

吉林延边六道崴子铁铜矿床成矿辉长闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征

侯鹤楠¹, 任云生¹, 杨群¹, 邹欣桐¹, 蒋国豪²

HOU He-nan¹, REN Yun-sheng^{1,2}, YANG Qun¹, ZOU Xin-tong¹, JIANG Guo-hao²

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

2. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China

摘要:六道崴子铁铜矿位于兴蒙造山带东段的延边地区,主矿体赋存于燕山早期辉长闪长岩与二叠系大理岩接触带内,赋矿岩石主要为石榴子石矽卡岩,成因上属接触交代型矿床。为确定成岩成矿时代、物质源区和构造背景,对矿区北山成矿辉长闪长岩中的锆石进行了LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素测定和岩石地球化学分析。结果表明,20个测点的U-Pb 年龄值介于196Ma±2Ma~213Ma±1Ma之间,年龄加权平均值为204Ma±2.3Ma,指示成岩成矿作用发生于早侏罗世;岩石主量元素组成具有低硅、富碱、富钠、高铝的特征,属偏铝质富钠钙碱性系列;辉长闪长岩稀土元素总量较低,以轻稀土元素相对富集、轻重稀土分馏较明显、较弱的负Eu异常等为特征;大离子亲石元素富集,高场强元素亏损,低Sr高Yb,微量元素比值介于地壳和地幔平均值之间,表明六道崴子成矿岩体具有壳幔混源的特征。结合东北地区区域构造背景演化,初步认为六道崴子铁铜矿的成岩成矿作用发生在活动大陆边缘的岛弧环境,与古太平洋板块向吉黑东部的俯冲作用有关。

关键词:矽卡岩型矿床;LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年;岩石地球化学;六道崴子铁铜矿床;延边地区

中图分类号:P588.12⁺2;P597⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2014)09-1342-11

Hou H N, Ren Y S, Yang Q, Zou X T, Jiang G H. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of the metallogenic gabbrodiorite intrusion in the Liudaowaizi iron-copper deposit of eastern Yanbian, Northeast China. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(9):1342-1352

Abstract: The Liudaowaizi iron-copper deposit is located in Yanbian area and belongs to the east part of the Xing'an-Mongolia Orogenic Belt. The major orebodies occur along the contact zone between the Early Yanshanian gabbrodiorite and the Permian marble. The ore-hosting rock in the ore deposit is dominated by the garnet skarn. Based on the ore-forming geological factors and mineralization characteristics, it can be concluded that the deposit belongs to the contact-metasomatic type. Using the LA-ICP-MS U-Th-Pb dating method of isotopes of zircon grains from gabbrodiorite in northern mining area and analysis of the geochemical characteristics of the intrusion, the authors obtained the U-Pb ages, which vary from 196Ma±2Ma to 213Ma±1Ma with an average value of 204Ma±2.3Ma. Both the gabbrodiorite and the associated iron-copper mineralization were formed at the beginning of the Jurassic period. Major elements in the gabbrodiorite are characterized by low SiO₂ (55.56%~56.45%), high alkali (3.43%~3.66%), sodium (3.43%~3.66%) and aluminum (17.34%~18.33%), indicating that the metallogenic gabbrodiorite belongs to the metaluminous high-

收稿日期:2014-05-12;修订日期:2014-07-17

资助项目:中国地质调查局项目(编号:12120113098300)和中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室开发基金项目(编号:201209)

作者简介:侯鹤楠(1987-),女,硕士,从事矿物学、岩石学、矿床学方面研究。E-mail: hhn2006112@163.com

通讯作者:任云生(1969-),男,博士,教授,从事矿床学的教学与研究。E-mail: renys@jlu.edu.cn

sodium calc-alkaline series. Meanwhile, the rocks are featured by low REE content ($(77.43\sim 88.76)\times 10^{-6}$), high LREE and LREE/HREE ratios, and low positive or negative Eu anomalies. Such geochemical features as relative enrichment of large ion lithophile elements, depletion of high field strength elements, low Sr, high Yb and ratios of trace elements between the crust and the mantle show that the gabbrodiorite was derived from the crust-mantle mixed source. In combination with the evolution of tectonic background of Northeast China, the authors hold that both the gabbrodiorite and the associated iron-copper mineralization in the Liudaowaizi deposit were formed in island-arc environment resulted from the subduction of the Paleo Pacific plate to the Eurasian plate at the beginning of the Jurassic period.

Key words: skarn deposit; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochemistry; Liudaowaizi iron-copper deposit; Yanbian area

六道崴子铁铜矿床位于吉林省延边朝鲜族自治州汪清县境内。近年来的勘查和研究结果表明,该矿床是延边地区典型的接触交代型铁铜矿床,虽然目前规模不大,但铁、铜矿石品位高,深部和外围具有较好的找矿远景。

随着找矿工作的不断进行,对于该矿床的理论研究渐显薄弱,一些关键科学问题亟待研究。例如,前人^[1]根据区域资料认为,矿床与海西晚期闪长岩或石英闪长岩有关,但吉黑东部地区大规模斑岩型—矽卡岩型矿床主要形成于燕山早期。为了解决该矿床的形成时代、成岩成矿作用构造背景及成岩成矿的物质源区,笔者对该矿床的成矿岩体开展了岩相学、同位素年代学与地球化学特征研究,为该矿床的理论研究及深部和外围找矿奠定基础。

1 矿床地质特征及成因

研究区大地构造位置处在兴蒙造山带东段,佳木斯地块与华北地块北缘之间的松嫩地块东部,属古亚洲洋构造域控制的古生代近EW向构造岩浆带与西太平洋活动陆缘带控制的中生代、新生代NE向构造岩浆带的叠加交汇处(图1-a)。

区内出露地层主要为二叠系庙岭组和柯岛组。庙岭组分布于矿区中东部六道崴子—八道崴子一带,主要岩性为凝灰质砂岩、凝灰质板岩、角岩及大理岩;柯岛组分布于矿区北西五道崴子一带,主要岩性为黑色凝灰质砂岩。区内的构造行迹由NE向褶皱带、压性或压扭性断裂及与其伴生的NW向张性或张扭性断裂组成(图1-b)。

六道崴子矿床成矿岩体主要分布在六道崴子南山、北山及矿区东部,由岩体和岩株组成,出露面积约4.5km²。主要岩石类型为闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩^[1]。本次研究发现,在六道崴子北山矿段存在与铁铜矿化有密切空间及成因关系的辉

长闪长岩体。辉长闪长岩呈块状构造,矿物组成为斜长石(60%)、辉石(20%)、角闪石(15%)、黑云母(小于5%)等,岩石多呈半自形粒状结构、不等粒结构和似斑状结构;黑云母表现为弱绿泥石化;大部分角闪石蚀变为绿泥石或碳酸盐矿物,且可见角闪石双晶;顽火辉石边缘部分转变为滑石;斜长石大部分晶面混浊,高岭土化、绢云母化明显(图版I)。

矿区探明的主矿体赋存于二叠系大理岩与辉长闪长岩接触带内及其附近,受接触带控制,以脉状为主,个别呈扁豆状、囊状、脉状、透镜状及不规则状;矿体分枝复合较明显,与围岩界线清楚。矿体受接触带和NE向断裂构造控制,总体走向43~63°,倾向NW,倾角61~70°,平均真厚度为2.75~6.02m,控制延长约400m,最大延深大于300m。

矿石中金属矿物主要以黄铜矿、磁铁矿为主,其次为黄铁矿、磁黄铁矿、斑铜矿、辉铜矿、黝铜矿、方铅矿、闪锌矿、含银矿物等;非金属矿物以铁铝榴石、钙铝榴石、顽火辉石、紫苏辉石、透辉石、绿帘石、绿泥石、石英和方解石为主。矿石结构有中粗粒自形—半自形—他形晶粒状结构、溶蚀结构、固溶体分解结构等。主要构造为块状、细脉浸染状、角砾状和条带状构造。围岩蚀变有矽卡岩化、角岩化、硅化、碳酸盐化等。

根据成矿地质条件、矿体特征、矿石组构和围岩蚀变特征,认为六道崴子矿床产于中基性侵入岩与二叠系大理岩接触带内,成因上属接触交代型铁铜矿床。

近些年来,不少学者发现中基性侵入岩和碳酸盐岩的接触带也可以形成矽卡岩型矿床,比如中国新疆与辉绿岩有关的磁海铁矿床^[3-6];伊朗西北部与辉长闪长岩岩体有关的Tikmeh Dash铁—钼矽卡岩型矿床^[7],以及土耳其东部Tuzba、Si-Tunceli地区矽卡岩型钛铁矿矿床^[8]等,这些矽卡岩型铁铜矿床的相继发现为此类矿床的深入研究拓展了思路。

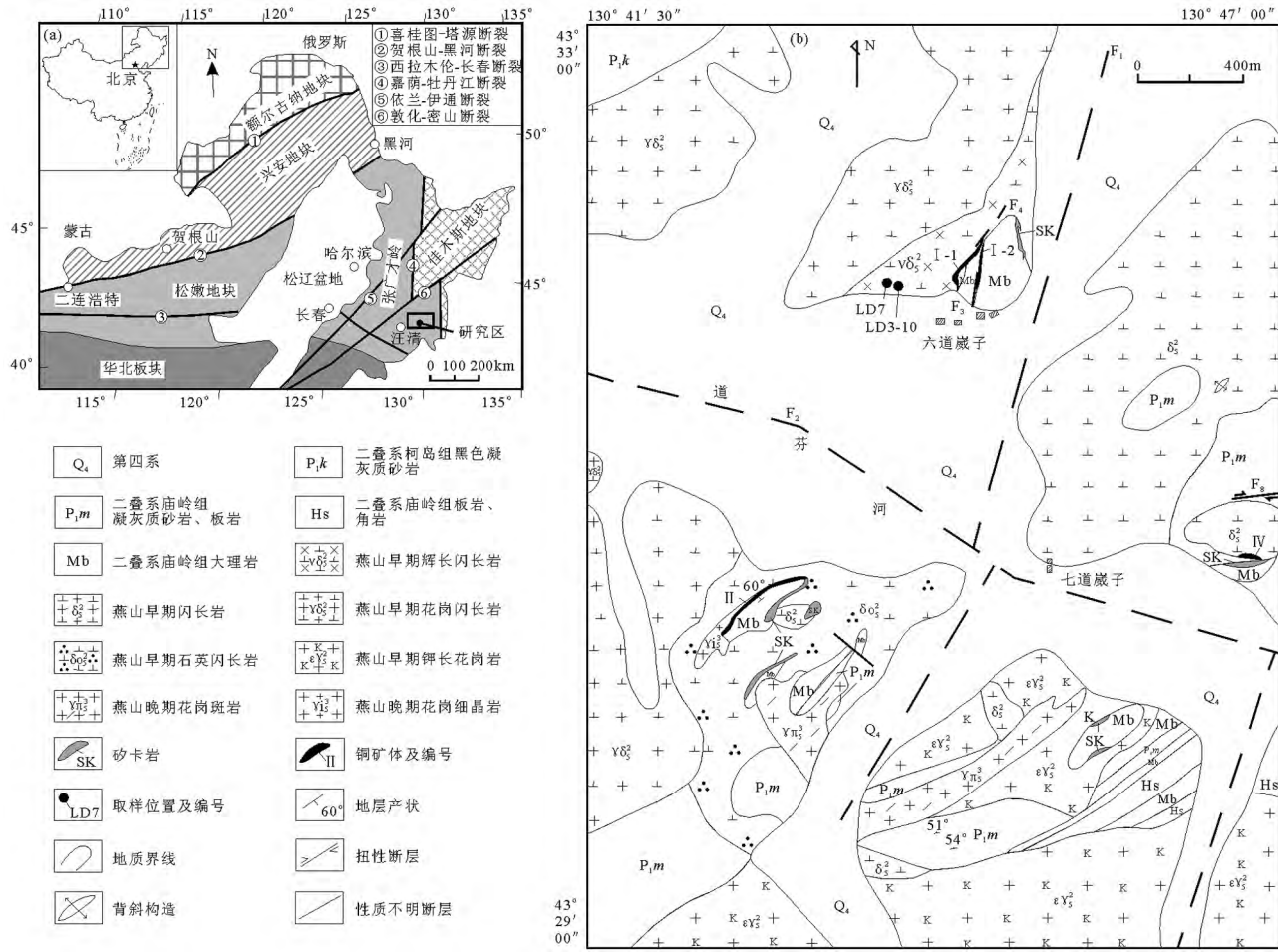


图1 六道崴子矿床大地构造位置图(a)及矿区地质图(b)
(a图据参考文献[2]修改)

Fig. 1 Tectonic location (a) and geologic sketch map (b) of the Liudaowaizi deposit

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

用于U-Th-Pb同位素测定的样品(LD3-10)为辉长闪长岩,采自六道崴子北山竖井平硐口附近,即N43°31.020'、E130°43.564'。样品新鲜,无明显的矿化和蚀变现象。在同位素测年样品采样位置及其附近共采集5件无蚀变矿化的辉长闪长岩样品(编号LD3-10-1、LD3-10-2、LD3-10-3、LD7-1和LD7-2),用于主量、微量和稀土元素分析。

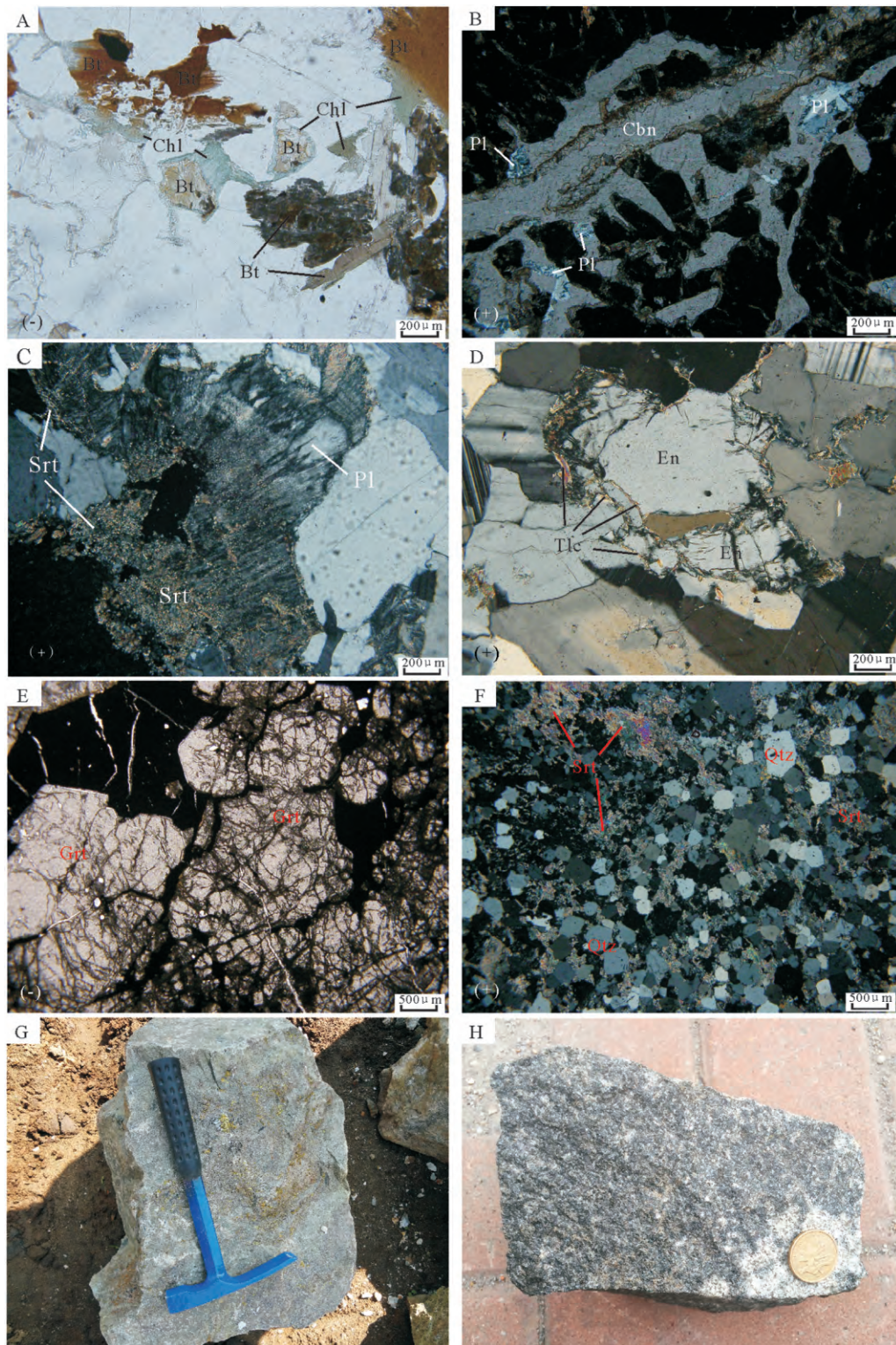
2.2 分析方法

锆石单矿物的挑选由河北省廊坊诚信地质服务有限公司完成;样品的制靶,锆石反射光、透射光照相及锆石阴极发光(CL)图像均在西北大学大陆

动力学国家重点实验室完成;锆石U-Th-Pb同位素测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上完成,其中激光剥蚀系统是配有193nm ArF-excimer激光器的Geolas200M,采用标准锆石91500进行校正;LA-ICP-MS分析的详细流程及实验方法见参考文献[9];锆石同位素数据处理采用Glitter4.0完成,运用Isoplot 3.0计算锆石的年龄加权平均值,并绘制锆石U-Pb谐和图^[10]。

在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室进行了5件辉长闪长岩样品的主量、微量和稀土元素分析。主量元素主要采用Axios PW 4400型X射线荧光光谱仪(XRF)分析完成。挑选出新鲜的岩石样品,将其粉碎至200目,称重0.7g,再取

图版 I Plate I



A. 黑云母绿泥石化(单偏光); B. 斜长石碳酸盐化(正交偏光); C. 斜长石绢云母化(正交偏光);
 D. 顽火辉石转化为滑石(正交偏光); E. 大颗粒石榴子石(单偏光); F. 硅化、斜长石绢云母化(正交偏光);
 G. 辉长闪长岩野外照片; H. 辉长闪长岩手标本照片。Bt—黑云母; Chl—绿泥石; Cbn—碳酸盐矿物;
 Hy—紫苏辉石; En—顽火辉石; Tlc—滑石; Srt—绢云母; Pl—斜长石; Grt—石榴子石

0.7g XRF专用溶剂 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 、LiF和 LiBO_2 ,将粉末与溶剂均匀搅拌后倒入坩埚中,放入熔样机器进行高温熔融,将制成的熔片放在XRF仪器上测试。微量和稀土元素的测试分析采用电感耦合等离子体质谱仪(ELAN DRC-e型ICP-MS)完成,相对误差为5%。详细流程及实验方法见参考文献[11]。

3 分析结果

3.1 锆石U-Th-Pb同位素测定

锆石阴极发光图像显示(图2),锆石多为无色透明的自形一半自形短柱状及浑圆粒状晶形,粒度一般为100~200 μm ,长宽比为2~4,少数锆石晶体的长宽比小于2或大于4。锆石内部具有明暗相间的环带结构,且环带宽窄大小不一,个别为均匀的无环带结构,岩浆韵律环带相对不太清晰,但多数锆石的内外核环带具有明显的界线;锆石具有较高的Th/U值(0.42~0.73),表明其为岩浆成因^[12-13]。

18颗锆石20个测点的U-Th-Pb同位素测试结果(表1)表明,测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在196Ma \pm 2Ma~

213Ma \pm 1Ma之间,数据在U-Pb谐和图中的投影点位于谐和线或其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为204Ma \pm 2.3Ma(MSWD=13,可信度95%)(图3)。该结果代表锆石的结晶年龄,也代表了成矿岩体的结晶年龄,即早侏罗世。

3.2 地球化学特征

六道崴子矿区北山成矿辉长闪长岩的主量、微量和稀土元素分析结果如表2所示。

岩石中 SiO_2 的含量为55.56%~56.45%,平均值为56.14%;($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量为4.74%~5.07%,平均值为4.88%; Na_2O 含量为3.43%~3.66%,平均值为3.54%,($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$)值为2.52%~2.76%; Ti_2O_3 、 MgO 、 CaO 和 Fe_2O_3 的含量分别为0.97%~1.06%(平均值1.02%)、2.99%~3.32%(平均值3.21%)、6.71%~7.10%(平均值6.91%)和6.90%~7.40%(平均值7.24%); Al_2O_3 的含量为17.34%~18.33%,平均值为17.84%;A/CNK值为0.89~0.92,A/NK值为2.42~2.47。岩石成分反映出六道崴子辉长闪长岩具有偏铝质富钠钙碱性岩石的特点(图4)。

表1 六道崴子辉长闪长岩体(LD3-10)锆石LA-ICP-MS U-Th-Pb同位素分析结果

Table 1 U-Th-Pb composition of zircons in the gabbrodiorite (LD3-10) in Liudaowaizi deposit as measured by LA-ICP-MS

测点	含量/ 10^{-6}			Th/ U	同位素比值($\pm\sigma$)				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 $\pm\sigma$ /Ma
	Th	U	Pb		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{U}$	
1	105	169	14	0.62	0.06 \pm 0.00	0.25 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	209 \pm 1
2	61.8	97.3	8.06	0.63	0.05 \pm 0.00	0.21 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	198 \pm 2
3	103	140	11.9	0.73	0.05 \pm 0.00	0.22 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	201 \pm 1
4	70.4	169	13.4	0.42	0.07 \pm 0.00	0.34 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	207 \pm 2
5	74.3	113	9.39	0.66	0.05 \pm 0.00	0.23 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	208 \pm 1
6	192	296	25.7	0.65	0.05 \pm 0.00	0.23 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	213 \pm 1
7	83.9	120	10.4	0.70	0.06 \pm 0.00	0.24 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	198 \pm 2
8	76.6	113	9.70	0.68	0.05 \pm 0.00	0.24 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	204 \pm 1
9	41.9	89.5	5.88	0.47	0.05 \pm 0.00	0.120 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	196 \pm 2
10	75.4	111	9.35	0.68	0.05 \pm 0.00	0.23 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	203 \pm 2
11	96.7	137	12.1	0.71	0.05 \pm 0.00	0.23 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	211 \pm 2
12	74.3	114	9.39	0.65	0.056 \pm 0.00	0.24 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	202 \pm 2
13	63.7	116	8.61	0.55	0.05 \pm 0.00	0.23 \pm 0.00	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	204 \pm 2
14	77.3	118	10.5	0.65	0.05 \pm 0.00	0.23 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	214 \pm 2
15	30.6	69.4	5.08	0.44	0.05 \pm 0.00	0.24 \pm 0.02	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	210 \pm 2
16	63.0	104	8.34	0.60	0.05 \pm 0.00	0.23 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	202 \pm 1
17	38.8	93.3	5.96	0.42	0.05 \pm 0.00	0.23 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	198 \pm 2
18	57.0	94.8	8.33	0.60	0.06 \pm 0.00	0.28 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	209 \pm 2
19	64.5	98.1	8.50	0.66	0.05 \pm 0.00	0.2 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	203 \pm 1
20	124	180	15.6	0.69	0.05 \pm 0.00	0.24 \pm 0.01	0.03 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	200 \pm 1

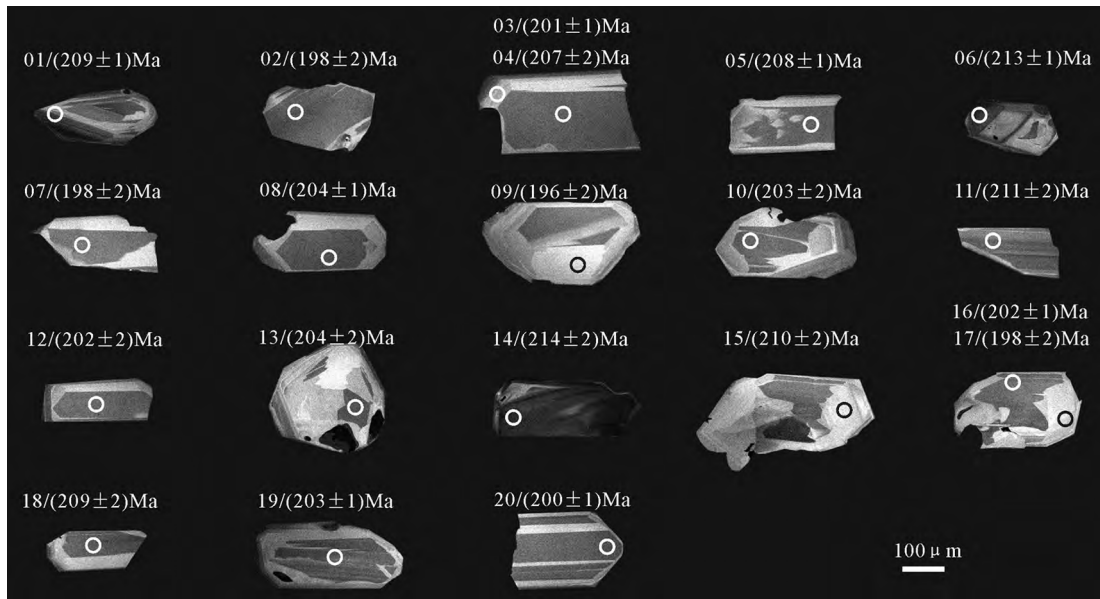


图2 六道崴子矿区辉长闪长岩中锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄及CL图像
Fig. 2 ²⁰⁶Pb/²³⁸U age, serial number of analytical points and CL image of zircons from gabbrodiorite in the Liudaowaizi deposit

六道崴子辉长闪长岩稀土元素总量较低 ($77.43 \times 10^{-6} \sim 88.76 \times 10^{-6}$), 轻稀土元素为 $63.49 \times 10^{-6} \sim 71.46 \times 10^{-6}$, 重稀土元素值为 $(15.30 \sim 16.07) \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 4.01~4.76; (La/Yb)_N 值为 3.66~4.96, 稀土元素配分曲线呈右倾型, 轻、重稀土元素分馏较为明显, 富 LREE 贫 HREE; 除样品 LD3-10-1 无明显 Eu 异常外, 其余 4 件样品均表现出较弱的 Eu 负异常 ($\delta \text{Eu} = 0.90 \sim 0.94$), 表明残余相中存在一

定量的斜长石^[14]; 5 件样品中, 2 件(LD7-1 和 LD7-2) 表现为弱的 Ce 负异常 (δCe 分别为 0.82 和 0.85), 3 件(LD3-10-1, LD3-10-2 和 LD3-10-3) 表现为弱的 Ce 正异常 (δCe 分别为 1.04、1.05 和 1.05) (图 5)。从微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 6) 可以看出, 大离子亲石元素 Rb、K、Th、U 及轻稀土元素相对富集, 而高场强元素 Ta、Nb 和 Ti 呈明显亏损, 该特点表明岩体形成过程中可能有陆壳物质的参与^[15]。

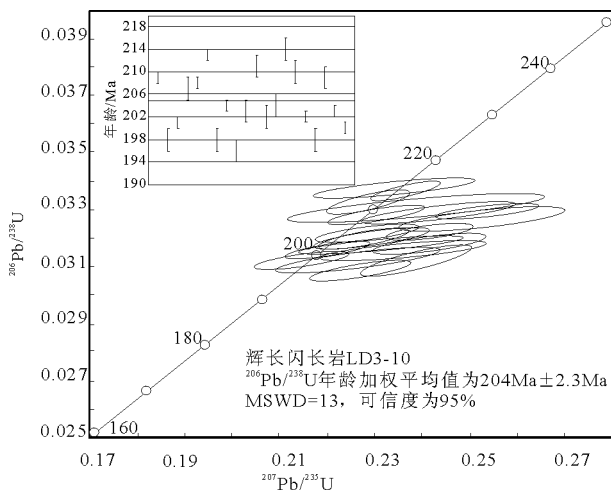


图3 六道崴子矿区辉长闪长岩体锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 3 Concordia diagram showing U-Pb data of gabbrodiorite in the Liudaowaizi deposit

4 讨论

4.1 成岩成矿物质源区

张旗^[18]认为, 中酸性岩浆岩($\text{SiO}_2 > 56\%$ 的中酸性火山岩及侵入岩)中元素 Sr 和 Yb 的含量是 2 个具有重要意义地球化学指标, 并根据其含量将花岗岩分为五大类; 在 Yb-Sr 图解(图 7)上, 六道崴子辉长闪长岩落在 IV 区, 为低 Sr 高 Yb 型花岗岩类; 岩体具有钙碱性岩石的特点(图 4), 且稀土元素具有 LREE 富集、HREE 相对亏损、弱的负 Eu 异常等特点(图 5), 符合中国东北地区的低 Sr 高 Yb 型花岗岩特征, 主要为岛弧或活动大陆边缘的中酸性岩浆岩。低 Sr 高 Yb 的原因可能是源区缺少石榴子石, 富斜长石, 具有角闪石和斜长石组成的典型残留矿物组

表2 六道崴子辉长闪长岩岩体主量、微量和稀土元素分析结果
 Table 2 Compositions of major elements, trace elements and rare earth elements
 in gabbrodiorite from the Liudaowaizi deposit

样品号	LD7-1	LD7-2	LD3-10-1	LD3-10-2	LD3-10-3	样品号	LD7-1	LD7-2	LD3-10-1	LD3-10-2	LD3-10-3
SiO ₂	56.45	56.29	56.21	56.19	55.56	Cs	2.93	3.88	4.89	4.86	5.83
Al ₂ O ₃	18.26	18.33	17.76	17.34	17.50	Ba	200	237	275	277	271
Fe ₂ O ₃	7.40	7.25	6.90	7.39	7.28	Zr/Hf	33.53	30.80	29.13	31.53	28.98
MgO	3.32	3.24	2.99	3.24	3.28	Nb/Ta	14.39	14.84	15.14	15.75	15.07
CaO	6.95	7.10	6.71	6.85	6.96	Rb/Sr	0.05	0.15	0.12	0.12	0.12
Na ₂ O	3.63	3.66	3.53	3.43	3.45	Sr/Y	9.92	12.76	13.13	11.65	11.71
K ₂ O	1.44	1.37	1.28	1.31	1.29	La	12.74	15.27	11.5	12.1	12
MnO	0.14	0.15	0.12	0.12	0.12	Ce	23.81	27.88	27.5	29.3	29.4
P ₂ O ₅	0.16	0.16	0.16	0.17	0.16	Pr	3.91	4.09	3.6	3.79	3.85
TiO ₂	1	0.97	1.02	1.06	1.04	Nd	18.16	18.58	15.6	17	17.3
烧失量	0.65	0.85	3.27	2.72	3.12	Sm	4.33	4.31	4.02	4.33	4.43
总量	99.41	99.35	99.94	99.82	99.77	Eu	1.3	1.33	1.27	1.3	1.28
Na ₂ O+K ₂ O	5.07	5.03	4.80	4.75	4.74	Gd	4.34	4.26	3.50	4.11	4.14
Na ₂ O/K ₂ O	2.52	2.67	2.76	2.61	2.67	Tb	0.74	0.72	0.69	0.76	0.77
A/CNK	0.9	0.9	0.92	0.89	0.89	Dy	4.42	4.21	3.78	4.34	4.47
A/NK	2.42	2.44	2.47	2.45	2.47	Ho	0.87	0.82	0.85	0.95	0.98
Li	21.38	15.73	21.01	21.60	21.48	Er	2.54	2.39	2.34	2.60	2.65
Be	0.95	0.99	0.91	1.11	0.95	Tm	0.36	0.34	0.31	0.36	0.37
Sc	14.72	16.67	25	27.3	27.2	Yb	2.39	2.21	2.17	2.29	2.35
V	139	140	182	207	194	Lu	0.37	0.34	0.31	0.34	0.34
Cr	35.24	32.33	22.5	27	24.8	Hf	4.98	2.37	1.72	2.53	2.21
Co	19.11	21.25	17.6	19	18.1	Ta	0.33	0.31	0.28	0.28	0.28
Ni	7.74	5.92	4.65	4.76	5.2	U	1.29	1.26	0.89	1.07	0.89
Cu	9.76	7.61	12.7	16	12.4	Th	3.73	4.09	3.6	4.84	3.38
Zn	64.42	77.17	83.08	91.3	93.77	Bi	0.02	0.02	0.05	0.06	0.05
Ga	17.93	18.98	18.7	18.8	19	ΣREE	80.28	86.76	77.43	83.56	84.33
Rb	13.65	49.6	40.2	41.5	42	LREE	64.25	71.46	63.49	67.82	68.26
Sr	267	339	346	343	342	HREE	16.03	15.3	13.95	15.74	16.07
Y	26.92	26.56	26.35	29.44	29.21	LREE/ HREE	4.01	4.67	4.55	4.31	4.25
Zr	167	73	50.11	79.77	64.04	(La/Yb) _N	3.82	4.96	3.8	3.79	3.66
Nb	4.75	4.6	4.24	4.41	4.22	δEu	0.91	0.94	1.01	0.93	0.9
Sn	1.12	1.12	2.42	3.98	3.02	δCe	0.82	0.85	1.04	1.05	1.05

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素单位为10⁻⁶

合,可能在正常地壳厚度下(约20km)形成的^[18-20]。

在K₂O-Na₂O图解(图8)中,六道崴子矿床成矿岩体样品点均落在I型花岗岩区内。另外,一些微量元素的比值也较好地反映出了源区特点^[21],Zr/

Hf值介于28.98~33.53之间,与地幔平均值(30.74)^[22]基本吻合;Nb/Ta值为14.39~15.75,介于地幔平均值(17.5)^[15]与地壳平均值(11)^[22]之间;而Rb/Sr值为0.05~0.12,大于上地幔平均值(0.034)^[22]而小于地壳

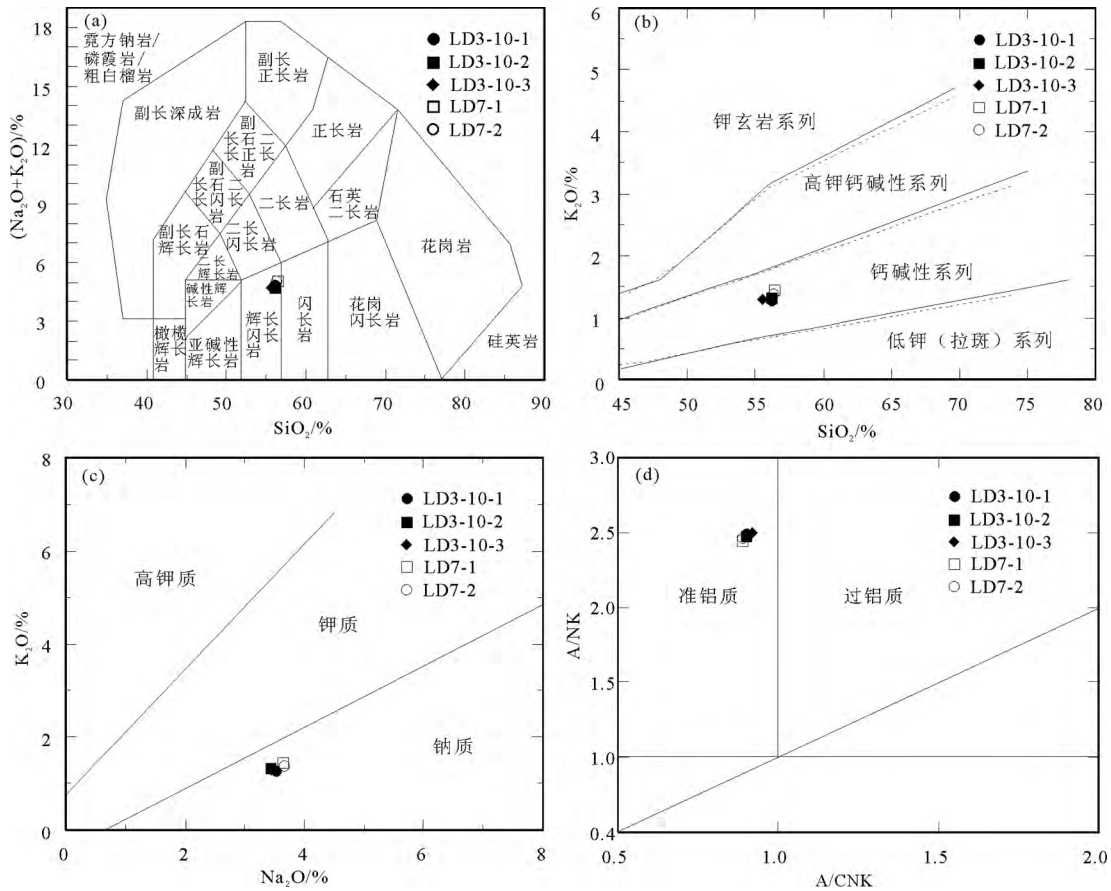


图 4 六道崴子岩体主量元素特征判别图解

Fig. 4 Discrimination diagram of major elements in Liudaowaizi gabbrodiorite

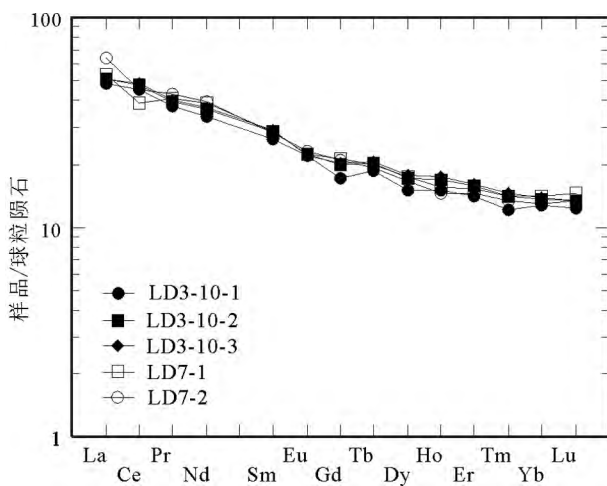


图 5 六道崴子岩体稀土元素球粒陨石标准化配分模式(底图据参考文献[15])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of gabbrodiorite in the Liudaowaizi deposit

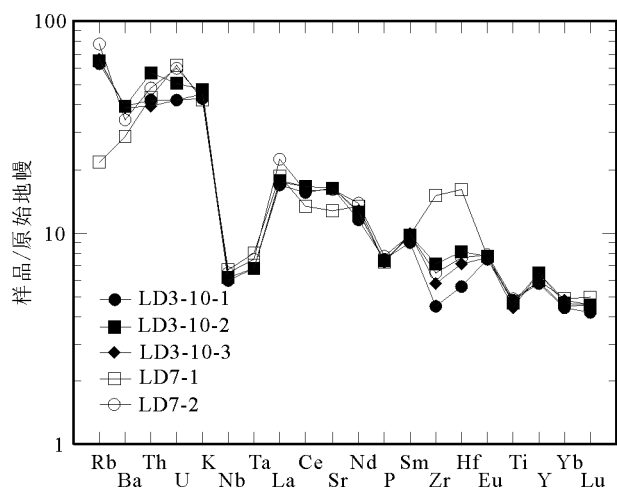


图 6 六道崴子岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图(底图据参考文献[16])

Fig. 6 Primitive mantle-normalized multi-element spider diagram of gabbrodiorite in the Liudaowaizi deposit

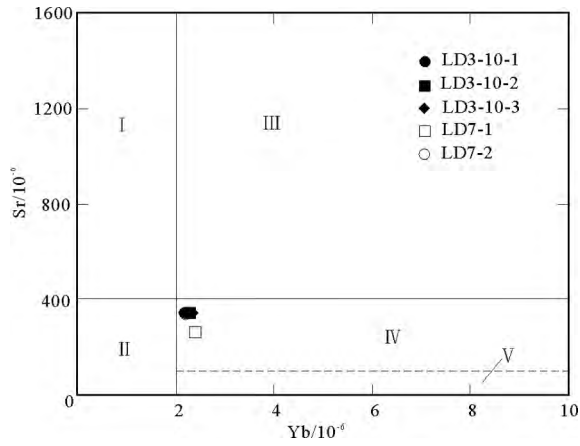


图7 花岗岩 Yb-Sr 分类图(据参考文献[18]修改)

Fig. 7 Classification diagram for granites based on Yb-Sr
 I—高Sr低Yb型; II—低Sr低Yb型; III—高Sr高Yb型; IV—低Sr高Yb型; V—非常低Sr高Yb型

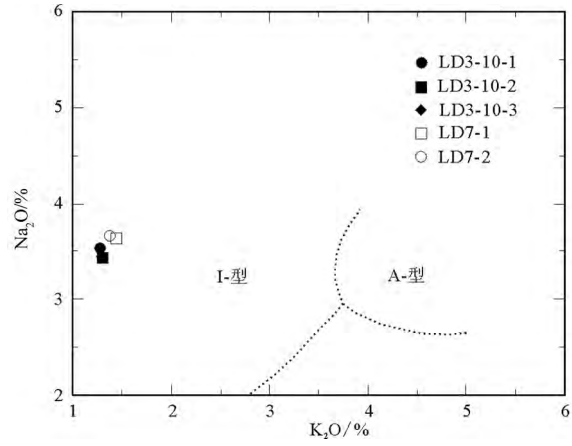


图8 六道崴子岩体 K₂O-Na₂O 判别图解

Fig. 8 K₂O-Na₂O discrimination diagram of Liudaowaizi gabbrodiorite

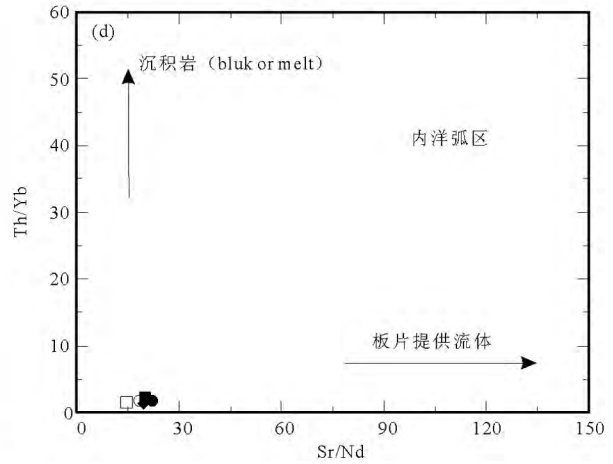
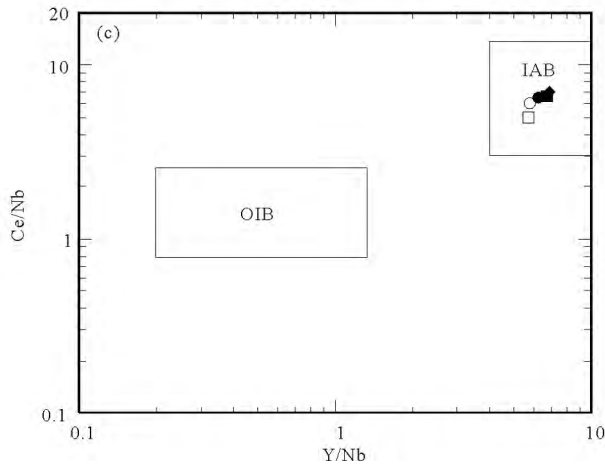
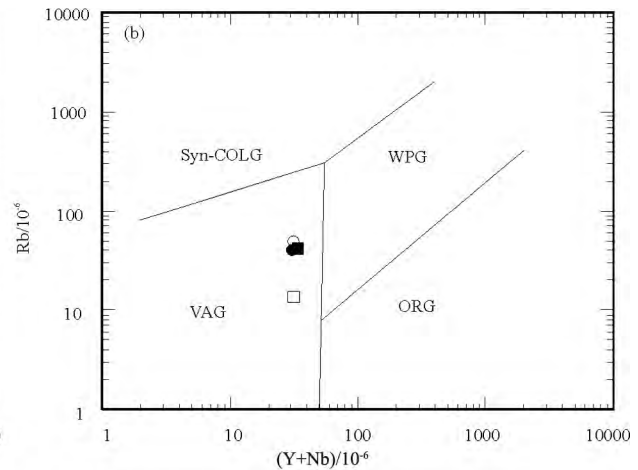
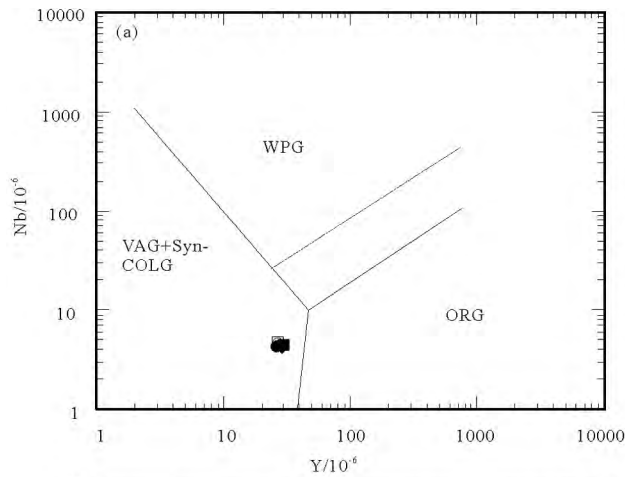


图9 六道崴子岩体构造环境判别图解

Fig. 9 Discrimination diagrams for tectonic setting of gabbrodiorite in the Liudaowaizi deposit
 a—Y-Nb 判别图解; b—(Y+Nb)-Rb 判别图解; c—Y/Nb-Ce/Nb 判别图解(据参考文献[25]修改);
 d—Sr/Nd-Th/Yb 判别图解。ORG—大洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩;
 Syn-COLG—同碰撞花岗岩; OIB—大洋岛玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; 图例同图4

平均值(0.35)^[22]。由此可判断,六道崴子岩体具有壳—幔混源的特征。

4.2 成岩成矿时代及构造环境

20世纪90年代以前,有关学者^[23-24]普遍认为中国东北地区的花岗岩主要形成于古生代,随着高精度同位素测年资料的不断积累,发现该区原来认为属于海西期及加里东期的花岗岩体的侵位时代主体为中生代,并将中生代花岗岩分为晚三叠世—中侏罗世(160~230Ma)和早白垩世(120~130Ma)两期。

本次测年结果表明,六道崴子矿区辉长闪长岩中锆石测点的U-Pb年龄范围为 $196\text{Ma} \pm 2\text{Ma} \sim 213\text{Ma} \pm 1\text{Ma}$,年龄加权平均值为 $204\text{Ma} \pm 2.3\text{Ma}$,可见六道崴子铁铜矿成矿岩体为该地区侏罗纪初期(燕山早期)岩浆的产物,而并非前人认为的海西晚期。

在Y-Nb及(Y+Nb)-Rb构造环境判别图解(图9-a,b)上,辉长闪长岩落入火山弧花岗岩区内;在Y/Nb-Ce/Nb图解(图9-c)中,岩体落入岛弧玄武岩区内,这表明低Sr I型花岗岩源区的来源与相对富集的岛弧玄武岩源区类似^[25]。结合岩体地球化学特征,判断区内辉长闪长岩可能形成于早期大陆边缘或岛弧环境;在Sr/Nd-Th/Yb图解(图9-d)中,岩体形成与板片流体相关,表明I型花岗岩的流体来源可能与来自古太平洋俯冲板片的残留体有关^[26]。

中国兴蒙造山带东段小兴安岭—张广才岭一带中生代花岗岩的形成时代以侏罗纪为主^[27],多为偏铝质、高钾钙碱性系列的I型花岗岩^[28-29]。六道崴子矿区辉长闪长岩为偏铝质富钠钙碱性I型花岗岩,具有类似于活动大陆边缘花岗岩的岩石组合特征,因此也暗示其形成可能与古太平洋板块的俯冲有关,处于大陆边缘构造背景^[28-29]。

5 结论

(1)六道崴子铁铜矿床位于兴蒙造山带东段,主矿体赋存于燕山早期辉长闪长岩与二叠系大理岩接触带内,赋矿岩石为石榴子石矽卡岩,属于典型的接触交代型矿床。

(2)与成矿相关的辉长闪长岩中18粒锆石20个测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄值集中于 $196\text{Ma} \pm 2\text{Ma} \sim 213\text{Ma} \pm 1\text{Ma}$ 之间,年龄加权平均值为 $204\text{Ma} \pm 2.3\text{Ma}$,表明其形成于早侏罗世(燕山早期)。

(3)六道崴子矿区辉长闪长岩属偏铝质富钠钙

碱性系列,岩石地球化学特征表明物质源区具有壳—幔混源的特征。

(4)六道崴子辉长闪长岩及相关的铁铜矿化形成于大陆边缘或岛弧环境中,符合东北地区I型花岗岩地球化学特征,成岩成矿作用与古太平洋板块的俯冲作用有关。

致谢:野外调研中得到吉林省有色金属地质勘查局六〇三队李晨辉总工程师和六道崴子矿区庄开林经理等相关技术人员的大力支持与帮助,西北大学大陆动力学国家重点实验室和中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室在LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素测定和岩石主量、微量及稀土元素的测试分析中给予了大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]李峰,时俊峰,李志兴,等.吉林省汪清县六道崴子铜矿床地质特征及找矿方向[J].吉林地质,2010,29(4):32-34.
- [2]Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, et al. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 30: 542-556.
- [3]左国朝,李绍雄,于守南,等.新疆磁海铁矿床产出特征及成矿构造演化[J].西北地质,2004,37(1):53-61.
- [4]王玉往,沙建明,程春.新疆磁海铁(钴)矿床磁铁矿成分及其成因意义[J].矿床地质,2006,25(增刊):321-323.
- [5]唐萍芝,王京彬,王玉往,等.新疆磁海铁矿区镁铁—超镁铁岩地球化学特征及其地质意义[J].地球化学,2010,39(6):542-552.
- [6]唐萍芝,王玉往,王京彬,等.新疆磁海铁矿床中黑柱石的发现及其地质意义[J].矿物学报,2011,31(1):9-16.
- [7]Somarin A K, Moayyed M. Granite and gabbrodiorite associated skarn deposits of NW Iran[J]. Ore Geology Review, 2002, 20: 127-138.
- [8]Altunbey M, Sagioglu A. Skarn-type ilmenite mineralization of the Tuzba, Si-Tunceli region, eastern Turkey[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2003, 31: 481-488.
- [9]袁洪林.西北大学大陆动力学国家重点实验室[J].岩矿测试,2012,31(6):1090-1092.
- [10]Ludwig K R. User's manual for isoplot 3.1, A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication. 4, 2003.
- [11]Qi L, Zhou M F. Platinum-group elemental and Sr-Nd-Os isotopic geochemistry of Permian Emeishan flood basalts in Guizhou Province, SW China[J]. Chemical Geology, 2008, 248: 83-103.
- [12]张磊,史兴俊,张建军,等.内蒙古阿拉善北部陶家托西圈辉长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄和地球化学特征[J].地质通报,2013,32(10):1536-1546.
- [13]Koschek G. Origin and significance of the SEM cathodolumines-

- cence from zircon[J]. *Journal of Microscopy*, 1993, 171: 223-232.
- [14]李永飞, 郝晓勇, 卞雄飞, 等. 大兴安岭北段龙江盆地中生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 2013, 32(8): 1196-1211.
- [15] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins*, London. Geological Society London Special Publications, 1989, (44): 313-345.
- [16]Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[C]//Henderson P. *Rare earth element geochemistry: development in geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984: 3-107.
- [17]Rollinson H R. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*[J]. Longman Scientific Technical, Harlow, UK, 1993: 80-142.
- [18]张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2249-2269.
- [19]张旗, 李承东, 王焰, 等. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(6): 1527-1537.
- [20]张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 造山前、造山和造山后花岗岩的识别[J]. *地质通报*, 2008, 27(1): 1-18.
- [21]汪岩, 付俊彧, 那福超, 等. 内蒙古扎赉特旗辉长岩-闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 2013, 32(10): 1525-1535.
- [22]Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Blackwell Scientific Publish, 1985.
- [23]吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217-1238.
- [24]Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 1-30.
- [25]Eby G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 641-644.
- [26]隋振民, 陈跃军. 大兴安岭东部花岗岩锆石饱和温度及其地质意义[J]. *世界地质*, 2011, 30(2): 162-172.
- [27]孙德有. 张广才岭中生代花岗岩的时代、地球化学特征与构造背景[D]. 长春: 吉林大学博士学位论文, 2001.
- [28]孙德有, 吴福元, 高山, 等. 吉林中部晚三叠世和早侏罗世两期铝质 A 型花岗岩的厘定及对吉黑东部构造格局的制约[J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 263-275.
- [29]葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 749-760.