

doi: 10.12029/gc20160620

李德荣, 牛延宏, 崔根, 等. 黑龙江省嫩江县三矿沟 Cu-Fe-Mo 矿床岩浆岩成因研究[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2104-2117.

Li Derong, Niu Yanhong, Cui Gen, et al. A study of the genesis of igneous rocks from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit in Heilongjiang Province[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2104-2117(in Chinese with English abstract).

黑龙江省嫩江县三矿沟 Cu-Fe-Mo 矿床岩浆岩成因研究

李德荣¹ 牛延宏² 崔 根¹ 王秋阳¹

(1. 黑龙江省矿业集团有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150036;

2. 黑龙江省地质调查研究院齐齐哈尔分院, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要:三矿沟 Cu-Fe-Mo 矿床是大兴安岭地区三矿沟—多宝山构造—成矿带中一个比较典型的矽卡岩型矿床。在大量野外地质调查、室内岩矿鉴定的基础上,对与成矿有关的三矿沟复式英云(花岗)闪长岩体的岩石地球化学特征进行了分析,探讨了该岩体的成因类型和构造环境。研究表明,该矿床岩浆岩体属于钙碱性 I 型花岗岩,具有大陆地壳的特征,形成于与造山花岗岩有关的火山弧环境或相似的构造环境中,主要与造山阶段的火山弧花岗岩关系密切。稀土元素配分图显示向右缓倾斜的轻稀土元素富集型特点,轻、重稀土分馏较为明显,无明显的负铕异常,暗示其具有相同或相近的成因,也反映了同源岩浆的特点。 δEu 值介于 0.81~1.24, δCe 值为 1.00~1.13,表明岩浆演化过程中发生了微弱的分离结晶作用,同时又受到同化混染作用的一定影响,其成岩环境氧逸度较低,指示了缺氧环境,有利于金属元素的积聚而形成矿床。

关键词:三矿沟; Cu-Fe-Mo 矿床; 岩浆岩; 成因研究; 主微量; 黑龙江

中图分类号: P618.201; P588.12²

文献标志码: A

文章编号: 100-3657(2016)06-2104-14

A study of the genesis of igneous rocks from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit in Heilongjiang Province

LI De-rong¹, NIU Yan-hong², CUI Gen¹, WANG Qiu-yang¹

(1. Heilongjiang Mining Group Co., Ltd., Harbin 150036, Heilongjiang, China; 2. Qiqihar Branch of Heilongjiang Institute of Geological Survey, Harbin 150036, Heilongjiang, China)

Abstract: Located along the Sankuanggou-Duobaoshan tectonic-metallogenic belt in Da Hinggan Mountains, the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo deposit is a typical skarn-type deposit. On the basis of field geological survey and indoor rock ore identification, the authors analyzed the lithogeochemical characteristics of Sankuanggou (granite) tonalite related to metallogeny,

收稿日期: 2016-01-26; 改回日期: 2016-03-21

基金项目: 全国危机矿山找矿项目(200623016)资助

作者简介: 李德荣, 男, 1965 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事矿产勘查工作; E-mail: Leederong@163.com.

通讯作者: 牛延宏, 男, 1964 年生, 高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查工作; E-mail: niuyanhong6699@163.com.

and discussed the genetical type and tectonic setting of this rock mass. Studies show that the magmatic rocks of this deposit belong to the calc-alkaline I-type granite, with the characteristics of continental crust, and that these magmatic rocks were formed in a volcanic arc tectonic environment or a similar environment, mainly having close relationship with volcanic arc granite orogenic phase. REE distribution patterns show LREE-enriched patterns with gently rightly inclined shape, and strong REE fractionation with no pronounced negative Eu anomaly, suggesting that these magmatic rocks have the same or similar genesis and reflect the characteristics of comagmatic region. δEu values vary from 0.81 to 1.24, δCe values range from 1.00 to 1.13, indicating that weak fractional crystallization occurred in the process of magma evolution, with some influence of assimilation and contamination, and that their low oxygen fugacity of diagenetic environment might imply some anoxic environment.

Keywords: Sankuanggou; Cu-Fe-Mo deposit; igneous rocks; studies of genesis; major and trace elements; Heilongjiang

About the first author: LI De-rong, male, born in 1965, doctor and senior engineer, mainly engages in mineral exploration work; E-mail: Leederong@163.com.

Fund support: Supported by National Project for Prospecting Superseding Resources in Crisis Mine of China (No. 200623016).

三矿沟Cu-Fe-Mo矿床是大兴安岭地区三矿沟—多宝山构造—成矿带中一个比较典型的矽卡岩型矿床。长期以来,人们认为三矿沟地区属多宝山成矿带的末端,不具备找到大、中型矿床或其他类型矿床的条件,因此,直到2006年才在三矿沟铜铁矿床边部和外围开展了危机矿山接替资源找矿工作^[1]。前人对该成矿带的研究,大多侧重于成矿带中多宝山和铜山斑岩矿床的地质特征^[2]、矿床成因模式^[3,4]、成矿作用^[5]、成矿流体^[6,7]、成矿年代学^[8,9]、同位素地球化学^[10,11]等方面。但是,三矿沟Cu-Fe-Mo矿床自20世纪50年代被发现以来,仅有个别人研究了该矿床的地质特征^[12,13]、地质特征及成因^[14]、成矿物质的流体特征与成矿机制^[15,16]、以及成矿物质来源^[17]。本文是在大量野外地质调查、室内岩矿鉴定的基础上,结合前人研究成果,试图通过对岩体地球化学特征的分析,揭示该矿床岩浆岩的成因类型和构造环境,为进一步研究成矿条件和找矿标志以及深部矿化情况提供岩石学依据。

1 地质背景

三矿沟Cu-Fe-Mo矿床的大地构造位置处于天山—兴蒙造山区,大兴安岭岛弧系,扎兰屯—多宝山岛弧北部上的三矿沟—多宝山北西向构造—成矿带的西北端(图1)。该成矿带位于嫩江和新开岭北东向岩石圈断裂之间的多宝山火山弧附近^[18]。

区内出露地层较为复杂,主要为中奥陶统铜山组、上奥陶统裸河组、志留系黄花沟组以及第四系^[19]。铜山组主要为凝灰质砂砾岩、凝灰质粉砂岩、长石石英砂岩、角岩化粉砂岩、角岩化云母长石砂

岩,夹薄层板岩和大理岩;裸河组主要为角岩化粉砂岩,局部为云母石英角岩夹大理岩透镜体;黄花沟组主要为砂岩、杂砂岩、泥质板岩,夹变粉砂岩和凝灰岩。其中,奥陶系铜山组地层是三矿沟Cu-Fe-Mo矽卡岩矿床的矿源层和成矿围岩(图2)。

经过加里东、华力西、印支、燕山及喜山期等多次的构造运动以后,该矿区构造变形强烈、形式复杂多样,形成了各种背斜、向斜、断裂、环形构造以及岩浆侵入穹窿。其中花朵山向斜和大孤山—育宝山背斜是三矿沟矿床的主要赋矿构造,花朵山向斜中局部紧闭的直立地段是成矿的有利部位,为三矿沟矿床2号矿带提供了赋矿空间;大孤山—育宝山背斜局部地段形成紧闭背斜或倒转背斜,其鞍部及其两翼是三矿沟矿床1号矿带的有利赋矿空间;北西向窝理河断裂、北东向三矿沟断裂以及花朵山环形构造是三矿沟矿床的导矿构造。

三矿沟—多宝山成矿带岩浆活动强烈,具多旋回、多期、多阶段、继承演化的特点^[20],先后经历了奥陶纪岛弧型花岗闪长岩成矿作用、石炭纪造山型花岗闪长斑岩成矿作用、早三叠世基性—中酸性小岩体的成矿作用、晚三叠—中侏罗世中性—中酸性侵入岩体的成矿作用、晚侏罗—早白垩世岩浆成矿作用。区内晚印支—燕山中期构造—岩浆—成矿作用最为强烈,侵入岩为印支晚期—燕山早期的三矿沟复式英云闪长岩体。

三矿沟Cu-Fe-Mo矿床位于花朵山环形构造的西部,北东向与北西向环状断裂的交汇处,矿体赋存于大理岩与角岩的接触界面,以及大理岩的底部,特别是当包有薄层角岩的大理岩被英云闪长岩

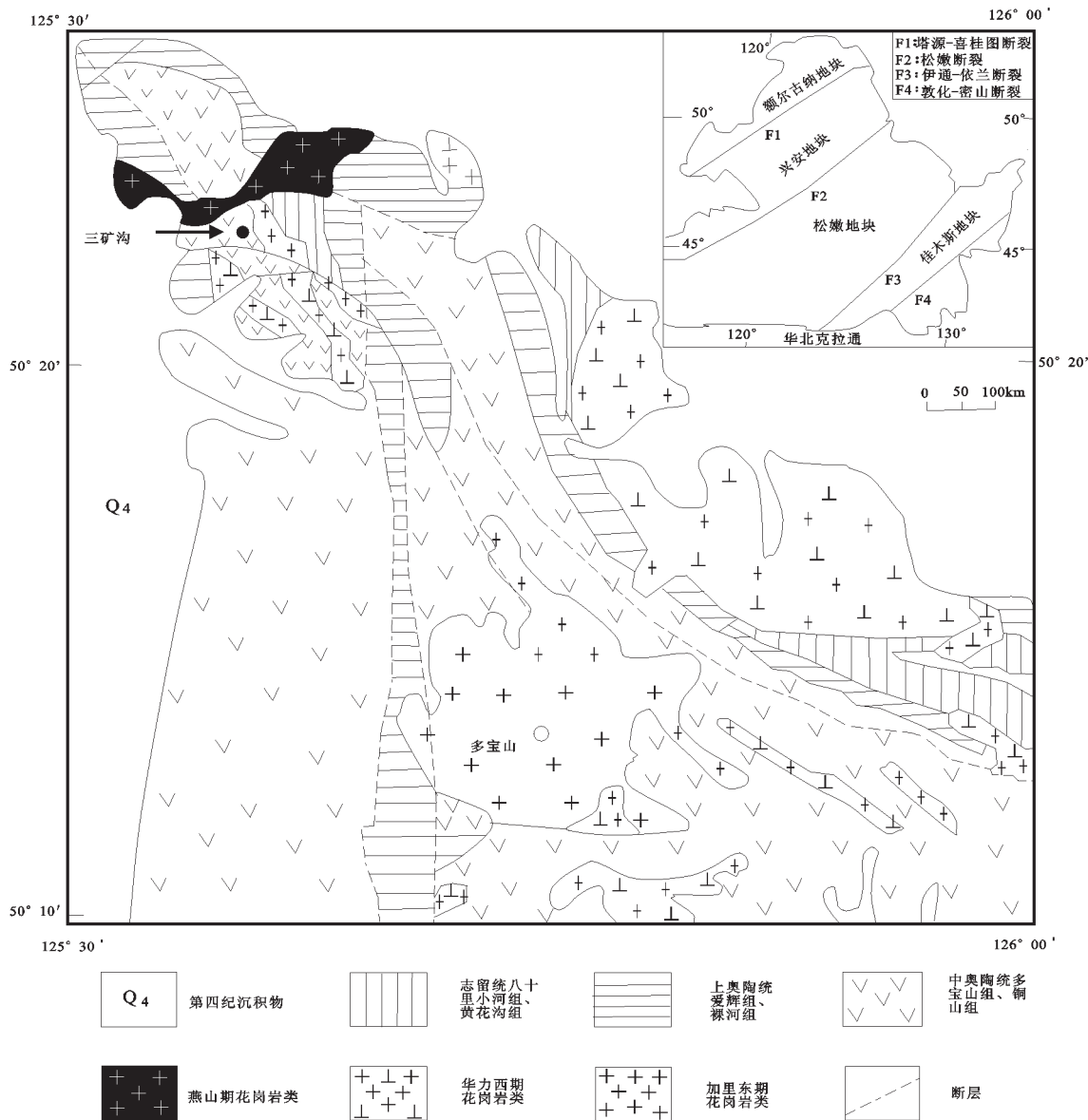


图1 三矿沟—多宝山成矿带区域地质简图(据文献[15]修改)

Fig.1 Regional geological map of the Sankuanggou-Duobaoshan metallogenic belt(modified after reference[15])

捕虏时,其底部或近底部的两侧常形成较厚的矿体,且铜铁共生。该矿床在空间上可划分为3个矿带,包括5个主要矿体,80个次要矿体(图2)。矿体呈小的扁豆状、似层状,其中主矿体主要呈似层状产出,扁豆状矿体常成群断续分布,总体产状随地层产状的变化而变化,其厚度沿走向或倾向呈现突然收缩、尖灭的现象^[21]。

2 岩石学特征

三矿沟 Cu-Fe-Mo 矽卡岩矿床的形成与晚三

叠世—中侏罗世三矿沟复式英云(花岗)闪长岩体的侵入有关。该岩体一般呈岩株状、岩枝状、小侵入体状产出。经过手标本和显微镜观察,主要岩石类型的岩石学特征如下:

英云闪长岩:浅灰—深灰色,中粒结构,块状构造。主要矿物有斜长石、钾长石、石英、黑云母,还有少量的角闪石。其中斜长石含量 65%~75%,灰白色,半自形、他形,柱粒状,大小 2~3 mm。钾长石含量 1%~3%,浅肉红色,半自形、他形,柱粒状,大小 1~3 mm。石英含量 20%~25%,灰白色,他形粒状,

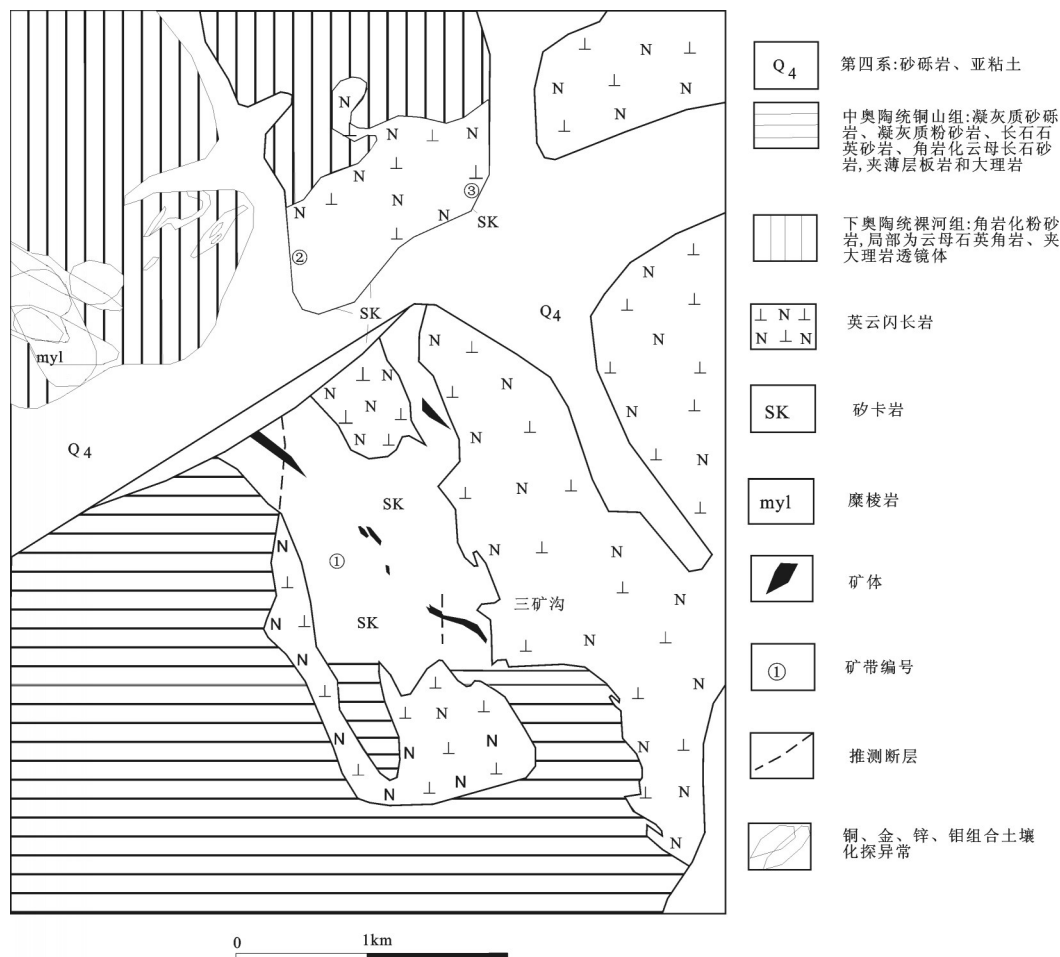


图2 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床地质简图(据文献[21]简化)

Fig.2 Simplified geological map of the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit

大小1~3 mm。黑云母含量5%~10%。局部裂隙中含少量磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、呈微细脉状、浸染状、星点状。岩石普遍具有绿泥石化,少量钠黝帘石化。局部具钾化、硅化、黄铜矿化。

3 地球化学特征

3.1 样品采集和分析方法

本文用于主量元素、微量元素和稀土元素测试的样品采自于钻孔岩心、岩脉、采坑。

主量元素、微量元素和稀土元素样品均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心测试完成。主量元素是依据《GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法》,采用荷兰FHLISP制造的PW2404型X射线荧光光谱仪进行测定,微量元素和稀土元素是依据《DZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱

(ICP-MS)方法通则》,采用Finnigan MAT制造的HR-ICP-MS进行测定。

3.2 主量元素地球化学特征

本文对三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩的主量元素进行了分析,其分析结果见表1。可以看出,三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩SiO₂含量介于66.5%~67.93%,平均含量为67.15%,属于酸性岩浆岩,具有富硅的特点。

三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩的全碱(Na₂O+K₂O)含量为6.95%~7.00%,平均含量为6.98%;Na₂O/K₂O为1.19~1.88,平均为1.47。通过SiO₂-(K₂O+Na₂O)图解^[22](图3)判断该矿床岩石系列,结果显示均投在亚碱性系列区域。结合SiO₂-AR图解加以甄别,该矿床岩浆岩的AR值介于2.22~2.44,在SiO₂-AR图解上^[23](图4),样品均投入了钙碱性

表1 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩主量元素分析结果(%)及其参数值

Table 1 The analytical results (%) of the major elements of magmatic rock from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit and their characteristic parameters

样品编号	Ym II-2	CKIII-2	CK184-1	ZK0-1-1
岩石名称	英云闪长岩	英云闪长岩	英云闪长岩	英云闪长岩
SiO ₂	67.48	66.5	66.68	67.93
Al ₂ O ₃	14.19	13.27	14.74	13.95
Fe ₂ O ₃	4.92	5.55	5.04	4.37
FeO	2.8	2.9	2.8	2.55
MgO	1.89	1.9	1.73	1.87
CaO	3.51	4.26	3.77	2.71
Na ₂ O	4.17	4.07	4.53	3.78
K ₂ O	2.83	2.88	2.47	3.18
MnO	0.08	0.09	0.09	0.07
TiO ₂	0.54	0.57	0.54	0.55
P ₂ O ₅	0.19	0.21	0.22	0.17
LOI	0.18	0.61	0.17	1.32
TFeO	6.92	8.45	7.72	7.84
Na ₂ O+K ₂ O	7.00	6.95	7.00	6.96
CaO/Na ₂ O	0.72	1.05	0.84	0.83
A/CNK	0.96	0.75	0.87	0.87
A/NK	1.44	1.35	1.43	1.45
AR	2.31	2.31	2.22	2.44
σ值	1.94	2.06	2.00	2.07

范围之内。此外,在AFM图解上^[24](图5)所有样品也都投在了钙碱性系列区域。由于SiO₂-AR图解和AFM图的钙碱性区与SiO₂-(K₂O+Na₂O)图的亚碱性区相当,因而可以说明该矿床岩浆岩主要属亚碱性系列。

从表1可以看出,样品的里特曼指数σ值($\sigma = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)$)介于1.94~2.07,表明该矿床成矿岩浆岩为钙碱性岩。在SiO₂-K₂O图解中^[25](图6),所有样品都集中在中钾钙碱性系列与高钾钙碱性系列分界线附近,反映该矿床岩浆岩具有由中钾钙碱性过渡为高钾钙碱性系列的特征。这些特征不但表明成矿岩浆岩属钙碱性岩,还表明了这些岩石具有成因联系,很可能系形成于同一构造背景下的同源岩浆经分离结晶作用形成。

三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩相对富铝,Al₂O₃

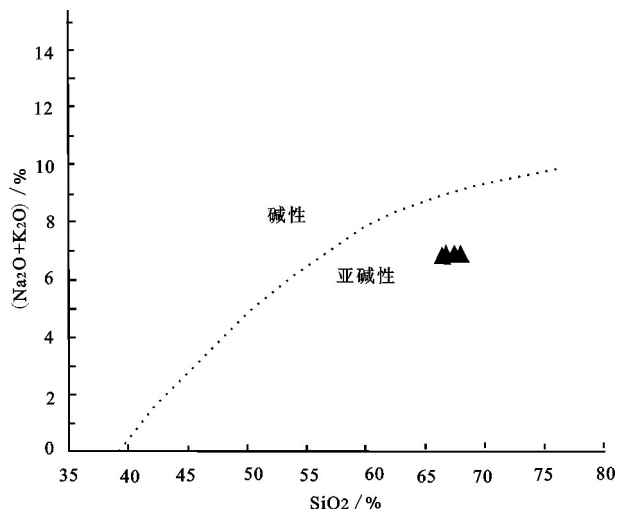


图3 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩SiO₂-(K₂O+Na₂O)图解(底图据文献[22])

Fig. 3 SiO₂-(K₂O + Na₂O) diagram of magmatic rock from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit

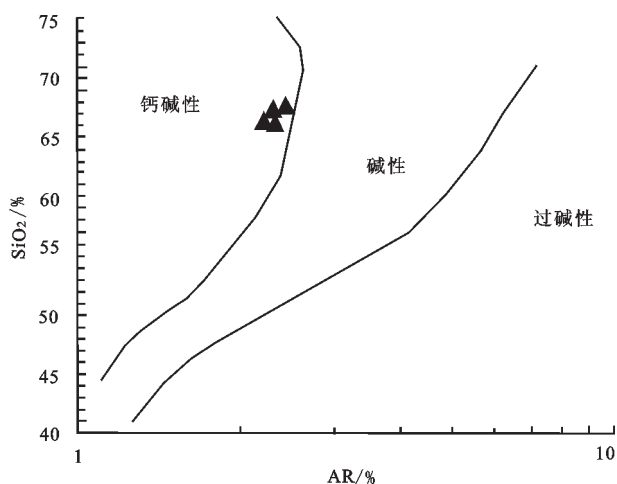


图4 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩SiO₂-AR图解(据文献[23])

Fig. 4 SiO₂-AR diagram of magmatic rock from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit

含量介于13.27%~14.74%,平均含量为14.04%,表明该岩石的黏度较大,暗示着长石的含量高。A/NK介于1.35~1.45,平均值为1.40;A/CNK变化于0.75~0.96,平均值为0.86。

Harker图解可以用来反映主量元素之间的相关关系。在Harker图解(图7)中,SiO₂与K₂O呈正相关关系,SiO₂与Al₂O₃、MgO、FeO、TiO₂呈明显的负相关关系,Na₂O、CaO、P₂O₅与SiO₂没有明显的相关性,

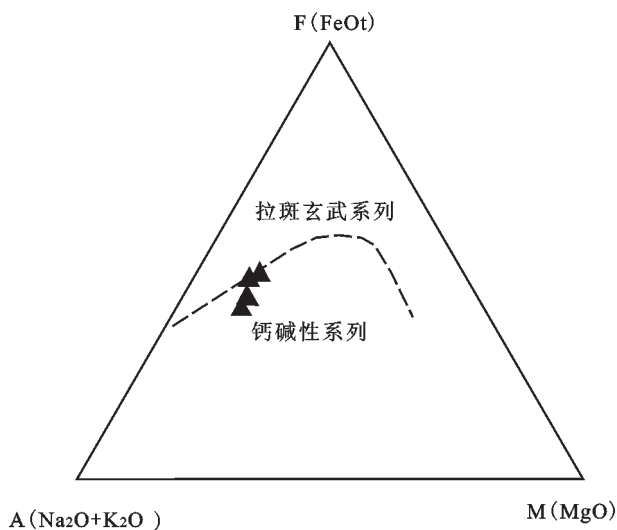


图5 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩AFM图解
(底图据文献[24])

Fig. 5 AFM diagram of magmatic rock from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit

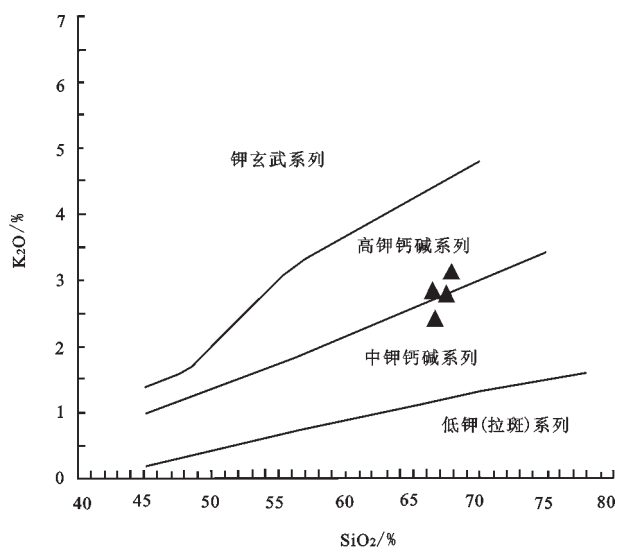


图6 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩SiO₂-K₂O图解
(底图据文献[25])

Fig. 6 SiO₂-K₂O diagram of magmatic rock from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit

这说明在岩浆演化过程中大部分暗色矿物和长石发生了结晶分异作用,但也有相当一部分岩浆演化程度不高。Al₂O₃、FeO、TiO₂与SiO₂呈明显的负相关关系,说明黑云母在岩浆演化中明显分离,岩浆成分分异可能主要受黑云母分离结晶的控制。

3.3 微量元素地球化学特征

微量元素可以用来指示岩浆演化过程、大地构造环境、岩相古地理环境、恢复变质岩原岩,也可以作为元素温度计、压力计和氧逸度计等。因此,本文对三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩的微量元素进行了分析,其分析结果见表2。

微量元素比值蛛网图常用于微量元素的成岩意义分析^[26]。在微量元素蛛网图上^[27](图8),U和Pb表现为明显的富集,Nb、Ta明显亏损,Ba、Sr为正常-富集,Th、Pr、Nd为正常-亏损。Pb的富集和Nb的相对亏损反映出陆壳成分的特点^[28]。

3.4 稀土元素地球化学特征

稀土地球化学研究可以用来探讨岩石的形成机制或成因分类,判别成岩成矿构造环境,示踪成岩作用过程以及成岩成矿物理化学条件等。三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩的微量元素和稀土元素分析结果见表3。

三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩稀土元素总量 Σ REE变化范围较大,介于 $64.764 \times 10^{-6} \sim 133.619 \times 10^{-6}$;轻稀土LREE变化范围 $57.061 \times 10^{-6} \sim 121.55 \times 10^{-6}$,重稀土HREE介于 $7.703 \times 10^{-6} \sim 12.4 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE比值范围为7.41~10.07,具轻稀土富集特征,与来自壳源的英云闪长岩吻合。La/Yb比值介于9.85~16.03,(Gd/Yb)_N变化范围为1.26~1.80,表明轻、重稀土分馏程度高。LREE/HREE、La/Yb比值大,也反映了轻、重稀土分馏程度高。La/Sm比值介于5.54~6.07,Gd/Yb比值为1.52~2.17,暗示轻稀土元素分馏程度略高,HREE内部分馏作用弱。(La/Yb)_N比值介于7.07~11.51,轻稀土相对富集;(Ce/Yb)_N比值为5.64~9.00,轻稀土元素的分馏程度较高于重稀土元素。(La/Yb)_N > 1,(La/Sm)_N > 1,也反映了轻稀土富集的特点。(La/Sm)_N介于3.58~3.92,(La/Sm)_N和(Gd/Lu)_N可以反映轻重稀土元素内部分异情况,该矿床岩浆岩(La/Sm)_N和(Gd/Lu)_N(1.17~1.81)的比值都较小,说明轻、重稀土元素内部分异不明显。

在球粒陨石标准化的稀土元素配分图^[29](图9)中,所有样品总体表现为相似的平滑的右倾型曲线,轻稀土元素配分型式为逐渐降低,重稀土元素则近于水平,属于向右缓倾斜的轻稀土元素富集型,轻、重稀土分馏较为明显,无明显的负偏异常,暗示其具有相

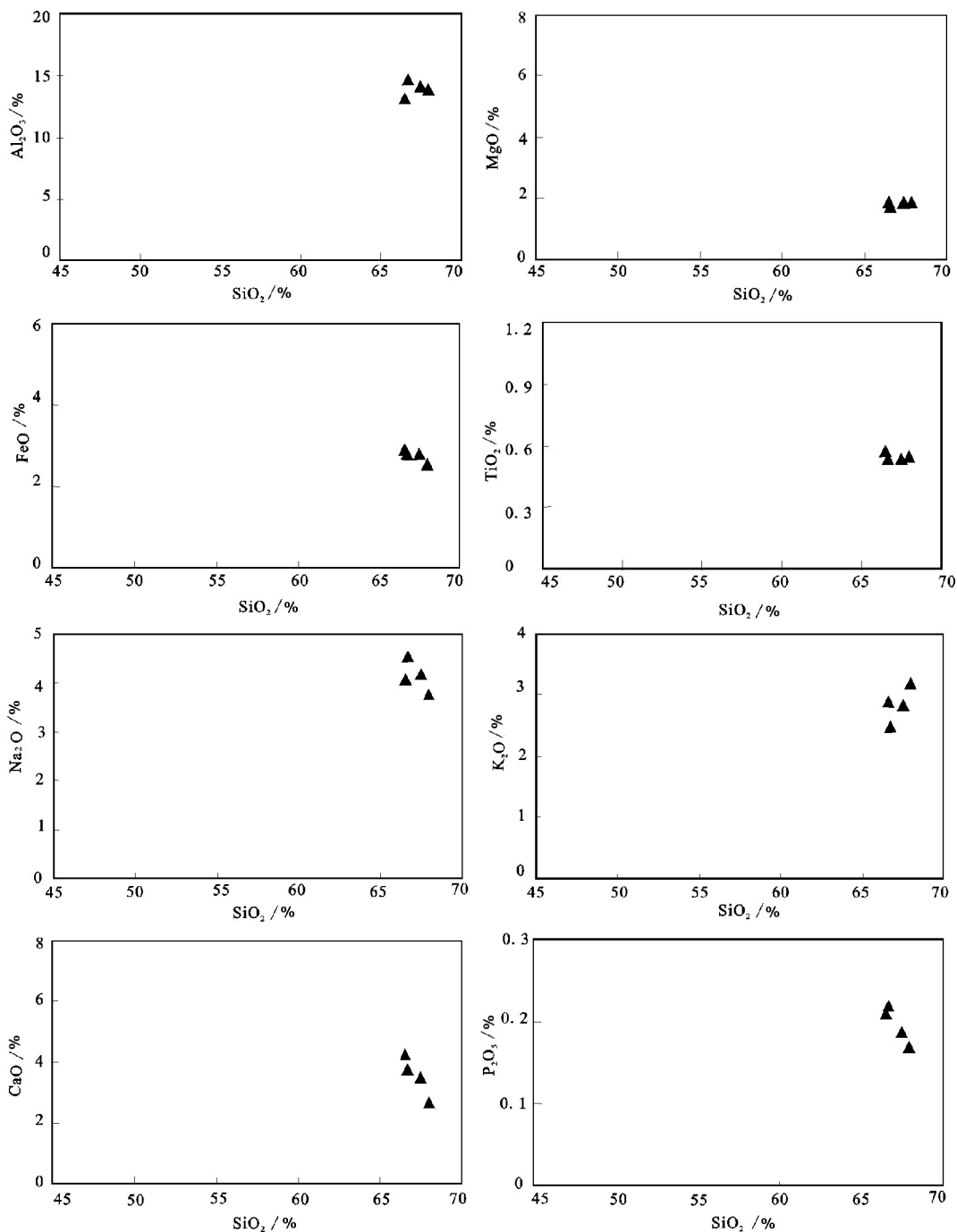


图7 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩Harker图解

Fig. 7 Harker diagrams of magmatic rock from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit

同或相近的成因,也反映了同源岩浆的特点^[26]。

4 讨论

4.1 岩石成因

三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩A/CNK全部小

于1.1,显示I型花岗岩的特点。在A/CNK-A/NK关系图上^[30](图10),所有样品点均落在准铝质区域,表明该矿床岩石属于准铝质系列,反映了I型花岗岩的特征。将主量元素Na₂O和K₂O投在Na₂O-K₂O成因图解上^[31],所有样品点也都落在了I型花岗

表2 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩微量元素分析结果
(10⁻⁶)及其参数值
Table 2 The analytical results (10⁻⁶) of the trace elements of
magmatic rock from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit
and their characteristic parameters

样品编号	ZK0-1-1	CKIII-2	Ym II-2	CK184-1
岩石名称	英云闪长岩	英云闪长岩	英云闪长岩	英云闪长岩
Rb	69.6	69.4	63.5	63.4
Sr	330	393	394	498
Y	11.8	16.1	17.8	17.2
Nb	6.78	7.11	7.71	7.55
Ba	1794	579	587	548
Hf	4.16	2.81	3.62	3.54
Ta	0.586	0.549	0.686	0.655
Pb	17.3	8.98	10.3	11.5
Th	8.27	7.76	8.73	8.46
U	6.59	3.21	3.31	7.96
Ba/Nb	264.60	81.43	76.13	72.58
Rb/Nb	10.27	9.76	8.24	8.40
Th/Nb	1.22	1.09	1.13	1.12
Th/U	1.25	2.42	2.64	1.06
Th/Ta	14.11	14.13	12.73	12.92
Nb/U	1.03	2.21	2.33	0.95

岩区域(图11)。因此,充分说明该矿床岩浆岩属I型花岗岩的特征,是活动大陆边缘的产物。

三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩CaO/Na₂O比值介于0.72~1.05,均大于0.3,说明源区的成分成熟度

普遍很低,指示该矿床岩浆岩的源岩可能是沉积岩或火成岩。TFeO含量为6.92%~8.45%,Fe₂O₃>FeO;MgO含量为1.73%~1.90%,平均含量为1.85%,镁铁含量较低,碱质成分含量较高,且Na₂O>K₂O,反映拉伸减薄作用中地壳成熟度降低的过程;TiO₂含量为0.54%~0.57%,平均含量为0.55%;P₂O₅含量为0.17%~0.22%,平均含量为0.20%。

微量元素对比值在岩浆岩地球化学研究中具有重要的意义,可以指示岩石源区成分特征。Ba/Nb、Rb/Nb、Th/Nb、Th/U、Th/Ta的比值分别介于72.58~264.60、8.24~10.27、1.09~1.22、1.06~2.64、12.73~14.13,均反映了大陆地壳成分的特点。Sm/Nd比值介于0.18~0.21,小于0.3,具明显的壳源成因。La/Nb比值介于1.96~3.70,平均3.04,明显高于原始地幔(地幔物质La/Nb比值为0.98~1),接近于地壳的La/Nb比值(1.5~2.2),同样也显示出地壳成分的特征。Nb/U的比值范围为1.03~2.33,远远低于球粒陨石和原始地幔(34),也显示出受到地壳组分的混染。该矿床岩浆岩样品均出现Th>Ta、La>Ta的现象,说明岩石受到一定程度的陆壳混染作用的影响^[32,33]。由此可见,该矿床岩浆岩具有大陆地壳的特点,这正与微量元素在蛛网图上的富集和亏损所暗示的结论一致。

该矿床岩浆岩样品δEu值介于0.81~1.24,只有1件样品的δEu值(1.24)大于1.05,显示正锕异常,其余样品的δEu值均小于0.95,表现为Eu弱亏损

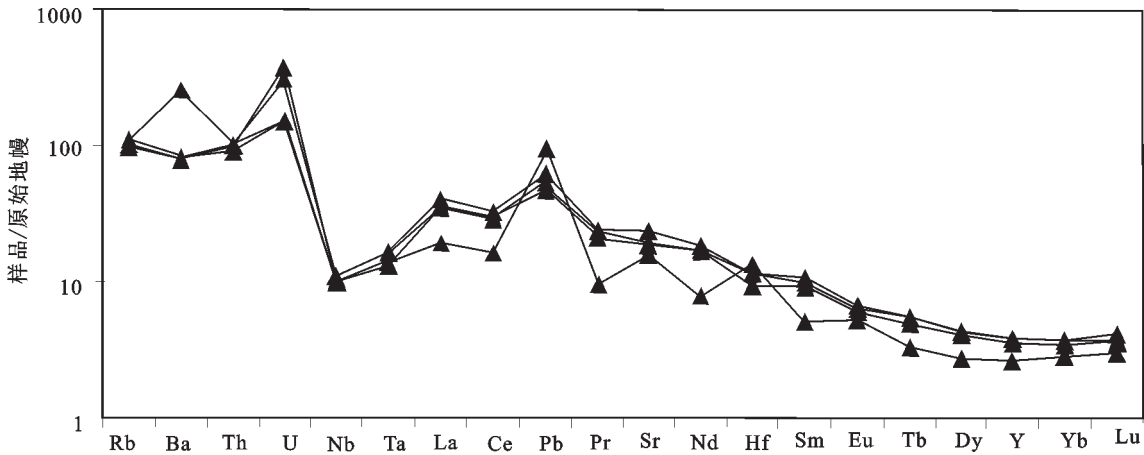


图8 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩微量元素原始地幔蛛网图(原始地幔标准值引自文献[27])
Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element spidergrams of magmatic rock from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit

表3 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩稀土元素分析结果(10^{-6})及其参数值

Table 3 The analytical results (10^{-6}) of rare earth elements of magmatic rock from the Sankuangou Cu-Fe-Mo deposit and their characteristic parameters

样品编号	ZK0-1-1	CKIII-2	Ym II-2	CK184-1
岩石名称	英云闪长岩	英云闪长岩	英云闪长岩	英云闪长岩
La	13.3	24	24	27.9
Ce	27.4	51	51.9	56.4
Pr	2.71	6.52	5.86	6.54
Nd	10.6	22.4	23.3	25
Sm	2.19	4.01	4.33	4.61
Eu	0.861	1.02	1.07	1.1
Gd	2.05	3.42	3.57	3.78
Tb	0.346	0.529	0.571	0.583
Dy	1.97	2.94	3.32	3.19
Ho	0.387	0.531	0.61	0.575
Er	1.18	1.67	1.86	1.67
Tm	0.203	0.263	0.297	0.272
Yb	1.35	1.69	1.87	1.74
Lu	0.217	0.276	0.302	0.259
Σ REE	64.764	120.269	122.86	133.619
LREE	57.061	108.95	110.46	121.55
HREE	7.703	11.319	12.4	12.069
LREE/HREE	7.41	9.63	8.91	10.07
La/Sm	6.07	5.99	5.54	6.05
La/Nb	1.96	3.38	3.11	3.70
La/Yb	9.85	14.20	12.83	16.03
Gd/Yb	1.52	2.02	1.91	2.17
(La/Yb) _N	7.07	10.19	9.21	11.51
(Ce/Yb) _N	5.64	8.38	7.71	9.00
(La/Sm) _N	3.92	3.87	3.58	3.91
(Gd/Yb) _N	1.26	1.67	1.58	1.80
(Gd/Lu) _N	1.17	1.54	1.47	1.81
δ Eu	1.24	0.84	0.83	0.81
δ Ce	1.12	1.00	1.07	1.02

型,表明岩浆演化过程中斜长石发生了微弱的分离结晶作用;而正铕异常,又表明该矿床岩浆岩在一定程度上受到上地壳富CaO、Al₂O₃的岩石的同化混染作用。 δ Ce值介于1.00~1.12,大多数大于1,表现

Ce为弱富集型,表明其成岩环境氧逸度较低,指示了缺氧环境。

总之,三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩是在岩浆源区发生了地壳混染作用以后,通过岩浆平衡部分熔融作用和结晶分离作用形成的钙碱性I型花岗岩,表现为Eu弱亏损型、Ce为弱富集型,其岩浆演化过程中发生了微弱的分离结晶作用,同时又受到同化混染作用的一定影响,其成岩环境氧逸度较低,指示了缺氧环境。

4.2 构造背景判别

花岗岩元素地球化学组成在一定程度上能够反映花岗岩岩体形成的大地构造背景。前人先后提出了运用花岗岩主量元素组合判别花岗岩构造环境的不同方法^[30,34]。将三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩的主量元素SiO₂、CaO、Na₂O、K₂O投影在SiO₂-CaO/(Na₂O+K₂O)构造环境判别图解中,样品均投影到同构造花岗岩(TGGM)+晚构造花岗岩(SMG)的区域(图12-a),说明该矿床花岗岩主要是与造山阶段中地壳运动(褶皱作用)的发生同时侵入的,是岩浆在结晶过程中尚未完全固结前受强烈的区域构造应力影响下结晶形成的花岗岩,但是又在一定程度上受到晚构造作用的影响。将该矿床岩浆岩的主量元素SiO₂、CaO、TFeO、MgO分别投影到CaO-(TFeO+MgO)、MgO-TFeO、SiO₂-TFeO/(TFeO+MgO)构造环境判别图中,由CaO-(TFeO+MgO)构造环境判别图(图12-b)可以看出,样品均落到IAG+CAG+CCG区域,从而排除了是洋脊花岗岩的可能,暗示它们具有相似的形成环境和成因,也表明成矿岩浆岩主要为造山花岗岩。在MgO-TFeO构造环境判别图(图12-c)中,样品均落到IAG+CAG+CCG区域,暗示了它们很可能是同源岩浆演化形成,表明该矿床岩浆岩与造山花岗岩关系更为密切,但又在一定程度上受到后造山作用的影响。在SiO₂-TFeO/(TFeO+MgO)构造环境判别图(图12-d)中,所有样品均落到IAG+CAG+CCG区域,说明该矿床岩浆岩与造山花岗岩密切相关。

微量元素和稀土元素同样也可以用于岩浆岩构造环境的判别。将三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩的微量元素Rb、Hf、Ta数据投影在Rb-Hf-Ta构造环境判别图上^[35],在(Rb/10)-Hf-(Ta×3)图上(图13-a),所有样品均落在火山弧岩浆岩(VAG)区域;

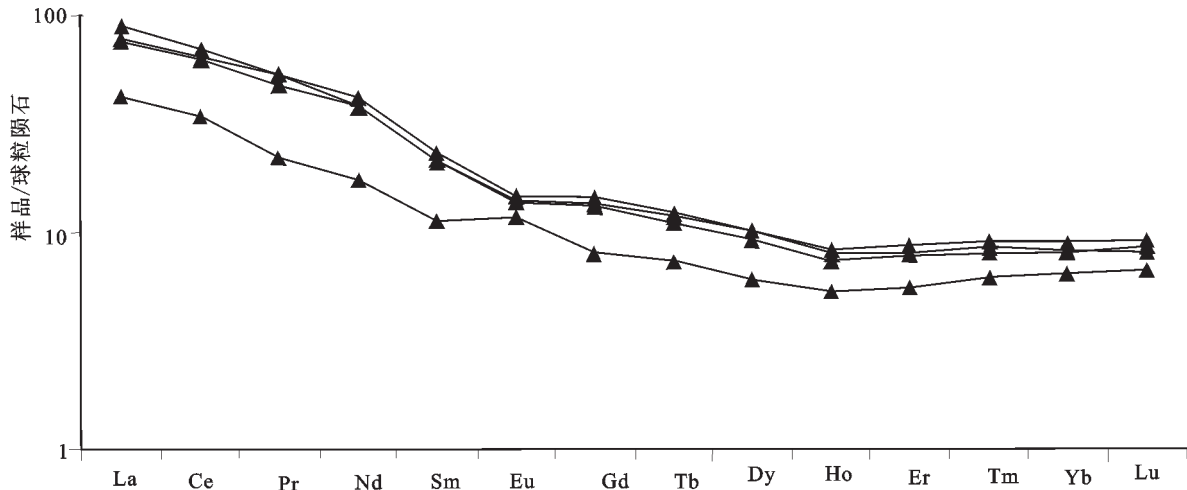


图9 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩稀土元素配分图(球粒陨石标准值引自文献[29])

Fig. 9 REE distribution patterns of magmatic rock from the Sankuangou Cu-Fe-Mo deposit

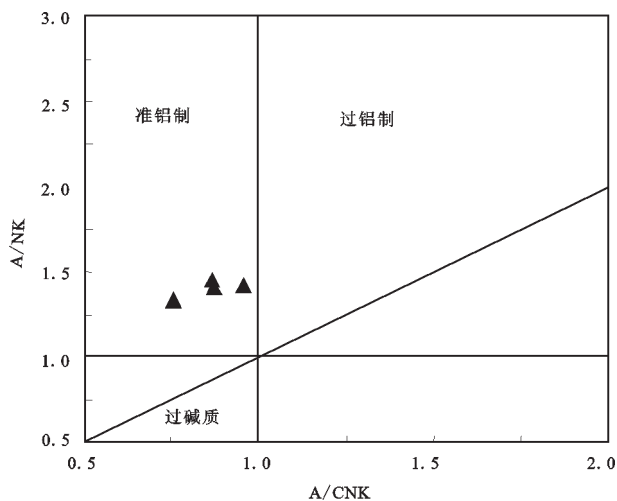
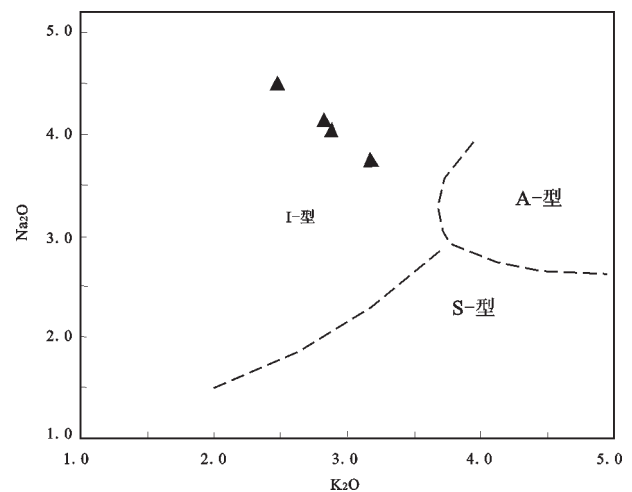
图10 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩A/NK-A/CNK图解
(底图据文献[30])

Fig. 10 A/NK-A/CNK diagram of magmatic rock from the Sankuangou Cu-Fe-Mo deposit

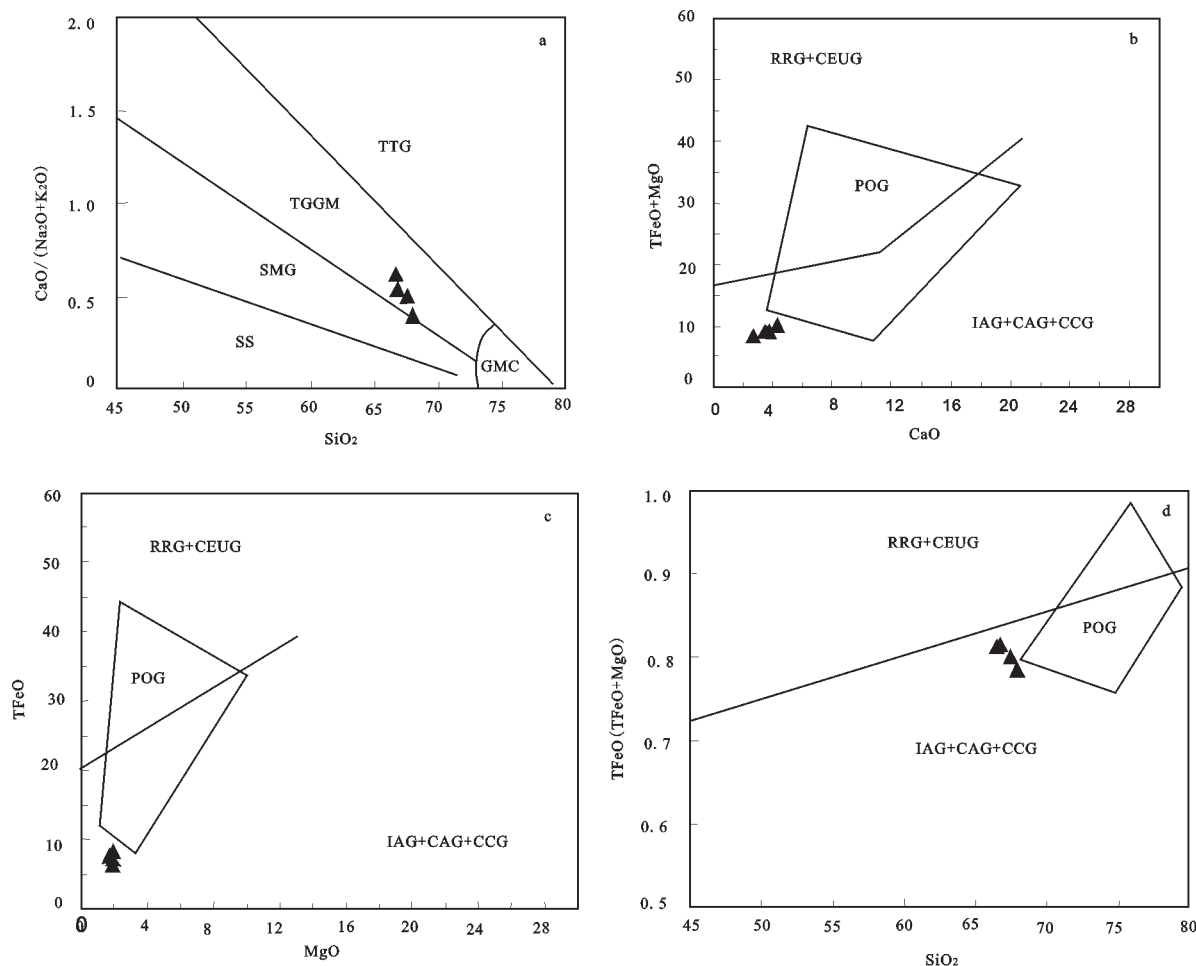
图11 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩Na₂O-K₂O成因判别图解(底图据文献[31])Fig. 11 Na₂O-K₂O genetic discrimination diagram of magmatic rock from the Sankuangou Cu-Fe-Mo deposit

在(Rb/30)-Hf-(Ta×3)图上(图13-b),所有样品同样也落于火山弧岩浆岩(VAG)区域,但有少数样品接近后造山花岗岩(POG)区域,说明该矿床的岩浆岩可能形成于造山阶段的火山弧环境中,表明该矿床岩浆岩与造山阶段的火山弧花岗岩关系密切。

与成矿有关的三矿沟复式英云(花岗)闪长岩

体,花岗闪长岩的锆石U-Pb年龄为209 Ma;K-Ar年龄:黑云母为201~108.8 Ma、全岩为184 Ma^①。葛文春等^[8]研究发现,与三矿沟Cu-Fe-Mo矿床铜矿有关的花岗闪长岩结晶年龄为170~175 Ma,认为三矿沟矿床的形成与太平洋板块的俯冲作用关系密切。李德荣等^[21]、吕鹏瑞等^[17]研究发现,三矿沟岩体

①黑龙江省地质矿产局第三地质勘查所,地质矿产部矿床地质研究所,黑龙江省多宝山及其邻区寻找大型斑岩铜矿的研究,“八五”国家科技攻关计划专题成果报告(85-901-01-01),哈尔滨:黑龙江省地质资料档案馆,1995。



TTG—同火山花岗岩; TGGM—同构造花岗岩; SMG—晚构造花岗岩; SS—后构造花岗岩; GMC—同碰撞花岗岩; POG—后造山花岗岩; IAG—岛弧花岗岩; CAG—大陆弧花岗岩; CCG—大陆碰撞花岗岩; RRG—与裂谷有关的花岗岩; CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩;

图12 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩 SiO_2 - $\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 、 $\text{CaO}-(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 、 $\text{MgO}-\text{TFeO}$ 、 $\text{SiO}_2-\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ 构造环境判别图(底图据文献[30,34])

Fig. 12 SiO_2 - $\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$, $\text{CaO}-(\text{TFeO}+\text{MgO})$, $\text{MgO}-\text{TFeO}$, $\text{SiO}_2-\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})$ tectonic discrimination diagrams of magmatic rock from the Sankuangou Cu-Fe-Mo deposit

英云闪长岩K-Ar等时年龄为172 Ma, SHRIMP U-Pb年龄范围为172~183.5 Ma, 加权平均年龄177 Ma, 认为三矿沟岩体时代为晚三叠世—中侏罗世, 岩浆脉动侵位活动持续时间约35 Ma。

三矿沟矿床位于嫩江和新开岭岩石圈断裂之间, 在早古生代属于岛弧环境, 经过加里东、华力西、印支、燕山及喜山期多次的构造运动, 形成了北西向窝理河断裂、北东向三矿沟断裂、花朵山向斜、大孤山—育宝山背斜、花朵山环形构造。早—中侏罗世期间, 中性—酸性岩浆侵入活动强烈, 北部蒙古—鄂霍茨克洋挤压闭合, 东部完达山一带太平洋板块向北斜向俯冲, 黑龙江板块由古亚洲构造域的近南北向挤压转为近南北向反时针剪切, 北东向

嫩江断裂、新开岭断裂、北西向塔西—林口和黑龙江断裂产生强烈的左行和右行走滑, 深切、分割古亚洲造山带增厚的地壳和岩石圈, 中酸性至中性—中酸性岩浆首先沿着这些北东向和北西向深大断裂喷发, 随后, 在北西向、北东向断裂及其交汇部位发生了大规模的花岗质岩浆侵入活动^[36-38], 形成了早—中侏罗世中酸性岩浆侵入热液Au-Ag-Cu-Mo-W成矿系列, 中酸性英云闪长岩侵入先前形成的古生代大理岩地层, 并在侵入接触带上形成三矿沟Cu-Fe-Mo矽卡岩矿床。

5 结论

(1) 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩属于钙碱性

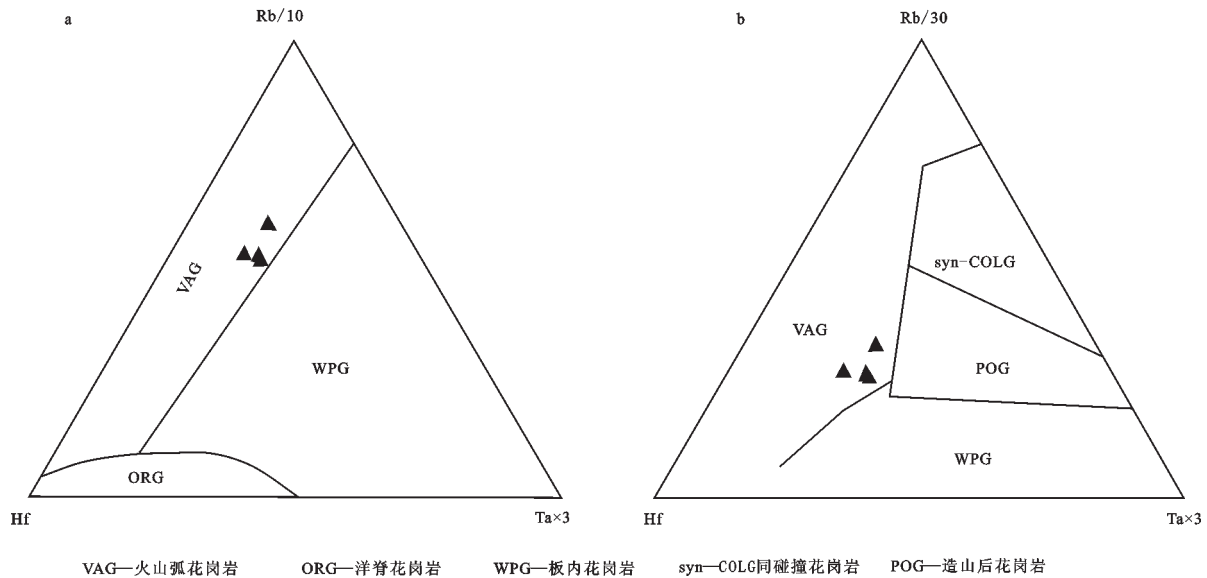


图13 三矿沟Cu-Fe-Mo矿床岩浆岩Rb-Hf-Ta构造环境判别图(底图据文献[35])

Fig. 13 Rb-Hf-Ta tectonic discrimination diagrams of magmatic rock from the Sankuanggou Cu-Fe-Mo deposit

I型花岗岩,该矿床岩浆岩具有大陆地壳的特点。

(2)稀土元素配分图显示向右缓倾斜的轻稀土元素富集型特点,轻、重稀土分馏较为明显,无明显的负锕异常,暗示其具有相同或相近的成因,也反映了同源岩浆的特点。

(3)该矿床岩浆岩形成于与造山花岗岩有关的火山弧环境或相似的构造环境中,主要与造山阶段的火山弧花岗岩关系密切。

致谢:在论文的写作过程中,得到了中国地质科学院矿产资源研究所王立强博士、中国地质大学(北京)地球科学与资源学院杜泽忠博士、杜玉雕硕士及吕鹏瑞硕士的热情指导和帮助;审稿专家和编辑部老师提出了宝贵的意见和建议,在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] 李德荣,朱朝利,吕军,等.黑龙江三矿沟—多宝山成矿带构造—岩浆成矿作用[J].中国矿业,2010,19(增刊):142-146.
Li Derong, Zhu Chaoli, Lv Jun, et al. Structural-magmatic mineralization of Sankuanggou-Duobaoshan metallogenic belt, Heilongjiang[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(supp.): 142-146(in Chinese with English abstract).
- [2] 杜琦.多宝山斑岩铜矿床蚀变与矿化特征[J].地质学报,1980,4:310-323.
Du Qi. The alteration and mineralization features of the Duobaoshan porphyry copper deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 1980,4:310-323 (in Chinese with English abstract).

- [3] 杜琦,陈明秀.多宝山斑岩铜矿床成因模式[J].矿床地质,1983,2:42-48.

Du Qi, Chen Mingxiu. The genetic model of Duobaoshan porphyry copper deposit[J]. Mineral Deposits, 1983, 2:42-48(in Chinese with English abstract).

- [4] 杜琦,赵玉明.多宝山斑岩铜矿床[M].北京:地质出版社,1988:74-310.

Du Qi, Zhao Yuming. Porphyry Copper Deposit in Duobaoshan [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1988:74-310(in Chinese with English abstract).

- [5] 王喜臣,王训练,王琳,等.黑龙江多宝山超大型斑岩铜矿的成矿作用和后期改造[J].地质科学,2007,42(1):124-133.

Wang Xichen, Wang Xunlian, Wang Lin, et al. Metallogeny and reformation of the Duobaoshan superlarge porphyry copper deposit in Heilongjiang[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1):124-133(in Chinese with English abstract).

- [6] 李克生.多宝山斑岩铜(钼)矿床气液包裹体研究[J].地质与勘探,1979,(3):22-23.

Li Kesheng. A study on gas-liquid inclusions of Duobaoshan porphyry-type copper (molybdenum) deposits [J].Geology and Prospecting, 1979, (3): 22-23(in Chinese with English abstract).

- [7] 武广,刘军,钟伟,等.黑龙江省铜山斑岩铜矿床流体包裹体研究[J].岩石学报,2009,25(11):2996-3006.

Wu Guang, Liu Jun, Zhong Wei, et al. Fluid inclusion study of the Tongshan porphyry copper deposit, Heilongjiang Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11):2996-3006(in Chinese with English abstract).

- [8] 葛文春,吴福元,周长勇,等.兴安造山带东段斑岩型Cu-Mo矿床成矿时代及其地球动力学意义[J].科学通报,2007,52(20):2407-

2417.
Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, et al. Mineralization time of porphyry-type Cu-Mo deposit in the eastern section of Xing'an Mongolian orogenic belt and its geodynamics significance[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(20):2407-2417 (in Chinese).
- [9] 赵一鸣, 毕承思, 邹晓秋, 等. 黑龙江多宝山、铜山大型斑岩铜(钼)矿床中辉钼矿的铼-钨同位素年龄[J]. 地球学报, 1997, 18(1):61-67.
Zhao Yiming, Bi Chengsi, Zou Xiaoqiu, et al. The Re-Os isotopic age of molybdenite from Duobaoshan and Tongshan porphyry copper (molybdenum) deposits [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, 18(1):61-67(in Chinese with English abstract).
- [10] 刘驰. 多宝山斑岩铜矿区水热蚀变矿物的激光显微探针 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年[J]. 地质科学, 1995, 30(4):329-337.
Liu Chi. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser microprobe dating on hydrothermal minerals from Duobaoshan porphyry copper mining district, Heilongjiang Province, China[J]. Scientia Geologica Sinica, 1995, 30(4):329-337(in Chinese with English abstract).
- [11] 崔根, 王金益, 张景仙, 等. 黑龙江多宝山花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 世界地质, 2008, 27(4): 387-394.
Cui Gen, Wang Jinyi, Zhang Jingxian, et al. U-Pb SHRIMP dating of zircons from Duobaoshan granodiorite in Heilongjiang and its geological significance[J]. Global Geology, 2008, 27(4): 387-394(in Chinese with English abstract).
- [12] 李之彤, 王希今, 王宏博, 等. 黑龙江省嫩江县三矿沟含金铁铜矿床地质特征[J]. 地质与资源, 2008, 17(3):170-174.
Li Zhitong, Wang Xijin, Wang Hongbo, et al. Geology of the Sankuanggou gold-bearing iron-copper deposit in Nenjiang county, Heilongjiang Province[J]. Geology and Resources, 2008, 17(3):170-174(in Chinese with English abstract).
- [13] 王希金, 谭成印, 张东才, 等. 黑龙江省有色、贵金属矿产区域成矿特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(4):376-381.
Wang Xijin, Tan Chengyin, Zhang Dongcai, et al. A study on the regional metallogeny of base and precious metal resources in Heilongjiang Province, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(4):376-381(in Chinese with English abstract).
- [14] 王洪瑜, 马丽玲, 王卓. 黑龙江省嫩江县三矿沟铜(铁)矿床地质特征及成因探讨[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(增刊): 214-218.
Wang Hongyu, Ma Liling, Wang Zhuo. Geological character and genesis of Sankuanggou copper (iron) mineral deposit, Duobaoshan area, Heilongjiang Province [J]. Journal of Jinlin University(Earth Science Edition), 2008, 38(supp.):214-218(in Chinese with English abstract).
- [15] 刘军, 武广, 钟伟, 等. 黑龙江省三矿沟矽卡岩型铁铜矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(10):2631-2641.
Liu Jun, Wu Guang, Zhong Wei, et al. Fluid inclusions study of the Sankuanggou skarn Fe-Cu deposit, Heilongjiang Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10):2631-2641(in Chinese with English abstract).
- [16] 吕鹏瑞, 顾雪祥, 李德荣, 等. 黑龙江三矿沟矽卡岩型Cu-Fe-Mo多金属矿床的成矿流体特征与成矿机制[J]. 地质通报, 2011, 30(10):1563-1574.
Lv Pengrui, Gu Xuexiang, Li Derong, et al. Ore-forming fluid characteristics and mineralization mechanisms of the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo polymetallic deposit in Heilongjiang Province[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(10):1563-1574(in Chinese with English abstract).
- [17] 吕鹏瑞, 李德荣, 彭义伟, 等. 黑龙江三矿沟矽卡岩型Cu-Fe-Mo矿床矿石硫化物硫、铅同位素特征及锆石U-Pb定年[J]. 中国地质, 2012, 39(3):717-728.
Lv Pengrui, Li Derong, Peng Yiwei, et al. S-Pb isotopic characteristics of ore sulfides and U-Pb dating of zircon from the Sankuanggou skarn-type Cu-Fe-Mo polymetallic deposit in Heilongjiang Province[J]. Geology in China, 2012, 39(3):717-728 (in Chinese with English abstract).
- [18] 韩振新, 徐衍强, 郑庆道, 等. 黑龙江省重要金属和非金属矿产的成矿系列及其演化[M]. 哈尔滨:黑龙江人民出版社, 2004:76-80.
Han Zhenxin, Xu Yanqiang, Zheng Qingdao, et al. Major Metal and Nonmetal Metallogenic Series in Heilongjiang and their Evolution[M]. Harbin:Heilongjiang People's Press, 2004:76-80 (in Chinese with English abstract).
- [19] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省岩石地层[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1997:30-50.
Bureau of Geological and Mineral Resources of Heilongjiang Province. Lithostratigraphy in Heilongjiang Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997:30-50(in Chinese with English abstract).
- [20] 谭成印, 王根厚, 李永胜. 黑龙江多宝山成矿区找矿新进展及其地质意义[J]. 地质通报, 2010, 29(2/3): 436-445.
Tan Chengyin, Wang Genhou, Li Yongsheng. New progress and significance on the mineral exploration in Duobaoshan mineralization area, Heilongjiang, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2/3):436-445(in Chinese with English abstract).
- [21] 李德荣, 吕福林, 刘素颖, 等. 黑龙江省嫩江县三矿沟矿区地质特征及找矿方向[J]. 中国地质, 2011, 38(2): 415-426.
Li Derong, Lv Fulin, Liu Suying, et al. Geological features and prospecting orientation of the Sankuanggou Cu-Mo-Au deposit in Nenjiang County, Heilongjiang Province[J]. Geology in China, 2011, 38(2): 415-426(in Chinese with English abstract).
- [22] Muschler F E. The precious metal deposits associated with alkaline rocks—a spatial and temporal process in Cordillera[J]. Mining Engineering, 1991, 3: 304-309.
- [23] Wright J B. A simple alkalinity ratio and its application to

- questions of non-orogenic granite genesis[J]. *Geological Magazine*, 1969, 106: 370–384.
- [24] Macdonald G A, Katsura T. Chemical composition of Hawaiian lavas[J]. *Petrol.*, 1964, 5: 83–133.
- [25] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1976, 58: 63–81.
- [26] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 1–169.
- Zhao Zhenhua. *Geochemistry Principle of Trace Elements*[M]. Beijing: Science Press, 1997: 1–169 (in Chinese with English abstract).
- [27] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for Mantle composition and process[C]//Saunders A D, Norry M J (ed.). *Magmatism in Ocean Basins*. London: Geological Society London Special Publication, 1989, 42: 313–345.
- [28] 谢建成, 杨晓勇, Insung Lee. 安徽沿江地区燕山期含铜岩体稀土、微量地球化学特征[J]. *矿物岩石*, 2008, 28(1): 72–78.
- Xie Jiancheng, Yang Xiaoyong, Insung Lee. Geochemical characteristics of Yanshanian copper-bearing rocks along the Yangtze River in Anhui Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2008, 28(1): 72–78 (in Chinese with English abstract).
- [29] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite study[C]//Henderson P (ed.). *Rare Element Geochemistry*[C]. Elsevier, 1984, 63–114.
- [30] Maniar Papu D, Piccoli Philip M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101 (5): 635–643.
- [31] Collins W J, Beams S D, White A J R, et al. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1982, 80 (2): 189–200.
- [32] 丁建华, 肖成东, 秦正永. 洞子沟地区大红峪组富钾火山岩岩石学、地球化学特征[J]. *地质调查与研究*, 2005, 28(2): 100–105.
- Ding Jianhua, Xiao Chengdong, Qin Zhengyong. Petrological and geochemical research on Dahongyu ultrapotassic volcanic rocks in Dongzigou Area, Hebei Province[J]. *Geological Survey and Research*, 2005, 28(2): 100–105 (in Chinese with English abstract).
- [33] 汤文豪, 张志诚, 李建锋, 等. 内蒙古苏尼特右旗查干诺尔石炭系本巴图组火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(2): 321–330.
- Tang Wenhao, Zhang Zhicheng, Li Jianfeng, et al. Geochemistry of the carboniferous volcanic rocks of Benbatu Formation in Sonid Youqi, Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(2): 321–330 (in Chinese with English abstract).
- [34] Feng R, Kerrich R. Geochemical evolution of granitoids from the Archean Abitibi southern volcanic zone and the Pontiac sub-province Superior province, Canada: Implication for tectonic history and source regions[J]. *Chemical Geology*, 1992, 98: 23–70.
- [35] Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[C]//Coward M P, Reis A C (eds.). *Collision Tectonics*. Spec. publ. Geol. Soc., 1986, 19: 67–81.
- [36] 李仰春, 汪岩, 吴淦国, 等. 大兴安岭北段扎兰屯地区铜山组源区特征: 地球化学及碎屑锆石 U–Pb 年代学制约[J]. *中国地质*, 2013, 40(2): 391–402.
- Li Yangchun, Wang Yan, Wu Ganguo, et al. The provenance characteristics of Tongshan Formation in north Zhalantun area of the Da Hinggan Mountains: The constraint of geochemistry and LA–MC–ICPMS U–Pb dating of detrital zircons[J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 391–402 (in Chinese with English abstract).
- [37] 张磊, 吕新彪, 刘阁, 等. 兴蒙造山带东段大陆弧后 A 型花岗岩特征与成因[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 869–884.
- Zhang Lei, Lv Xinbiao, Liu Ge, et al. Characteristics and genesis of continental back-arc A-type granites in the eastern segment of the Inner Mongolia–Da Hinggan Mountains orogenic belt[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 869–884 (in Chinese with English abstract).
- [38] 刘军, 武广, 王峰, 等. 黑龙江省岔路口斑岩铜矿床流体包裹体和稳定同位素特征[J]. *中国地质*, 2013, 40(4): 1231–1251.
- Liu Jun, Wu Guang, Wang Feng, et al. Fluid inclusions and stable isotope characteristics of the Chalukou porphyry Mo deposit in Heilongjiang Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40 (4): 1231–1251 (in Chinese with English abstract).