

# 新疆阿尔泰库卫岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 及其地球化学特征

赵 莉<sup>1</sup>, 张招崇<sup>1,2</sup>, 闫升好<sup>3</sup>, 周 刚<sup>4</sup>, 陈柏林<sup>5</sup>, 柴凤梅<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 3. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 4. 新疆地质矿产局 第四地质大队, 新疆 阿尔泰 836500; 5. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

**摘 要:** 阿尔泰造山带的库卫地区分布有 10 余个镁铁-超镁铁质岩体, 库卫岩体是其中面积最大的一个岩体。SHRIMP 锆石 U-Pb 方法测年结果表明其形成时代为  $47 \pm 1$  Ma, 暗示了该地区新生代曾发生过强烈的隆升过程。与阿尔泰山其他地区的镁铁-超镁铁质岩体相比, 库卫岩体的地球化学特征具有特殊性, 以低的  $\text{TiO}_2$ 、稀土元素、不相容元素含量及高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为特征。较大的 MgO 含量变化范围(6.6%~20.1%)以及 MgO 与其他主要元素和 Ni 含量之间的相关性暗示着岩浆发生过橄榄石、斜方辉石和单斜辉石的分离结晶作用。低的稀土和不相容元素含量及平坦型的稀土元素配分模式和不相容元素比值(如 La/Sm 和 Gd/Yb)暗示了其原始岩浆来自于亏损的软流圈地幔(石榴石二辉橄岩)的高度部分熔融。同时, 高的 La/Nb 比值和在微量元素原始地幔标准化图解上显示出的明显正 Pb 异常暗示着岩浆在岩浆房中曾遭受过下地壳物质的同化混染作用, 岩体中较低的 Ni 含量则可能是深部硫化物熔离作用的结果。

**关键词:** 镁铁-超镁铁质岩体, SHRIMP 年龄, 地球化学, 岩石成因, 库卫, 阿尔泰

中图分类号: P597<sup>+</sup>3; P591; P588.12<sup>+</sup>4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)03-0194-09

## SHRIMP U-Pb zircon dating and geochemistry of Kuwei intrusion in the Altay Mountains, Xinjiang

ZHAO Li<sup>1</sup>, ZHANG Zhao-chong<sup>1,2</sup>, YAN Sheng-hao<sup>3</sup>, ZHOU Gang<sup>4</sup>, CHEN Bai-lin<sup>5</sup> and CHAI Feng-mei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 4. No. 4 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Altay 836500, China; 5. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** More than ten mafic-ultramafic intrusions are distributed in Kuwei area of the Altay orogenic belt, and the Kuwei intrusion is the biggest one in this area. The SHRIMP U-Pb zircon dating yields an age of  $47 \pm 1$  Ma, suggesting that strong uplift occurred in this area during Cenozoic. Compared with the mafic-ultramafic intrusions in other areas of the Altay Mountains, the Kuwei intrusion has some unique geochemical features in that it is characterized by low  $\text{TiO}_2$ , REE and incompatible element contents, and high  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contents. The wide range of MgO contents (6.6%~20.1%) and the correlation between MgO contents, other major element contents and Ni contents imply that the fractional crystallization of olivine, orthopyroxene and clinopyroxene

收稿日期: 2005-09-15; 修订日期: 2006-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572047); 国家 305 项目(2001BA609A-07-02); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0728); 科技部 973 资助项目(2001CB409807)

作者简介: 赵 莉(1984-), 女, 硕士, 岩石学专业。

might have occurred. Its low REE and incompatible element contents, flat chondrite-normalized REE patterns and incompatible element ratios (e.g., La/Sm and Gd/Yb) indicate that the primary magma resulted from the high degree of melting of the depleted asthenospheric mantle (garnet peridotite). In addition, its high La/Nb ratios and the markedly positive Pb anomalies in the primitive mantle normalized trace element patterns suggest that the magma must have been subjected to the contamination of low crust materials in the magma chamber. The relatively low Ni contents probably resulted from the immiscible sulfide melt at a relatively deep level.

**Key words:** mafic-ultramafic intrusion; SHRIMP dating; geochemistry; petrogenesis; Kuwei; Altay

新疆阿尔泰地区喀拉通克铜镍矿床是 20 世纪 80 年代发现的一个赋存于镁铁-超镁铁质杂岩体中的大型富铜镍矿床,对我国西北地区的经济发展起到了重要作用。然而,直到现在,除了喀拉通克外,阿尔泰地区还没有发现其他有经济价值的铜镍硫化物矿床。新疆地矿局第四地质大队于 20 世纪 70 年代在富蕴县西北的库卫地区库卫岩体的东部勘探白云母矿时发现该岩体的深部存在浸染状铜镍矿石,于是库卫岩体的含矿性问题就成为了关注的焦点。最近笔者对该岩体进行了相关的地球物理研究,发现局部地段存在良好的物探异常,认为库卫岩体具有找矿前景。但是由于该区工作条件极差,目前对该岩体还未进行过任何基础地质工作(包括年代学、岩石学、矿物学和地球化学),这在很大程度上影响了对该岩体的找矿评价工作。本文试图对该岩体进行初步的年代学和地球化学研究,探讨其岩石成因,以便为该岩体的找矿评价工作提供理论依据。

库卫岩体在构造位置上位于西伯利亚板块的阿尔泰造山带内(图 1),是中亚造山带的重要组成部分,也是研究中亚造山带形成演化的关键地区之一,而中亚造山带一直被认为是大陆板内活动和地壳隆升的天然实验室(Cunningham *et al.*, 1996)。库卫岩体位于斋桑晚古生代碰撞造山带和萨彦岭-蒙古西部古生代碰撞造山带之间。该区奥陶纪之前一直处于被动陆缘环境;奥陶纪至石炭纪由于萨彦洋的扩张俯冲,研究区进入活动大陆边缘演化阶段;至石炭纪,塔里木板块和西伯利亚板块碰撞结束了区内洋陆格局的演化(李锦轶, 2004),从而进入大陆板内演化期;侏罗纪后进入陆内造山阶段,山体开始大幅度隆起(Sengor, 1993),但是隆升时间及降升幅度大小都还不清楚。本次对库卫岩体的 SHRIMP U-Pb 锆石的测年工作可为阿尔泰山的新生代隆起及降升幅度提供重要约束。

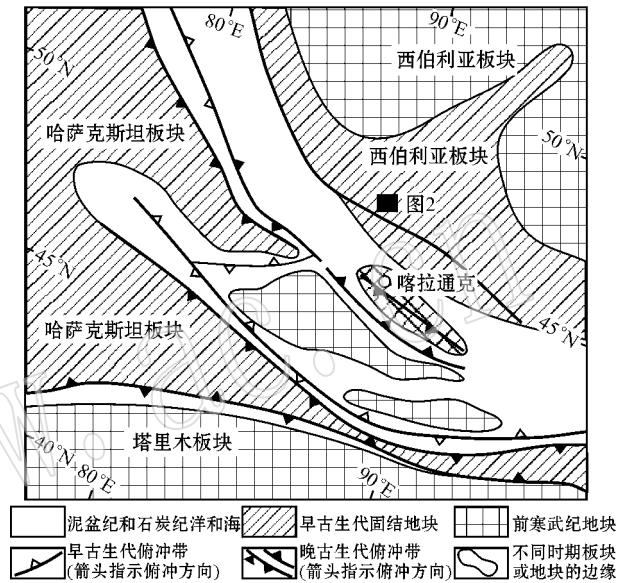


图 1 研究区大地构造位置图(据李锦轶, 1991)

Fig. 1 Tectonic map showing the location of the researched area (after Li Jinyi, 1991)

## 1 岩体的地质特征

库卫岩体位于富蕴县西北(中心坐标为北纬 47°25'05", 东经 89°26'16"),构造位置属于阿尔泰造山带。在该地区分布有十余个镁铁-超镁铁质岩体(图 2),岩体走向与区域构造线基本一致,为北西向。库卫岩体是其中面积最大、岩性最复杂的一个岩体,长约 3.5 km,宽约 1 km,面积约 3.3 km<sup>2</sup>,侵入于中上奥陶统哈巴河群石榴石片岩和石英片岩中。岩体由角闪辉长岩、辉长岩、辉长苏长岩和橄榄苏长岩组成。其中角闪辉长岩分布于岩体的边部,约占岩体面积的 20%,由普通角闪石(70%)、斜长石(30%)及少量磁铁矿组成,角闪辉长岩和其他岩石类型呈明显的侵入接触,前者侵入于后者中(图 3)。辉长

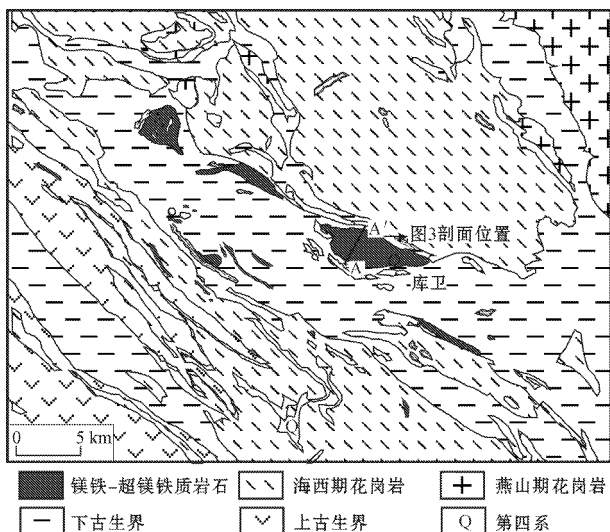


图 2 库卫地区区域地质简图(据 1:20 万地质图修改)

Fig. 2 Regional geological sketch map showing the distribution of mafic-ultramafic intrusions in Kuwei area (modified after the 1:200 000 geological map)

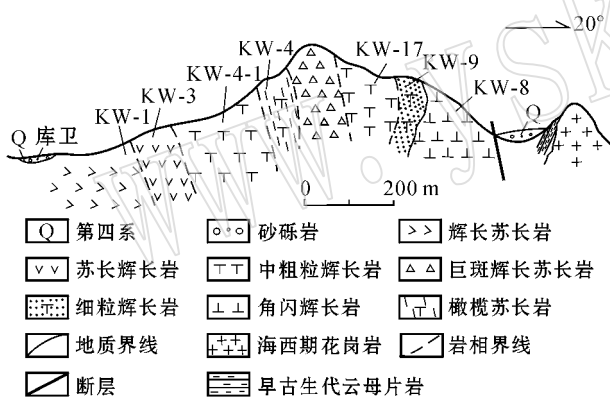


图 3 库卫镁铁-超镁铁质岩体剖面图

Fig. 3 Geological section of Kuwei mafic-ultramafic intrusions

岩、辉长苏长岩和橄欖苏长岩均呈渐变过渡关系,由岩体中心至边缘,岩石类型由橄欖苏长岩、辉长苏长岩过渡到辉长岩,颗粒由粗变细,局部可见辉长岩和橄欖苏长岩呈条带状构造分布,条带宽度约 30~70 cm。辉长岩、辉长苏长岩和橄欖苏长岩由橄欖石( $\text{Fo}_{70\sim 76}$ )、紫苏辉石( $\text{Wo}_{0.4}\text{En}_{71.1}\text{Fs}_{27.5}$ )、普通辉石-易变普通辉石( $\text{Wo}_{29\sim 45}\text{En}_{44\sim 55}\text{Fs}_{10\sim 16}$ )、钙质普通角闪石和拉长石以及少量的磁铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿等副矿物组成。

## 2 SHRIMP U-Pb 测年及结果

取约 30 kg 辉长苏长岩(KW-1)样品经重液分离和磁选后,在双目镜下挑选出约 20 颗锆石,并将其与数粒 RSES TEM 置于环氧树脂中保存,用于阴极发光、背散射电子像研究及 SHRIMP U-Pb 分析。阴极发光和背散射电子像研究由中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成,锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的 SHRIMP II 上进行,详细分析流程和原理见 Campstor(1984)和 Williams(1992)。应用 RSES 参考锆石 TEM(417 Ma)进行元素分馏校正,应用 SL13(年龄 572 Ma, U 含量  $238 \times 10^{-6}$ )标定所测锆石的 U、Th、Pb 含量,应用 ISOPLOT 方法进行数据处理,普通铅根据实测  $^{204}\text{Pb}$  进行校正,表 1 所列单个数据点的误差均为  $1\sigma$ ,采用年龄为  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄,其加权平均值具 95% 的置信度。

分选出的锆石以无色透明为主,少部分为浅棕色,短柱状,直径大多为 10~50  $\mu\text{m}$ ,在阴极发光图上,大部分锆石具明显的振荡环带,显示出岩浆锆石的特点。由表 1 可以看出,锆石的 U 和 Th 含量均较高,分别为  $450 \times 10^{-6}$ ~ $2878 \times 10^{-6}$  和  $410 \times 10^{-6}$ ~ $2153 \times 10^{-6}$ ,Th/U 比值为 0.53~1.67,显示出岩浆锆石的特点(Belousova *et al.*, 2002),这与其形态特点一致(图 4)。

由图 5 可以看出,8 个锆石样品中除 1 个样品年龄明显偏大和 1 个样品误差较大外,其余 6 个颗粒在误差范围内具有一致的 U-Pb 年龄,均落在 U-Pb 一致曲线之上构成单一的正态分布形式, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄的加权平均值为  $47 \pm 1$  Ma,其 MSWD = 1.3。此外,另 1 个落在 U-Pb 一致曲线之上的锆石颗粒的年龄为  $146.8 \pm 4.2$  Ma。

## 3 地球化学特征

库卫岩体的主要元素和微量元素分析结果见表 2。

### 3.1 主要元素特征

由表 2 可以看出,库卫岩体的  $\text{SiO}_2$  含量均较低,为 39.41%~45.89%。除 1 个样品外(1.57%),其他所有样品  $\text{TiO}_2$  含量均很低,为 0.15%~0.31%,是阿尔泰山地区镁铁-超镁铁质岩体中  $\text{TiO}_2$

表 1 库卫辉长苏长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定结果

Table 1 SHRIMP U-Pb zircon dating of Kuwei gabbro norite

点号	U	Th	<sup>206</sup> Pb*	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U ± %				<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th ± %		<sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U ± %					<sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U ± %	
	w <sub>Pb</sub> /10 <sup>-6</sup>				年龄/Ma				同位素比值								
KW-5.1	1 523	2 153	9.93	1.46	48.2	140	45	180	48.0	170	0.056	3.9	0.049	8.1	0.007 5	2.9	
KW-6.1	2 878	1 823	18.2	0.65	47.1	140	-54	130	45.5	220	0.05	1.5	0.046	6.2	0.007 3	2.9	
KW-7.1	518	470	3.49	0.94	48.6	150	-704	670	48.4	400	0.062	3.4	0.037	24	0.007 6	3.2	
KW-8.1	532	282	10.7	0.55	146.8	420	-111	170	134.0	790	0.058	1.7	0.14	7.3	0.023	2.9	
KW-4.1	968	1 613	6.4	1.72	49.2	140	228	130	48.9	170	0.055	2.4	0.054	6.5	0.007 7	2.9	
KW-1.1	450	410	3.18	0.94	52.1	160	-17	310	43.1	310	0.056	3.4	0.051	13	0.008 1	3.1	
KW-2.1	733	912	4.61	1.29	46.3	140	-598	320	44.0	190	0.049	3.1	0.036	12	0.007 2	3	
KW-3.1	628	938	3.88	1.54	43.8	190	-90	1 900	45.3	710	0.086	25	0.042	78	0.006 8	4.4	

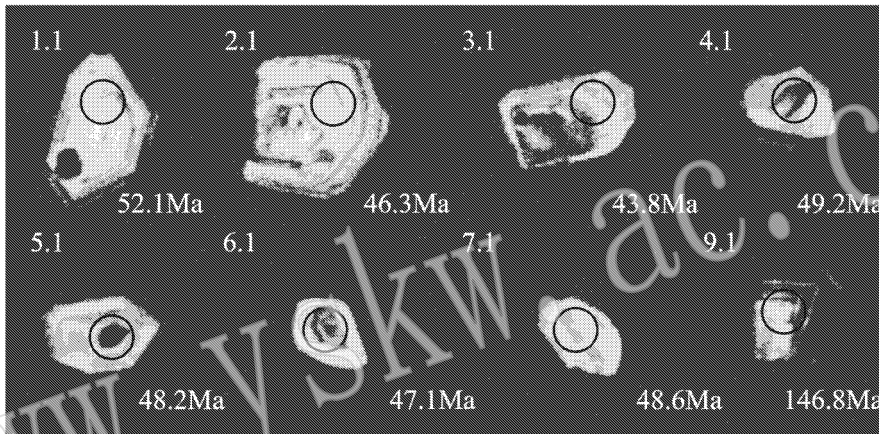


图 4 库卫辉长苏长岩(KW-1)阴极发光特征

Fig. 4 CL imaging of zircon from Kuwei gabbro norite(KW-1)

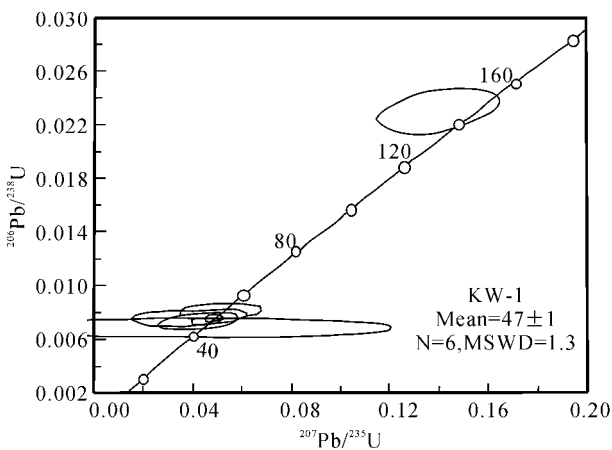


图 5 库卫辉长苏长岩锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄谱和图

Fig. 5 U-Pb zircon concordia diagram for Kuwei gabbro norite

托别等岩体的 TiO<sub>2</sub> 含量均在 0.5% 以上(杨文平等, 2004)。库卫岩体的 MgO 含量变化较大,为 6.6% ~ 20.1%。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量总体上较高,为 13.21% ~ 25.81%。即便是 MgO 含量最高的样品(KW-4),其 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量仍达 13.2%,明显比喀拉通克 MgO 含量相近的样品的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量高(张招崇等, 2003),这表明库卫岩体中斜长石的含量相当高。CaO 含量为 8.2% ~ 14.2%,明显高于喀拉通克,后者为 3.2% ~ 8.8%(张招崇等, 2003)。此外,库卫岩体不论何种岩性,其 K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 含量均较低,尤其是 K<sub>2</sub>O 的含量低于 0.3%。

在 MgO 与主要元素关系图解(图 6)上,其与 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O、CaO 的含量呈负相关,与全 FeO 呈正相关。

### 3.2 微量元素特征

与阿尔泰山其他地区的镁铁-超镁铁质岩体相比,库卫岩体的稀土元素含量较低(表 2)。除 KW-9 外,

含量最低的,其他如喀拉通克岩体一般为 0.5% ~ 1.0%(张招崇等, 2003),锡泊渡、托斯巴斯陶、阿拉

表2 库卫镁铁-超镁铁质岩体主要元素( $w_B/\%$ )和微量元素( $w_B/10^{-6}$ )分析结果Table 2 Major element ( $w_B/\%$ ) and trace element ( $w_B/10^{-6}$ ) analyses of Kuwei mafic-ultramafic rocks

样品号	KW-4	KW-9	KW-17	KW-1	KW-3	KW-8	KW-4-1
岩石名称	中粗粒橄榄苏长岩	细粒辉长岩	辉长岩	中粒辉长苏长岩	中粗粒辉长岩	角闪辉长岩	中粗粒辉长岩
SiO <sub>2</sub>	42.22	45.89	45.09	44.58	45.35	39.41	44.57
TiO <sub>2</sub>	0.15	1.57	0.31	0.20	0.20	0.13	0.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.21	15.87	18.32	16.80	18.62	15.94	25.81
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.87	3.84	2.54	1.85	1.26	4.37	2.42
FeO	12.57	8.21	6.04	5.77	6.82	9.38	3.47
MnO	0.21	0.20	0.13	0.13	0.13	0.19	0.09
MgO	20.10	10.16	10.22	12.50	11.97	16.56	6.60
CaO	8.18	11.82	14.48	13.86	13.73	8.35	14.48
Na <sub>2</sub> O	0.40	1.45	0.76	0.77	0.81	1.03	1.12
K <sub>2</sub> O	0.05	0.20	0.15	0.05	0.04	0.28	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.83	0.66	1.06	1.20	0.53	4.42	0.52
CO <sub>2</sub>	0.09	0.09	0.52	1.86	0.24	0.05	0.23
Total	99.90	100.11	99.63	99.58	99.71	100.12	99.50
Mg <sup>#</sup>	0.74	0.64	0.72	0.78	0.76	0.72	0.71
La	0.71	3.55	0.57	0.78	0.49	1.20	1.11
Ce	1.61	10.3	1.58	1.85	1.21	2.26	2.04
Pr	0.19	1.71	0.23	0.26	0.16	0.29	0.29
Nd	0.90	9.14	1.33	1.41	0.96	1.25	1.28
Sm	0.21	2.97	0.46	0.45	0.32	0.33	0.29
Eu	0.13	1.10	0.22	0.23	0.20	0.12	0.11
Gd	0.25	3.73	0.57	0.56	0.41	0.38	0.36
Tb	<0.05	0.62	0.07	0.07	0.06	0.08	0.07
Dy	0.28	4.06	0.65	0.63	0.49	0.41	0.40
Ho	<0.05	0.86	0.11	0.11	0.08	0.09	0.08
Er	0.15	2.45	0.38	0.37	0.28	0.24	0.21
Tm	<0.05	0.33	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	0.03
Yb	0.17	2.15	0.31	0.33	0.25	0.21	0.19
Lu	<0.05	0.30	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Y	1.66	21.0	3.32	3.56	2.82	1.84	1.63
Ba	20.7	57.6	17.2	16.1	14.6	11.5	18.5
Sr	140	149	210	189	194	59.1	278
Ni	377	159	107	127	120	220	72.9
V	55.0	297	155	107	104	50.2	54.6
Co	101	51.7	49.1	54.9	53.6	76.3	55.0
Zn	84.0	87.1	45.7	47.6	54.6	83.4	31.2
Cu	46.2	79.2	63.1	104	114	19.2	27.4
Cr	217	413	402	546	546	295	97.6
Rb	0.39	1.23	0.65	1.35	0.78	2.55	0.91
Th	0.46	0.15	0.09	0.20	0.10	0.18	0.06
U	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.07	<0.05
Mo	0.30	0.36	0.36	0.24	0.32	nd	nd
Pb	3.39	2.23	2.32	3.72	2.79	4.62	4.51
Ga	9.95	18.4	14.7	13.2	14.5	10.9	17.6
Hf	1.20	2.67	1.18	1.17	1.95	0.27	0.16
Nb	1.06	3.17	0.71	1.05	1.53	0.23	0.23
Ta	0.39	0.51	0.50	0.43	0.40	<0.05	<0.05
Zr	10.3	43.4	6.93	6.75	5.42	10.3	4.92
La/Nb	0.67	1.12	0.80	0.74	0.32	5.22	4.83
Gd/Yb	1.47	1.73	1.84	1.70	1.64	1.81	1.89
La/Sm	3.38	1.20	1.24	1.73	1.53	3.64	3.83
Zr/Sm	49.05	14.61	15.07	15.00	16.94	31.21	16.97
Zr/Nb	9.72	13.69	9.76	6.43	3.54	44.78	21.39

分析单位: 国家地质实验测试中心, 主要元素分析方法: XRF, 分析精度<2%;  $Mg^{\#} = Mg/(Mg + Fe^{2+})$ , 假设  $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 0.15$ , 微量元素分析方法: ICP-MS, 分析精度<5%, nd代表未测试该元素。

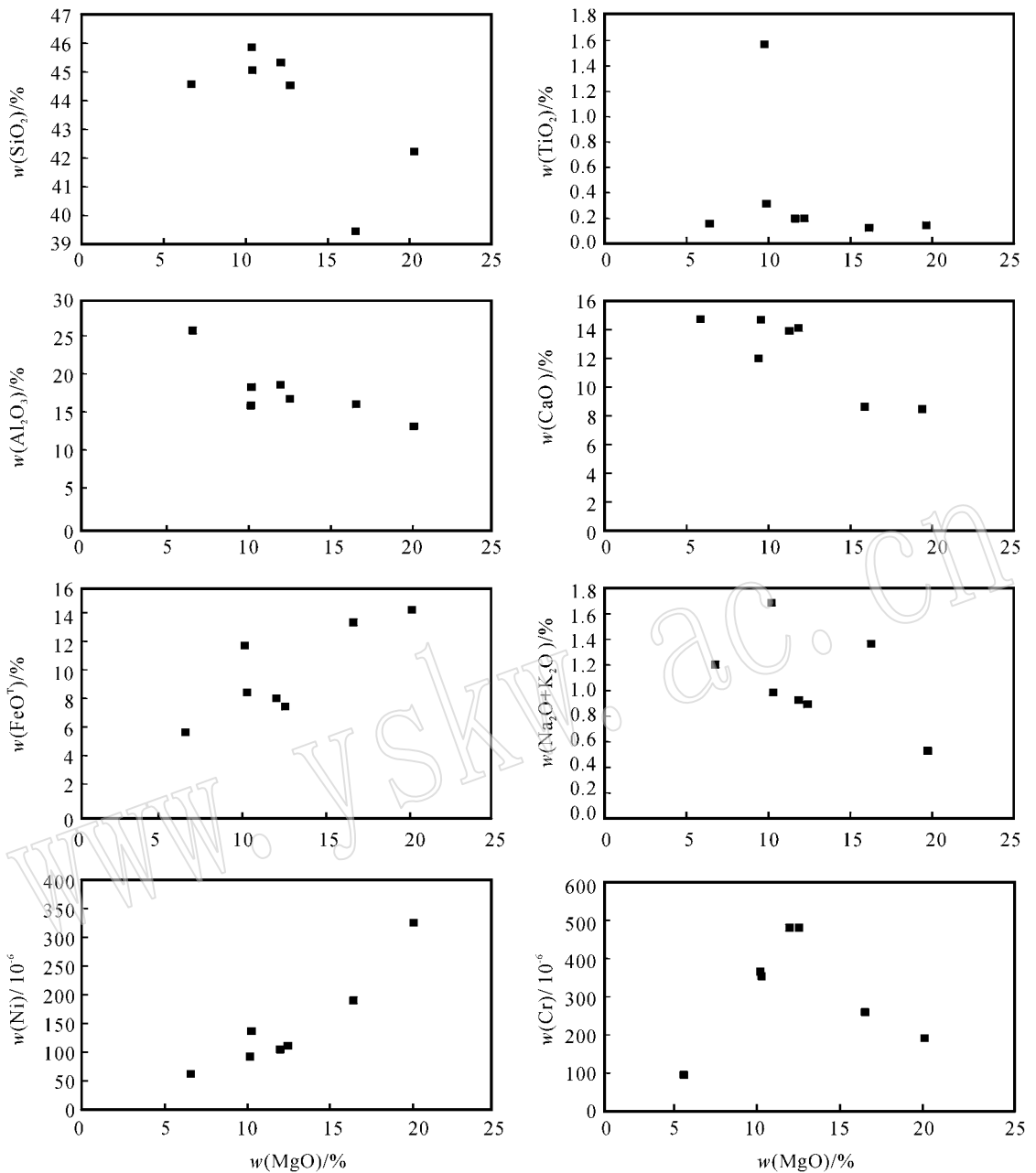


图 6 库卫岩体 MgO 与主要氧化物及 Cr、Ni 的关系图解

Fig. 6 Diagram of MgO versus major oxides and Cr and Ni contents of Kuwei intrusion

其他样品的稀土元素含量基本上和原始地幔相似，具平坦型的配分曲线，且具有轻微的 Eu 正异常(图 7)。样品 KW-9 尽管其稀土含量略高，约为球粒陨石的 10 倍，但总体上也具平坦型的配分曲线。

库卫岩体的不相容元素含量较低，除样品 KW-9 外，大多数不相容元素的含量均低于原始地幔(图 8)，这与阿尔泰山地区其他镁铁-超镁铁质岩体明显不同。在微量元素的原始地幔标准化图解上，具有明显的 Pb 正异常和轻微的 Nb 负异常。与此相对照

的是，相容元素 Cr 和 Ni 的含量也不高，分别为  $98 \times 10^{-6} \sim 546 \times 10^{-6}$  和  $73 \times 10^{-6} \sim 377 \times 10^{-6}$ ，总体上 Ni 的含量与 MgO 的含量呈正相关，而 Cr 则与 MgO 无相关性(图 6)。

## 4 讨论

### 4.1 岩体的形成时代与地壳升降

库卫岩体侵位于下泥盆统变质岩系中，而没有

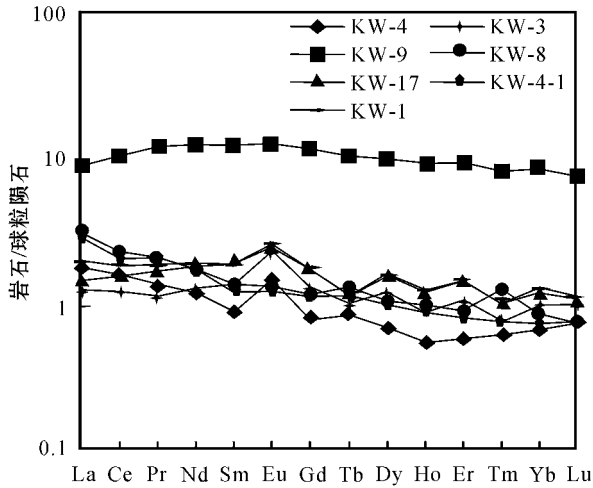


图 7 库卫岩体的稀土元素配分曲线(球粒陨石数据据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of Kuwei intrusion (chondrite data from Sun and McDonough, 1989)

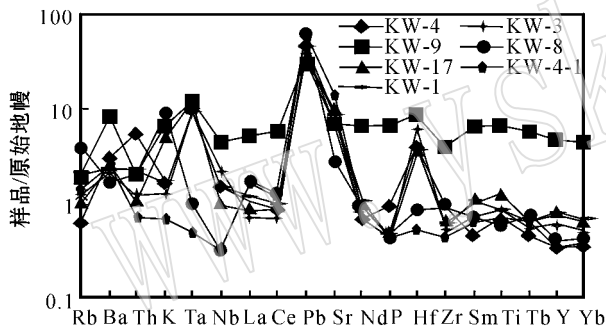


图 8 库卫岩体微量元素原始地幔标准化图解(原始地幔数据据 Sun 和 MacDonough, 1989)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element patterns of Kuwei intrusion (primitive mantle data from Sun and McDonough, 1989)

被其他地层覆盖,所以无法用地质学的方法对其形成时代进行约束。本次 SHRIMP U-Pb 锆石测年研究尽管只测定了 8 颗锆石,但 6 颗具有一致的同位素年龄值,并且锆石形态(环带和细小完好的晶型)指示了其其为基性岩石中的岩浆锆石,所以 6 颗锆石的平均年龄  $47 \pm 1$  Ma 代表了锆石的结晶年龄。然而目前研究区还没有新生代侵入岩的报道,本次 SHRIMP U-Pb 锆石年龄测试结果似乎有些难以置信。张前锋等(1994)报道过阿尔泰山的哈拉乔拉地区存在新生代玄武岩,其时代为  $17.59 \pm 0.59$

Ma ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法),因此如果考虑到本区还存在更晚的新生代岩浆活动,那么本区存在 47 Ma 的岩浆侵入活动就不奇怪了。从其结晶程度来判断库卫岩体是个深成侵入体,其侵位深度应该至少在 3 km 以上。根据单斜辉石和角闪石的压力计计算的的压力在  $1.9 \times 10^8$  Pa 左右<sup>①</sup>,相当于深度 6 km 左右,所以由此推测本区在 47 Ma 左右已开始隆升,并在此之后发生过强烈的隆升(岩体的盖层已被剥蚀殆尽),其隆升幅度大致在 3~6 km。阿尔泰山在新生代时曾发生过大幅度隆升,这一点已基本成为共识(Molnar & Tapponnir, 1975; Yarmolyuk *et al.*, 1990; Windley & Allen, 1993; Owen *et al.*, 1997; Barry *et al.*, 1998, 2003)。Owen 等(1997)估计蒙古的阿尔泰山隆升幅度在 3900 m 以上,这与笔者从库卫岩体的侵位深度得出的结论基本一致。有关隆升问题争论的焦点是何时开始隆升以及隆升的机制是什么。在上世纪 90 年代以前,大多数研究者都接受 Molnar 和 Tapponnir (1975) 的观点,即认为其隆升机制是印度-亚洲板块碰撞远程效应的结果,前苏联一些学者则认为是一个长期活动的地幔柱上升的结果(Yarmolyuk *et al.*, 1990),而 Windley 等(1993)尽管也认为是地幔柱作用的结果,但认为其活动时间相对较短,于晚新生代开始活动;Barry 等(1998, 2003)则从新生代火山岩的角度提出新生代的隆升主要发生在 33~30 Ma 和 6~0.004 Ma,是软流圈地幔上隆的结果,与地幔柱作用无关。根据本文对库卫岩体的同位素测年结果,笔者认为研究区的隆升比位于其北部的蒙古阿尔泰山开始的时间要早一些,并且结合其地球化学研究结果,确定其岩浆来源主要为软流圈地幔(见 4.2),所以其隆升机制可能主要与软流圈的上涌有关。

此外,由表 1 可以看出,其中 1 个锆石颗粒的年龄为 146.8 Ma,尽管其形态仍为岩浆锆石,但考虑到此颗粒与其他颗粒的年龄明显不同,并且研究区区域上存在中生代的岩浆活动(燕山期花岗岩,图 2,王登红等 2002),所以推测其为捕获的锆石年龄。

#### 4.2 岩浆源区

库卫岩体低的稀土元素总量、平坦型的稀土元素配分模式以及低的不相容元素含量暗示了其源区为亏损的地幔并具高的熔融程度。样品 KW-9 具有特殊性,稀土和不相容元素含量相对较高,考虑到其

① 张招崇等. 2005. 国家 305 项目专题报告“阿尔泰铜矿带东段靶区优选及评价”。

具有较高的  $\text{TiO}_2$  含量 (1.57%) ,可能说明岩石中具有相对高的榍石或金红石 ,相对高的稀土和不相容元素含量可能与其含有榍石或金红石等副矿物有关。

至于库卫岩体的源区是石榴石二辉橄榄岩还是尖晶石二辉橄榄岩 ,稀土元素的比值可为此提供重要约束。相对于中稀土元素 (如 Sm) ,轻稀土元素 La 无论对于石榴石还是尖晶石均是不相容的 ,而中稀土元素相对于重稀土元素 (如 Yb) 的富集程度则决定于部分熔融时是否有石榴石作为残留矿物相 ,因为重稀土元素倾向于富集于石榴石中 ,而不是绝大多数矿物相 [据 McKenzie 和 O'Nions (1991) 所编辑的分配系数推断]。另外 ,与源区矿物组成和熔融作用比较 ,分离结晶作用导致 La/Sm 和 Sm/Yb 比值变化较小 ,这样利用这两个比值可以了解其源区性质和部分熔融程度 (图 9)。由图 9 可以看出 ,其地幔源区为石榴石二辉橄榄岩 ,而不是尖晶石二辉橄榄岩 ,并可能有下地壳物质的混染。另外 ,图 9 还暗示了地幔为亏损地幔 ,并且熔融程度相对较高 ,这与其稀土元素配分曲线和原始地幔标准化曲线得出的结论一致。由其地幔源区的亏损特点进一步推测 ,源区为软流圈地幔 ,而不是富集的岩石圈地幔。

#### 4.3 岩浆演化

库卫岩体 MgO 较大的含量变化范围 (6.6% ~ 20.1%) 暗示了岩浆发生过强烈的分异作用 ,其与全

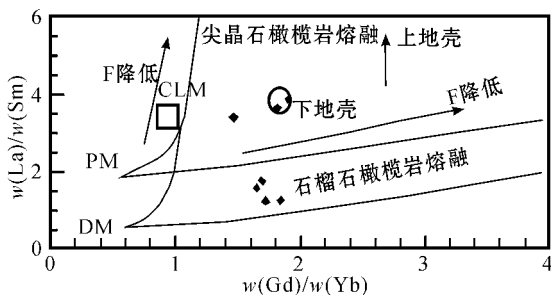


图 9 La/Sm 对 Gd/Yb 图解 底图据 Lassiter 和 Depaolo, 1997)

Fig. 9 Diagram of La/Sm versus Sm/Yb (after Lassiter & Depaolo, 1997)

PM—原始地幔 (McKenzie & O'Nions, 1991); DM—亏损地幔 (McKenzie & O'Nions, 1991); CLM—大陆岩石圈地幔 (McDonough, 1990); 上地壳和下地壳据 Taylor 和 McLennan (1985) PM—primitive mantle (McKenzie & O'Nions, 1991); DM—depleted mantle (McKenzie & O'Nions, 1990); CLM—continental lithosphere mantle (McDonough, 1990); upper crust and low crust from Taylor and McLennan (1985)

FeO 和 Ni 的正相关暗示着岩浆发生过橄榄石的分离结晶作用。另外 ,MgO 含量与  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  和 CaO 的含量呈负相关 ,说明发生了橄榄石、斜方辉石和单斜辉石的分离结晶作用 ,同时结合稀土元素配分模式中不存在 Eu 的负异常 ,说明没有发生过斜长石的分离结晶作用。Cr 和 MgO 不呈正相关关系 ,暗示没有发生过铬铁矿的分离结晶作用。此外 ,与其他地区具有相似 MgO 含量的同类岩石相比 ,库卫岩体 Ni 的含量较低 (表 2) ,并且橄榄石中 Ni 的含量较一般橄榄石的 Ni 含量低 (NiO 的含量为 0.02% ~ 0.07% ,张招崇未发表数据) ,暗示着深部可能发生过镍的硫化物 (如镍黄铁矿) 的熔离作用 ,因为 Ni 在橄榄石中具有高的分配系数 ,如果没有发生硫化物的深部熔离 ,则橄榄石以及富橄榄石的超镁铁质岩石应该具有高的 Ni 含量 (Naldrett, 1989)。从这一点来看 ,库卫岩体具有铜镍硫化物矿床的找矿潜力。

库卫岩体某些岩石具有高的 La/Nb 比值 (>1) 和 La/Sm 比值 ,微量元素原始地幔标准化图解中出现了明显的 Pb 的正异常 ,暗示着可能有地壳物质的混染。其相对低的 Gd/Yb (图 9) 暗示了地壳物质的混染 ,可能正是这种混染导致了硫化物的深部熔离作用 (Lightfoot & Hawkesworth, 1997)。

## 5 结论

(1) 锆石 SHRIMP U-Pb 同位素测年结果表明 ,库卫岩体的形成时代为  $47 \pm 1$  Ma ,说明 47 Ma 时研究区地壳开始隆升 ,并在 47 Ma 之后发生过大幅度隆升 ,隆升幅度大约在 3~6 km 左右 ,其隆升机制可能与本区的软流圈上涌有关。

(2) MgO 含量变化大 (6.6% ~ 20.1%) ,是岩浆发生橄榄石、斜方辉石和单斜辉石分离结晶作用的结果 ,同时岩浆在岩浆房中还发生了下地壳物质的同化混染作用 ,岩体较低的 Ni 含量可能是深部硫化物熔离作用的结果 ,原始岩浆可能是来自于亏损的软流圈地幔石榴石二辉橄榄岩高度部分熔融的产物。

本文在修改过程中得到了李锦轶研究员的指导 ,SHRIMP 测年过程中得到了闫全人研究员的指导 ,在此一并表示衷心的感谢!



## References

- Barry T L, Kempton P D, Saunders A D, *et al.* 1998. Mantle dynamics beneath Mongolia: implications from Cenozoic and Mesozoic alkalic basalts [ J ]. *Mineralogical Magazine*, 62A, Part 1 :122.
- Barry T L, Saunders A D, Kempton P D, *et al.* 2003. Petrogenesis of Cenozoic basalts from Mongolia; evidence for the role of asthenospheric versus metasomatized lithospheric mantle sources [ J ]. *Journal of Petrology*, 44 : 55~91.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [ J ]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 143 :602~622.
- Campston W, Williams I S & Meyer C. 1984. U-Pb geochronology of zircons from lunar braccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe [ J ]. *Geophys. Res.*, 89 :B525~534.
- Cunningham W D, Windley B F, Dorjnamjia D, *et al.* 1996. Late Cenozoic transpression in southwestern Mongolia and the Gobi Altai-Tien Shan connector [ J ]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 140 :67~81.
- Lassiter J C & Depaolo D J. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: chemical and isotope constraints [ A ]. Mahoney J. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism [ C ]. *Geophysical Monography 100*, American Geophysical Union, 335~355.
- Li Jinyi. 1991. On evolution of Paleozoic plate tectonics of east Junggar, Xinjiang, China [ A ]. Xiao Xuchang and Tang Yaoging. Tectonic Evolution of the Southern Margin of the Paleo-Asian Composite Megasuture [ C ]. Beijing Scientific and Technical Publishing House, 92~108 (in Chinese with English abstract).
- Li jinyi. 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang [ C ]. *Geological Review*, 50 :304~322 (in Chinese with English abstract).
- Lightfoot P C & Hawkesworth J. 1997. Flood basalts and magmatic Ni, Cu, and PGE sulphide mineralization: comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Traps) and West Greenland sequences [ A ]. Mahoney J J. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism [ C ]. *Geophysical Monography 100*, American Geophysical Union, 357~380.
- McDonough W F. 1990. Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle [ J ]. *Earth Sci. Planet. Lett.*, 101 :1~18.
- McKenzie D & O'Nions K. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations [ J ]. *J. Petrol.*, 32 :1021~1091.
- Molnar P & Tapponnier P. 1975. Tectonics of Asia: Consequences and implications of a continental collision [ J ]. *Science*, 189 :419~426.
- Naldrett A J, 1989. *Magmatic Sulfide Deposits* [ M ]. New York: Oxford University Press, 196.
- Owen L A, Windley B F, Cunningham W D, *et al.* 1997. Quaternary alluvial fans in the Gobi of southern Mongolia; evidence for neotectonics and climate change [ J ]. *Journal of Quaternary Science*, 12 : 239~252.
- Sengor A M C, Natal'in B A & Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [ J ]. *Nature*, 364 :299~307.
- Sun S S & McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [ A ]. Saunders A D & Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [ C ]. Geological Society. London, Special Publication, 42 :313~345.
- Taylor S R & McLennan S M. 1985. *The continental Crust: Its Composition and Evolution* [ M ]. London: Blackwell Scientific Publications, 312.
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, *et al.* 2002. Metallogenic Series and Regularities in Altay Metallogenic Province [ M ]. Beijing: Atomic Energy Press, 493 (in Chinese).
- Williams I S. 1992. Some observations on the use of zircon U-Pb geochronology in the study of granitic rocks. *Trans. R. Soc [ J ]*. Edinburgh-Earth Sci., 83 :447~458.
- Windley B F & Allen M K. 1993. Mongolian plateau: evidence for a late Cenozoic mantle plume under central Asia [ J ]. *Geology*, 295~298.
- Yang Wenping, Zhou Gang, Zhang Zhaochong, *et al.* 2004. Geochemistry of the Mafic Complexes in the South Margin of the Arly Orogenic Belt and Potential of Cu-Ni Sulfide Deposits [ J ]. *Bulletin of Geology*, 23(4) :390~399 (in Chinese with English abstract).
- Yarmolyuk V V, Kovaienko V I and Bogatikov O A. 1990. The south Baikal mantle hot spot and its role in the development of the Baikal rift zone [ J ]. *Akademiya Nauk SSSR Doklady*, 312 :93~96.
- Zhang Qianfeng, Hu Aiqin, Zhang Guoxin, *et al.* 1994. Evidence from isotopic age for presence of Mesozoic-Cenozoic magmatic activities in Altai region, Xinjiang [ J ]. *Geochimica*, 23(3) :269~280 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bailin, *et al.* 2003. Geochemistry of the Kalatongke basic complex, Xinjiang province, constraints on genesis of the deposit [ J ]. *Acta Mineralogica et Petrologica*, 22(3) :217~224 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 李锦轶. 1991. 试论中国新疆准噶尔山系古生代板块构造演化 [ A ]. 肖序常, 汤耀庆. 中亚复合巨型缝合带南缘构造演化 [ C ]. 北京: 北京科学技术出版社, 92~108.
- 李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变 [ J ]. *地质论评*, 50 :304~322.
- 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 [ M ]. 北京: 原子能出版社.
- 杨文平, 周刚, 张招崇, 等. 2004. 阿尔泰山带南缘镁铁质岩体的地球化学特征以及铜镍硫化物型矿床找矿前景分析 [ J ]. *地质通报*, 23(4) :390~399.
- 张前锋, 胡藜琴, 张国新, 等. 1994. 阿尔泰山地区中、新生代岩浆活动的同位素年龄证据 [ J ]. *地球化学*, 23(3) :269~280.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 2003. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 22(3) :217~224.