~1.6)和高 Sr/Ba(0.5 ~1.6)特征(李鹏春等,2005 及参考文献)。铁木尔特花岗岩具有高的 Rb/Sr(1.19 ~3.25)和低的 Sr/Ba 比值(0.13 ~0.24),结合岩体源区高的熔融温度和高钾的特点,表明花岗质熔体可能是在水不饱和条件下由富含白云母和黑云母的泥质岩脱水熔融形成。

花岗岩的 Nd 模式年龄代表着源区物质的平均地壳存留年龄,铁木尔特花岗岩样品 Nd 的两阶段模式年龄(t_{2DM})集中分布在 1.27 ~1.32Ga 之间,故推断其源区可能为一套中元古代物质。岩石的 Nb/Ta 与 Zr/Hf 基本保持不变,分别为 7.45 ~10.8 和 28.1 ~32.5,且与原始地幔的相应值 17.8 与 37(McDonough and Sun,1995)相差较大,与地壳的相应值 11 和 33(Taylor and Mclenann,1985)接近,表明岩石受地壳组分影响较大。然而,其 Sr 的初始值(0.702 ~0.709 之间)比壳源花岗岩低,$\varepsilon_{Nd}(t)$(-1.43 ~ -0.98)接近 0,比壳源花岗岩高,Th/U 比值(6.0 ~8.5)高于地壳平均值 3.8(Taylor and Mclenann,1985),表明成岩过程中有幔源物质的加入。铁木尔特花岗岩样品具有高的 Y 和 Yb 含量以及高的 Zr/Sm(18.43 ~32.26)比值,表明部分熔融位于石榴石稳定区之上(Defant *et al.*, 2002),并且是在较低的压力下发生的部分熔融,因为对于有黑云母参与的部分熔融,在较高的压力下残留相中会出现石榴石(刘四海等,2008)。另外,岩体的 CaO 含量极低,具有 Sr 和 Eu 的负异常、低的 Al/Ga 比值以及 Ti、P 的负异常,暗示铁木尔特花岗岩源区残留有富钙斜长石、钛铁矿和磷灰石,因为 Ti 在角闪石、黑云母中的平均分配系数较高,P 在磷灰石和独居石中分配系数较高,Sr 和 Eu 在斜长石中的分配系数较高,尤其在偏铝质的酸性岩中 Sr 在斜长石、磷灰石中分配系数最大(周红升等,2008),相对于 Ga,Al 更易进入钙长石的结构(刘四海等,2008)。

综上所述,铁木尔特花岗岩可能为富含白云母和黑云母的变泥质岩在较低压力和较高的温度条件下经部分熔融形成,源区残留有富钙的斜长石、钛铁矿和磷灰石等,同时熔体中混有部分幔源物质。

5.2 地质意义

阿尔泰造山带南缘古生代的构造演化模式一直是研究的热点,存在着是被动大陆边缘环境(韩宝福和何国琦,1991;陈毓川等,1996)还是活动大陆边缘(童英等,2007;杨富全等,2008;刘锋等,2009)环境的争议;并且随着近年来对阿尔泰造山带内不同时期、成因有别的花岗岩的深入研究,认为古生代花岗质岩浆活动主要发生在 460Ma,410Ma,380Ma 和 265Ma 的较长的时间范围内,其中 400Ma 是花岗岩的主要成岩时期,并提出阿尔泰造山带为早古生代造山带而不是晚古生代造山带的观点(Wang *et al.*, 2006;童英等,2007;曾乔松等,2007)。本研究中的铁木尔特花岗岩为早古生代早期的岩浆活动产物,为阿尔泰造山带的构造演化研究提供了新依据。

前已述及,铁木尔特花岗岩主要是富含黑云母的源岩(变泥质沉积物和新生陆壳)经高温(>875℃)部分熔融的产物,那么是什么因素导致源区部分熔融? 前人大量研究结果表明,过铝花岗岩不仅可以形成于碰撞造山过程中的挤压性构造环境,与加厚地壳的熔融有关(如澳大利亚拉克伦造山带(LFB),喜马拉雅造山带);也可以形成于碰撞后与岩石圈伸展作用相关的张性构造环境,与岩石圈的拆沉或幔源岩浆的底侵作用有关(如法国中央地块的海西期二云母淡色花岗岩和德国地区的海西期碰撞晚期的过铝质花岗岩)(钟长汀等,2006)。

铁木尔特花岗岩与阿巴宫岩体和铁列克岩体同属中晚奥陶世(分别为 459 ±4.9Ma,462 ±10Ma,462 ±3.6Ma)岩浆活动的产物;同位素上具有与阿尔泰造山带内早古生代晚期的花岗岩(如阿维滩岩体、库尔提岩体、可可托海岩体、琼库尔岩体、哈纳斯岩体、蒙库岩体等(Wang *et al.*, 2006;童英等,2007;杨富全等,2008))相似的特征,即均具有接近于 0 的 $\varepsilon_{Nd}(t)$(-1.43 ~ -0.98)值和 Nd 模式年龄远高于岩体的形成年龄;微量元素上体现了贫 Zr 和 Hf,明显亏损 Ti、P、Sr、Ba,具有 Nb、Ta 的负异常和显著的 Eu 负异常,富集 Th、U、Pb 和轻稀土元素的活动大陆边缘上陆缘弧特征(Wang *et al.*, 2006;刘锋等,2009);这些早古生代岩体在 Pearce *et al.*(1984)构建的花岗岩构造环境判别图解(图略)上均位于"火山弧"花岗岩区,说明阿尔泰造山带南缘在奥陶纪时期处于俯冲环境(Wang *et al.*, 2006)。这些不同时代的花岗岩可能为构造演化不同阶段的产物,因为火山弧区花岗岩的 LILE、HFSE 以及 HFSE/LILE 的比值与其形成过程中壳幔物质组分的贡献以及岛弧演化不同阶段相关(张成立等,2007)。铁木尔特花岗岩体低的 LILE 和 HFSE 含量表明可能处于初始弧时期,这与前人关于这一时期正处于阿尔泰造山带发展的俯冲-碰撞造山的早期阶段的认识一致(Wang *et al.*, 2006)。此外,阿尔泰南缘地区早古生代时期的地热梯度及热流值较高,并有地震波速 <8km/s 的异常地幔存在(曾乔松等,2007)。因此推测铁木尔特花岗岩可能是在挤压环境的背景中局部伸展减压以及异常地幔和深部热流不均匀上升提供的热量,由中上地壳沉积物发生部分熔融并可能混入少量的幔源物质形成。

6 结论

(1)铁木尔特岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 459 ±4.9Ma,表明为中晚奥陶世岩浆活动的产物。

(2)岩石具有白云母和黑云母的矿物组合,高硅(SiO_2 >72%)、高钾(K_2O/Na_2O >1.1)、低铁和镁($MgO + Fe_2O_3 + TiO_2$ <5%),高 A/NCK 值(>1.1),刚玉标准分子 >1%,低

Al_2O_3/TiO_2（<100）和 CaO/Na_2O 比值（<0.3），属高钾钙碱性高温型强过铝质花岗岩。

（3）岩石明显亏损 Ti、P、Sr、Ba，具有 Nb、Ta 的负异常，富集 Th、U、Pb 和轻稀土元素，有显著的 Eu 负异常，接近于 0 的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 同位素特征。源岩为富含白云母和黑云母的高成熟度地壳物质熔融形成，在成岩过程中有幔源物质的加入。

（4）岩体形成于活动大陆边缘挤压背景下，由于局部伸展减压以及异常地幔和深部热流不均匀上升提供的热量，由中上地壳沉积物发生部分熔融并可能混入少量的幔源物质形成，源区残留有富钙的斜长石、钛铁矿和磷灰石等。

致谢 野外期间得到新疆维吾尔自治区有色地质勘查局 706 队、新疆地质矿产勘探开发局第四地质大队的支持。样品的年龄测试得到了北京离子探针中心的陶华、颉颃强等老师、中国地质大学李颖、杨宗喜等同学的帮助。样品的主量元素、微量及稀土元素由中科院地质与地球物理研究所靳新娣、李禾等老师完成，在此一并表示感谢。

References

Altherr R, Holl A, Hegener E, Langer C and Kreuzer H. 2000. High potassium, calc-alkaline plutonism in the European variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). Lithos, 50: 51 – 73

Altherr R and 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: 397 – 415

Chen YC, Ye QT, Feng J, Mu CL, Zhou LG, Wang QM, Huang GZ, Zhuang DZ and Ren BC. 1996. Ore-forming Conditions and Metallogenic Prognosis of the Ashele Copper-Zinc Metallogenic Belt, Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 330 (in Chinese with English abstract)

Defant MJ, Xu JF, Kepmhinskas P *et al*. 2002. Adakites: Some variations on a theme. Acta Petrologica Sinica, 18:129 – 142

Green TH. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical process in the crust-mantle system. Chemical Geology,120:347 – 359

Han BF and He GQ. 1991. Geotectonic setting of Devonian volcanic rocks belt in southern margin of the Altai Mountains, China. Xinjiang Geoscience No. 3, Beijing: Geological Publishing House, 89 – 100 (in Chinese)

Li JY, Xiao WJ, Wang KZ, Sun GH and Gao LM. 2003. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China. In: Mao JW, Goldfarb RJ, Seltman R, Wang DH, Xiao WJ and Hart C (eds.). Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan. IAGOD Guidebook Series 10: CERCAMS/ NHM London, 31 – 74

Li PC, Xu DR, Chen GH, Xia B, He CL and Fu GG. 2005. Constrains of petrography, geochemistry and Sr-Nd isotopes on the Jinjing granitoids from northeastern Hunan Province, China: Implications for petrogenesis and geodynamic setting. Acta Petrologica Sinica, 21 (3): 921 – 934 (in Chinese with English abstract)

Liu F, Yang FQ, Mao JW, Chai FM and Geng XX. 2009. Study on chronology and geochemistry for Abagong granite in Altay orogen. Acta Petrologica Sinica, 25 (6): 1416 – 1425 (in Chinese with English abstract)

Liu SH, Wu CZ, Gu LX, Zhang ZZ, Tang JH, Li GR, Lei RX and Wang CS. 2008. Geochronology, petrogenesis and tectonic significances of the Baishitouquan pluton in Middle Tianshan, Northwest China. Acta Petrologica Sinica, 24 (11): 2720 – 2730 (in Chinese with English abstract)

Lu FX and Sang LK. 2002. Petrology. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 39 (in Chinese)

Lu YF. 2004. GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel. Geochimica,33 (5): 459 – 464 (in Chinese with English abstract)

Ludwig KR. 2001. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2. 49. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 1 – 56

Lugmair GW and Marti K. 1978. Lunar initial $^{143}Nd/^{144}Nd$: Differential evolution of the lunar crust and mantle. Earth and Planetary Science Letters, 39: 349 – 357

Ma CQ, Ming HL and Yang KG. 2004. An Ordovician magmatic arc at the northern foot of Dabie mountains: Evidence from geochronology and geochemistry of intrusive rocks. Acta Petrologica Sinica, 20 (3):393 – 402 (in Chinese with English abstract)

Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of American Bulletin, 101: 635 – 643

McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the earth. Chemical Geology, 120: 223 – 253

Pearce JA, Harris BW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25(4): 956 – 983

Qiao GS. 1998. Normalization of isotopic dilution analuses: A new program for isotope mass spectrometric analysis. Scientia Sinica (Series A), 31: 1263 – 1268

Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22: 247 – 263

Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. Chemical Geology, 184: 123 – 138

Song B, Zhang YH, Wan YS *et al*. 2002. The mount making for the procedure of SHRIMP dating. Geological Review, 48 (Suppl.): 26 – 30 (in Chinese with English abstract)

Steiger RH and J? ger E. 1977. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geochronology and cosmochronology. Earth and Planetary Science Letters, 36: 359 – 362

Sun M, Yuan C, Xiao WJ, Long XP, Xia XP, Zhao GC, Lin SF, Wu FY and Kröner A. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: Progressive accretionary history in the Early to Middle Paleozoic. Chemical Geology, 247: 352 – 383

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 42: 313 – 345

Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. Lithos, 45: 29 – 44

Taylor SR and Mclenann SM. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell: Oxford Press, 1 – 312

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)

Wang JB, Qin KZ, Wu ZL, Hu JH and Deng JN. 1998. Volcanic Exhalative Sedimentary Lead-Zinc Deposits in the Southern Margin of the Altai, Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 210 (in Chinese with English abstract)

Wang T, Hong DW, Tong Y, Han BF and Shi YR. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implications for continental growth. Acta Petrologica Sinica, 21 (3): 640 – 650 (in Chinese with English abstract)

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. The Journal of Geology, 114: 735 – 751

Wang ZG, Zhao ZH, Zou TR *et al*. 1998. Geochemistry of the Granitoids in Altay. Beijing: Science Press, 1 – 152 (in Chinese)

Windley BF, Kroener A, Guo JH, Qu GS, Li YY and Zhang C. 2002.

Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution. Journal of Geology, 110: 719 – 737

Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li JY, Qin KZ and Wang Z, 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: Implications for the growth of Central Asia. Journal of the Geological Society, London, 161: 339 – 342

Xiao WJ, Han CM, Yuan C, Sun M, Lin SF, Chen HL, Li ZL, Li JL and Sun S. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 32, 102 – 117

Yang FQ, Mao JW, Yan SH, Liu F, Chai FM, Zhou G, Liu GR, He LX, Geng XX and Dai JZ. 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)

Yuan C, Sun M, Xiao WJ, Li XH, Chen HL, Lin SF, Xi XP and Long XP. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids. Chemical Geology, 242: 22 – 39

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, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 23 (8): 1921 – 1932 (in Chinese with English abstract)

Zhang CL, Zhou DW, Wang JL andWang RS. 2007. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic composition and genesis implications of Huangjianshishan granite intrusion in Kumishi area of southern Tianshan. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1821 – 1829 (in Chinese with English abstract)

Zhang Q, Wang Y, Pan GQ, Li CD and Jin WJ. 2008. Sources of granites: Some crucial questions on granite study (4). Acta Petrologica Sinica, 24 (6): 1193 – 1204 (in Chinese with English abstract)

Zhang ZC, Yan SH, Chen BL, Zhou G, He YK, Chai FM, He LX and Wan YS. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of subduction granites from the East Junggar, Xinjiang. Science Bulletin, 51(13):1565 – 1574 (in Chinese)

Zhao YJ, Yuan C, Zhou MF, Yan DP, Long XP and Li JL. 2007. Geochemistry and petrogenesis of Laojungou and Mengtouggou granites in western Sichuan, China: Constrains on the nature of Songpan-Ganzi basement. Acta Petrologica Sinica, 23(5): 995 – 1006 (in Chinese with English abstract)

Zhao ZH, Wang ZG, Zou TR *et al*. 1993. The REE, isotopic composition of O, Pb, Sr and Nd and petrogenesis of granitoids in the Altai region. In: Tu GZ (ed.). Progress of Solid-Earth Sciences in Northern Xinjiang, China. Beijing: Science Press, 239 – 266 (in Chinese)

Zhong CT, Deng JF, Wu YP, Mao DB, Xi Z and Chen B. 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 ZC, Luo SB, He B, Wang X, Yin LJ, Zhao H, Li AH and He YK. 2007. Confirmation of high temperature strongly peraluminous Mayin'ebo granites in the south margin of Altay, Xinjiang: Age, geochemistry and tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 23 (8): 1909 – 1920 (in Chinese with English abstract)

Zhou HS, Ma CQ, Zhang C, Chen L, Zhang JY and She ZB. 2008. Yanshanian aluminous A-type granitoids in the Chunshui of Biyang, south margin of North China Craton: Implications from petrology, geochronology and geochemistry. Acta Petrologica Sinica, 24(1):49 – 64 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF, Zeng YS and Gu LB. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China. Journal of Asian Earth Sciences, 27: 61 – 77

附中文参考文献

陈毓川, 叶庆同, 冯京, 牟传龙, 周良仁, 王全明, 黄光昭, 庄道泽, 任秉琛. 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

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

李鹏春, 许德如, 陈广浩, 夏斌, 贺传利, 符巩固. 2005. 湘东北金井地区花岗岩成因及地球动力学暗示:岩石学、地球化学和 Sr-Nd 同位素制约. 岩石学报, 21 (3): 921 – 934

刘锋, 杨富全, 毛景文, 柴凤梅, 耿新霞. 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 (6): 1416 – 1425

刘四海, 吴昌志, 顾连兴, 张遵忠, 唐俊华, 黎广荣, 雷如雄, 汪传胜. 2008. 中天山白石头泉岩体年代学、岩石成因及构造意义. 岩石学报,24(11),2720 – 2730

路凤香, 桑隆康. 2002. 岩石学. 北京: 地质出版社, 1 – 399

路远发. 2004. Geo Kit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. 地球化学, 33 (5): 459 – 464

马昌前, 明厚利, 杨坤光. 2004. 大别山北麓的奥陶纪岩浆弧:侵入岩年代学和地球化学证据. 岩石学报,20(3):393 – 402

宋彪, 张玉海, 万渝生等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 48 (增刊): 26 – 30

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

王涛, 洪大卫, 童英, 韩宝福, 石玉若. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义. 岩石学报, 21 (3): 640 – 650

王中刚,赵振华,邹天人等. 1998. 阿尔泰花岗岩类地球化学. 北京: 科学出版社,1 – 152

王京彬, 秦克章, 吴志亮, 胡剑辉, 邓吉牛. 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

杨富全, 毛景文, 闫升好, 刘锋, 柴凤梅, 周刚, 刘国仁, 何立新, 耿新霞, 代军治. 2008. 新疆阿尔泰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

曾乔松,陈广浩,王核,单强. 2007. 阿尔泰冲乎尔盆地花岗质岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义. 岩石学报,23(8):1921 – 1932

张成立,周鼎武,王居里,王润三. 2007. 南天山库米什南黄尖石山岩体的年代学、地球化学和 Sr、Nd 同位素组成及其成因意义. 岩石学报,23(8):1821 – 1829

张旗,王焰,潘国强,李承东,金惟俊. 2008. 花岗岩源岩问题——关于花岗岩研究的思考之四. 岩石学报,24(6):1193 – 1204

张招崇,闫升好,陈柏林, 周刚, 何永康, 柴凤梅, 何立新, 万渝生. 2006. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年. 科学通报,51(13):1565 – 1574

赵永久, 袁超, 周美夫, 颜丹平, 龙小平, 李继亮. 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, 增田章. 1993. 阿尔泰花岗岩类 REE 及 O、Pb、Sr、Nd 同位素组成及成岩模型. 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, 毛德宝, 席忠, 陈博. 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,何斌,王祥, 应立娟,赵华,李爱红,贺永康. 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

周红升, 马昌前, 张超, 陈玲, 张金阳, 佘振兵. 2008. 华北克拉通南缘泌阳春水燕山期铝质 A 型花岗岩年代学、地球化学及其启示. 岩石学报,24 (1): 49 – 64