

# 陕西金堆城钼矿区花岗岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其地质意义

李洪英<sup>1</sup> 毛景文<sup>1</sup> 王晓霞<sup>1</sup> 叶会寿<sup>1</sup> 杨 磊<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 中海油研究总院, 北京 100027)

**摘要:** 通过对陕西金堆城钼矿区花岗斑岩体和八里坡斑岩体进行地球化学测试, 测得金堆城斑岩体的 SiO<sub>2</sub> 含量为 72.89%~74.06%, MgO 为 0.07%~0.3%, 稀土总量为 43.29×10<sup>-6</sup>~93.94×10<sup>-6</sup>, 稀土元素配分曲线呈右倾型, 具有明显的钕负异常和弱的负铈异常 ( $\delta$ Eu 为 0.43~0.78,  $\delta$ Ce 为 0.74~0.86), 富集大离子亲石元素 K、Rb、U、Th 和 Sr 等元素, 亏损 Ba、P 和 Ti 等元素。八里坡斑岩体的 SiO<sub>2</sub> 含量为 69.87%~70.80%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14.93%~15.46%, MgO 0.28%~0.48%, Sr/Y 比值大于 60, 稀土总量为 125.23×10<sup>-6</sup>~139.63×10<sup>-6</sup>, 钕为无异常或微弱的正异常 ( $\delta$ Eu 为 0.98~1.04), 铈为微弱的负异常 ( $\delta$ Ce 为 0.92~0.96), 富集 Ba、U、K 等大离子亲石元素, 而亏损 P、Ta 和 Ti 等元素。金堆城斑岩体和八里坡斑岩体的岩石类型为 I 型花岗岩, Pb 同位素显示金堆城斑岩体的 Pb 主要来自下地壳, 但有地幔物质的加入, 八里坡斑岩体的 Pb 主要来自下地壳。金堆城斑岩体的  $\epsilon$ (Nd,t) 值为较低负值(-13.8~-15.2), 但  $\epsilon$ (Sr,t) 变化较大, 为-46.4~13.6, 八里坡斑岩体具有负低  $\epsilon$ (Nd,t) 值(-20.4) 和正高  $\epsilon$ (Sr,t) 值(64.5~65.2)。金堆城花岗斑岩和八里坡花岗斑岩的 Sr、Nd、Pb 同位素与华北地块相似, 这两个岩体的源区为华北地块组成部分。

**关键词:** Sr、Nd、Pb 同位素; 花岗斑岩; 岩石地球化学; 金堆城

中图分类号: P588.14

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2011)06-1536-15

金堆城是中国重要的大型钼矿区, 钼矿资源量大于 200 万 t, 矿床类型有斑岩型、碳酸岩脉型, 主要分布有金堆城钼矿床、八里坡钼矿床、石家湾钼矿床、黄龙铺钼矿床、文公岭钼矿点、宋家沟钼矿点、桃园钼矿点、双庙钼矿点、东西沟钼矿点等。该矿区内分布着一系列花岗岩岩体, 其中老牛山花岗岩体呈岩基, 分布于矿区的西北部, 金堆城、石家湾、八里坡等呈小斑岩体产出, 与该区的钼、铁等矿产的生成有密切的关系。前人对矿区内花岗岩研究表明, 区内花岗岩具有多时代、多类型、多成因和多来源特征, 形成于多种构造环境的特征<sup>[1-8]</sup>, 但近年来更为精确的花岗岩年代学研究表明, 金堆城矿区的花岗岩基及花岗斑岩形成时代为燕山期<sup>[9-11]</sup>。本次研究主要是在

前人研究的基础上, 分析金堆城斑岩体和八里坡斑岩体的岩石地球化学和 Sr、Nd、Pb 同位素特征, 进一步探讨了该矿区花岗岩岩体物质来源及其成矿潜力评价。

## 1 地质概况

金堆城钼矿区位于陕西省东部, 地处华北板块南缘洛南—栾川台缘褶皱带西段。在矿区出露地层为太古宇太华岩群片麻岩和混合岩, 出露于矿区的北部; 中元古界熊耳群火山岩, 分布于矿区的中部—西南部; 中元古界官道口群高山河组不整合覆盖于熊耳群之上, 高山河组岩性主要为石英岩、板岩和泥岩。金堆城矿区内断裂构造发育, 褶皱构造主要为黄

收稿日期: 2011-06-09; 改回日期: 2011-07-21

基金项目: 中央级公益性科研院所基本业务费资助项目(K1019)、国土资源部公益性行业科研专项(200911007-6)、全国危机矿山接替资源找矿项目(20089949)资助。

作者简介: 李洪英, 女, 1979 年生, 博士, 主要从事矿床地球化学研究; E-mail: lihongyingy@163.com。

龙铺背斜,轴向与近东西向的区域构造线相一致,核部由熊耳群火山岩组成,两翼和倾伏端由高山河组的石英岩、板岩组成,东段轴向近东西,在潘家沟一带呈略向南凸出的弧形。断裂构造主要为近东西向和北西向两组,走向近东西的断裂有燕门凹张性断裂,它具有多期活动的特点,形成一张性断裂破碎带,南部为碌碡沟压性断裂,倾向南,北西向断裂倾向南西,近东西向断裂和北西向断裂交汇处往往控制花岗斑岩和钼矿床的分布<sup>[12]</sup>。

金堆城矿区内岩浆岩出露广泛,元古宙花岗岩和花岗伟晶岩出露于矿区的东北部,呈东西向带状分布。印支期辉绿岩、正长斑岩主要分布在东坪—黄龙铺—太子坪一带,呈北东向或北西向脉状分布。燕山期花岗岩呈两种形态产出,老牛山花岗岩体呈岩基大面积分布于矿区的西北部(图 1),而金堆城、八里坡、石家湾等呈小斑岩体产出,与钼矿化关系密切。

金堆城花岗斑岩体位于石家湾斑岩体西南约 12 km 处,岩体呈岩筒状,深部长 2 000 m,地表的裸露长度约 450 m,宽 150 m,面积约 0.35 km<sup>2</sup>,呈北北

西向延伸,岩体为北宽南窄,向北西延伸,从北西南东呈岩株状侵位于熊耳群火山岩内,岩体在深部与老牛山岩基呈断层接触关系。金堆城花岗斑岩呈肉红色、浅肉红色,岩石呈斑状和聚斑状结构,斑晶为石英、钾长石,基质主要为石英,其次为钾长石、钠长石及少量黑云母,副矿物有锆石、磁铁矿、磷灰石等(图 2)。成矿岩体和围岩发生强烈而广泛的热液蚀变,其中和矿化关系密切的蚀变类型主要有钾长石化、黑云母化、青磐岩化、硅化、绢云母化、黄铁绢英岩化,其中斑岩体的钾长石化最强烈。金堆城花岗斑岩体锆石 U-Pb 年龄为(143.36±0.85)Ma(待发表数据)。

八里坡斑岩体位于金堆城斑岩体西边,呈北东-南西向延伸,出露长度大于 1 000 m,宽度 200~500 m,面积约 0.4 km<sup>2</sup>,北东段宽度较小,向南西逐渐变大,地表形似“葫芦”状。主要由黑云母二长花岗斑岩组成,岩石为灰白色、淡肉红色,中-细粒花岗结构,局部为似斑状结构,斑晶主要为钾长石,块状构造,主要成分为石英、斜长石、钾长石,有少量的黑

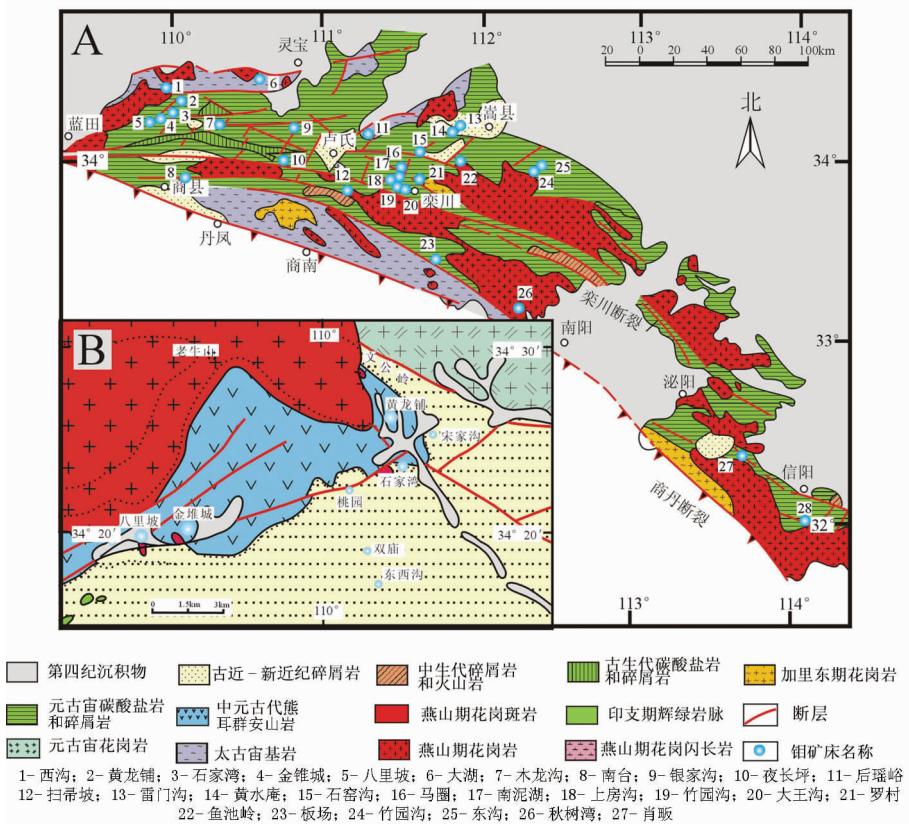
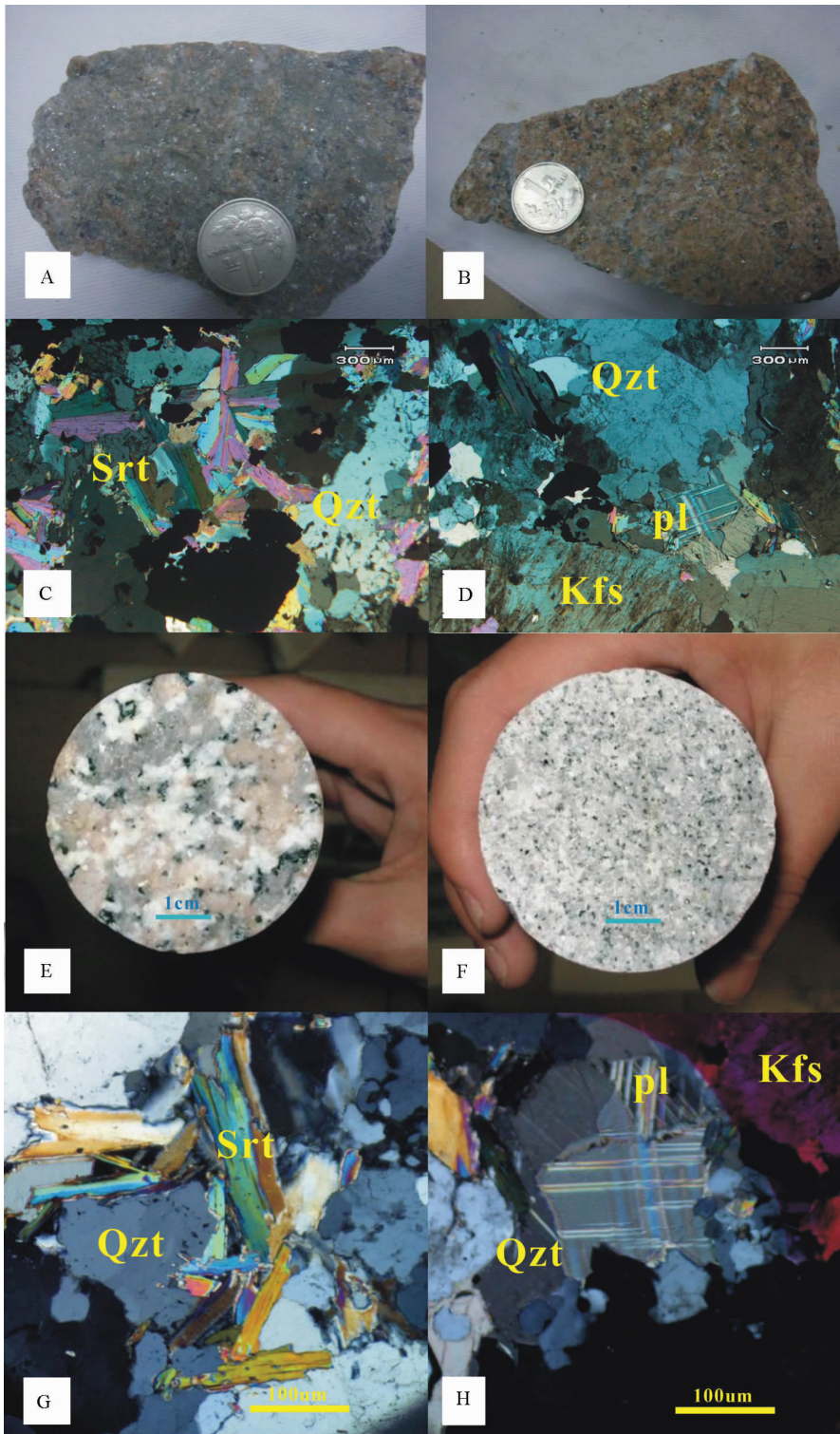


图 1 陕西金堆城钼矿区区域地质图(据文献[12-13])  
Fig.1 Regional geological map of Jinduicheng area in Shaanxi





A—绢云母化;B—钾长石化;C—绢云母化;D—钾长石化;  
E—粗粒结构;F—细粒结构;G—白云母化;H—似斑状结构

图 2 陕西金堆城钼矿区花岗岩岩石矿物组合与蚀变特征(A、B、C、D 为金堆城斑岩体照片,E、F、G、H 为八里坡斑岩体照片)

Fig.2 Characteristics of mineral association and erosion of granites in Jinduicheng area

云母,斑岩体中普遍发育有绢云母化和黄铁矿化,局部可见绿泥石化(图 2)。八里坡花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为(154.89±0.66) Ma(待发表数据)。

## 2 样品和测试方法

金堆城花岗斑岩体和八里坡花岗斑岩体的岩石地球化学分析样品经无污染破碎、研磨(>200 目)制成分析样品,在国家地质实验测试中心进行分析,其中微量元素和稀土元素是采用等离子质谱(X-series)分析,含量大于  $10 \times 10^{-6}$  的元素分析精度优于 5%,含量小于  $10 \times 10^{-6}$  的元素分析精度优于 10%,主量元素除 FeO、LOI 采用标准湿化学分析方法外,其他元素分析采用 X 荧光光谱仪(3080E),精度优于 5%。花岗斑岩体的 Sr、Nd 和 Pb 同位素测试在核工业北京地质研究所完成,采用 ISOPROBE-T 热电离质谱仪进行分析测试, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ , $^{143}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值通过 ICP-MS 方法测得 Rb、Sr、Sm、Nd 含量计算得到。

## 3 测试结果分析

### 3.1 主量元素特征

本次研究选择了金堆城和八里坡花岗斑岩中的新鲜样品进行主量元素、微量元素和稀土元素分析(表 1)。从表 1 可知,金堆城斑岩体  $\text{SiO}_2$  含量总体上大于八里坡斑岩体的  $\text{SiO}_2$  含量,其中金堆城斑岩体的  $\text{SiO}_2$  含量为 72.89%~74.06%,属硅过饱和,与张正伟等<sup>[4]</sup>所统计的东秦岭钼矿带中钼矿有关花岗斑岩全岩  $\text{SiO}_2$  含量基本一致( $\text{SiO}_2$  一般大于 70%),八里坡斑岩体的  $\text{SiO}_2$  含量变化范围较小,为 69.87%~70.80%,与张正伟等统计的东秦岭钼矿带中斑岩型多金属矿床成矿母岩(二长花岗斑岩、钾长花岗斑岩和石英正长斑岩-闪长斑岩)全岩的  $\text{SiO}_2$  相一致( $\text{SiO}_2$  变化范围为 65%~71%),说明八里坡斑岩内外接触带可能还有其他金属成矿。八里坡斑岩体的里特曼指数小于金堆城岩体的里特曼指数,为 2.13~2.72,金堆城斑岩体比八里坡斑岩体富碱(图 3),其中金堆城斑岩体的碱值为 8.46%~10.41%,八里坡斑岩体的碱值为 8.02%~8.56%。金堆城斑岩体的 A/CNK 值为 1.01~1.23,八里坡斑岩体的 A/CNK 值为 1.12~1.23,均为过铝质。金堆城斑岩体  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  为 0.05~0.21,八里坡斑岩体的  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  为 0.97~1.13,八里坡斑岩体中 Al 的含量较八里坡斑岩体高,八里坡斑岩体  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 14.93%~15.74%,而

金堆城斑岩体的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 12.26%~13.12%。金堆城斑岩体的 CaO 含量极低,为 0.56%~0.90%,而八里坡斑岩体的 CaO 含量较高,为 2.15%~2.74%,两岩体的  $\text{TiO}_2$  普遍较低,变化范围为 0.08%~0.22%。从 A/NK-A/CNK 图解(图 5)可知,金堆城斑岩体和八里坡斑岩体均投在过铝质区域。

### 3.2 稀土和微量元素地球化学特征

#### 3.2.1 稀土元素地球化学特征

金堆城和八里坡花岗斑岩稀土元素分析结果见表 1,由表 1 可知,金堆城斑岩体稀土总量( $\sum\text{REE}$ )较八里坡斑岩体稀土总量低,且金堆城斑岩体稀土总量变化范围大,为  $43.29 \times 10^{-6}$ ~ $93.94 \times 10^{-6}$ ,八里坡斑岩体稀土总量为  $125.23 \times 10^{-6}$ ~ $139.63 \times 10^{-6}$ ,都低于国内 S 型花岗岩稀土总量( $173.14 \times 10^{-6}$ )。金堆城斑岩体反映轻、重稀土元素分馏程度的 LREE/HREE 值为 6.72~9.21,八里坡斑岩体的轻重稀土分馏程度范围为 15.9~19.78,它们均属轻稀土富集型。经球粒陨石标准化后的稀土元素配分模式(图 6-A),金堆城斑岩体左高右低平倾斜的“V”字型,而八里坡斑岩体则呈相对平滑右倾。金堆城斑岩体的 Eu 和 Ce 均为负异常,铕异常系数( $\delta\text{Eu}$ )为 0.43~0.78,铕负异常明显,Ce 异常系数( $\delta\text{Ce}$ )为 0.74~0.86,为明显的弱的 Ce 负异常。而八里坡斑岩体的 Eu 为微弱的正异常( $\delta\text{Eu}$  为 0.98~1.04),表明在斑岩形成中,没有或很少发生过斜长石的分离结晶作用,Ce 为微弱的负异常。

#### 3.2.2 微量元素地球化学特征

金堆城和八里坡花岗斑岩微量元素分析结果见表 1,由表 1 可知,金堆城花岗斑岩体具有较高的大离子亲石元素含量(Rb 为  $308 \times 10^{-6}$ ~ $466 \times 10^{-6}$ 、Sr 为  $55.7 \times 10^{-6}$ ~ $2126 \times 10^{-6}$ 、Ba 为  $411 \times 10^{-6}$ ~ $14186 \times 10^{-6}$ )、高场强元素(HSPE)Zr 和 Nb 含量较高(Zr 为  $56.1 \times 10^{-6}$ ~ $1236 \times 10^{-6}$ 、Nb 为  $30 \times 10^{-6}$ ~ $63.7 \times 10^{-6}$ ),但 Ta 含量较低( $1.62 \times 10^{-6}$ ~ $3.68 \times 10^{-6}$ ),在原始地幔 PM 标准化微量元素蛛网图上显示大离子亲石元素(K、Rb)相对富集,Nb、P 和 Ti 相对亏损(图 6-B),Rb/Sr 比值小于 7,Rb/Ba 比值小于 1。

八里坡斑岩体花岗斑岩具有较高的大离子亲石元素含量(Rb 为  $124.1 \times 10^{-6}$ ~ $174.99 \times 10^{-6}$ 、Sr 为  $679.8 \times 10^{-6}$ ~ $741.81 \times 10^{-6}$ 、Ba 为  $1422.6 \times 10^{-6}$ ~ $2166 \times 10^{-6}$ )、高场强元素(HSPE)Zr 和 Nb 含量较高(Zr 为  $160.48 \times 10^{-6}$ ~ $168.53 \times 10^{-6}$ 、Nb 为  $17.77 \times 10^{-6}$ ~ $19.87 \times$

表 1 金堆城斑岩体和八里坡斑岩体的岩石地球化学分析数据  
**Table 1 Geochemical analytical data of granite porphyry from Jinduicheng and Balipo area**

矿床 样号	金堆城					八里坡				
	JDC-54c	JDC-54d	JDC-82	JDC-96	JDC-100	ZK0001-1	ZK001	XLYT-01	B0003-9	B2101-11
SiO <sub>2</sub> / 10 <sup>-2</sup>	72.89	74.06	73.71	73.1	73.16	69.98	70.72	69.92	70.80	69.87
Na <sub>2</sub> O	1.49	1.36	1.53	0.54	1.18	4.16	4.26	4.41	3.97	3.72
MgO	0.13	0.07	0.3	0.06	0.28	0.38	0.33	0.28	0.34	0.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.12	12.5	12.94	12.26	12.79	15.02	14.93	15.46	15.53	15.74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.03	0.04	0.04	0.06	0.09	0.07	0.04	0.07	0.09
K <sub>2</sub> O	6.97	7.93	7.18	9.87	8.46	3.94	3.76	4.15	3.98	3.85
CaO	0.73	0.66	0.9	0.56	0.7	2.38	2.43	2.15	2.37	2.74
TiO <sub>2</sub>	0.14	0.14	0.14	0.08	0.16	0.22	0.21	0.21	0.16	0.21
MnO	0.02	0.01	0.04	0.02	0.01	0.10	0.09	0.07	0.13	0.16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.89	1.20	0.98	1.31	1.00	2.18	2.05	1.93	2.30	2.65
LOI	1.85	1.29	1.71	1.28	1.2	0.80	0.61	0.69	0.61	0.86
Total	100.19	100.03	100.92	99.68	99.95	99.25	99.46	99.31	100.26	100.35
La / 10 <sup>-6</sup>	21.5	12.00	18.20	10.30	16.40	31.10	30.00	35.20		
Ce	36.2	19.30	27.10	14.90	27.70	58.00	56.28	62.60		
Pr	4.47	2.66	3.59	2.15	3.38	6.32	6.15	7.05		
Nd	16.4	10.00	13.20	8.52	13.10	21.52	21.02	23.46		
Sm	3.34	2.10	2.39	1.57	2.39	3.39	3.32	3.52		
Eu	0.47	0.33	0.54	0.39	0.58	1.00	1.05	1.08		
Gd	3.18	1.81	2.45	1.52	2.06	2.65	2.67	2.69		
Tb	0.50	0.30	0.38	0.25	0.33	0.33	0.34	0.32		
Dy	2.90	1.71	2.36	1.46	1.71	1.74	1.77	1.64		
Ho	0.58	0.36	0.46	0.28	0.34	0.33	0.33	0.30		
Er	1.86	1.15	1.46	0.85	1.04	0.96	0.98	0.80		
Tm	0.28	0.18	0.23	0.12	0.17	0.14	0.14	0.12		
Yb	1.96	1.20	1.75	0.85	1.06	1.06	1.02	0.74		
Lu	0.30	0.19	0.28	0.13	0.19	0.17	0.16	0.11		
Hf	3.94	4.02	4.42	2.33	4.05	3.88	3.63	3.94		
Ta	3.51	3.67	3.59	1.62	2.93	0.83	0.81	0.68		
Th	22.00	15.10	17.70	9.45	12.40	6.55	5.66	6.09		
U	13.50	10.90	15.20	9.43	5.72	7.10	3.85	4.72		
Cu	23.90	17.40	16.80	21.90	25.60	21.85	13.62	11.91		
Mo	127	283	74.1	868	565	111.28	110.42	210.43		
Rb	308	358	333	466	385	174.98	167.52	124.10		



续表 1

Sr	96.90	55.70	79.30	110	212	679.80	724.80	741.80		
Zr	112	100	109	56.10	123	168.52	160.48	164.98		
Nb	63.60	60.00	46.40	30.00	47.3	19.86	19.33	17.77		
Ba	686	411	603	926	1418	1422.60	1432.40	2166.00		
Y	17.90	10.70	12.80	7.74	9.36	11.30	11.14	8.85		
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	8.46	9.29	8.71	10.41	9.64	8.1	8.02	8.56	7.95	7.57
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	0.21	0.17	0.21	0.050	0.14	1.06	1.13	1.06	1.00	0.97
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	4.68	5.83	4.69	18.28	7.17	0.95	0.88	0.94	1.00	1.03
σ	2.39	2.78	2.47	3.60	3.08	2.43	2.32	2.72	2.27	2.13
Mg <sup>#</sup>	11.33	9.22	32.30	7.46	30.11	25.85	24.35	22.49	22.82	25.77
A/CNK	1.23	1.09	1.16	1.01	1.09	1.13	1.12	1.13	1.19	1.23
ANK	1.31	1.15	1.26	1.06	1.15	1.35	1.35	1.31	1.43	1.53
ΣREE	93.94	53.29	74.39	43.29	70.45	128.71	125.23	139.63		
LREE	82.38	46.39	65.02	37.83	63.55	121.33	117.82	132.91		
HREE	11.56	6.90	9.37	5.46	6.90	7.38	7.41	6.72		
LREE/HREE	7.13	6.72	6.94	6.93	9.21	16.44	15.90	19.78		
dEu	0.43	0.51	0.68	0.76	0.78	0.98	1.04	1.03		
dCe	0.86	0.80	0.77	0.74	0.86	0.96	0.96	0.92		
Zr/Hf	28.43	24.88	24.66	24.08	30.37	43.43	44.21	41.87		
Rb/Sr	3.18	6.43	4.2	4.24	1.82	0.26	0.23	0.17		
Sr/Y	5.41	5.21	6.20	14.21	22.65	60.17	65.05	83.84		
Rb/Ba	0.45	0.87	0.55	0.50	0.27	0.12	0.12	0.06		

注: A/CNK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)原子量比值; A/NK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)原子量比值; Mg<sup>#</sup>=100×w(MgO)/(w(MgO)+w(TFeO))。

10<sup>-6</sup>), Ta 含量较低(0.68×10<sup>-6</sup>~0.84×10<sup>-6</sup>)。在原始地幔PM 标准化微量元素蛛网图上显示大离子亲石元素(K、Rb 和 Ba)相对富集,Nb、P 和 Ti 相对亏损(图 6-B),且 Rb/Sr 比值小于 0.3,Rb/Ba 比值小于 0.2。

### 3.3 Sr、Nd、Pb 同位素特征

#### 3.3.1 Pb 同位素特征

铅同位素由于其质量大,同位素间的相对质量差较小,外界条件对其组成的影响很小,故铅同位素组成具有明显的“指纹特征”<sup>[20-21]</sup>,而且花岗岩全岩的铅同位素组成代表岩石现今的铅同位素比值。由表 2 可知,金堆城斑岩体和八里坡斑岩体具有较为相似的铅同位素组成,它们的 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值为 16.797~18.079,<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值为 15.371~15.498,<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 比值为 37.464~38.139。

在 Zartman<sup>[20]</sup> 的铅构造模式图解 <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb—<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb (图 7A) 和 <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb—<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb (图 7B) 中,金堆城斑岩体及八里坡斑岩体的铅同位素组成

投点有些差距,在 <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb—<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 图(图 7-A) 中,金堆城斑岩体主要落在地幔线和造山带线之间,多数靠近地幔线,造山带本身代表了壳幔混合来源;八里坡斑岩体都落在下地壳和地幔线之间,多数靠近地幔线。在 <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb—<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 图(图 7-B) 中,金堆城斑岩体位于下地壳线和造山带线之间,靠近造山带线,八里坡斑岩体也落在造山线和下地壳线之间,多数靠近下地壳。因此,金堆城和八里坡斑岩体的铅来源具有一定的差异,也具有一定的相似性,即主要属深源铅,为地幔与下地壳的混合成因铅。

#### 3.3.2 Sr、Nd 同位素特征

金堆城花岗斑岩的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 测得值为 0.716 8~0.727 8(表 4),由此同位素比值,并根据金堆城花岗斑岩的 U—Pb 年龄(143Ma)所计算得到的 Sr 同位素初始比值(1Sr)为 0.701 1~0.7053,<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 测定值为 0.511 7~0.5118,由此计算得到的 ε<sub>Nd</sub>(t) 值为 -15.2~-13.8,在(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>—ε<sub>Nd</sub>(t)图解上(图 8),金

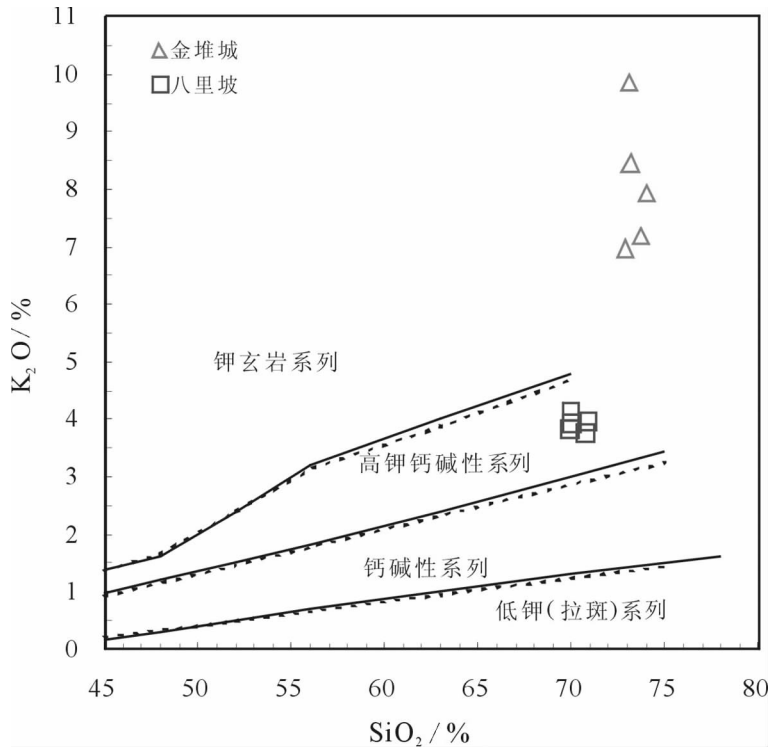


图 3 金堆城钼矿区 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解 (底图据文献[15-17])

Fig.3 Discriminant diagram of K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> of granite porphyry in Jinduicheng area

堆城花岗斑岩样品点投在了地壳线和富集地幔线之间,主要靠近 I 型富集地幔。八里坡花岗斑岩的 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 测得值为 0.710 2~0.710 4 (表 4), 花岗斑岩的 U-Pb 年龄为 155 Ma, 计算得到 Sr 同位素初始比值 (ISr) 为 0.708 8~0.708 9, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 测定值为 0.511 5, 计算得到 ε<sub>Nd</sub>(t) 值在 -20.4, 在 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> - ε<sub>Nd</sub>(t) 图解上 (图 8), 八里坡花岗斑岩样品点都投于下地壳区域。

## 4 结果与讨论

### 4.1 成因类型

本次研究测得的金堆城斑岩体样品具高的 SiO<sub>2</sub> 含量 (最高值为 74.06%)、全碱含量高 (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O 为 8.02%~10.41%), 表明它们经历了高程度结晶分异。在准铝质到弱过铝质岩浆中, 磷灰石的溶解度很低, 并在岩浆分异过程中随 SiO<sub>2</sub> 的增加而降低, 而在强过铝质岩浆中, 磷灰石溶解度变化趋势与此相反, 磷灰石在 I 型和 S 型花岗岩浆中这种不同行为已被成功地用于区分 I 型和 S 型花岗岩类<sup>[25-31]</sup>。表 1 数据显示, 金堆城矿区金堆城斑岩体为弱过铝质岩石 (A/CNK < 1.1), 而八里坡斑岩体为强过铝质岩石 (A/CNK > 1.1), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量很低 (< 0.10%), 并且随

SiO<sub>2</sub> 含量增加而降低 (图 4), 与 I 型花岗岩演化趋势一致, 金堆城斑岩体 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值为 4.69~18.28, 八里坡斑岩体 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值为 0.88~1.03, Rb/Sr 比值为 0.17~6.43, Rb/Ba 比值为 0.06~0.87, I<sub>Sr</sub> 值为 0.701 1~0.708 9 (表 3), 初始 Sr 比值与 I 型花岗岩相近。因此, 本次研究获得的金堆城矿区的斑岩体属于 I 型花岗岩。

### 4.2 花岗斑岩岩浆源讨论

花岗岩 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 可作为源区部分熔融温度指示<sup>[32]</sup>, 若 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> < 100, 则部分熔融温度可达 875℃, 金堆城斑岩体 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 为 79.94~93.71, 八里坡斑岩体的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 为 68.27~97.06, 金堆城钼矿区的斑岩体主要为源区部分熔融形成, 而且形成温度较高。SiO<sub>2</sub> 与主要氧化物之间具有良好的线性关系, 表明了同源岩浆的演化特征, 在 Harker 图解中 (图 4), 金堆城斑岩体的氧化物 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 呈负相关, 表现出长石、单斜辉石、磷灰石及钛铁矿等矿物的分离结晶作用<sup>[33]</sup>, Na<sub>2</sub>O、CaO、MgO 与 SiO<sub>2</sub> 呈正相关, 八里坡斑岩体中氧化物 Na<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 呈负相关, MnO、CaO、MgO 与 SiO<sub>2</sub> 呈正相关。八里坡

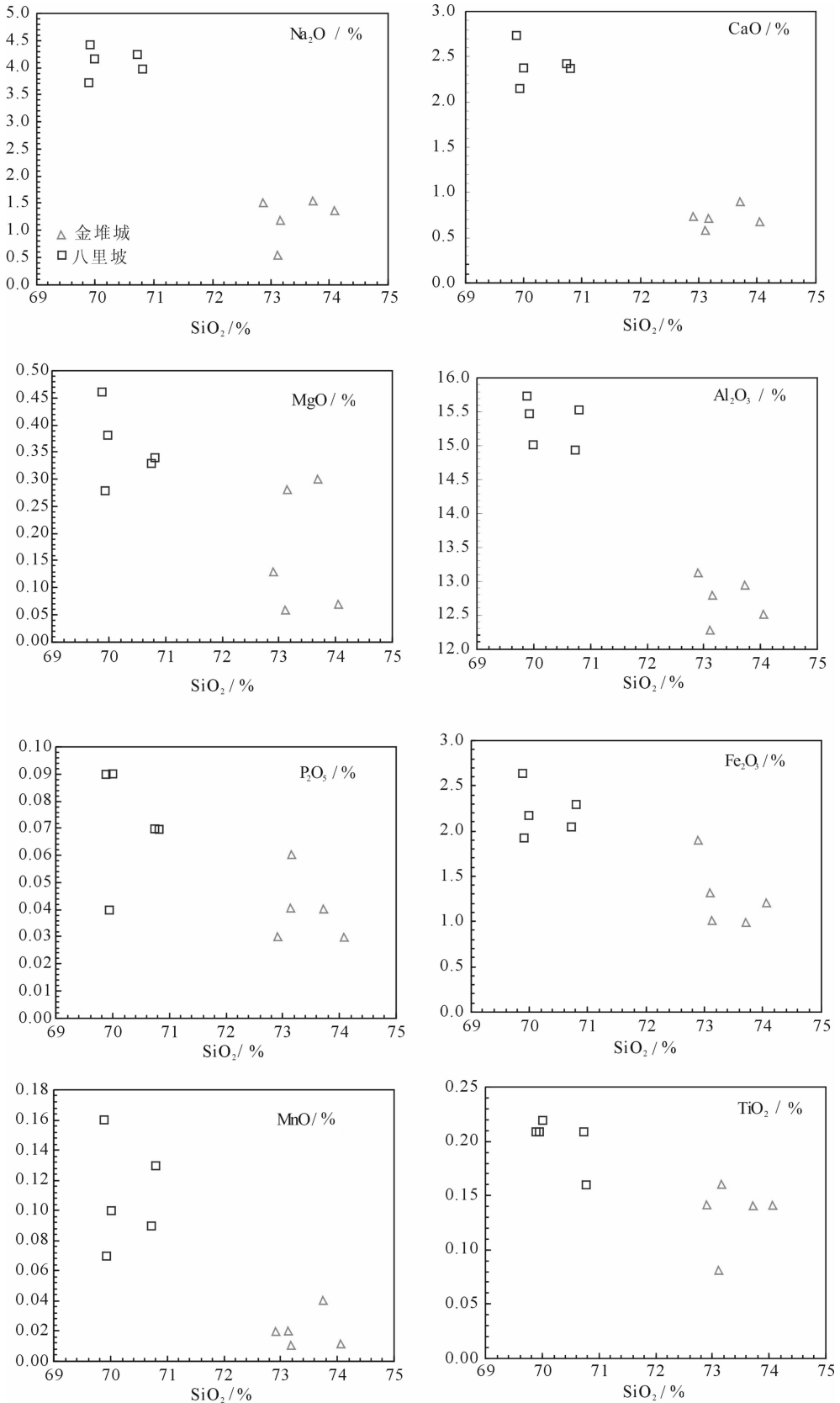


图 4 金堆城斑岩体和八里坡斑岩体 Harker 图

Fig.4 Harker discrimination plot for granite porphyry from Jinduicheng and Balipo area



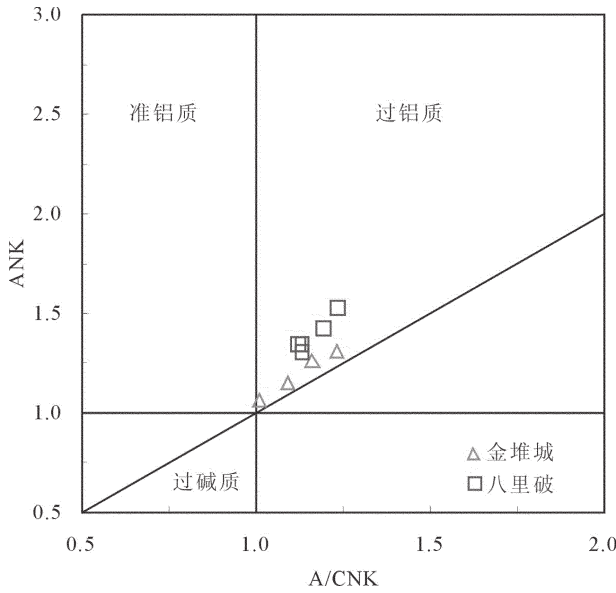


图5 A/NK-A/CNK 图解(底图据文献[18])  
Fig.5 Discriminant diagram of A/NK-A/CNK

斑岩体的 La/ Yb 为 21.05~34.12, 暗示部分熔融时在残留矿物相中有石榴石存在, Sr 含量也较高 (为  $679.8 \times 10^{-6} \sim 741.8 \times 10^{-6}$ ), 表明斜长石已经进入熔体, 八里坡斑岩体高场强元素 (Nb、Ta、Zr、Hf) 的强烈亏损和 Rb、Ba、LREE 等不相容元素的富集以及富 Si 等特征表明其源岩可能主要来源于地壳。前文已经述及金堆城斑岩体和八里坡斑岩体均具有富集 LILE 和 LREE, 但相对亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素的特征, 前者表明物质来源于地幔的低程度熔融, 后者揭示出壳源物质的混染导致高场强元素的相对亏损<sup>[34]</sup>。在 La/ Sm-La 及 La/ Yb-La 图中(图 9), 金堆城矿区斑岩体显示了部分熔融成因。

钕同位素是一种十分理想的地球化学示踪剂,

尤其是铈钕联合示踪更有意义。八里坡斑岩体以负低  $\epsilon_{Nd}(t)$  值 (-20.9~-18.3) 和正高  $\epsilon_{Sr}(t)$  值 (63.1~74.4) 为特征, 铈的初始值均大于 0.706 (表 3), 属中等铈花岗质岩石。金堆城斑岩体负低  $\epsilon_{Nd}(t)$  值 (-13.3~-11.5),  $\epsilon_{Sr}(t)$  变化较大 (-51~26.1), 铈的初始值大都小于 0.706 (表 3), 属低铈花岗质岩石。肖庆辉等<sup>[31-35]</sup>认为 I 型花岗岩的形成有幔源物质的贡献, 金堆城矿区斑岩体  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始值均小于 7.1, 显示了壳幔过渡源区特点, 岩石初始值为 0.706~0.719 的花岗岩, 其岩浆来源主要是壳源物质, 但受到幔源物质的混染<sup>[36]</sup>。金堆城斑岩体和八里坡斑岩体的  $\epsilon_{Nd}(t)$  为明显的负值, 反映其来源于与地壳物质的部分熔融有关, 而八里坡斑岩体的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值变化较明显, 可能反映它是由不均一源区熔融形成的, 或反映在其形成过程中曾发生过壳幔物质的混合作用<sup>[37]</sup>。在不同区域铅演化模式图上(图 7), 金堆城斑岩体位于下地壳和地幔趋势线之间, 而八里坡斑岩体位于下地壳和地幔趋势线之间, 靠近下地壳趋势线, 反映本区花岗斑岩为深部地壳熔融产物。上述两个岩体的 Sr、Nd 同位素组成特征比较相似, 都具有较低的  $I_{Sr}$  (表 4), 与华北克拉通南缘中生代花岗岩的 Sr 同位素 ( $I_{Sr}$  初始值为 0.704~0.709<sup>[38]</sup>) 组成一致。两个岩体的 Nd 同位素组成也相似,  $\epsilon_{Nd}(t)$  值以明显的负值为特征, 岩体的样品点在  $\epsilon_{Nd}(t) - \epsilon_{Sr}(t)$  图解上不存在明显的相关性(图略), 但都与华北克拉通岩浆岩范围一致。

### 4.3 成矿潜力分析

含钼矿斑岩体的 SiO<sub>2</sub> 含量高, 同时也富碱、高钾, SiO<sub>2</sub> 含量变化范围为 72%~77%, Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 总量大于 7%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值大于 1.3, 里特曼指数范

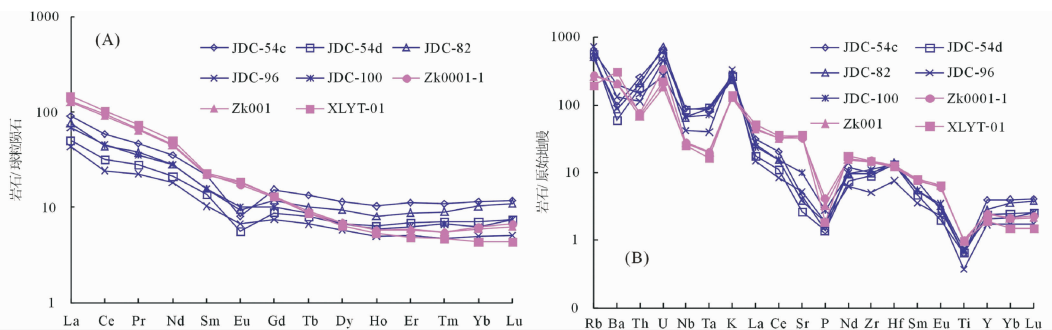


图 6 稀土元素配分模式图(A)和微量元素蛛网图(B)  
(蓝色曲线为金堆城斑岩体, 红色曲线为八里坡斑岩体, 标准化值据文献[15-19])  
Fig.6 REE distribution pattern (A) and spider diagram of trace elements (B)

表 2 金堆城斑岩体和八里坡斑岩体普通 Pb 同位素分析数据  
Table 2 Pb isotopic data of granite porphyry from Jinduicheng and Balipo area

样号	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 $\sigma$
JDC-7	37.976	0.003	15.463	0.001	17.812	0.002
JDC-34	38.039	0.005	15.462	0.002	17.690	0.002
JDC-36	38.139	0.005	15.498	0.002	18.026	0.003
JDC-54a	38.104	0.005	15.483	0.002	18.079	0.002
JDC-54b	38.031	0.003	15.469	0.001	17.946	0.002
JDC-55	38.109	0.003	15.468	0.001	17.788	0.001
JDC-80	37.963	0.003	15.458	0.001	17.630	0.002
JDC-82	37.856	0.004	15.445	0.002	17.568	0.002
JDC-100	37.990	0.003	15.469	0.001	17.800	0.002
JDC-101	38.006	0.006	15.471	0.002	17.908	0.003
ZK001	37.576	0.003	15.388	0.001	16.987	0.002
ZK002	37.464	0.004	15.371	0.002	16.797	0.002
ZK003	39.217	0.004	15.916	0.002	22.230	0.002
ZK001-1	37.586	0.003	15.393	0.001	17.052	0.001

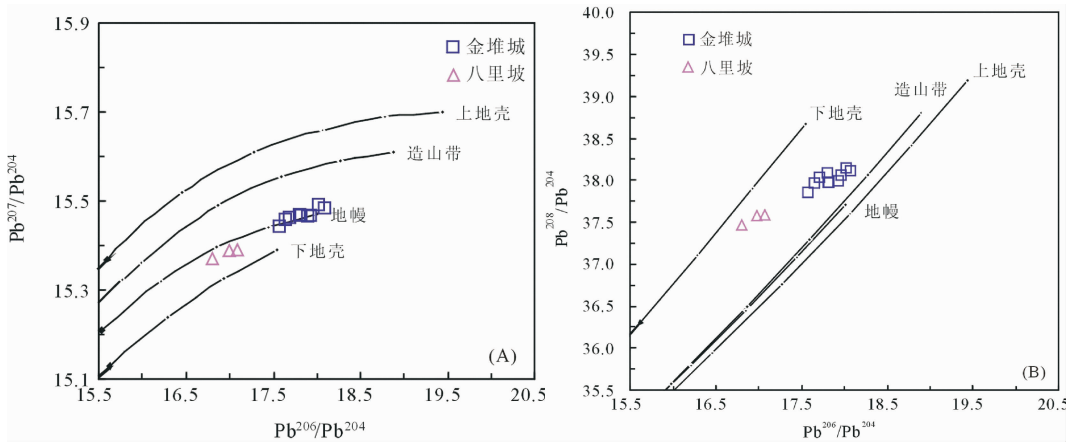


图 7 金堆城斑岩体和八里坡斑岩体的铅模式图解(曲线边界据文献[20-24])  
Fig.7 Lead-isotopic evolution of granite porphyry from Jinduicheng and Balipo area

围为 1.8~3.3,岩体属于钙碱性系列岩类。含铜矿岩体多以 SiO<sub>2</sub> 含量偏低、富碱富钠为特征,SiO<sub>2</sub> 为 62%~71%,Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 总量大于 6%,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值小于 1.3,里特曼指数范围为 1.8~3.3,岩体属于钙碱性系列岩类<sup>[39]</sup>。金堆城岩体的岩石化学成分和南泥湖、上房沟、东沟等特大型、大型斑岩钼矿的岩石化学成分相比,它们均为 I 型花岗岩,且 SiO<sub>2</sub> 含量大于 72%,K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 均大于 8.5%,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值均大于 2 以上,有的更高。在微量元素和稀土元素含量上,均富集 Rb、K、U、Th 等大离子亲石元素及 Zr、

Hf、Nb、Ta 等高场强元素,而明显亏损 Sr、Ba 和 P 等元素;均有强烈的 Eu 负异常,且稀土配分曲线呈现出“燕翼型”中间下凹两侧扬起的特征。岩体的 Sr 同位素测试值为 0.7740~0.8229,初始 Nd 同位素组成为 0.51166~0.51182,ε<sub>Nd(t)</sub> 值为 -17.3~14.3<sup>[40-42]</sup>。

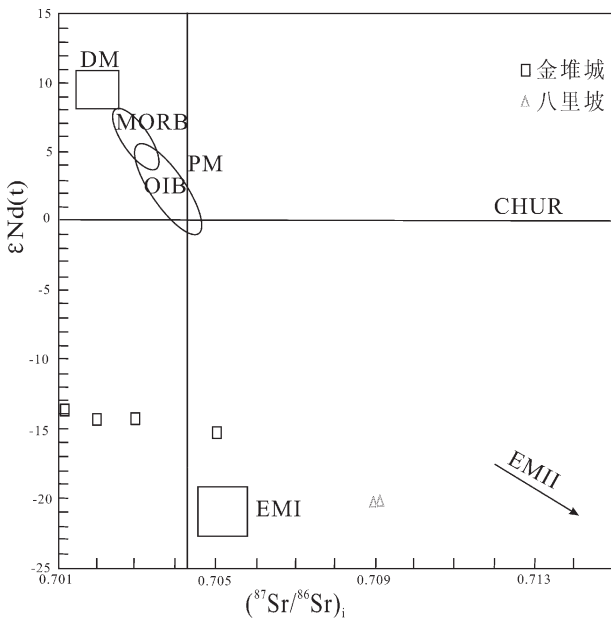
八里坡岩体的岩石化学成分和南泥湖、上房沟、金堆城等特大型斑岩钼矿的化学成分相比,虽然都属 I 型花岗岩,但二者却表现出明显的差异,主要表现在控制矿化的酸度值 SiO<sub>2</sub>、碱度值(ALK)和 K/Na 比等方面,八里坡斑岩体的 SiO<sub>2</sub> 含量小于 72%,

表3 金堆城斑岩体和八里坡斑岩体 Sr-Nd 同位素分析数据

**Table 3 Sm-Nd isotopic data of granite porphyry from Jinduicheng and Balipo area**

样号	ZK001	ZK001-1	JDC-7	JDC-36	JDC-82h	JDC-100
t(Ma)	155	155	143	143	143	143
Rb	724.8	679.8	92	129	79.3	212
Sr	3.316	3.386	2.41	2.84	2.39	2.39
Sm	21.02	21.52	12.9	14.4	13.2	13.1
Nd	167.52	174.98	353	309	333	385
( <sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr) <sub>m</sub>	0.6682	0.7442	11.093	6.9252	12.14	5.2504
( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>m</sub>	0.7102	0.7104	0.7259	0.7183	0.7278	0.7168
2σ	0.000009	0.000009	0.000009	0.000008	0.000009	0.000011
eSr(t)	64.5	65.2	-40.4	-17.8	-46.4	13.6
( <sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd) <sub>m</sub>	0.0954	0.0951	0.1130	0.1192	0.1095	0.1103
( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>m</sub>	0.5115	0.5115	0.5118	0.5118	0.5118	0.5117
2σ	0.000015	0.000007	0.000013	0.000004	0.000015	0.000011
eNd(t)	-20.4	-20.4	-14.3	-14.2	-13.8	-15.2
( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>i</sub>	0.7088	0.7089	0.7015	0.7031	0.7011	0.7053

注: ZK001, ZK001-1 为八里坡斑岩体, JDC-7, DC-36, JDC-82h 和 JDC-100 为金堆城斑岩体, Rb, Sr, Sm, Nd 的单位均为 10<sup>-6</sup>, 上表中 ε<sub>Nd</sub>(t) 及 T<sub>DM</sub> 计算过程中选择衰变常数 λ<sub>sm</sub> = 6.54×10<sup>-12</sup>a<sup>-1</sup>, λ<sub>Rb</sub> = 1.42×10<sup>-11</sup>a<sup>-1</sup>, 采用标准值 (<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub> = 0.1967, (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>CHUR</sub> = 0.7045, (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub> = 0.512638, T<sub>DM</sub>Nd 计算采用 (<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub> = 0.21357, (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>DM</sub> = 0.51315, CHUR: 原始球粒隕石均一库。



DM: 亏损地幔; MORB: 洋中脊玄武岩; PM: 原始地幔; EMI: I 型富集地幔; EMII: II 型富集地幔; OIB: 洋岛玄武岩

图8 金堆城矿区斑岩体的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>-ε<sub>Nd</sub>(t)图解

Fig.8 Diagram of (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>-ε<sub>Nd</sub>(t) from Jinduicheng area

K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O 均小于 8.6%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值均小于 2, 从而表明二者不论来源和成矿作用可能都不尽相同。而八里坡岩体与秋树湾岩体岩石地球化学相似, 如秋树湾花岗闪长斑岩 SiO<sub>2</sub> 为 68%~71.05%, TiO<sub>2</sub> 为 0.25%~0.30%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 13.97%~14.48%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 1.36%~1.71%, FeO 为 0.91%~2.11%, CaO 为 1.64%~2.17%, MgO 为 0.67%~0.74%, MnO 为 0.03%~0.06%, K<sub>2</sub>O 为 4.56%~4.78%, Na<sub>2</sub>O 为 3.16%~3.44%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 0.10%~0.22%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 为 1.42, 岩石的酸度偏低, 钾大于钠, 与 I 型花岗岩的主要岩石化学参数一致, 岩石系列属钙碱性岩浆系列<sup>[41]</sup>。八里坡斑岩体和国内外典型的斑岩铜矿或斑岩钼矿的稀土元素配分模式相比, 与德兴斑岩铜矿的模式非常近似, 变异曲线右倾, Eu 基本没有亏损。但与一些典型的斑岩钼矿的花岗岩的模式却有差别, 后者都具有较明显的 Eu 亏损, 如南泥湖、上房沟、金堆城斑岩钼矿, 虽然曲线向右倾斜, 但都有轻度或中度的 Eu 亏损 (δEu 为 0.67~0.82)<sup>[40-42]</sup>。

从表 1 可知, 八里坡岩体的相关数据特征总体

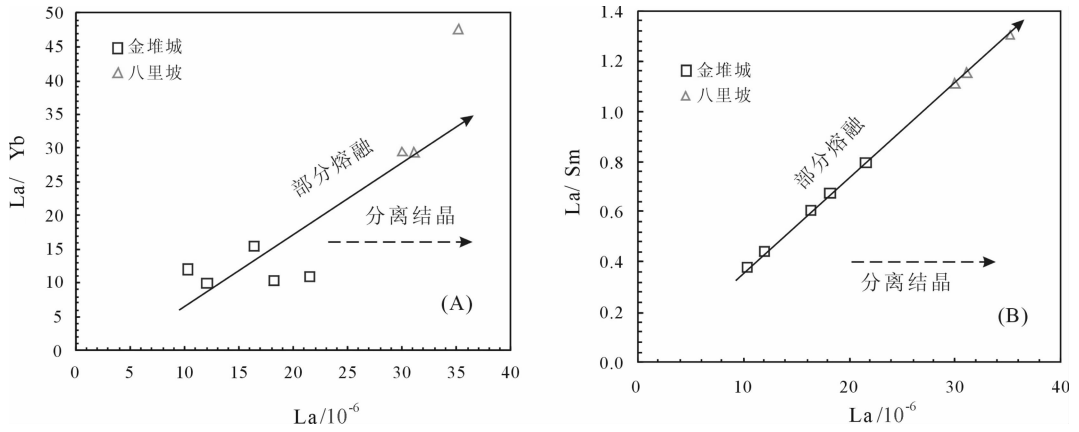


图 9 金堆城矿区花岗斑岩 La/ Sm-La (A)及 La/ Yb-La (B)图解

Fig.9 La/Sm versus La(A) and La/Yb versus La (B) diagrams of granite porphyry in Jinduicheng area

上与以铜为主的成矿岩体表现一致或介于铜钼成矿特征之间,岩体含 Cu 为  $11.91 \times 10^{-6} \sim 21.85 \times 10^{-6}$ ,八里坡岩体与石家湾岩体、金堆城岩体均明显受到北东向区域大断裂的控制。从金堆城矿区的实际地质背景看,它具有十分有利的成矿地质条件,首先从岩石的成矿专属性来讲,研究区内侵入岩以花岗斑岩为主,此类岩体通常以铜、钼矿为主<sup>[43]</sup>,其次研究区断裂、破碎带及裂隙十分发育将有利于成矿物质的供给与运移。

### 5 结论

(1)金堆城斑岩体和八里坡斑岩体的地球化学特征具有明显不同,说明它们的源区也存在明显的差异。金堆城花岗斑岩具有硅过饱和 ( $\text{SiO}_2$  为 72.89%~74.06%)、富碱 (8.46%~10.41%)、过铝质 (A/CNK 为 1.01~1.23) 特征,稀土元素总量变化大 ( $43.29 \times 10^{-6} \sim 93.94 \times 10^{-6}$ ),稀土元素标准化曲线呈右倾,中等 Eu 的负异常 ( $\delta \text{Eu}$  为 0.43~0.78),Ce 具有微弱的负异常 ( $\delta \text{Ce}$  为 0.74~0.86),微量元素以富集大离子亲石元素 K、Rb、U 和 Th 等元素,而亏损 P、Ti、Ba、Zr 等元素为特征。八里坡花岗斑岩具有高硅 ( $\text{SiO}_2$  为 69.87%~70.80%)、富碱 (7.57%~8.56%)、过铝质 (A/CNK 为 1.12~1.23) 特点,稀土元素总量变化不大 ( $125.23 \times 10^{-6} \sim 139.63 \times 10^{-6}$ ),稀土元素标准化曲线呈右倾,Eu 几乎没有异常 ( $\delta \text{Eu}$  为 0.98~1.04),Ce 为微弱的负异常 ( $\delta \text{Ce}$  为 0.92~0.96),微量元素以富集大离子亲石元素 Ba、K、Nd、U 和 Sm 等元素,而亏损 P、Ti、Ta 等为特征。

(2)金堆城斑岩体的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值变化于 17.568~

18.079, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值变化于 15.445~15.498, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值变化于 37.856~38.139,斑岩体中 Pb 主要来自下地壳,但有地幔物质的混入。八里坡斑岩体的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值变化于 16.797~22.23, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值变化于 15.371~15.916, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值变化于 37.464~39.217,斑岩体中 Pb 主要来源于下地壳。

(3)金堆城花岗斑岩的  $I_{\text{Sr}}$  为 0.7011~0.7053,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 -13.8~-15.2,表明岩浆源区主要为壳幔混合,八里坡花岗斑岩的  $I_{\text{Sr}}$  为 0.7088~0.7089,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 -20.4,说明岩浆源区主要为下地壳。金堆城花岗斑岩和八里坡花岗斑岩的 Sr、Nd、Pb 同位素与华北地块相似,说明这两个岩体的源区应该为华北地块组成部分。

### 参考文献 (References):

- [1] 陕西省地质矿产局. 陕西省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1989:1-698.  
Geology and Mineral Resources Bureau of Shaanxi Province. Regional Geology of Shaanxi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989:1-698(in Chinese).
- [2] 薛祖雷, 吴向东, 王养苍, 等. 陕西金堆城地区含钼花岗岩类成因及成矿的讨论[J]. 陕西地质, 1984, 2(2):37-46.  
Xue Zulei, Wu Xiangdong, Wang Yangcang, et al. A review on the genesis and metallogeny of the molybdenite-bearing granitoid at Jinduicheng, Shaanxi [J]. Geology of Shaanxi, 1984, 2(2):37-46(in Chinese with English abstract).
- [3] 樊金涛. 金堆城—南泥湖地区燕山期花岗岩类成因类型探讨[J]. 陕西地质, 1986, 4(1):39-53.  
Fan Jintao. Genetic types and mineralization characteristics of Yanshanian granitoids of minor Qiling, Shaanxi [J]. Geology of Shaanxi, 1986, 4(1):39-53(in Chinese with English abstract).
- [4] 杜本臣, 朱炳义. 陕西金堆城钼矿田构造特征及与成矿关系的探讨[J]. 陕西地质, 1984, 2(1):15-24.



- Du Bencheng, Zhu Bingyi. The study on the structural features and the relationship between the structure and mineralization of Jinduicheng molybdenum ore field in Shaanxi Province[J]. *Geology of Shaanxi*, 1984, 2(1):15-24(in Chinese with English abstract).
- [5] 尚瑞均, 严阵. 秦巴花岗岩[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988. Shang Ruijun, Yan Zhen. Qinba Granite [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1988(in Chinese).
- [6] 聂凤军. 陕西金堆城花岗岩类主要造岩矿物特征及其岩石学意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 1988, 7(4):336-346. Nie Fengjun. Main rock-forming minerals of Jinduicheng granitoids in Shaanxi Province: their characteristics and petrological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1988, 7 (4):336-346 (in Chinese with English abstract).
- [7] 聂凤军, 樊建廷. 陕西金堆城—黄龙铺地区含钼花岗岩类稀土元素地球化学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 1989, 8(1):24-33. Nie Fengjun, Fan Jianting. A study on REE geochemistry of the molybdenum-bearing granitoids in the Jinduicheng-Huanglongpu area, Shaanxi [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1989, 8(1):24-33 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李先祥. 秦岭—大别山花岗岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1993:1-218. Li Xianzi. Qinling -Dabie Mountains Granite [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993:1-218(in Chinese).
- [9] 朱赖民, 张国伟, 郭波, 等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. *地质学报*, 2008, 82(2):204-220. Zhu Laimin, Zhang Guowei, Guo Bo, et al. U-Pb (LA-ICP-MS) zircon dating for the large Jinduicheng porphyry Mo deposit in the East China, and its metallogenic setting [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(2):204-220(in Chinese with English abstract).
- [10] 焦建刚, 袁海潮, 何克, 等. 陕西华县八里坡钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 2009, 83(8):1159-1166. Jiao Jiangang, Yuan Haichao, He Kai, et al. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the Balipo porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(8):1159-1166(in Chinese with English abstract).
- [11] 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 等. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗岩斑岩的年代学及岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制约[J]. *矿床地质*, 2010, 29(1):143-157. Zhao Haijie, Mao Jingwen, Ye Huishou, et al. Chronology and petrogenesis of Shijiawan granite porphyry in Shannxi Province: Constrains from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. *Mineral deposits*, 2010, 29(1):143-157(in Chinese with English abstract).
- [12] 黄典豪, 吴澄宇, 聂凤军. 陕西金堆城斑岩钼矿床地质特征及成因讨论[J]. *矿床地质*, 1987, 6(3):22-34. Huang Dianhao, Wu Chengyu, Nie Fengjun. Geological features and genesis of Jinduicheng porphyry molybdenum deposit, Shaanxi Province [J]. *Mineral Deposits*, 1987, 6(3):22-34(in Chinese with English abstract).
- [13] Mao J W, Xie G Q, Pirajino F, et al. Late Jurassic -Early Cretaceous granitoid magmatism in Eastern Qinling, central-eastern China: SHIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2010, 57: 51-78.
- [14] 张正伟, 朱炳泉, 常向阳, 等. 东秦岭钼矿带成岩成矿背景及时空统一性[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(3):307-315. Zhang Zhengwei, Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, et al. Petrogenetic -metallogenetic background and time -space relationship of the East Qinling molybdenum ore belt, China [J]. *Geological Journal of China Universities*. 2001, 7 (3):307-315(in Chinese with English abstract).
- [15] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 1989, 22:247-263.
- [16] Morrison G W. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 1980, 13:97-108.
- [17] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements [J]. *Lithos*, 1989, 22:247-263.
- [18] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1989, 101:635-643.
- [19] 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 the Ocean Basins*. *Geo. Soc. Spec. Pub.*, 1989, 42:313-345.
- [20] Zartman R Z, Doe B R. Plumbotectonics -the model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75:135-162.
- [21] Tosdal R M, Cline J S, Mark F C, et al. Lead in the Gechell-Turquoise Ridge Carlin-Type gold deposits from the perspective of potential igneous and sedimentary rock sources in northern Nevada: Implications for fluid and metal sources [J]. *Economic Geology*, 1981, 98:1189-1211.
- [22] 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等. 燕辽阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr,Nd,Pb 同位素特征及意义 [J]. *中国科学 (D)*, 2000, 30(4): 383-387. Yan Guohan, Mu Baolei, Xu Baoliang, et al. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area: Their chronology, Sr, Nd and Pb isotopic characteristics and implication [J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(4):383-387(in Chinese).
- [23] Hart S R. Heterogeneous mantle domains signatures, genesis and mixing chronologies [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 90: 273-296.
- [24] Zindler Alan, Hart Start. Chemical geodynamics [J]. *Annual Review of Earth Planet Science*, 1986, 14:493-671.
- [25] Wolf M B, London D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: an experimental study of solubilities and mechanism [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58:4127-4145.
- [26] Watson E B. Apatite saturation in basic to intermediate magmas [J].

- Geophys. Res. Lett., 1979, 6(12):937-940.
- [27] Chappell B W. Aluminum saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites [J]. Lithos, 1999, 46:535-551.
- [28] Wu Fuyuan, Jahn B M, Wilder S A, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): geochronology and petrogenesis [J]. Lithos, 2003, 66:241-273.
- [29] Li X H, Li Z X, Li W X, et al. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China; evidence for a Permian magmatic arc in the Hainan Island [J]. J. Geol., 2003, 114:341-353.
- [30] 李献华, 李武显, 李正祥. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报, 2007, 52(9):981-992.  
Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang. The genetic type and tectonic significance of early yanshan period granite in Nanling [J]. Science Bulletin, 2007, 52(9):981-992(in Chinese).
- [31] 潘爱芳, 赫英, 黎荣剑. 鄂尔多斯盆地能源矿产氯仿沥青 Sm-Nd 同位素研究[J]. 中国地质, 2007, 34(3):440-444.  
Pan Aifang, He Ying, Li Rongjian. Sm-Nd isotope study of chloroform bitumen in various energy minerals of the Ordos basin [J]. Geology in China, 2007, 34 (3):440-444 (in Chinese with English abstract).
- [32] Sylvesler P J. Post-collisional peraluminous granites [J]. Litho, 1998, 45:29-44.
- [33] 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义; 岩石学和同位素地质年代学[J]. 地球化学, 2000, 29 (6):514-520.  
Li Xianhua, Zhou Hanwen, Liu Yin, et al. Mesozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance: Petrology and isotope geochronology [J]. Geochimica, 2000, 29 (6):514-520 (in Chinese with English abstract).
- [34] 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 等. 阿拉善断块富碱侵入岩岩石地球化学和 Nd、Sr、Pb 同位素特征及其意义 [J]. 地学前缘, 2005, 12 (2):292-301.  
Ren Kangxu, Yan Guohan, Mu Baolei, et al. Geochemistry and Nd, Sr, Pb isotopic characteristics of the alkali-rich intrusive rocks in Alxa Fault Block, Western Inner Mongolia and their implications [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12 (2):292-301(in Chinese with English abstract).
- [35] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002:1-294.  
Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, et al. Thinking and Method of Granite Research [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002:1-294(in Chinese).
- [36] 高秉璋, 洪大卫, 郑基俭, 等. 花岗岩类区 1:5 万区域地质填图方法指南[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.  
Gao Bingzhang, Hong Dawei, Zheng Jijian, et al. The Guide of Granite Area 1:5 Million Regional Geological Mapping Methods [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991 (in Chinese).
- [37] 沈渭洲, 凌洪飞, 王德滋, 等. 浙江省中生代火成岩的 Nd-Sr 同位素研究[J]. 地质科学, 1999, 34(2):223-232.  
Shen Weizhou, Ling Hongfu, Wang Dezi, et al. Study on Nd-Sr isotopes of Mesozoic igneous rocks in Zhejiang, China [J]. Chinese Journal of Geology, 1999, 34(2):223-232(in Chinese with English abstract).
- [38] 周作侠. 华北地台南缘金(钼)矿床成因[M]. 北京: 地震出版社, 1993:1-269.  
Zhou Zuoxia. The Genesis of Gold (molybdenum) Deposits in the Southern Margin of North China Platform [M]. Beijing: Seismological Press, 1993:1-269(in Chinese).
- [39] 罗铭玖, 张辅民, 董群英, 等. 中国钼矿床[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1991.  
Luo Mingjiu, Zhang Fumin, Dong Qunying, et al. The Molybdenum Deposits in China [M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Press, 1991(in Chinese).
- [40] 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 等. 豫西南泥湖矿田钼钨及铅锌银矿床地质特征[J]. 现代地质, 2006, 20(3):219-226.  
Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng, et al. Characteristics and metallogenic mechanism of Mo-W and Pb-Zn-Ag deposits in Nannihu ore field, Western Henan Province [J]. Geoscience, 2006, 20(3):219-226(in Chinese with English abstract).
- [41] 罗铭玖, 黎世美, 卢欣祥, 等. 河南省主要矿床的成矿系列与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2000:81-136.  
Luo Mingjiu, Li Shimei, Lu Xinxiang, et al. Metallogensis and Deposit Series of Main Mineral Resources of Henan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000:81-136(in Chinese).
- [42] 徐兆文, 陆现彩, 杨荣勇, 等. 河南省栾川县上房斑岩钼矿床地质地球化学特征及成因[J]. 地质与勘探, 2000, 36(1):14-16.  
Xu Zhaowen, Lu Xiancai, Yang Rongyong, et al. Geochemistry and metallogensis of the Shangfang porphyry molybdenum deposit in Luanchuan, Henan [J]. Geology and Prospecting, 2000, 36(1):14-16(in Chinese with English abstract).
- [43] 卢欣祥, 于在平, 冯有利, 等. 东秦岭深源浅成型花岗岩的成矿作用及地质构造背景[J]. 矿床地质, 2002, 21(2):168-178.  
Lu Xinxiang, Yu Zaiping, Feng Youli, et al. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal granites in East Qinling Mountain [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(2):168-178 (in Chinese with English abstract).

## Sr, Nd, Pb isotopic characteristics of granite in Jinduicheng area and their geological significance

LI Hong-Ying<sup>1</sup>, MAO Jing-wen<sup>1</sup>, WANG Xiao-xia<sup>1</sup>, YE Hui-shou<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Research Institute, CNOOC, Beijing 100027, China)

**Abstract:** A study of petrology and element geochemistry shows that Jinduicheng granite porphyry and Balipo granite porphyry are I - type granites in the Jinduicheng ore concentration area. SiO<sub>2</sub> values of Jinduicheng porphyry bodies vary in the range of 72.89%~74.06% (73.48% on average), MgO values are 0.073%~0.30%,  $\Sigma$  REE values are 43.29%~93.94%, REE distribution patterns are of "V" type, there exists an evident negative Eu anomaly and a weak negative Ce anomaly,  $\delta$ Eu values are 0.43~0.78, and  $\delta$  Ce are 0.74~0.86. They are enriched with K, Rb, U, Th and Sr, and strongly depleted in Ba, P and Ti. SiO<sub>2</sub> of Balipo granites range from 69.87 to 70.80%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> values are 14.93%~15.46%, MgO are 0.28%~0.48%, the total rare earth element concentrations ( $\Sigma$  REE) of the rocks are 125.23~139.63 $\times 10^{-6}$ , the ratios of Sr/Y are generally higher than 60, Eu has no anomaly or weak positive anomaly, Ce shows weak negative anomaly, and there exists the enrichment of HFSE (such as Ba, U and K) and the depletion of P, Ta and Sr. Plotting of lead isotopes of granite porphyry on the <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb diagrams and <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb versus <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb evolution curves show that lead of Balipo granite porphyry might have come from crust source area, and lead of Jinduicheng granite porphyry was probably derived from the crust-mantle mixing source area. Jinduicheng has low Nd ( $\epsilon$  (Nd,t)= -20.8~-18.3) and high Sr ( $\epsilon$  (Sr,t)= 63.0~74.3), Balipo rocks have extremely low  $\epsilon$  (Nd, t) of -20.8~-18.3 and relatively high  $\epsilon$  (Sr,t) of 63.0~74.3. Sr, Nd and Pb plots show that the Jinduicheng rocks originated from the lower crust, but were contaminated by mantle-derived materials, and the source rock of Balipo is the lower crust, which has considerable ore-forming potential. the values of Sr, Nd and Pb isotopes are similar to the data of the North China plate, suggesting that these intrusives constitute a component part of the North China plate.

**Key words:** Sr, Nd and Pb isotopes; granite porphyry; litho-geochemistry; Jinduicheng

---

**About the first author:** LI Hong-ying, female, born in 1979, doctor, now mainly engages in the study of deposit geochemistry; E-mail: lihongyingy@163.com.