



# 内蒙古东七一山碱长花岗岩的地球化学特征和成因

吕博<sup>1</sup> 杨岳清<sup>2</sup> 孟贵祥<sup>2</sup> 严加永<sup>2</sup> 赵金花<sup>2</sup> 王守光<sup>3</sup> 贾玲珑<sup>3</sup> 彭润民<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学, 北京 100037; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037;  
3. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 东七一山碱长花岗岩是内蒙古北山地区规模最大的稀有金属矿化花岗岩。本文在前期岩石学及成矿特征研究基础上, 首次对其岩石地球化学、同位素地球化学及年代学进行了分析探讨。岩石富硅、富碱, 贫 Ti、Fe、Mg、Mn 等基性组分, 属高钾钙碱性系列岩石。稀土元素配分模式显示 Eu 强亏损特征  $\delta\text{Eu} < 0.1$ , Ba、Sr、P、Ti 相对地幔显著亏损, 而 Rb、Nb+Ta、W、Mo、Li 等元素明显富集。两类碱长花岗岩的 Rb-Sr 等时线年龄为  $128.2 \pm 1.1$  Ma, 相关系数为 0.999 9,  $I_{\text{Sr}} = 0.709 79$ , 说明岩体的物质来源具有明显的壳源特征。 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  值相对亏损地幔值偏高, 而  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值偏低, Pb 同位素以富含放射性成因铅为特征。结合岩石学和产出环境研究成果, 认为该碱长花岗岩是在燕山晚期, 由区域钾长花岗岩浆在壳层挤压-拉伸环境中进一步分异演化形成的, 先形成的是碱长花岗斑岩, 构成了似斑状碱长花岗岩的外部相, 而似斑状碱长花岗岩是在相对封闭且挥发组分和稀有元素进一步富集、结晶分异较缓慢的过程中形成的, 由残余流体产生的自交代作用也相对更发育, 导致形成与锂云母化、次生钠长石化和硅化关系更密切的铈-钽、钨、锡、铷等稀有金属矿化。以上认识对在北山地区寻找与中生代花岗岩浆活动有关的金属矿产, 特别是铈-钽、钨、锡、铷、钼矿产, 具有重要的指导意义。

**关键词:** 碱长花岗岩 稀有金属 地球化学 同位素 燕山期 东七一山

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>1; P59; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)03-0543-10

## Geochemical characteristics and petrogenesis of Dongqiyishan alkali feldspar granite, Inner Mongolia

LÜ Bo<sup>1</sup>, YANG Yue-qing<sup>2</sup>, MENG Gui-xiang<sup>2</sup>, YAN Jia-yong<sup>2</sup>, ZHAO Jin-hua<sup>2</sup>, WANG Shou-guang<sup>3</sup>,  
JIA Ling-long<sup>3</sup> and PENG Run-min<sup>1</sup>

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037; 3. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** The Dongqiyishan alkali feldspar granite is the largest rare metal mineralized granite in Beishan area, Inner Mongolia, and is of remarkable representative significance in similar rock masses. Based on previous research result of petrologic and metallogenetic characteristics, the authors performed a lot of detailed work on geochemistry, isotope geochemistry and geochronology. Petrochemical research shows that the granite is rich in silicon and alkali, and poor in Fe, Ti, Mg and Mn, thus belonging to high-k calc-alkaline series. Petrochemical research shows that the granite is strongly depleted in Eu ( $\delta\text{Eu} < 0.1$ ), Ba, Sr, P, Ti and obviously enriched in Rb, Nb+Ta, W, Mo, Bi, Li, etc. The Rb-Sr isochron age is  $128.2 \pm 1.1$  Ma, with  $I_{\text{Sr}}$  being 0.709 79, suggesting that the original rock had obvious crustal characteristics. Relative to values of the depleted mantle, the two types of rocks have somewhat higher  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  values and lower  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  values, and the Nd isotopes

收稿日期: 2011-03-03; 修订日期: 2011-04-15

基金项目: 国家科技支撑计划课题资助项目(2006BAB01A09)

作者简介: 吕博(1983-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, Email: Lvbosama@gmail.com

of granites are similar to things of Beishan area granites. According to lithological characteristics and formation environment, the authors hold that the Dongqiyishan alkali feldspar granite was formed by the magma derived from partial melting of the upper crust through violent differentiation evolution in the late Yanshanian extrusion-tension environment. First, the alkali-feldspar granite porphyry was formed and constituted the exterior facies of the porphyreous alkali feldspar granite. The formation environment of the alkali-feldspar porphyreous granite was relatively closed; it was formed through the further enrichment of the volatile components and rare elements and a slow process of crystallization differentiation. Therefore, the self-metasomatism produced by the residual fluid became more developed, resulted in more close connection of lepidolite mineralization and secondary albitization and silicification to niobium-tantalum, tungsten, tin, rubidium and other rare metals mineralization. The results obtained by the authors have some guiding significance in the study of Mesozoic granite-related metal ores of Yanshanian period, especially in the prospecting for niobium-tantalum, tungsten, tin, rubidium and other rare metal deposits.

**Key words:** alkali feldspar granite; rare metals; geochemistry; isotope; Yanshanian; Dongqiyishan

东七—山稀有金属矿化碱长花岗岩是北山地区同类岩体中规模最大的一个,成岩成矿特征很有代表性(王勇等,2009),但其岩石地球化学及成岩年龄,目前仍无确切的资料。在1:20万区调中,曾将其定为燕山晚期钠长石化二长花岗岩,后来,聂凤军等(2002)又推定其为加里东期产物,之后,又见到156.8 Ma的年龄数据(殷先明,2008a),但缺少定年方法及岩石学、同位素等方面的详细研究资料。根据该岩体产出环境和成岩成矿特征,笔者认为它属于中生代花岗岩的可能性较大,有必要对其从地球化学及成岩年代等方面进一步进行研究。另外,人们对北山地区的古生代岩浆活动及其成矿作用非常关注,其规律性已较清楚(左国朝等,1990;聂凤军等,2002;何世平等,2005;杨合群等,2008),但对中生代的岩浆活动还没有引起足够的重视(殷先明,2008a,2008b;杜玉良等,2009),因此有必要对中生代花岗岩浆在北山地区的活动也同时做一探讨。

东七—山碱长花岗岩可分为碱长花岗斑岩和似斑状碱长花岗岩,其产状和岩石学特征见王勇等(2009)。二者在岩石学中的最主要特征是,钠长石构成了岩石中最主要矿物成分,钾长石基本仅作为钠长石的交代残留体存在。此外,成岩后,由本身残余热液引起的自交代作用仍较发育,主要表现在锂云母、次生钠长石和次生石英对早期钠长石等矿物的广泛交代上,因此,岩石的矿物和化学成分变化较大(王勇等,2009),但总体来看,其规律性仍较清楚,后期由岩体结晶过程自身热液产生的交代作用,对其定年应该不会产生质的影响。在此认识基础上,笔者开展了岩石地球化学及定年等方面的工作。

## 1 碱长花岗岩的岩石化学特征

### 1.1 主量元素特征

样品的岩石化学成分测定由国家地质实验测试中心完成,常量元素用X荧光光谱仪(3080E)测定,微量元素用等离子质谱仪(X-series)测定。碱长花岗斑岩和似斑状碱长花岗岩的化学成分分析结果如表1所示。

在主要成分中,最突出的特点是 $\text{SiO}_2$ 含量明显偏高,似斑状碱长花岗岩的平均值为75.29%,碱长花岗斑岩的平均值为76.21%,即使除去因自交代作用而叠加有硅化的两个高硅样品(DG12-6和DG12-7),后者的平均值也达74.66%,比我国花岗岩平均成分(71.63%,黎彤等,1998)也分别高出了3.66%、4.58%和3.03%。似斑状碱长花岗岩的 $\text{K}_2\text{O}$ 平均含量为4.11%, $\text{Na}_2\text{O}$ 平均为4.36%;碱长花岗斑岩的 $\text{K}_2\text{O}$ 平均含量为3.87%, $\text{Na}_2\text{O}$ 平均为3.13%。如果除去样品DG12-6和DG12-7,后者 $\text{Na}_2\text{O}$ 的平均含量也达到4.31%,也即两类岩石 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量较为接近。似斑状碱长花岗岩中 $\text{K}_2\text{O}$ 的含量较高主要与较晚期锂云母的叠加有关系,这在碱长花岗斑岩中几乎是不存在的。碱长花岗斑岩中的 $\text{K}_2\text{O}$ 含量高主要由残留钾长石引起。反映基性程度的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 等含量在两类岩石中均显著偏低,其中 $\text{TiO}_2$ 平均含量仅为0.052%, $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ 平均仅为0.31%(我国花岗岩则分别平均为0.29%和1.52%,黎彤等,1998)。综上所述,东七—山碱长花岗岩是一种富硅、富碱和贫基性组

表1 东七一山碱长花岗岩主要元素( $w_B/\%$ )和微量元素( $w_B/10^{-6}$ )成分Table 1 Major ( $w_B/\%$ ) and trace element ( $w_B/10^{-6}$ ) compositions of Dongqiyishan alkali feldspar granites

样品号	似斑状碱长花岗岩				碱长花岗斑岩					
	DQ15-1	DQ15-3	DQ15-4	DQ15-5	DG12-3	DG12-4	DG12-5	DG12-6	DG12-7	DG12-1
SiO <sub>2</sub>	75.32	75.47	74.88	75.47	74.22	73.35	75.33	76.60	82.02	75.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.84	13.69	13.77	13.65	14.48	13.65	13.75	13.27	10.66	12.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11	0.18	0.08	0.10	0.06	0.02	0.12	0.15	0.03	0.57
FeO	0.75	0.56	0.63	0.66	0.16	0.52	0.48	0.48	0.74	0.27
CaO	0.39	0.43	0.46	0.50	1.22	1.93	0.85	1.75	0.62	1.22
MgO	0.05	0.04	0.04	0.07	0.08	0.06	0.08	0.24	0.31	0.20
K <sub>2</sub> O	3.83	4.01	4.27	4.37	3.21	4.38	4.25	3.95	3.07	4.39
Na <sub>2</sub> O	4.34	4.38	4.57	4.15	5.48	4.24	3.94	1.46	0.09	3.57
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.09	0.09	0.03	0.03	0.10
MnO	0.08	0.05	0.07	0.08	0.02	0.03	0.05	0.02	0.02	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.04
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.68	0.72	0.34	0.30	0.62	0.78	0.62	1.56	1.54	1.02
CO <sub>2</sub>	0.09	0.09	0.17	0.17	0.09	0.26	0.09	0.26	0.26	0.09
LOI	0.67	0.70	0.62	0.66	0.88	1.27	0.91	2.36	1.71	1.07
Rb	1 291	1 244	1 272	1 330	461	704	732	753	594	680
Ba	8.49	9.86	11.1	16.2	159	256	207	74.6	48.2	64.4
Th	11.1	10.9	6.71	11.0	9.58	84.4	48.4	21.7	16.3	48.0
U	3.84	2.33	3.41	4.42	3.16	7.97	6.70	5.88	4.83	10.6
Nb	46.5	52.7	42.8	57.8	34.4	33.3	32.2	32.9	39.6	43.7
Ta	6.48	14.6	11.0	15.8	19.8	7.74	9.00	18.2	19.2	11.6
Sr	9.16	8.58	29.7	28.0	34.9	74.4	44.4	30.1	19.4	65.1
Zr	68.3	58.4	53.9	61.9	49.9	185	182	57.7	45.2	147
Hf	4.81	4.38	4.15	4.47	5.07	9.33	9.41	4.74	4.63	6.31
Sc	0.97	0.51	0.31	0.39	1.18	1.87	0.68	1.75	1.53	1.60
Ga	24.5	23.9	22.3	22.9	28.8	24.1	19.2	32.3	23.0	27.2
W	108	31.8	22.5	22.2	6.28	12.5	13.3	11.5	22.0	16.0
Sn	17.2	15.7	14.0	14.6	10.2	9.00	13.5	73.8	52.9	40.6
Mo	40.8	13.0	1.36	1.81	0.22	0.96	0.85	0.74	1.94	7.84
Bi	49.3	34.8	5.36	1.18	0.17	0.21	0.40	5.04	1.72	1.05
Li	1 085	751	726	794	53.4	77.9	132	34.8	38.3	70.5
La	11.2	7.57	5.41	7.23	6.15	26.4	16.3	15.0	10.8	27.4
Ce	36.8	30.4	35.4	37.3	14.0	57.0	49.5	36.2	26.4	56.3
Pr	3.39	2.61	1.64	2.44	2.54	9.08	5.91	6.11	3.83	8.00
Nd	11.6	9.23	5.60	8.81	10.3	35.2	21.7	24.8	14.9	29.5
Sm	3.48	2.96	1.82	2.95	4.44	9.74	6.31	11.6	6.35	8.37
Eu	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.13	0.06	0.06	<0.05	0.20
Gd	3.67	3.18	2.36	3.28	6.50	9.60	6.21	15.6	8.73	10.0
Tb	0.74	0.64	0.55	0.69	1.61	1.77	1.25	3.51	2.12	2.00
Dy	4.76	4.47	3.87	5.00	11.6	11.8	8.63	22.8	16.0	14.3
Ho	0.94	0.93	0.81	1.03	2.45	2.46	1.79	4.39	3.41	3.08
Er	3.07	2.97	2.69	3.27	8.26	7.83	5.84	13.9	11.5	10.2
Tm	0.53	0.50	0.47	0.56	1.46	1.27	0.97	2.41	2.07	1.74
Yb	3.92	3.67	3.43	3.95	10.8	9.06	6.80	18.1	15.8	12.7
Lu	0.54	0.53	0.50	0.57	1.54	1.28	0.93	2.64	2.22	1.84
Y	21.7	20.6	20.2	23.4	56.2	73.6	42.1	119	70.8	86.4
ΣREE	106.39	90.31	84.8	100.53	137.89	256.22	174.3	296.12	194.98	272.03
LREE	66.52	52.82	49.92	58.78	37.48	137.55	99.78	93.77	62.33	129.77
HREE	18.17	16.89	14.68	18.35	44.22	45.07	32.42	83.35	61.85	55.86
LREE/HREE	3.66	3.13	3.40	3.20	0.85	3.05	3.08	1.12	1.01	2.32
δEu	0.04	0.06	0.10	0.08	0.06	0.04	0.03	0.01	0.02	0.07
δCe	1.42	1.64	2.83	2.13	0.85	0.88	1.21	0.91	0.99	0.91

分的岩石,其中,以似斑状碱长花岗岩更为显著。

在  $K_2O-SiO_2$  图(图1)中,两类岩石的主体集中于高钾钙碱性系列范畴,样品 DG12-3 和 DG12-7 投入中钾系列,主要是由于后期硅化强烈而使岩石中的  $K_2O$  相对偏低所致。

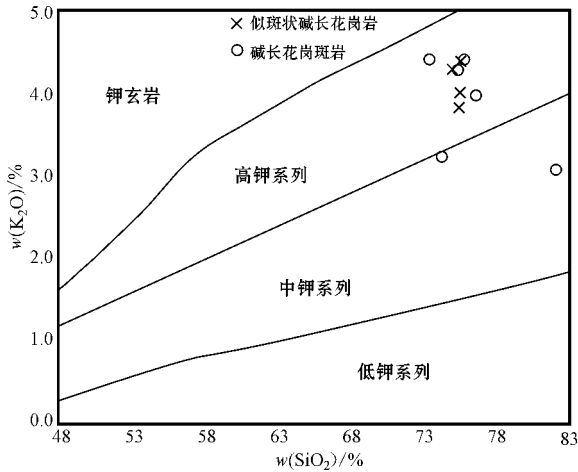


图1 碱长花岗岩的  $K_2O-SiO_2$  图解(据 Rickwood, 1989)

Fig. 1  $K_2O$  versus  $SiO_2$  diagram (after Rickwood, 1989)

在过铝指数图(图2)上,两类岩石的投点主要集中于过碱性和偏铝质岩石的交界处,碱长花岗斑岩的两个样品投点于过铝质范围,也主要是由于岩石强烈硅化而使  $Na_2O$  相对偏低所致,但两类岩石的共性还是较明显的。

## 1.2 稀土元素特征

两类碱长花岗岩的稀土元素含量均不高,明显低于世界花岗岩的平均值  $292 \times 10^{-6}$  (Nockolds, 1954),同时,两类岩石的稀土分配模式也较相似,即强烈发育的  $Eu$  谷两侧曲线均呈倾斜度不大的平坦型式,但二者也还存在一定差异。碱长花岗斑岩的稀土元素总量(平均  $221.92 \times 10^{-6}$ )是似斑状碱长花岗岩(平均  $95.50 \times 10^{-6}$ )的 2.32 倍;轻重稀土元素比值在碱长花岗斑岩中平均为 1.91,在似斑状碱长花岗岩中平均为 3.35,在轻稀土元素含量上,碱长花岗斑岩和似斑状碱长花岗岩仅表现出 1.64 倍的差异,而在重稀土含量上差异达 3.16 倍。这说明从碱长花岗斑岩到似斑状碱长花岗岩,稀土元素总量从总体上趋于减少,其中,减少较明显的是重稀土元素。在碱长花岗斑岩中,重稀土元素含量平均为  $53.80 \times$

$10^{-6}$ ,而在似斑状碱长花岗岩中平均含量为  $17.02 \times 10^{-6}$ ,也即在碱长花岗斑岩到似斑状碱长花岗岩的形成过程中,重稀土元素的迁移颇为显著。

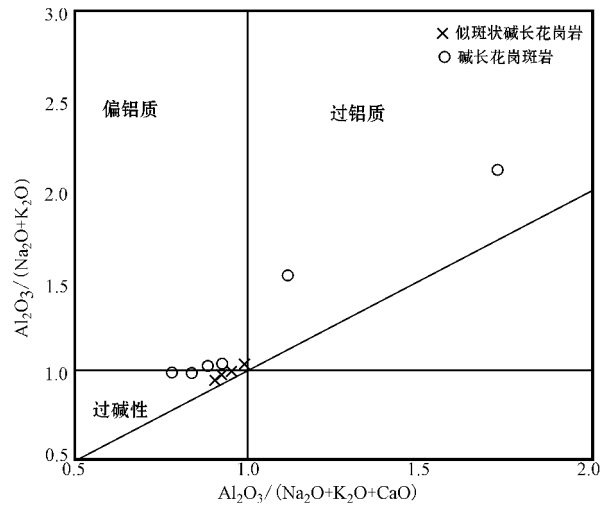


图2 东七一山碱长花岗岩体过铝指数  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)-Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$  图解

Fig. 2  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$  versus  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$  diagrams for Dongqiyishan alkali feldspar granite

两类岩体的  $Eu$  均有强烈的亏损,反映在  $\delta Eu$  上,二者  $Eu$  元素的 V 形谷非常发育(图3),似斑状碱长花岗岩更为明显,另外,  $\delta Ce$  呈现正异常,和较晚期一些富铈矿物的发育有一定关系。稀土元素在两类岩石中的分布特点,在一定程度上反映了似斑状碱长花岗岩是从碱长花岗斑岩岩浆进一步分异演化而来的。

## 1.3 微量元素特征

在微量元素的含量上,两类碱长花岗岩也有各自的特点,似斑状碱长花岗岩以  $Rb, Nb+Ta, W, Mo, Bi, Li$  等元素含量较高为特征,另外,  $Hf/Zr$  值也较高,而碱长花岗斑岩则以  $Ba, Th+U, Sr, Sc, Sn$  等元素较高为特征。值得注意的是,似斑状碱长花岗岩中的  $Rb$  是碱长花岗斑岩的 1 倍,  $Li$  达 11 倍,  $W$  近 3 倍,  $Mo$  达 5 倍,  $Bi$  近 15 倍,反映在蛛网图上(图4),二者的图形总体是相似的,即  $Ba, Sr, P, Ti$  相对地幔值是显著亏损的,其中  $DQ15$  样品亏损更明显,这表明在两类岩石的形成过程中,岩浆有强烈的结晶分异作用存在,其中似斑状碱长花岗岩形成时岩浆的分异作用更强,说明岩石形成于长期较稳定的环境,即非造山的条件。

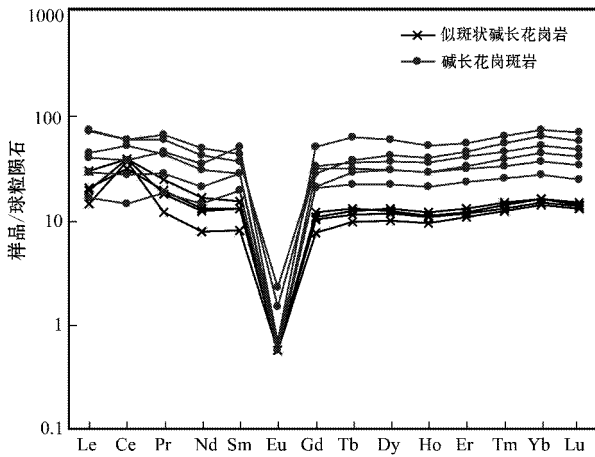


图 3 球粒陨石标准化的稀土元素配分模式  
Fig. 3 Chondrite normalized REE patterns

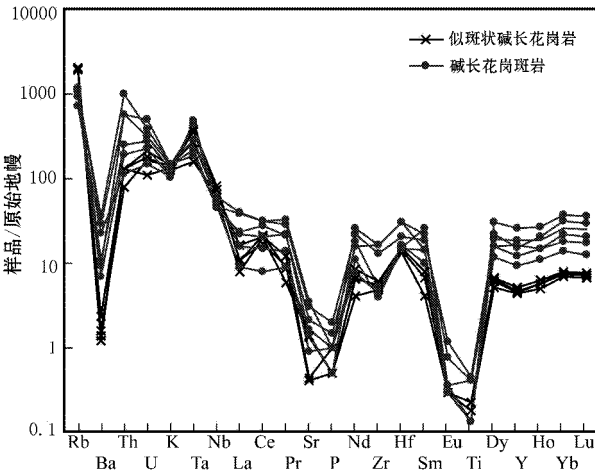


图 4 原始地幔标准化的蛛网状图(原始地幔参考值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Primary mantle normalized trace element spider diagrams (reference values of primitive mantle after Sun and McDonough, 1989)

## 2 碱长花岗岩的 Rb-Sr、Sm-Nd 和 Pb 同位素特征

同位素成分测定由中国地质科学院地质研究所同位素室完成。Rb、Sr 同位素分析仪器为 MAT262 固体同位素质谱计,标准测定结果:SRM987 SrCO<sub>3</sub>, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 0.710 247 ± 12(±2σ), Sr 同位素质量分馏采用 <sup>88</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr = 8.375 21 校正。Sm、Nd 同位素分析仪器为 Nu Plasam HR MC-ICP-MS(Nu Instruments), DSN-100 膜去溶,标准测定结果:JMC

Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.511 125 ± 10(2σ); Nd 同位素质量分馏采用 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.721 9 校正(何学贤等 2007)。铅同位素比值用多接收器等离子体质谱法(MC-ICPMS)测定,所用仪器为英国 Nu Plasma HR, 仪器的质量分馏以 TI 同位素外标校正,样品中 TI 的加入量约为铅含量的 1/2, NBS 981 长期测定的统计结果:<sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb = 2.167 4 ± 0.000 5, <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb = 0.914 86 ± 0.000 25, <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 16.939 7 ± 0.011 1, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 15.497 4 ± 0.008 9, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 36.714 7 ± 0.026 2(±2σ)(何学贤等 2005)。

Rb-Sr 同位素分析结果见表 2。由于岩石中 Rb 的含量极高,所以 <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 和 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值与绝大多数碱土系列花岗岩相比有较大差异, <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 高达 835, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 也高达 2.227 801, 比我国花岗岩高出许多,例如在秦岭地区的数百个花岗岩中, <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 绝大多数 < 10, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 绝大多数在 < 0.8(张宗清等 2006)。与邻近的东七一山大岩体相比,也有较大不同,该岩体的 <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 变化在 0.581 9 ~ 2.214 之间, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 变化于 0.708 35 ~ 0.716 048 之间。似斑状碱长花岗岩的 Rb 含量最高,而 Sr 在碱长花岗斑岩中仅相对较高,反映似斑状碱长花岗岩的 <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 和 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 的这两个比值也均明显高于碱长花岗斑岩。Rb、Sr 含量和相应的比值也反映了从碱长花岗斑岩到似斑状碱长花岗岩之间的岩浆演化关系。总体来看,两类岩石 5 个样品构成的等时线(图 5)线性关系还是较理想的,相关系数为 0.999 9,反映了它们之间具有密切的内在联系,等时线斜率 0.001 821,斜率误差为 0.000 015,等时线年龄为 128.2 ± 1.1 Ma。虽然个别样品硅化较强,但由于这种硅化是岩体结晶过程中本身残留热液自交代作用所引起的,体系依然是相对封闭的,故其数值有较高的可信度。同位素年代学结果显示,岩体形成

表 2 东七一山碱长花岗岩 Rb-Sr 同位素组成

Table 2 Rb-Sr isotopic composition of Dongqiyishan alkali feldspar granite

样号	$w_{ij}/10^{-6}$		<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	±2σ
	Rb	Sr			
DQ-15-1	1 291	9.16	835	2.227 801	15
DQ-15-5	1 330	28.0	377.57	1.402 298	19
DG-12-4	704	74.4	43.716	0.777 962	5
DG-12-5	732	44.4	54.07	0.805 707	5
DG-12-6	753	30.1	101.09	0.906 019	5

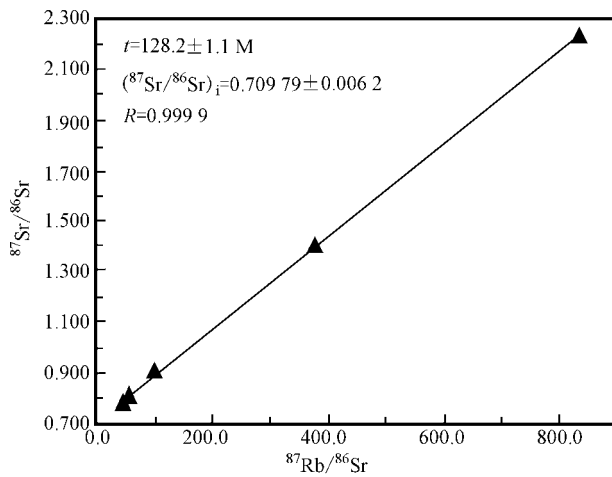


图 5 东七一山碱长花岗岩的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 等时线年龄图

Fig. 5  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  versus  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  isochron diagram of Dongqiyishan alkali feldspar granite

于燕山晚期,  $I_{\text{Sr}} = 0.70979$ , 其物质来源具有较明显的壳源和同源特征。

岩体的 Sm、Nd 同位素分析结果如表 3 所示, 其 Sm、Nd 含量相对绝大多数碱土系列花岗岩是较低的(中国科学院贵阳地球化学研究所, 1977), 似斑状碱长花岗岩和碱长花岗斑岩相比, 前者的 Sm 含量平均为  $2.8 \times 10^{-6}$ , Nd 含量平均为  $8.81 \times 10^{-6}$ , 而后的 Sm 含量平均为  $7.69 \times 10^{-6}$ , Nd 含量平均  $21.39 \times 10^{-6}$ , 也就是说, 从碱长花岗斑岩到似斑状碱长花岗岩, Sm、Nd 含量有较明显的下降, 这和相应岩体中稀土元素总量和轻、重稀土元素含量的变化基本是一致的。但作为相邻元素, 其 Sm/Nd 在两类岩石中并没有显著的变化, 在似斑状碱长花岗岩中平均为 0.318 1, 在碱长花岗斑岩中为 0.359 6, Nd 含量仅相对稍高一些。另外,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$

值在两类岩石中相近, 在似斑状碱长花岗岩中两个比值平均分别为 0.226 5 和 0.512 625, 在碱长花岗斑岩中分别为 0.222 8 和 0.512 635, 和亏损地幔值 (Jahn *et al.*, 1988; 江博明, 1989) 相比,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  值偏高,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值偏低。和北山地区花岗岩类的 Nd 同位素组成(江思宏等, 2006) 相比也有些类似。

表 3 东七一山碱长花岗岩的 Sm-Nd 同位素分析结果  
Table 3 Sm-Nd isotopic composition of Dongqiyishan alkali feldspar granite

样号	$\omega_{\text{B}}/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$
	Sm	Nd			
DQ15-1	3.48	11.6	0.232 1	0.512 619	7
DQ15-3	2.96	9.23	0.208 5	0.512 625	6
DQ15-4	1.82	5.60	0.240 3	0.512 631	7
DQ15-5	2.95	8.81	0.225 4	0.512 624	5
DG12-3	4.44	10.3	0.272 9	0.512 690	5
DG12-4	9.74	35.20	0.173 7	0.512 562	5
DG12-5	6.31	21.7	0.178 3	0.512 589	5
DG12-6	11.6	24.80	0.271 4	0.512 695	5
DG12-7	6.35	14.90	0.217 5	0.512 640	5

岩体的 Pb 同位素分析结果如表 4、图 6 所示。在同一类岩石中, 铅同位素比值变化幅度很小, 似斑状碱长花岗岩的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  变化于 38.565 9 ~ 38.742 1,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  变化于 15.639 2 ~ 15.674 4,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  变化于 18.914 8 ~ 19.446 2,  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  变化于 1.989 38 ~ 2.038 92,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  变化于 0.805 66 ~ 0.826 82。碱长花岗斑岩的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  变化于 38.900 0 ~ 39.428 5,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  变化于 15.695 2 ~ 15.717 0,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  变化于 19.183 3 ~ 20.443 5,  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  变化于 1.928 66 ~ 2.034 48,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  变化于 0.768 81 ~ 0.818 35。这说明同一类岩石的物质来源较狭窄。但两类岩石相比, 仍存在一定差异, 碱长花岗斑岩的铅同位素比值普遍较

表 4 东七一山碱长花岗岩 Pb 同位素分析结果  
Table 4 Pb isotopic composition of Dongqiyishan alkali feldspar granite

样号	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2SE	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2SE	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2SE	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2SE	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2SE
DQ15-1	38.690 5	0.001 7	15.658 1	0.000 7	19.107 0	0.000 7	2.024 93	0.000 04	0.819 49	0.000 02
DQ15-3	38.565 9	0.001 8	15.639 2	0.000 7	18.914 8	0.000 8	2.038 93	0.000 03	0.826 82	0.000 01
DQ15-4	38.742 1	0.001 6	15.674 4	0.000 5	19.345 5	0.000 6	2.002 62	0.000 04	0.810 23	0.000 01
DQ15-5	38.685 7	0.001 3	15.666 9	0.000 5	19.446 2	0.000 6	1.989 38	0.000 03	0.805 66	0.000 01
DG12-3	39.028 6	0.001 6	15.698 6	0.000 7	19.183 3	0.000 8	2.034 48	0.000 03	0.818 35	0.000 01
DG12-4	39.424 0	0.002 0	15.716 9	0.000 7	20.097 9	0.000 7	1.961 60	0.000 05	0.782 02	0.000 01
DG12-5	39.428 5	0.001 8	15.717 0	0.000 7	20.443 5	0.000 9	1.928 66	0.000 04	0.768 81	0.000 01
DG12-6	38.900 0	0.001 9	15.695 2	0.000 6	19.491 3	0.000 8	1.995 76	0.000 03	0.805 24	0.000 01
DG12-7	39.001 2	0.002 0	15.704 0	0.000 9	20.026 5	0.001 0	1.947 48	0.000 02	0.784 16	0.000 01

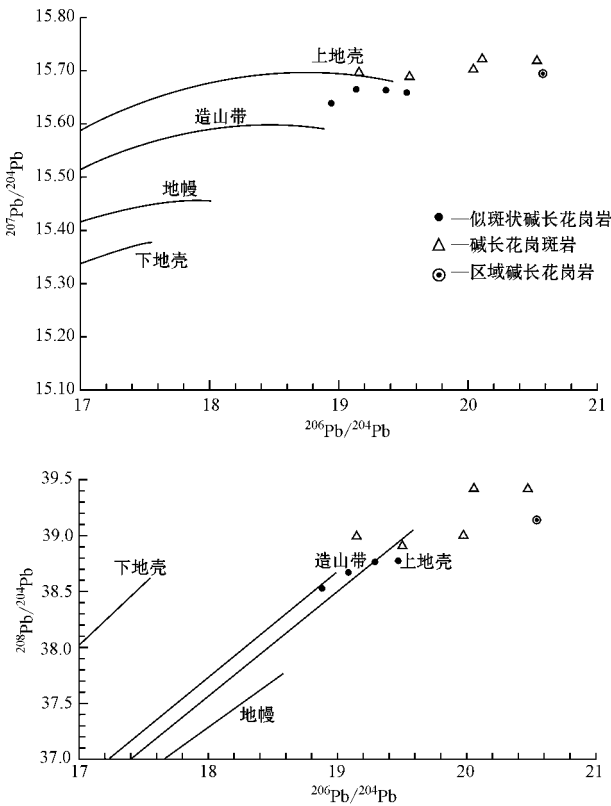


图 6 东七—山碱长花岗岩的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图(地幔、上地壳、造山带和下地壳铅演化线引自 Zartman 等, 1988)

Fig. 6  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagram showing isotopic features of Dongqiyan alkali feldspar granite (after Zartman *et al.*, 1988)

似斑状碱长花岗岩偏低,另外也相对分散,暗示物质来源较广于似斑状碱长花岗岩。整体和区域上的碱长花岗岩铅同位素组成(图 6)(聂凤军等, 2002)基本一致,表明铅同位素也以富含放射性成因铅为特征。

### 3 东七—山碱长花岗岩成因探讨

北山地区是我国与岩浆活动有关的重要成矿区,除了各时代地层中大量发育的火山岩外,侵入岩,特别是花岗岩类分布非常广泛,几乎占到基岩出露面积的三分之一。岩浆侵入活动贯穿于本区地壳演化的各个时期,其中分布面积最广的则是海西中晚期花岗岩,出露面积几乎接近基岩分布范围的一半,它们的形成与古生代时期哈萨克斯坦板块和塔里木板块的碰撞造山及陆内裂谷等地壳活动密切有

关。二叠纪末,北山成为统一和相对稳定的陆块。

长期以来,众多地质工作者认为,北山地区进入中生代后,其地壳活动主要表现为整体抬升、经受剥蚀以及受断裂控制的山间陆相盆地的沉积作用,岩浆活动基本不存在。但近年来的大量工作(杜玉良等, 2009; 殷先明, 2008a, 2008b; 彭振安等, 2010)表明,北山地区中生代的花岗质岩浆侵入活动比较发育,而且它们与区内一些内生成矿作用具有密切联系,也即在中生代北山陆壳有较明显的活化现象。

目前在北山地区发现的中生代花岗岩体近 40 个(殷先明, 2008a),其中早中生代(三叠纪)花岗岩数量稍占优势,有较确切同位素年龄的晚中生代(白垩纪)花岗岩数量还不到 10 个。这些岩体的分布有如下一些特点:①在空间上主要受东西向和北北东向断裂的控制,其中以后者的控制更为明显(杜玉良等, 2009);②岩体的规模都不大,绝大多数以岩株及岩枝形式出露,但对一些含矿岩体的深部勘探表明,有相当部分岩体的剥蚀深度较浅,同时,说明岩浆分异作用较强的岩相分带普遍发育;③岩体以偏酸-偏碱为特征,特别是钾长花岗岩及钠长石发育的碱长花岗岩是这个时代岩体的一大特色。④与其有关的成矿作用以岩浆热液型为主,特别是石英脉型金矿(杜玉良等, 2009)、斑岩性钼矿(沈存利等, 2010)和蚀变岩型稀有、稀土矿床(王勇等, 2009)在北山地区占有重要地位。⑤岩体的形成环境以板内伸展变形发育为特征(杜玉良等, 2009)。对东七—山碱长花岗岩的岩石学及地球化学等方面研究表明,该岩体也具有与此类似的如下特征。

(1)东七—山岩体在空间上处于斜山-凤尾山近东西向挤压带中,该带形成于中生代之前,受它控制的还有分布广泛的晚古生代中酸性侵入岩,表明东西向构造活动从古生代一直延续到中生代,并总体控制了中生代的岩浆侵入活动,但东七—山岩体又具体受北东和北西向两组派生构造控制。

(2)碱长花岗岩斑岩和似斑状碱长花岗岩在岩性上虽有一定差异,但二者存在过渡关系;两类岩石中,钾长石和钠长石,特别是后者均为最主要的矿物成分,其中云母类型也相同,表明形成它们的岩浆相同。但似斑状碱长花岗岩中的交代作用较强,并且钠长石的数量明显多于碱长花岗岩斑岩,空间上后者主要处于前者的外侧,似斑状碱长花岗岩基本构成了中心相,这种关系表明,似斑状碱长花岗岩是碱长花岗岩进一步演化的产物。

(3) 两类岩石的化学成分具有很大的相似性,二者基本均属高钾钙碱性系列,在过铝指数图上也主要集中在过碱性区。稀土元素的模式图和微量元素蛛网图也十分相似,进一步验证了它们具有共同的岩浆源,但似斑状碱长花岗岩的高钾钙碱性和过碱性特征更显著, $\text{Na}_2\text{O}$  和 Rb、Nb + Ta、W、Mo、Bi、Li 等元素含量相对更高,Hf/Zr 值也较高,基性组分和稀土元素含量趋少,而轻重稀土元素比值增高,特别是似斑状碱长花岗岩中热液蚀变作用更发育,Nb、Ta 矿化更强,暗示了它是在碱长花岗质岩浆进一步分异演化基础上形成的,也即两类岩体是同源花岗质岩浆分异作用的产物(图 7)。

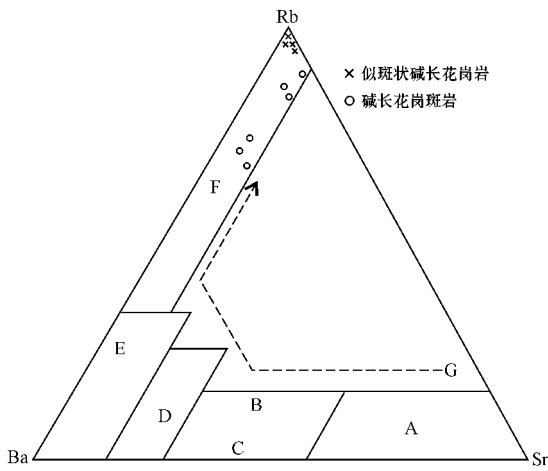


图 7 同源花岗质岩浆分异趋势图(据 Bouseily 和 Sokk, 1975)

Fig. 7 Differentiation trend of comagmatic granite magma (after Bouseily, 1975)

A—闪长岩; B—花岗闪长岩; C—石英闪长岩; D—例外的花岗岩; E—正常花岗岩; F—强烈分异花岗岩; G—岩浆分异趋势  
A—diortite; B—granodiorite; C—quartz diorite; D—exceptional granite; E—normal granite; F—strongly differentiated granite; G—differentiation trend of magma

(4) 两类碱长花岗岩的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 构成理想的等时线年龄图(图 5)相关系数高达 0.999 9,所计算的年龄  $128.2 \pm 1.1 \text{ Ma}$  也应是可靠的,即它们形成于早白垩纪,  $I_{\text{Sr}} = 0.70979$ ,显示其物质来源具有较明显的壳源和同源特征。两类岩体的 Sm、Nd 同位素也十分相近。Pb 同位素比值虽不是非常接近,但总体还是一致的,在图 6 中,样品投点落在造山带和上地壳的连接部位,但更具有上地壳特征,区域碱长花岗岩的投点(聂凤军等, 2002)也在这个

区域。

根据以上特征,对东七一山碱长花岗岩的形成过程可概括如下:

北山地区在晚古生代经过哈萨克板块和塔里木板块碰撞-造山和陆内裂谷等构造活动,于二叠纪末形成统一的陆块,中生代时期,北山陆壳总体处于一个缓慢隆升的相对稳定发育期,但古生代时期强烈发育的东西向等构造形迹,对中生代陆壳的活动仍有一定的影响,例如,中生代的一些陆相断陷盆地,总体也呈东西向分布。另外,东西向断裂构造作为古生代岩浆活动的主要通道,到中生代,也基本是北山陆壳相对薄弱段,因而也自然成为深部岩浆向上运移的主要空间,地壳浅部的挤压-伸展等构造活动就成了侵入岩浆定位的制约因素(图 8)。东七一山碱长花岗岩就是在这种特殊的环境形成的。

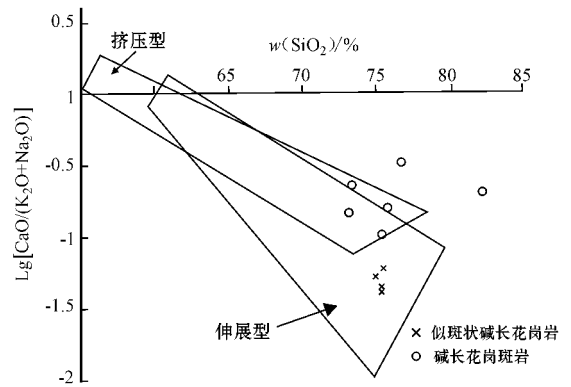


图 8  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Lg}[\text{CaO}/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})]$  所确定的构造环境图(据李三忠等, 2004)

Fig. 8  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Lg}[\text{CaO}/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})]$  diagram of Dongqiyishan alkali feldspar granite (after Li Sanzhong et al., 2004)

Rb-Sr、Sm-Nd 和 Pb 同位素分析结果表明,构成东七一山碱长花岗岩的物源应为板内造山带的上地壳岩石。对我国一些含矿碱长花岗岩的研究(夏卫华等, 1985, 1989; 杨岳清等, 1987; 白鸽等, 1988)表明,以碱性长石为主的花岗岩是在类似花岗闪长岩和二长花岗岩成分的岩浆经过分异演化产生的。根据东七一山地区钾长花岗岩分布甚广、空间上和碱长花岗岩密切相伴、钾长石在碱长花岗岩中普遍存在且被钠长石强烈交代等现象,笔者认为,二长花岗岩基本定位后,富碱和挥发组分的残余岩浆分异结晶形成了钾长花岗岩,钾长花岗岩浆最后结晶分异



形成了碱长花岗岩,之后,在岩浆上侵和定位的过程中,继续产生较强的分异作用,首先在较浅的环境中形成碱长花岗斑岩,并构成了未冷凝碱长花岗岩浆的外层,而中心部位更富碱、富挥发组分的岩浆在相对封闭的环境中继续冷凝结晶形成似斑状碱长花岗岩,期间交代作用更强烈(特别是钠长石化和硅化),Nb、Ta等稀有元素的矿化更强,因此形成了在稀有金属花岗岩中特有的自形斑状石英及其中钠长石呈环带分布的“雪球结构”(夏卫华等,1985,1989)。

目前,内蒙古北山地区的碱长花岗岩已发现多处,其产出特征和东七一山碱长花岗岩有较多相似之处,暗示它们也是形成于燕山期岩浆活动中,这对扩大Nb-Ta等稀有金属资源的寻找有积极的指导意义。

## References

- Bei Ge, Yuan Zhongxin and Ding Xiaoshi. 1988. Characteristics of Niobium-Tantalum-rich granites in China and investigation of their petrogenesis[J]. Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, CAGS, (1): 1~9 (in Chinese).
- Bouseily A M and Sokk A A. 1975. The relation between Rb, Ba and Sr in granite rocks[J]. Chemical Geology, 16: 207~219.
- Du Yuliang, Yin Xianming, Feng Zhishuang, et al. 2009. Mesozoic structural-magmatic activities and mineralization in Beishan Region[J]. Northwestern Geology, 42(2): 48~54 (in Chinese).
- He Xuexian, Tang Suohan, Zhu Xiangkun, et al. 2007. Precise measurement of Nd isotopic ratios by means of multi-collector magnetic sector inductively coupled Plasma Mass Spectrometry[J]. Acta Geoscientia Sinica, 28(4): 405~410 (in Chinese).
- He Xuexian, Zhu Xiangkun, Yang Chun, et al. 2005. High-precision analysis of isotope ratios using MC-ICP-MS[J]. Acta Geoscientia Sinica, 26(sup.): 19~22 (in Chinese).
- He Shiping, Zhou Huiwu, Ren Bingchen, et al. 2005. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China[J]. Northwestern Geology, 38(3): 6~15 (in Chinese).
- Institute of Guiyang Geochemistry, The Chinese Academy of Sciences. 1977. Handbook of Brief Geochemistry[M]. Beijing: Science House (in Chinese).
- Jahn B M, Auvray B, Shen Q H, et al. 1988. Archean crustal evolution in China: the Taishan complex and evidence for juvenile crustal addition from longterm depleted mantle[J]. Precamb. Res., 38: 381~403.
- Jiang Sihong and Nie Fengjun. 2006. Nd-isotope constraints on origin of granitoids in Beishan Mountain Area[J]. Acta Geologica Sinica, 80(6): 826~842 (in Chinese).
- Li Tong, Yuan Huayu and Wu Shengxi. 1998. On the average chemical composition of granitoids in China and the world[J]. Geotectonica et Metallogenia, 22(1): 29~34 (in Chinese).
- Li Sanzhong, Hao Defeng, Zhao Guochun, et al. 2004. Geochemistry features and origin of Dandong granite[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(6): 1417~1423 (in Chinese).
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai Daming, et al. 2002. Metallogenic Studies and Ore Prospecting in the Conjunction Area of Inner Mongolia Autonomous Region, Gansu Province and Xinjiang Uygur Autonomous Region (Beishan Mt. I M). Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- Nockolds S R. 1954. Average chemical composition of some igneous rocks[J]. Bull. Geol. Soc. Amer., 65: 124~131.
- Peng Zhen'an, Li Honghong, Qu Wenjun, et al. 2010. Molybdenite Re-Os age of Xiaohulishan molybdenum deposit in Beishan area, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 29(3): 510~516 (in Chinese with English abstract).
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor element[J]. Lithos, 22: 247~263.
- Shen Cunli, Zhang Mei, Yu Xiqing, et al. 2010. New progresses in exploration of molybdenum deposits and analysis of mineralization prospect in Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 46(4): 561~575 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes[J]. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Wang Yong, Lü Qingtian, Meng Guixiang, et al. 2009. Alkali feldspar granite of Dongqiyishan, Inner Mongolia and its metallogenesis[J]. Acta Geologica Sinica, 83(10): 1505~1514 (in Chinese with English abstract).
- Xia Weihua, Zhang Jintong, Feng Zhiwen, et al. 1985. The Genesis of Rare Element Mineralized Granites, Scientific Papers on Geology for International Exchange[M]. Beijing: Geological Publishing House, 271~278 (in Chinese with English abstract).
- Xia Weihua, Zhang Jintong, Feng Zhiwen, et al. 1989. Mineral Deposit Geology of Rare Metal of Granitic Type, Nanling, China[M]. Wuhan: Publishing House of CUGS (in Chinese).
- Yang Yueqing, Ni Yunxiang and Guo Yongquan. 1987. Rock-forming and ore-forming characteristics of the Xikeng granitic pegmatites in Fujian Province[J]. Mineral Deposits, 6(3): 12~21 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Li Ying, Li Wenming, et al. 2008. General discussion on metallogenic tectonic setting of Beishan Mountain, Northwestern China[J]. Northwestern Geology, 41(1): 22~28 (in Chinese).
- Yin Xianming. 2008a. Mesozoic Tectonics, Granite and Mineralization in Beishan Area of Gansu Province[J]. Gansu Geology, 17(1): 1~6 (in Chinese).
- Yin Xianming. 2008b. Re-study on metallogenesis and exploration of Indo-Chinese and Yanshan epoch granite in Beichan area of Gansu Province[J]. Gansu Geology, 17(3): 1~5 (in Chinese).
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Liu Dunyi, et al. 2006. Isotopic Geochronology and Geochemistry of Ophiolites, Granites and Clastic

Sedimentary Rocks in the Qinling Orogenic Belt[ M ]. Beijing : Geological Publishing House( in Chinese ).

Zuo Guochao and He Guoqi. 1990. Plate Tectonics and Metallogenic Regularities in Beishan Region[ M ]. Beijing : Peiking University Publishing House , 1~209( in Chinese ).

## 附中文参考文献

- 白 鸽,袁忠信,丁孝石. 1988. 我国富铋钼花岗岩特征及成因探讨 [ J ]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊 , ( 1 ): 1~9.
- 杜玉良,殷先明,冯治双,等. 2009. 北山地区中生代构造岩浆活动与成矿 [ J ]. 西北地质, 42( 2 ): 48~54.
- 何学贤,唐索寒,朱祥坤,等. 2007. 多接受器等离子体质谱( MC-ICPMS )高精度测定 Nd 同位素分析方法 [ J ]. 地球学报, 28( 4 ): 405~410.
- 何学贤,朱祥坤,杨 淳,等. 2005. 多接受器等离子体质谱( MC-ICP-MS ) Pb 同位素高精度研究 [ J ]. 地球学报, 26( 增刊 ): 19~22.
- 何世平,周会武,任秉琛,等. 2005. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化 [ J ]. 西北地质, 38( 3 ): 6~15.
- 江思宏,聂凤军. 2006. 北山地区花岗岩类成因的 Nd 同位素制约 [ J ]. 地质学报, 80( 6 ): 826~842.
- 江博明. 1989. 太古代岩石的定年——方法学和局限性的讨论 [ J ]. 地球化学 ( 2 ): 103~120.
- 黎 彤,袁怀雨,吴胜昔. 1998. 中国花岗岩类和世界花岗岩类平均化学成分的对比研究 [ J ]. 大地构造与成矿学, 22( 1 ): 29~34.
- 李三忠,郝德峰,赵国春,等. 2004. 丹东花岗岩的地球化学及其成因 [ J ]. 岩石学报, 20( 6 ): 1 417~1 423.

- 聂凤军,江思宏,白大明,等. 2002. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向 [ M ]. 北京 : 地质出版社.
- 彭振安,李红红,屈文俊,等. 2010. 内蒙古北山地区小狐狸山钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义 [ J ]. 矿床地质, 29( 3 ): 510~516.
- 沈存利,张 梅,于玺卿,等. 2010. 内蒙古钼矿找矿新进展及成矿远景分析 [ J ]. 地质与勘探, 46( 4 ): 561~575.
- 王 勇,吕庆田,孟贵祥,等. 2009. 内蒙古东七一山碱长花岗岩及其成矿作用 [ J ]. 地质学报, 83( 10 ): 1 505~1 514.
- 夏卫华,章锦统,冯志文. 1985. 稀有元素矿化花岗岩的成因 [ A ]. 国际交流地质学学术论文集 [ C ]. 北京 : 地质出版社, 271~278.
- 夏卫华,章锦统,冯志文,等. 1989. 南岭花岗岩型稀有金属矿床地质 [ M ]. 武汉 : 中国地质大学出版社.
- 杨岳清,倪云祥,郭永泉,等. 1987. 福建西坑花岗伟晶岩成岩成矿特征 [ J ]. 矿床地质, 6( 3 ): 12~21.
- 杨合群,李 英,李文明,等. 2008. 北山成矿构造背景概论 [ J ]. 西北地质, 41( 1 ): 22~28.
- 殷先明. 2008a. 甘肃省北山地区中生代构造花岗岩侵入及成矿作用 [ J ]. 甘肃地质, 17( 1 ): 1~6.
- 殷先明. 2008b. 甘肃北山印支燕山期花岗岩成矿作用与找矿工作再研究 [ J ]. 甘肃地质, 17( 3 ): 1~5.
- 左国朝,何国琦. 1990. 北山板块构造及成矿规律 [ M ]. 北京 : 北京大学出版社, 1~209.
- 张宗清,张国伟,刘敦一,等. 2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学 [ M ]. 北京 : 地质出版社.
- 中国科学院贵阳地球化学研究所. 1977. 简明地球化学手册 [ M ]. 北京 : 科学出版社.