

东秦岭金堆城钼矿床辉绿岩地球化学特征 及其地质意义*

李洪英¹, 杨磊², 柯昌辉¹, 王修缘³, 刘素彤⁴

(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; 3 金堆城钼业集团有限公司, 陕西 华县 714102; 4 西安石油大学

地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065)

摘要 对金堆城钼矿区辉绿岩脉的岩石学和地球化学的详细研究表明, 该区辉绿岩均遭受到不同程度的蚀变, 为拉斑系列岩石, 其主量元素以中等 $w(\text{TiO}_2)$ (1.47% ~ 2.16%)、中等 $w(\text{MgO})$ (3.47% ~ 6.58%)、 $\text{Mg}^\#$ 为 26.99 ~ 40.46、 $w(\text{K}_2\text{O})$ 变化较大 (0.05% ~ 3.16%) 为特征, 可能与蚀变有关, 贫 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ (0.36% ~ 0.58%)、 MgO 与主要组分的相关性表明, 岩浆早期出现过轻微的橄榄石、斜方辉石及铬铁矿、钛铁矿结晶分异, 稀土元素总量相对较高, 轻重稀土元素分馏显著 ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 7.5 \sim 12.4$)、 δEu 为 0.7 ~ 1.0, 出现 Eu 的弱负异常。金堆城钼矿区的辉绿岩脉属于大陆板内拉斑玄武岩, 形成过程中受到地壳物质的混染。

关键词 地球化学, 岩石成因, 辉绿岩, 金堆城钼矿, 东秦岭

中图分类号: P618.65

文献标志码: A

Geochemistry of diabase dyke in Jinduicheng Mo deposit, Eastern Qinling and its geological significance

LI HongYing¹, YANG Lei², KE ChangHui¹, WANG XiuYuan³ and LIU SuTong⁴

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Research Institute, CNOOC, Beijing 100027, China; 3 Jinduicheng Molybdenum Group Co., Ltd., Huaxian 714102, Shaanxi, China; 4 Earth Science and Engineering Couege of Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract

A study of petrology and element geochemistry shows that Jinduicheng diabase dyke has suffered from different degrees of alteration, and belongs to the tholelite series. SiO_2 values of the Jinduicheng diabase dyke vary in the range of 48.13% ~ 57.74%; in addition, it has high MgO (3.47% ~ 6.58%), its $\text{Mg}^\#$ values are 26.99 ~ 40.46, its TiO_2 values vary in the range of 1.47% ~ 2.16%, its K_2O values vary considerably (0.05% ~ 3.16%), and it has poor P_2O_5 (0.36% ~ 0.58%). Four of the samples show $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, and the other samples show $\text{Na}_2\text{O} < \text{K}_2\text{O}$. The correlation between MgO and the main components indicates that olivine, orthopyroxene, chromite, and ilmenite experienced slight crystallization differentiation at the early magma stage. ΣREE values are $169.4 \times 10^{-6} \sim 450.78 \times 10^{-6}$, REE distribution patterns are of "V" type, there exists a weak

* 本文得到中央级公益性科研院所基本科研业务专项资金“岩浆热液演化的包裹体证据-东秦岭金堆城斑岩钼矿床熔融包裹体和熔融-流体包裹体研究(编号:YK1503)”、山西中条山铜矿峪铜矿床地质特征及成因研究(编号:K1408)、中国地质调查项目“中国铜多金属成矿规律、矿床模型和找矿方项研究(编号:12120113093600)”和中国地质调查项目“重要矿种关键问题调查与矿产地质专题填图试点(编号:DD20160124)”的联合资助

第一作者简介 李洪英,女,1976年生,博士,高级工程师,主要从事岩石学、矿物学、矿床学研究。Email:lihongyingy@163.com

收稿日期 2015-09-17; 改回日期 2016-03-24。张绮玲编辑。

negative Eu anomaly, and δEu values are 0.7~1.0. Light and heavy rare earth element fractionation is remarkable ($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=7.5\sim 12.4$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 2.7\sim 4.22$). They are enriched in K, Rb, U, Th and Sr, and strongly depleted in Ba, P and Ti. The characteristics of the high field-strength elements (HFSE) suggests that the diabase dyke belongs to the continental intraplate tholeiite, but was contaminated by crustal material in the formation process.

Key words: geochemistry, petrogenesis, diabase dyke, Jinduicheng Mo deposit, East Qinling

众所周知,基性岩脉的主要岩石类型有辉绿岩、辉长辉绿岩、辉长辉绿玢岩和辉长玢岩以及煌斑岩脉等,基性岩脉对于研究岩浆混合作用、液相不混熔作用等有关成岩作用机制具有重要意义,而且基性岩脉也是衡量重要构造转换时间的标尺,具有特殊的大陆动力学意义(陆建军等,2006)。对它们进行系统研究,既有助于建立某一地区地壳拉张的时空格局,同时也有助于了解有关地区地幔与地壳的物质组成及其演化特征(Halls, 1982; Halls et al., 1987),因此基性岩脉一直是国内外研究热点(Hoek et al., 1995; 李献华等,1997; 谢桂青等,2002; 葛小月等,2003; 贾大成等,2003; 张贵山等,2004; 陆建军等,2006; 齐有强等,2008; 曹建劲等,2009)。尤其是在钾镁煌斑岩中金刚石的发现,以及认识到基性岩脉与热液矿床之间存在成因联系(Mc Neil et al., 1986; Rock et al., 1988; 毛景文等,1997; 程小久等,1998; 黄智龙等,1999; 翟明国等,2001; 谢桂青等,2001)以来,对基性岩脉与成矿关系的研究也越来越引起人们的兴趣。

基性岩脉是在大陆伸展背景下,主要来自地幔岩石圈或软流圈的岩浆侵入体,是地壳(或岩石圈)伸展的重要标志,是地幔岩石圈部分熔融作用以及幔源岩浆作用的产物,所以许多与地幔流体有关的矿床都和基性岩脉之前存在着一定的联系。研究表明,地幔流体为澳大利亚 Yilgarn 地块太古宙金矿、中国内蒙古白云鄂博 REE-Fe-Nb 超大型矿床提供了成矿物质,又是其成矿流体的重要来源;在胶东金矿、小秦岭金矿、华南铀矿带等成矿作用中,地幔流体起着重要作用(王团华等,2008; 倪师军,1994; 倪师军等,1994; 孙丰月等,1995; 胡瑞忠等,1990; 1993; 胡瑞忠,1989; 1990; 李子颖等,1999; 余达淦,1992; 范洪海等,2003; 张守本,2004; 王学成,1986; 1989; 王学成等,1991; 李献华等,1997; 李献华,1990)。在东秦岭地区许多金属矿床集中分布区域内,中基性岩脉也十分发育。因此,从20世纪50年代末期以来,对该区的研究工作从未间断过(王艺芬

等,1991; 裴先志等,1995; 2001; 张本仁等,2000; 宋峰等,1999; 董云鹏等,1999; 刘军锋等,2005; 余研等,1994; 倪师军,1994; 倪师军等,1994; 王团华等,2008),但先前的研究主要着重于探讨基性岩脉与各种金属矿化的关系,而对基性岩脉的岩石地球化学特征和成因的研究涉及较少,如王团华等(2008)对小秦岭、熊耳山金矿区中基性岩脉的岩石化学进行了系统研究,倪师军(1994)对小秦岭基性岩脉与金矿成因关系进行了研究,但是钼矿区基性岩脉的研究较少。金堆城钼矿集区的基性岩脉主要为辉绿岩脉,仅在区域地质报告中有见报道(陕西省地质局金堆城地质队,1959),而关于辉绿岩的形成时间、地球化学特征及其与金堆城斑岩钼矿的关系均未见到报道。因此,本文对该区辉绿岩脉开展了系统的地球化学研究,并结合区域上已有的研究成果,对于基性岩脉成因机制及其形成时的地球动力学背景进行了探讨。

1 区域地质背景

位于华北板块南缘的东秦岭钼矿带是中国重要的大型钼矿分布区之一,是全球最大钼成矿带(Mao et al., 2010),钼矿带西起陕西省的金堆城地区,经河南省栾川南泥湖、嵩县雷门沟、鱼池岭,东至汝阳东沟地区。该矿带产出了金堆城、夜长坪、南泥湖、三道庄、上房沟、雷门沟、鱼池岭、东沟和石窑沟等10余个超大型-大型钼(钨)多金属矿床,钼资源储量上千万吨,约占全国总储量的52%(张正伟等,2001; 李永峰等,2005)。东秦岭钼矿带的矿化地质特征、成岩成矿年龄及成矿地球动力学背景为国内外学者所共同关注(许志琴等,1986; 黄典豪等,1989; 刘长命等,1989; 罗铭玖等,1991; 1993; 张本仁等,1996; Stein et al., 1997; 高山等,1999; Meng et al., 2000; 陈衍景等,2000; 张国伟等,1996; 卢欣祥等,2002; 毛景文等,2003; Li et al., 2012; 2014)。基性岩在本区亦比较发育,主要以脉状和小岩株产出,单个岩株

的规模不大但数量众多,遍布整个小秦岭-熊耳山地区,以小秦岭地区较多。基性岩脉的形成时期主要以加里东期、燕山期和喜马拉雅期为主,主要岩石类型有辉绿岩、辉长辉绿岩、辉长辉绿玢岩和辉长玢岩以及煌斑岩脉等(王团华等,2008;倪师军,1994)。

金堆城钼矿区位于陕西省东部,地处华北板块南缘的洛南-栾川台缘褶皱带西段。太古界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,其岩性主要为石英岩、板岩和泥岩。金堆城矿区内断裂构造发育,断裂构造主要为近东西向和北西向 2 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(陕西省地质局金堆城地质队,1959;黄典豪等,1987)。褶皱构造主要为黄龙铺背斜,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,东段轴向近东西向,在潘家沟一带呈略向南凸出的弧形。金堆城矿区内岩浆岩出露广泛,印支期辉绿岩主要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)。

2 样品特征

辉绿岩位于金堆城钼矿区的东南部,本次对它进行了系统采样,7 件辉绿岩样品来自不同的岩脉,代表了金堆城钼矿集区辉绿岩特征。

本区辉绿岩主要呈北东向、或北西向脉状分布(图 1),与矿区内燕山期二长花岗岩呈侵入接触关系,主要分布于新元古界官道口群石英岩中。采样位置详见图 1,岩石样品均有不同程度的蚀变(图 2),主要呈灰黑色、灰黑绿色;主要矿物有单斜辉石(35%)、基性斜长石(50%~60%),少量为石英(2%~3%)、磁铁矿、钛铁矿、磷灰石等。斜长石呈较规则板状、长条状,杂乱分布,格架中充填细粒辉石,构成特征的辉绿结构,部分自形晶包嵌在辉石中,斜长石具有绢云母化、绿泥石化、钾长石化;辉石以半自形-他形粒状为主,不均匀地充填于斜长石的间隙中,多数发生蚀变,具有绿泥石化等;石英呈微细粒

状,不均匀地充填于斜长石、辉石的间隙中。

3 分析方法

7 件金堆城辉绿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。用于岩石化学分析的样品,首先将表面和裂隙切除,然后将标本样品碎成直径约 1 cm 的小岩块,将小岩块经去离子水清洗 3 次,导入 5% 稀盐酸溶液,并放入超声振荡器中振荡 30 min,多次用去离子水清洗,将装有小岩块的烧杯放进电热鼓风干燥箱。杯口盖上干净白纸,在 105℃ 下烘干。然后将干燥的样品经过清洗干净的振动磨样机磨成 200 目以下的岩石粉末。全过程严格控制样品交叉污染。制备的粉末在电烘箱中 105℃ 烘干。

每个样品取约 5 g 用于主量元素和微量元素的测试。测试工作在国家地质实验测试中心进行。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 XRF 方法完成,精度优于 5%,稀土和微量元素采用 ICP-MS 方法分析,含量 > 10×10^{-6} 的元素分析精度优于 5%,含量 < 10×10^{-6} 分析精度优于 10%。

4 分析结果

4.1 常量元素

金堆城钼矿区辉绿岩的主量元素分析结果列于表 1 中。从表中可知,本区辉绿岩的 SiO_2 质量分数明显偏高(48.13%~57.74%),大多为中-基性,少数为基性,除样品 JH-06 和 JH-07 外,其他样品的 $w(\text{SiO}_2)$ 偏高,可能与硅化有关。 $w(\text{MgO})$ 为 3.39%~6.58%, $\text{Mg}^\#$ 变化较大(27~40);低碱($w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 为 4.2%~5.85%),且钾、钠含量接近($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.73\sim 1.38$); FeO^T ($\text{FeO}^\text{T}=\text{FeO}+0.9 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$) 变化范围为 8.96%~12.74%。根据岩石学系列判别图解(图 3a),研究区中基性岩脉以玄武岩、玄武安山岩、安山岩为主;而在 $\text{SiO}_2\text{-FeO}^\text{T}/\text{MgO}$ 图解(Miyashiro,1975)(图 3b)上,落入拉斑系列区,显示本区辉绿岩总体具有拉斑玄武岩系列演化趋势;在 $\text{SiO}_2\text{-Nb/Y}$ 图解(图略)(Winchester et al.,1977)落入亚碱性系列区。

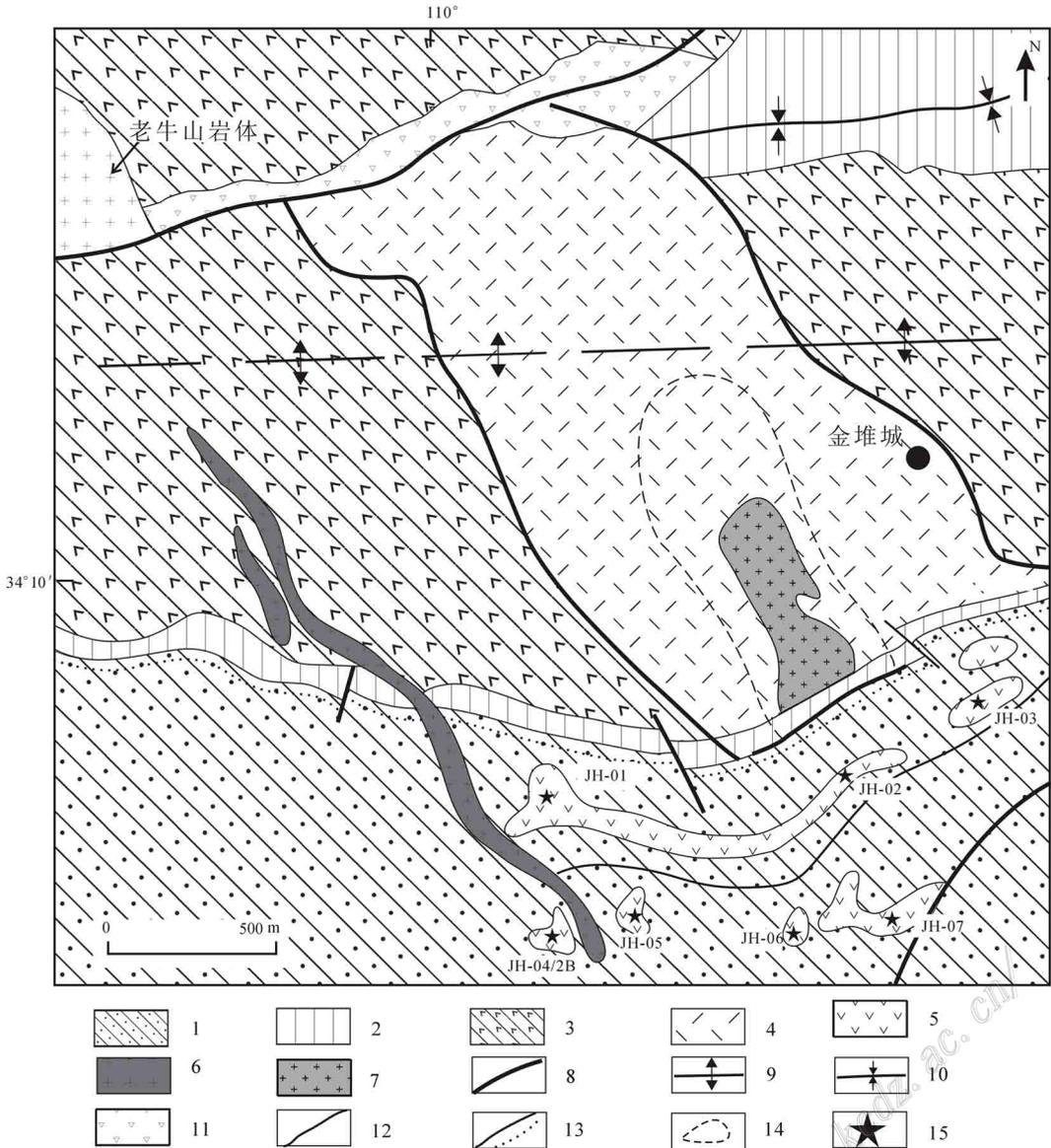


图 1 陕西金堆城钼矿床地质图(据黄兴家等, 1987)。

1—新元古界管道口群石英岩; 2—新元古界管道口群板岩; 3—古元古界熊耳群安山岩; 4—黑云母化安山岩; 5—辉绿岩; 6—燕山期二长花岗岩; 7—花岗斑岩; 8—断层; 9—背斜轴; 10—向斜轴; 11—断裂破碎带; 12—地质界线; 13—不整合界线; 14—钼矿体范围; 15—采样位置

Fig. 1 Geological map of Jindui Cheng Mo deposit in Shaanxi (modified after Huang et al., 1987)

1—Quartzite and sandstone of Neoproterozoic Guandaokou Group; 2—Slate of Mesoproterozoic Xiong'er Group; 3—Andesitic rocks of Mesoproterozoic Xiong'er Group; 4—Biotitized andesite; 5—Triassic diabase; 6—Yanshanian adamellite; 7—Granite porphyry; 8—Fault; 9—Anticline axis; 10—Syncline axis; 11—Fault zone; 12—Exploration line; 13—Unconformity; 14—Mo orebody; 15—Sampling location

4.2 稀土元素和微量元素

在球粒陨石标准化图解中, 样品均表现为右倾斜的稀土元素配分模式(图 4a)。稀土元素总量较高, ΣREE 变化为 $169.4 \times 10^{-6} \sim 450.8 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 2.7~4.2, $\omega(\text{La})$ 较高 ($26.0 \times 10^{-6} \sim 85.2 \times 10^{-6}$), $\omega(\text{Yb})$ 较低 ($2.5 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-6}$), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 7.5~12.4, 体现

LREE、HREE 强烈分异的特点; $(\text{La}/\text{Gd})_{\text{N}} = 3.8 \sim 6.3$, $(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.2 \sim 1.4$, 说明轻稀土元素比重稀土元素分异明显。大部分样品显示 Eu 负异常 (δEu 为 0.7~1.0), 反映岩浆演化过程中, 斜长石的分离结晶作用并不明显。稀土元素配分模式呈右倾型(图 4a), 分布曲线相互平行, 显示不同部位样品 REE 分馏程度相同。综上分析, 金堆城钼矿区 ΣREE



图 2 金堆城钼矿区辉绿岩特征

a. 花岗岩与辉绿岩接触带; b. 野外辉绿岩; c. 辉绿岩手标本; d. 绿泥石化辉绿岩
Pyx—辉石, Pla—斜长石, Chl—绿泥石化

Fig. 2 Petrography of diabase dyke from the Jinduicheng Mo deposit

a. Contact zone of granite and diabase; b. Field photo of diabase; c. Diabase sample; d. Microscopic characteristics of diabase
Pyx—Pyroxene, Pla—Plagioclase, Chl—Chloritization

表 1 金堆城辉绿岩脉的主量元素(w(B)/%)、微量元素和稀土元素(w(B)/10⁻⁶)分析结果

Table 1 Major (w(B)/%), trace and rare earth elements (w(B)/10⁻⁶) compositions of Jinduicheng diabase dykes

组分	JH-01	JH-02	JH-04/2B	JH-05	JH-03	JH-07	JH-06
SiO ₂	56.95	55.23	57.56	57.74	57.40	48.13	49.01
Al ₂ O ₃	14.14	14.62	14.19	14.02	14.18	14.63	16.48
CaO	5.70	5.87	5.16	5.36	6.39	7.84	4.81
Fe ₂ O ₃	4.80	3.24	2.62	2.60	3.37	5.86	3.22
FeO	6.42	8.05	7.24	6.62	6.63	7.47	9.70
K ₂ O	3.16	2.31	3.03	3.05	2.60	0.05	2.45
MgO	3.77	4.64	3.47	3.39	3.77	6.58	6.15
MnO	0.16	0.19	0.15	0.15	0.15	0.21	0.19
Na ₂ O	1.89	2.65	2.57	2.80	2.14	2.16	2.76
P ₂ O ₅	0.45	0.42	0.58	0.51	0.48	0.36	0.50
TiO ₂	1.59	1.47	1.91	1.65	1.61	2.16	1.79
H ₂ O ⁺	0.90	1.20	1.06	1.02	0.84	3.90	2.28
LOI	0.61	0.71	0.73	1.17	0.56	3.64	1.90
Hf	7.89	6.60	10.60	10.40	9.09	3.82	7.81
Ta	0.66	0.57	1.00	0.88	0.80	0.88	0.65
Pb	24.7	13.4	22.7	17.2	18.7	15.3	19.9
Th	3.07	3.00	5.43	5.18	4.10	2.31	3.27
U	0.51	0.52	0.85	0.81	0.67	0.44	0.53
Sc	24.2	25.3	22.4	22.0	22.3	37.2	28.3

续表 1
Continued Table 1

组分	JH-01	JH-02	JH-04/2B	JH-05	JH-03	JH-07	JH-06
V	161	150	155	160	154	327	194
Cr	97.4	116	73.5	85.6	109	85.6	184
Co	29.0	37.4	23.3	24.7	26.2	52.3	40.3
Cu	21.5	7.42	26.6	22.6	20.6	43.0	17.9
Mo	0.99	0.81	0.81	1.02	0.56	0.52	0.21
Zn	118	125	135	109	108	142	171
Rb	81.1	64.0	86.8	77.0	59.1	1.09	63.0
Sr	343	134	283	374	398	390	225
Zr	272	228	372	369	321	124	277
Nb	11.9	10.5	18.1	16.8	14.7	13.7	11.8
Ba	2031	1564	2262	1822	1653	206	1419
Ag	0.07	0.05	0.06	0.07	0.07	0.11	0.07
Ni	28.80	37.50	26.70	29.80	35.10	66.50	30.10
As	0.57	0.72	0.88	2.41	0.59	2.13	0.63
Sb	<0.05	<0.05	0.07	0.07	0.06	0.13	<0.05
Au	0.68	0.49	0.69	0.44	0.58	0.63	0.59
W	0.76	1.14	0.68	0.59	0.65	0.37	0.74
Sn	1.64	1.61	2.08	2.01	1.89	0.98	1.45
Ga	20.5	18.9	20.7	19.7	20.4	20.4	24.4
B	2.09	<2.00	<2.00	<2.00	2.22	3.91	<2.00
Hg	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.005	0.004
Li	43.7	27.8	39.1	15.0	21.3	28.2	30.1
Be	1.51	1.42	2.62	1.85	1.72	0.82	1.80
La	55.3	43.7	85.2	79.0	67.5	26.0	53.8
Ce	115	92.2	166	153	140	51.7	113
Pr	14.4	11.3	20.3	18.3	17.0	7.21	14.3
Nd	55.4	43.9	76.2	69.4	66.2	1.1	56.4
Sm	10.1	7.87	13.7	12.3	11.7	6.03	10.1
Eu	2.58	1.79	3.06	2.64	2.68	2.07	2.33
Gd	9.17	7.32	12.3	10.8	10.1	5.94	9.16
Tb	1.44	1.16	1.87	1.67	1.60	0.93	1.47
Dy	7.92	6.54	9.62	8.77	8.37	5.08	8.04
Ho	1.57	1.37	1.94	1.77	1.68	1.00	1.65
Er	4.64	3.92	5.43	4.95	4.82	2.76	4.60
Tm	0.69	0.61	0.82	0.75	0.71	0.41	0.72
Yb	4.29	3.75	4.95	4.56	4.31	2.48	4.38
Lu	0.66	0.61	0.79	0.73	0.69	0.39	0.71
Y	40.4	35.8	48.6	45.9	42.6	26.3	43.3
Na ₂ O+K ₂ O	5.05	4.96	5.60	5.85	4.74	2.21	5.21
FeO ^T	10.74	10.966	9.598	8.96	9.663	12.744	12.598
Mg [#]	31.18	30.78	26.99	28.32	30.49	40.46	32.85
SI	18.81	22.21	18.33	18.36	20.37	29.75	25.33
ΣREE	323.56	261.84	450.78	414.54	379.96	169.4	323.96
LREE/HREE	3.6	3.3	4.2	4.2	4.1	2.7	3.4
(La/Yb) _N	9.2	8.4	12.3	12.4	11.2	7.5	8.8
(La/Gd) _N	5.2	5.2	6.0	6.3	5.8	3.8	5.1
(Dy/Yb) _N	1.2	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4	1.2
Nb/Ta	18.0	18.4	18.1	19.1	18.4	15.6	18.2
Nb/La	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.2
δEu	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	1.0	0.7
Nb/Y	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.5	0.3
Zr/Hf	34.47	34.55	35.09	35.48	35.31	32.46	35.47
Hf/Th	2.57	2.20	1.95	2.01	2.22	1.65	2.39
Th/Ta	4.7	5.3	5.4	5.9	5.1	2.6	5.0
Ta/Hf	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1
Nb/U	23.33	20.19	21.29	20.74	21.94	31.14	22.26

注: FeO^T = FeO + 0.9 × Fe₂O₃; Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺); SI = (MgO × 100) / (MgO + FeO + Fe₂O₃ + Na₂O + K₂O); δEu = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N)

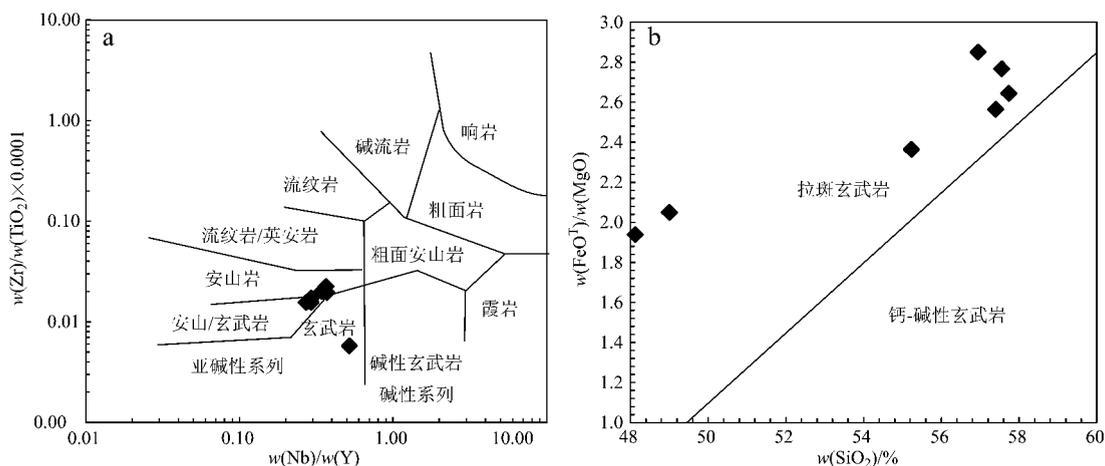


图 3 金堆城钼矿床辉绿岩脉的岩石系列判别图

a. $Zr/TiO_2 \times 0.001$ -Nb/Y 图解(据 Winchester et al., 1977); b. $FeO^T/MgO-SiO_2$ (Miyashiro, 1975) 图解

Fig. 3 Discriminative diagrams for the mafic dykes in the Jinduicheng Mo deposit

a. $Zr/TiO_2 \times 0.001$ versus Nb/Y (after Winchester et al., 1977); b. FeO^T/MgO versus SiO_2 (Miyashiro, 1975)

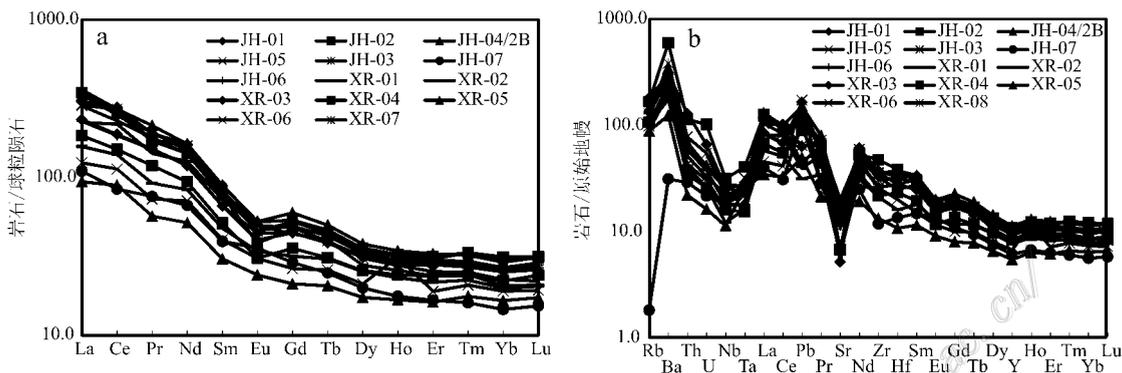


图 4 金堆城钼矿床辉绿岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b) 球粒陨石标准化值和原始地幔数据据 Sun et al., 1989 图中 XR-01~XR-07 为熊耳群火山岩,数据引自赵太平等(2002)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle normalized trace element spidergram(b) for the mafic dykes in the Jinduicheng Mo deposit (chondrite normalized values and primitive mantle data after Sun et al., 1989)

较高, LREE 明显富集, 轻重稀土元素分馏明显, 配分曲线右倾, 显示了辉绿岩岩浆起源较深, 可能源自幔源岩浆(图 4a; 罗金海等 2006)。

岩脉的微量元素分析结果列于表 1 中, 微量元素蛛网图见图 4b。微量元素组成上, 总体富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素, 而 Sr 相对相邻元素(Pr 和 Nd)亏损(图 4b)。岩脉的 Nb/Ta 比值为 15.6~19.1, 接近球粒陨石和原始地幔的 Nb/Ta 比值(约 17.5), 高于新太古代大陆地壳平均值(11~12)(Hofmann, 1988; Green, 1995)。

5 讨论

5.1 岩石成因

野外勘探中发现辉绿岩与花岗岩之间呈侵入接触关系(图 2a), 说明它们是在伸展构造背景下侵位的产物(曹豪杰等 2011)。从表 1 可知, 金堆城钼矿区辉绿岩的钼含量较低, 明显低于矿区含矿岩体和地层中的钼含量(李洪英等 2011); 根据前人研究, 金堆城钼矿区的辉绿岩成岩年龄为印支期, 而金堆城钼矿床的成矿年龄为 129~139 Ma(李永峰等,

2005, 黄典豪等, 1994; 1996; Stein et al., 1997; 毛景文等, 2003), 与成矿年龄相差较大, 辉绿岩可能与成矿关系不大。在 Harker 图上(图 5), 金堆城辉绿岩脉的 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 与 MgO 呈正相关, 暗示有 Fe 氧化物的分离结晶, 随着 MgO 的降低, CaO 降低, 表明有单斜辉石的分离结晶, Al_2O_3 与 MgO 呈正相关关系不是很明显, 表明斜长石的分离结晶作用不是很明显, TiO_2 与 MgO 呈负相关关系, 说明 Ti 氧化物的分离结晶并不明显, 与 REE 球粒陨石标准化图解上微弱的 Eu 负异常和微量元素蛛网图上 Sr 轻微的负异常一致(图 4)。Kuno 等(1957)和杨学明等(2000)提出, 固结指数(SI)用于确定玄武岩石的分异程度, 当岩浆发生结晶分异时, 残余熔浆的固结指数迅速降低。岩浆结晶分异一般由富镁向贫镁方向演化, 玄武岩 SI 愈低, 分异结晶程度愈高。本区辉绿岩的固结指数变化较大(18.33~29.75, 表 1), 反应了比较明显的分异趋势。岩石的 $\epsilon(\text{Cr})$ 为 $85.6 \times 10^{-6} \sim 184 \times 10^{-6}$ ($< 200 \times 10^{-6}$), 表明岩浆早期有橄榄石的分异作用(罗金海等, 2006)。与原生玄武岩浆相

比, 辉绿岩脉具有较低的 $\epsilon(\text{MgO})$ (3.39%~6.58%), $\text{Mg}^\#$ 值(26.99~40.46)和固结指数(18.33~29.75)以及较低的 TiO_2 含量, 反映了原始岩浆已经历了较明显的结晶分异作用(Le Bas et al., 1986; 谢桂青等, 2002)。

研究区辉绿岩脉总体亏损 HFSE, 富集 LILE, 有明显的 Nb、Ta 和 Ti 负异常以及 Ba 和 Pb 的正异常, La/Nb 比值和 La/Ta 比值(分别为 1.9~4.7 和 29.5~89.8)明显高于受地壳混染岩石的相应比值(分别为 > 1.5 和 > 30 , Fitton et al., 1988; Thompson et al., 1988), 说明金堆城钼矿区辉绿岩脉形成过程中受到地壳混染。

金堆城钼矿床辉绿岩脉的后期蚀变比较明显, 比如一些样品具有相对较高的 LOI 值(1.17%~3.64%)和较多的蚀变矿物(如绿泥石、绿帘石等), 有些薄片中的辉石全部蚀变为角闪石。部分岩石的蚀变程度较高, 研究区内辉绿岩脉以 Nb、Ta、Ti 亏损为特征, 表明有地壳物质或者富集岩石圈地幔物质的贡献, 可能是后期地壳混染的结果(AFC过程), 也

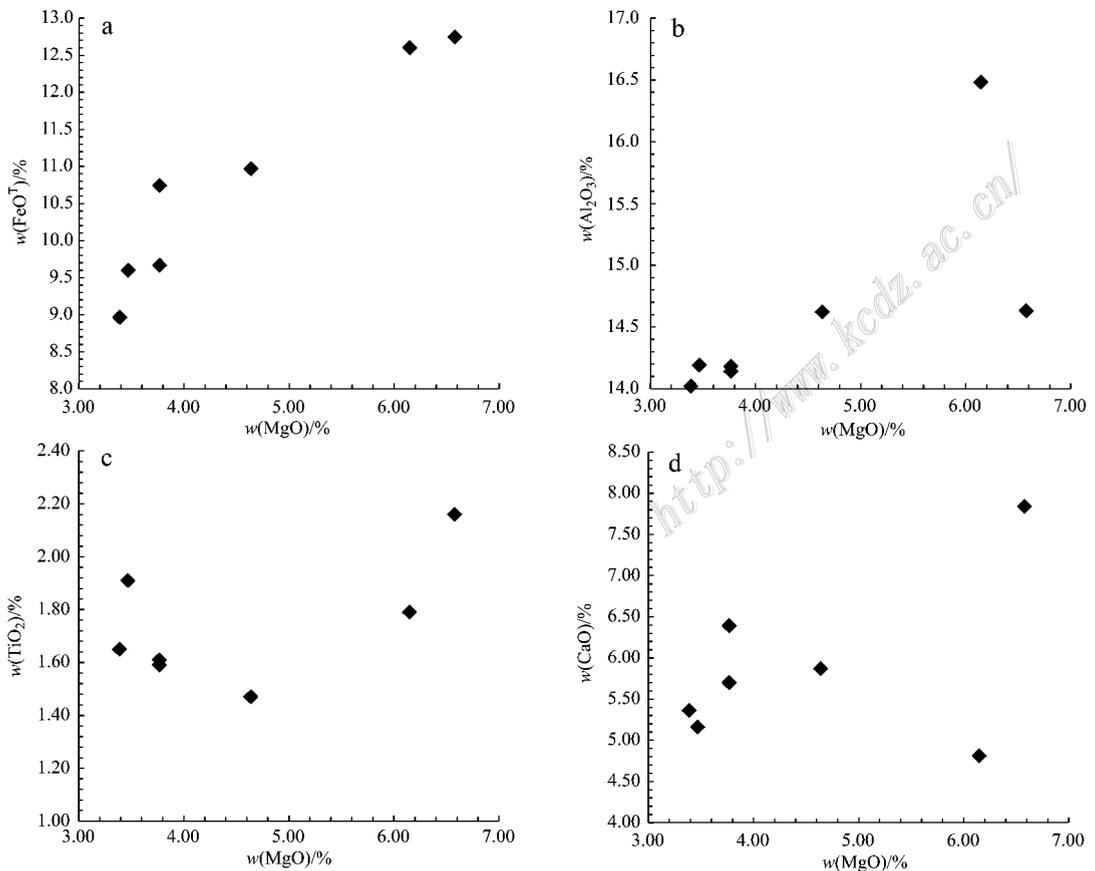


图 5 金堆城钼矿床辉绿岩脉的 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagrams of the diabase dykes in the Jinduicheng Mo deposit

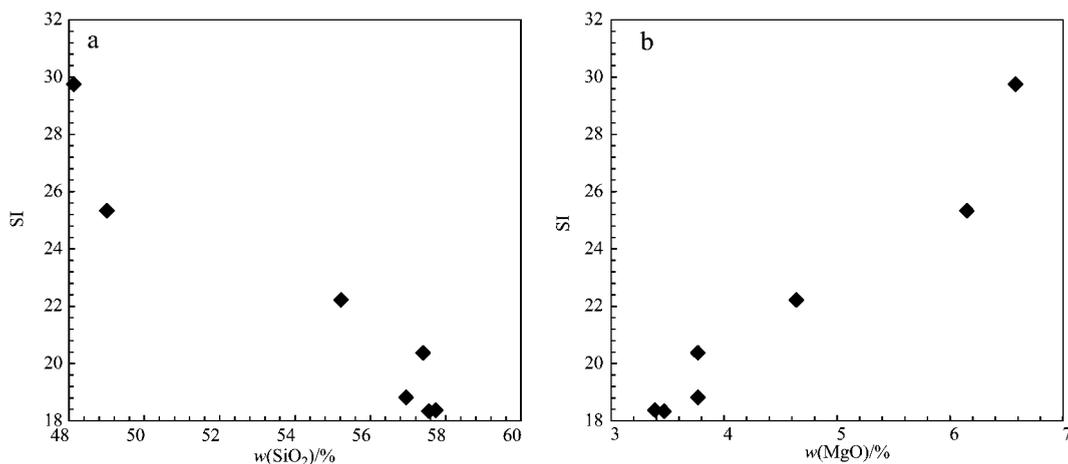


图 6 金堆城钼矿床辉绿岩脉的 SI-SiO₂ 图解(a)和 SI-MgO 图解(b)

Fig. 6 SI versus SiO₂ (a) and SI versus MgO (b) diagrams for the mafic dykes in the Jinduicheng Mo deposit

可能是源区混染的结果,有待进一步研究。辉绿岩脉的 Nb/La 比值(0.2~0.5)随 $w(\text{SiO}_2)$ 的变化较小(图略),说明岩浆在分异演化过程中受到地壳物质混染,反映的是源区的特点。Nb/La < 1(1 为原始地幔值,Weaver,1991),表示源区有陆壳物质的加入,与俯冲作用有关。Rb 和 Ba 等活动性元素和在蚀变过程中被认为最为稳定的元素 Zr 没有明显的相关性(图 7a、b),暗示这些元素受到了蚀变的影响。而 Zr 与 Ni(图 7c)、U(图 7d)和 REE 等元素具有很好的正相关关系,暗示这些元素并未明显受到蚀变的影响,这些元素可以用来探讨它们的源区特征。大洋玄武岩 Nb/U 比值平均为 52 ± 15 (Hofmann, 2003; Hofmann et al., 1986),明显高于地壳的比值(6.2, Rudnick et al., 2003),因此低的 Nb/U 比值可以反映地壳的同化混染。金堆城钼矿区辉绿岩 Nb/U 比值主要集中在 20.19~31.14,暗示了该区辉绿岩可能受到地壳物质的同化混染。辉绿岩具有微弱的 Eu 负异常,具较高的 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ (0.36%~0.51%) 和明显的 Pb 负异常,均表明辉绿岩侵位过程中发生了地壳混染作用(Weaver, 1991)。

金堆城钼矿区辉绿岩的稀土元素总量与熊耳群(ΣREE 为 $334.46 \times 10^{-6} \sim 463.6 \times 10^{-6}$, 夏林圻等, 1990, 赵太平等, 2002) 的相似,且均为轻稀土元素富集型(夏林圻等, 1990, 赵太平等, 2002), δEu 微弱的负异常(夏林圻等, 1990, 赵太平等, 2002), 表明它们具有相同的岩石化学基本属性。从上可知,金堆城的辉绿岩类主要来源于上地幔部分熔融产生的碱性玄武岩浆,但是受到陆壳物质的混染。

5.2 成岩构造环境

从表 1 可知,测试的 7 个样品中除一个样品外,其他样品的 $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 2.45%~3.16%,明显大于大洋拉板玄武岩的 $w(\text{K}_2\text{O})$ 0.24%(Pearce, 1982; Sun et al., 1989)。高场强元素 Zr、Hf 和 Nb 在蚀变和变质作用过程中具有良好稳定性,是岩石成因和源区性质的良好示踪剂。由于本区辉绿岩经历了多次蚀变改造,其主量元素成分也许不能很好地反映岩石形成时的构造环境,而不活动的微量元素协变关系是构造环境判别的有效方法,本区辉绿岩微量元素 $w(\text{Zr})$ 和 $w(\text{Hf})$ 分别在 $124 \times 10^{-6} \sim 372 \times 10^{-6}$ 和 $3.82 \times 10^{-6} \sim 10.60 \times 10^{-6}$ 之间,介于 MORB(分别为 90×10^{-6} 和 2.4×10^{-6}) (Pearce, 1982) 和 OIB(分别为 280×10^{-6} 和 7.8×10^{-6}) (Sun et al., 1989) 之间, $w(\text{Nb})$ 为 $10.5 \times 10^{-6} \sim 18.1 \times 10^{-6}$, 平均值为 13.93×10^{-6} , 介于 E-MORB 和 OIB(分别为 8.3×10^{-6} 和 48×10^{-6}) (Pearce, 1982; Sun et al., 1989) 之间。高场强元素比值 Zr/Nb 是有效的环境判别指示, N-MORB 的 Zr/Nb 值多大于 30, E-MORB 和洋岛拉斑玄武岩的 Zr/Nb 值约为 10(Wilson, 1989), 而本区辉绿岩 Zr/Nb 值多在 20~24 之间。微量元素蛛网图显示(图 4b),金堆城钼矿区辉绿岩 $w(\text{Sr})$ ($134 \times 10^{-6} \sim 398 \times 10^{-6}$) 高于 MORB 值(90×10^{-6} , Sun et al., 1989) 值。在众多的不活动微量元素构造环境判别图解(图 8)中,本区辉绿岩主要落入大洋中脊玄武岩区或大洋中脊玄武岩区和板内玄武岩区的分界线两侧。在 Ti-Zr 图解(Pearce et al., 1973)(图 8c)中,主要落入板内玄武岩区,在 Zr/Y-Zr

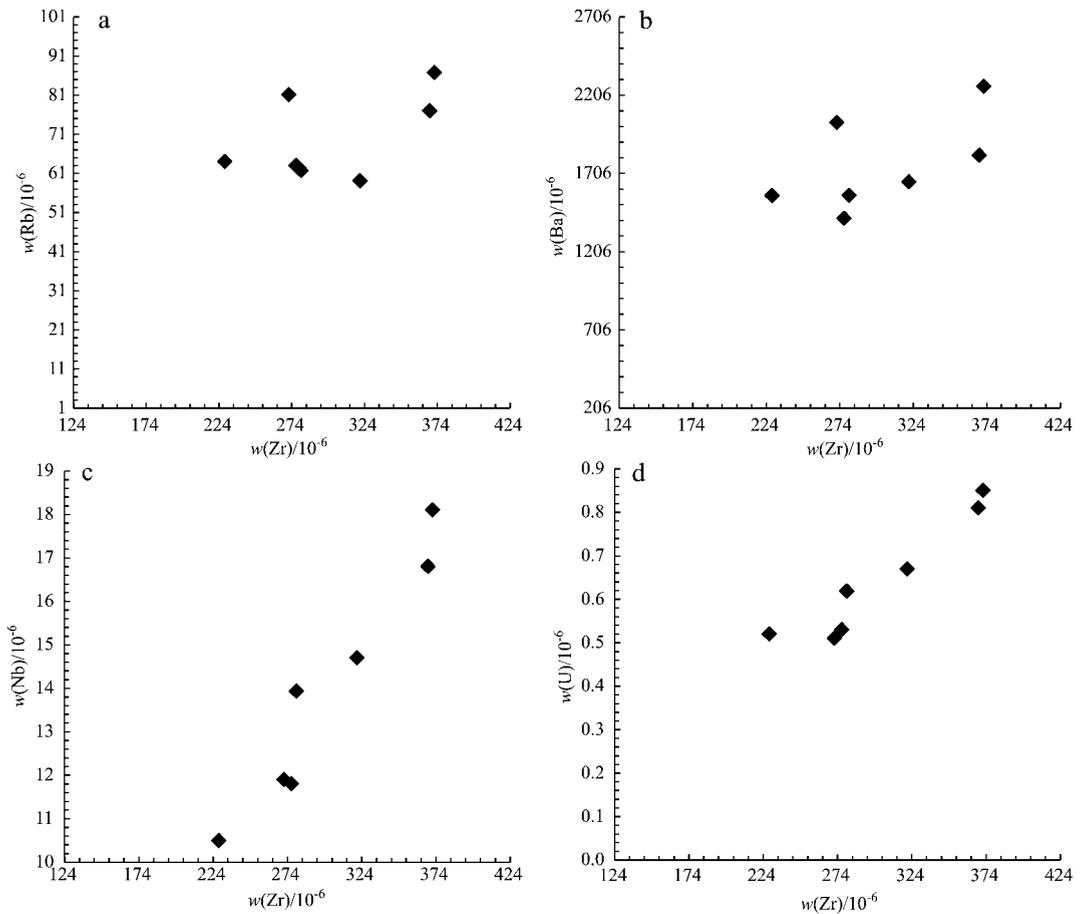


图7 金堆城钼矿区辉绿岩的 Rb-Zr (a)、Ba-Zr (b)、Nb-Zr (c) 和 U-Zr (d) 图解

Fig. 7 lots of Rb-Zr (a), Ba-Zr (b), Nb-Zr (c) and U-Zr (d) of the Jinduicheng Mo deposit

图解 (Pearce et al., 1973; 图 8a) 中, 投点落入板内玄武岩区; 在 $2\text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$ 图解 (Pearce, 1982; 图 8b) 中, 落入板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩区内, 而在 $\text{Y}/15-\text{La}/10-\text{Nb}/8$ 图解 (Cabaniš et al., 1989; 图 8d) 中, 则落入火山弧拉斑玄武岩区域内。各种构造环境判别图解的判别结果表明, 本区辉绿岩可能形成于大陆裂谷向 MORB 环境过渡的构造环境。微量元素地球化学特征显示, 金堆城钼矿区的辉绿岩具有板内玄武岩的特征 (图 8)。

金堆城钼矿区辉绿岩脉的大离子亲石元素 Sr、Ba 和高场强元素 Nb、Zr 较富集, 而稀土元素 Y 和 Yb 相对亏损。辉绿岩脉的 Hf/Th 比值 (1.65 ~ 2.57) 类似于板内玄武岩 (< 8, Condie, 1989); 辉绿岩脉的 Th/Ta 比值为 2.6 ~ 5.9, Ta/Hf 比值为 0.1 ~ 0.2, 与大陆板内玄武岩的值 (分别为 > 1.6 和 > 0.1, 汪云亮等, 2001) 相一致; Zr/Hf 比值为 32.46 ~ 35.48, Nb/Ta 比值为 15.6 ~ 19.1, Nb/U 比值为

20.19 ~ 31.14, 这些比值与大多数大陆板内拉斑碱性玄武岩相似, 相对都比较稳定 (罗金海等, 2006)。上述微量元素特征显示, 金堆城钼矿区的辉绿岩脉属于大陆板内玄武岩范畴, 形成过程中受到地壳物质的混染 (李献华等, 1997)。岩石的 $\alpha(\text{Cr})$ 为 $85.6 \times 10^{-6} \sim 184 \times 10^{-6}$ (< 200×10^{-6}), 表明岩浆早期有橄榄石的分异作用。HFSE 比值中的 Zr/Nb 比值为 20.55 ~ 23.47 (一个样品为 9.05), 普遍高于原始地幔平均值 (14.8), 表明岩浆可能是地幔源区遭受地壳组分改造所致。

赵太平等 (2002) 研究认为熊耳群火山岩由玄武质-流纹质火山岩组成, 并以玄武安山岩、安山岩为主, 次为英安-流纹岩, 显示与拉斑玄武岩岩浆及其演化趋势一致的特征, 其岩石化学成分的突出特点是高 Fe、K, 低 Al、Ca 和 Mg, 富集 LILE 和 LREE 相对亏损 HFSE, 显示岛弧型地球化学特征, 可能是地幔源区遭受地壳组分改造所致。从地质特征来看,

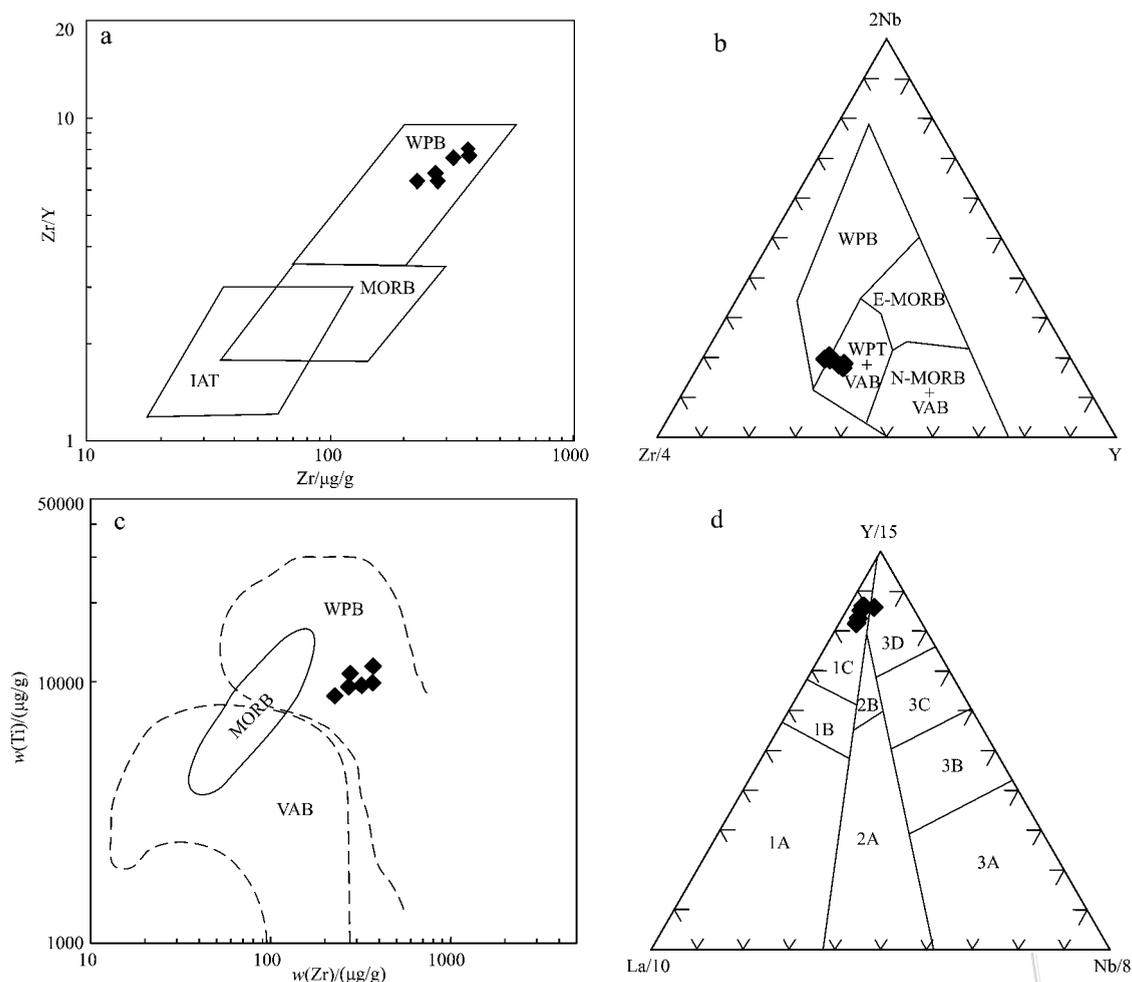


图 8 辉绿岩微量元素构造环境判别图

a. $Zr/Y-Zr$ (Pearce et al., 1979) 图解; b. $2Nb-Zr/4-Y$ (Meschede, 1986) 图解; c. $Zr-Ti$ (Pearce et al., 1979) 图解; d. $Y/15-La/10-Nb/8$ (Cabaniş et al., 1989) 图解

IAT—岛弧玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; WPB—板内玄武岩; E-MORB—富集型 MORB; VAB—火山弧玄武岩; 1A—钙碱性玄武岩; 1B—1A 和 1C 的重叠区域; 1C—火山弧拉斑玄武岩; 2A—大陆玄武岩; 2B—弧后盆地玄武岩; 3A—大陆内裂谷区的碱性玄武岩; 3B、3C—E 型 MORB (3B 区是富集的, 3C 是弱富集的); 3D—N-MORB

Fig. 8 Tectonic discriminant diagrams for the diabase dykes

a. $Zr/Y-Zr$ diagram (Pearce et al., 1979); b. $2Nb-Zr/4-Y$ diagram (Meschede, 1986); c. $Ti-Zr$ diagram (Pearce et al., 1979); d. $Y/15-La/10-Nb/8$ diagram (after Cabaniş et al., 1989)

IAT—Island-arc basalt, MORB—Mid-ocean ridge basalt, WPB—Intraplate basalt, E—MORB-enrichment-type MORB, VAB—Volcanic arc basalt, 1A—Calc-alkaline basalt, 1B—Transition region, 1C—Volcanic arc basalt, 2A—Continental basalt, 2B—Aackarc basin basalt, 3A—Continental rift alkaline basalt, 3B and 3C—E-type MORB (3B—Enrichment, 3C—Slight enrichment), 3D—N-type MORB

熊耳群火山岩带状超覆于华北南部古陆缘的结晶基底太华群上,其喷发于华北古陆缘水下裂谷,该裂谷是在相对稳定的结晶基底上受扩张拉伸发育起来的;从前面的分析可知,金堆城钼矿区的辉绿岩具有上述相似的地球化学特征(图 4),岩石化学显示其呈拉斑玄武岩特征;微量元素(富集大离子亲石元素)和稀土元素(富集 LREE)显示其具有明显过渡性特

征,以板内特征为主,是洋脊和大陆裂谷的过渡型岩石,可能是地幔源区遭受地壳组分改造所致。

6 结 论

(1)金堆城钼矿区辉绿岩为拉斑系列岩石,主量元素以中等 $w(TiO_2)$ (1.47% ~ 2.16%) 中等

$\omega(\text{MgO})$ (3.47% ~ 6.58%), $\text{Mg}^\#$ 为 26.99 ~ 40.46, 贫 P_2O_5 (0.36% ~ 0.58%), $\omega(\text{K}_2\text{O})$ 变化较大 (0.05% ~ 3.16%) 为特征, 稀土元素总量相对较高, 轻稀土元素明显富集, 轻重稀土元素分馏显著 [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 7.5 \sim 12.4$], 稀土元素配分曲线为右倾平滑状, 有较弱的 Eu 负异常, 无明显 Ce 异常。岩石富集 K、Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素, 而相对亏损 Nb、Ta、Hf、Ti、P 等高场强元素。显示了辉绿岩岩浆起源相对比较深, 可能源自幔源岩浆。

(2) 金堆城钼矿区的辉绿岩脉主要来源于上地幔部分熔融产生的碱性玄武岩浆, 但是受到陆壳物质的混染。

志谢 野外工作得到金堆城钼业集团有限公司各位领导、专家的热心帮助, 镜下鉴定过程中得到了中国地质科学院矿产资源研究所向君峰和魏然的指导与帮助。在此一并表示感谢。

References

- Cabanis B and Lecolle M. 1989. Le diagramme $\text{La}/10\text{-Y}/15\text{-Nb}/8$: Un outil pour la discrimination de series volcaniques et la mise en evidence des processus de metange et/ou de contamination crustal [J]. C. R. Acad. Sci., Ser. II. 309: 2023-2029.
- Cao H J, Huang L Z, Shen W Z, Ling H F, Huang G L, Deng P and Zhu B. 2011. Geochemical characteristics and genesis of Niudai diabase dykes in northern Guangdong Province [J]. Journal of East China Institute of Technology, 34(4): 323-331 (in Chinese with English abstract).
- Cao J J, Hu R Z and Xie G Q. 2009. Geochemistry and genesis of mafic dikes from the coastal areas of Guangdong Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 984-1000 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y J, Li C, Li Z and Wang H H. 2000. Sr-O isotopic characteristics, Genetic mechanism and types of granite-porphry bodies for Mo mineral belt in Xiao Qinling [J]. Science in China (Series D), 30(5): 64-73 (in Chinese).
- Cheng X J, Cheng J P and Wang J H. 1998. Element geochemistry of shoshonitic lamprophyres in the Pengjiakuang gold district, Shandong Province, China [J]. Geochimica, 27(1): 91-100 (in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 1989. Geochemical changes in basalts and andsites across the Archaean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. Lithos, 23: 1-18.
- Dong Y P, Zhou D W and Zhang G W. 1997. Geochemistry and formation setting of Fushui complex, eastern Qinling [J]. Geochimica, 26(3): 79-88 (in Chinese with English abstract).
- Fan H H, Ling H F and Wang D Z. 2003. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field [J]. Uranium Geology, 19(4): 208-213 (in Chinese with English abstract).
- Fitton J G, James D and Kempton P D. 1988. The role of lithospheric mantle in the generation of late Cenozoic basic magmas in the western United States [J]. Journal of Petrology, (Special volume): 331-349.
- Gao S, Zhang B R and Jin Z M. 1999. The delamination of the lower crust in Qinling-Dabie orogenic belt [J]. Science in China (Series D), 29(6): 532-541 (in Chinese).
- Ge X Y, Li X H and Zhou H W. 2003. Geochronologic, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the Late Cretaceous mafic dike swarms in southern Hainan island [J]. Geochimica, 32(1): 11-20 (in Chinese with English abstract).
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. Chemical Geology, 120: 347-359.
- Halls H C. 1982. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic process [J]. Geoscience Canada, 9(3): 145-154.
- Halls H C and Fahrig W F. 1987. Mafic dyke swarms [C]. Geology Abstracts Candy Spector Paper, 34: 1-503.
- Hoek J D and Seitz H M. 1995. Continental mafic dykes swarms as tectonic indicators: An example from the Vestfold Hills [J]. East Antarctica Precamb Resource, 7(1): 121-139.
- Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M and White W M. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constraints on mantle evolution [J]. Earth and Planetary Science Letters, 79(1-2): 33-45.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the petrogenesis of Mesozoic Gondwana low-Ti flood basalts [J]. Earth and Planetary Science Letter, 90(3): 297-314.
- Hofmann A W. 2003. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: Isotopes and trace elements [A]. In: Carlson R, ed. Treatise on geochemistry [C]. Pergamon: Elsevier. 2: 61-101.
- Hu R Z. 1989. Mineralizing mechanism of XW uranium deposit [J]. The Journal of Chengdu College of Geology, 16(3): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Hu R Z. 1990. One possible metallogenetic model of the granite-type uranium deposit [J]. Chinese Science Bulletin, 35(7): 53-57 (in Chinese with English abstract).
- Hu R Z and Jin J F. 1990. Mechanism of the migration and deposition of uranium in ascending hydrothermal solutions: Evidence from the Xiwang Uranium deposit [J]. Geological Review, 36(4): 317-325 (in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Li C Y and Ni S J. 1993. A study of origin for ΣCO_2 of the hydrothermal fluid in granite-type uranium deposit [J]. Science in China (Series B), 23(2): 189-196 (in Chinese with English abstract).
- Huang D H, Wu C Y and Nie F J. 1987. Geological feature and origin of the Jinduicheng porphyry molybdenum deposit, Shaanxi

- Province[J]. *Mineral Deposits*, 6(3): 22-34(in Chinese with English abstract).
- Huang D H. 1989. Mineralogical characteristics of Ferrimolybdenite from the Jinduicheng molybdenum deposit in Shaanxi Province and its significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 8(4): 352-360 (in Chinese with English abstract).
- Huang D H. 1992. Rhenium content and polytype characteristics of molybdenite from molybdenum deposit in East Qinling[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 11(1): 74-83(in Chinese with English abstract).
- Huang D H, Wu C Y, Du A D and He H L. 1994. Re-Os isotope age of molybdenum deposits in east Qinling and the significance[J]. *Mineral Deposits*, 13(3): 221-230(in Chinese with English abstract).
- Huang Z L, Liu C Q and Zhu C M. 1999. The origin of lamprophyres in Laowangzhai gold deposit, Yunnan Province and their relations with gold mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House. 30-112(in Chinese).
- Jia D C, Hu R Z and Lu Y. 2003. Element geochemistry and tectonic setting of the basic rocks in Rucheng Basin, southeastern Hunan Province, China[J]. *Geology-Geochemistry*, 31(2): 25-31(in Chinese with English abstract).
- Kuno H, Yamasaki K, Lida C and Nagashima K. 1957. Differentiation of Hawaiian magmas[J]. *Japanese Journal of Geography and Geology*, 28: 179-218.
- Le Bas N J, Le Maite R W and Streckeis A. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal Petrology*, 27: 745-750.
- Li H Y, Mao J W, Wang X X, Ye H S and Ma G W. 2011. Geochemistry and Sr, Nd, Pb isotopic characteristics of the granite in Jinduicheng ore concentration area[J]. *Geology in China*, 38(6): 1536-1550(in Chinese with English abstract).
- Li H Y, Ye H S, Wang X X, Yang L and Wang X Y. 2014. Geology and ore fluid geochemistry of the Jinduicheng porphyry molybdenum deposit, East Qinling, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 641-654.
- Li X H. 1990. Genesis of mafic dykes in Zhuguangshan rock: Sr, Nd, and Pb isotopic evidence[J]. *Chinese Science Bulletin*, 35(6): 1247-1249(in Chinese with English abstract).
- Li H Y, Wang X X, Ye H S and Yang L. 2012. Emplacement ages and petrogenesis of the molybdenum-bearing granites in the Jinduicheng area of East Qinling, China: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86(3): 661-679.
- Li X H, Hu R Z and Rao B. 1997. Geochronology and geochemistry of cretaceous mafic dikes from Northern Guangdong, SE China[J]. *Geochimica*, 26(2): 15-31(in Chinese with English abstract).
- Li Y F, Mao J W, Hu H B, Guo B J and Bai F J. 2005. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic molybdenum deposits in East Qinling area[J]. *Mineral Deposits*, 24(3): 292-304 (in Chinese with English abstract).
- Li Z Y, Li X Z and Lin J R. 1999. On the Meso-cenozoic mantle plume tectonics, its relationship to uranium metallogenesis and prospecting directions in South China[J]. *Uranium Geology*, 15(1): 9-17 (in Chinese with English abstract).
- Liu C M, Lu X X and Zhang Z W. 1989. Geochemical characteristics of rare earth elements for granitoid in East Qinling[J]. *Henan Geology*, 7(2): 32-39(in Chinese with English abstract).
- Liu J F and Sun Y. 2005. New data on the "hot" emplacement age of ultramafic rocks from the Songshugou area in the eastern Qinling[J]. *Geological Review*, 51(2): 189-192(in Chinese with English abstract).
- Lu J J, Wu L Q, Lin H F, Shen W Z, Gao J F, Huang G L, Deng P and Tan Z Z. 2006. The origin of the Huangpi-Zhangguangying diabase dykes in the Xiaozhuang uranium ore district of northern Guangdong Province: Evidence from trace elements and Nd-Sr-Pb-O isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 397-406(in Chinese with English abstract).
- Lu X X, Yu Z P, Feng Y L, Wang Y T and Ma W F. 2002. Mineralization and tectonic setting of deep-hypabyssal granites in East Qinling Mountain[J]. *Mineral Deposits*, 21(2): 168-178(in Chinese with English abstract).
- Luo J H, Che Z C, Zhou X Y, Li Y, Li J L and Zhang J Y. 2006. Diabase evidence for the early Mesozoic extension in the western Tarim Basin, NW China[J]. *Geology in China*, 33(3): 566-571(in Chinese with English abstract).
- Luo M J, Zhang F M and Dong Q Y. 1991. The molybdenum deposit[M]. Zhengzhou: Henan Science and Technology Publishing House. 1-235 (in Chinese).
- Luo M J, Lin Q L, Lu X X and Chen T H. 1993. Geological characteristics of the molybdenum-bearing granitoids in East Qinling[J]. *Henan Geology*, 11(1): 2-8(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Li Y H and Li H Y. 1997. Helium isotopic evidence on metallogenesis of mantle fluids in the Wangu gold deposit, Hunan Province[J]. *Geological Review*, 43(6): 646-649(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Li X F, Zhang Z H, Wang Y T, Li H M and Hu H B. 2003. Geology, distribution, types and tectonic settings of Mesozoic epithermal gold deposits in East China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 620-637.
- Mao J W, Xie G Q, Pirajino F, Ye H S, Wang Y B, Li Y F, Xiang J F and Zhao H J. 2010. 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*, 57: 51-78.
- Mc Neil A M and Kerrich R. 1986. Archean lamprophyres dikes and gold mineralization, Matheson Ontario: The conjunction of LREE-enriched magmas, deep crustal structures and Au concentration[J]. *Canada Journal of Earth Science*, 23: 324-343.
- Meng Q R and Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evo-

- lution of the Qinling orogen, central China[J]. *Tectonophysics*, 323:183-196.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of midocean ridge basalts and continental theories, and the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 56:207-218.
- Miyashiro A. 1975. Volcanic rock series and tectonic setting[C]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 3:251-269.
- Ni S J. 1994. the New mode of genetic relationship between mafic dikes and gold deposit in Xiaoqinling[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press. 1-139 (in Chinese).
- Ni S J, Li C Y and Zhang C. 1994. Contributions of meso-basic dyke rocks to gold mineralization: As exemplified for Xiaoqinling, China[J]. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 21(3):70-78 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis[J]. *Earth Planet Science Letter*, 19:290-300.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contrib. Mineral Petrology*, 69:33-47.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[A]. In: Thorpe R S, ed. *Andesites*[C]. Chichester: Wiley. 525-548.
- Pei X Z, Li H M, Li G G, Zhang W J and Wang Q Q. 1995. Sm-Nd age and geochemical character of meta-basic volcanic rocks in south side of the Shangdan-Danfeng fault from East Qinling[J]. *Northwest Geoscience*, 16(2):49-57 (in Chinese with English abstract).
- Pei X Z, Li H M and Li G G. 2001. A study of formation epoch and tectonic attribute of the Danfeng group complex in East Qinling Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(2):180-188 (in Chinese with English abstract).
- Qi Y Q, Hu R Z and Liu S. 2008. Geochemical characteristics of the mafic dikes from the Gan-Hang tectonic belt[J]. *Journal of Jilin University*, 38(5):784-794 (in Chinese with English abstract).
- Rock N M S and Groves D I. 1988. Do lamprophyres carry gold as well as diamonds[J]. *Nature*, 332:253-256.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust[A]. In: Rudnick R L, ed. *Treatise on geochemistry*[C]. Pergamon: Elsevier. 3:1-64.
- Shaanxi Province Geological Jinduicheng Geological Team. 1959. Shaanxi weinan the final geologic exploration report of Jinduicheng Mo deposit, Weinan, Shaanxi[R]. 1-185 (in Chinese).
- Song F, Liu T, Wang M S and Liu X Q. 1999. Volcanogenic massive sulfide deposits in the ophiolite of the Erlangping group in the eastern Qinling[J]. *Regional Geology of China*, 18(1):80-85 (in Chinese with English abstract).
- Stein H J, Markey R J W and Morgan J. 1997. Highly precise and accurate Re-Os ages for molybdenite from the East Qinling molybdenum belt Shanxi Province, China[J]. *Econ. Geol.*, 92:827-835.
- Sun F Y, Shi Z L and Feng B Z. 1995. the magmatism and mineralization of Jiaodong gold ore geology and mantle source C-H-O differentiation diagenetic fluid[M]. Changchun: Jilin People's Publishing House. 1-170 (in Chinese).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematicsof oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[A]. In: Saunders A D, Norry M J, et al. *Magmatism in the ocean basins*[C]. Geological Society Special Publication, 42:313-345.
- Thompson R N and Morrison M A. 1988. Asthenospheric and lower-lithospheric mantle contributions to continental extension magmatism: An example from the British Tertiary Province[J]. *Chemical Geology*, 68:1-15.
- Wang T H, Mao J W, Xie G Q, Ye A W and Li Z Y. 2008. Petrochemical research on intermediate-basic dykerocks in Xiaoqinling, Xiong'er shan goldfield, Henan Province, Central China[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(1):250-266 (in Chinese with English abstract).
- Wang X C. 1986. Geological and geochemical characteristics of Guidong body and metallogeny of No. 339 deposit[D]. Master Degree theses. Nanjing: Department of Earth Science, Nanjing University. 1-156 (in Chinese).
- Wang X C. 1989. Study on origin of dikes in uranium-bearing granite in South China and its relation on uranium mineralization[D]. Doctor Degree theses. Nanjing: Department of Earth Sciences, Nanjing University. 1-276 (in Chinese).
- Wang X C, Zhang B T and Zhang Z H. 1991. A study of the relationship between the dark dyke and the uranium mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 10(4):359-370 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y F and Xu G Z. 1991. the Characteristics of the metavolcanic rock series of early palaeozoic era and the structural environment of their genesis in the Northern part of the East Qinling-Tongbai-Dabie collision type orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(1):44-53 (in Chinese with English abstract).
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member composition: Trace element and isotopic constraints[J]. *Earth Planet Science Letter*, 104:381-397.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman. 1-466.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20:325-343.
- Xia L Y, Xia Z C, Ren Y X, Zhang C, Han S and Huang Z X. 1990. The petrology of volcanic rocks of Conger group in Southern Margin of North China plate and the discussion of its forming circumstance[J]. *Bulletin Xi'an Institute Geology Minimalist Resource, Chines Academy Geology Science*, 28(1):1-14 (in Chinese with English abstract).
- Xie G Q, Hu R Z and Zhao J H. 2001. Mantal plume and the relation-

- ship between it and Mesozoic metallogenesis in southeastern China: A preliminary discussion[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 25(2): 179-186(in Chinese with English abstract).
- Xie G Q, Hu R Z and Jia D C. 2002. Geological and geochemical characteristics and its significance of mafic dikes from northwest Jiangxi Province[J]. *Geochimica*, 31(4): 329-337(in Chinese with English abstract).
- Xu Z Q, Lu Y L and Tang Y H. 1986. Deformation characteristics and tectonic evolution of the eastern Qinling orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 60(3): 237-247.
- Yang X M, Yang X Y and Chen H X. 2000. Rock geochemistry[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press. 1-275(in Chinese with English abstract).
- Yu D G. 1992. Metallogenic environment and genetic model of Uranium in Meso-cenozoic volcanomagmatic belt in southeast China[J]. *Uranium Geology*, 8(2): 75-82(in Chinese with English abstract).
- Yu Y, Bao S C, Li X F and Chen Z R. REE geochemistry and petrogenesis of Songhugou-Yangqigou ultramafic rocks in eastern Qinling[J]. *Journal of Huan Institute of Chemical Technology*, 16(4): 44-48(in Chinese with English abstract).
- Zhai M G, Yang J H and Liu W J. 2001. Large cluster of gold deposits and large scale metallogenesis in the Jiaodong Peninsula, Eastern China[J]. *Science in China(Series D)*, 44(8): 758-768(in Chinese with English abstract).
- Zhang B R, Zhang H F, Zhao Z D and Ling W L. 1996. The geochemical division and the evolution of crust-mantle and its tectonic significance in East Qinling and adjacent area[J]. *Science in China(Series D)*, 26(3): 201-208(in Chinese).
- Zhang B R, Zhang H F and Han Y W. 2000. The geochemical partition and tectonic framework of East Qinling[J]. *Geology of Anhui*, 10(3): 209-211(in Chinese with English abstract).
- Zhang G S, Wen H J and Qiu Y Z. 2004. Geochemistry of the late Mesozoic mafic dikes in western Fujian Province[J]. *Geochimica*, 33(3): 243-253(in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Meng Q R, Yu Z P, Sun Y, Zhou D W and Guo A L. 1996. Orogenic process and dynamic characteristics of Qinling Orogen[J]. *Science in China(Series D)*, 26(3): 193-200(in Chinese).
- Zhang S B. 2004. The character of uranium deposit spatial distribution around the basic rock massif[J]. *World Nuclear Geoscience*, 21(1): 20-22(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z W, Zhu B Q and Chang X Y. 2001. Petrogenetic-Metallogenic Background and Time-Space Relationship of the East Qinling Molybdenum Ore Belt, China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 7(3): 307-315(in Chinese with English abstract).
- Zhao T P, Jin C W, Zhai M G, Xia B and Zhou M F. 2002. Geochemistry and Petrogenesis of the Xiong'er Group in the southern regions of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 59-69(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 曹豪杰, 黄乐真, 沈渭洲, 凌洪飞, 黄国龙, 邓平, 朱捌. 2011. 粤北牛岱辉绿岩脉的地球化学特征及其成因研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 34(4): 323-331.
- 曹建劲, 胡瑞忠, 谢桂青. 2009. 广东沿海地区基性岩脉地球化学及成因[J]. *岩石学报*, 25(4): 984-1000.
- 陈衍景, 李超, 张静, 李震, 王海华. 2000. 秦岭钼矿带斑岩体锶氧同位素特征与岩石成因机制和类型[J]. 30(S): 64-73.
- 程小久, 程景平, 王江海. 1998. 胶东蓬家乔金矿区钾玄质煌斑岩的元素地球化学研究[J]. *地球化学*, 27(1): 91-100.
- 董云鹏, 周鼎武, 张国伟. 1997. 东秦岭富水基性杂岩体地球化学特征及其形成环境[J]. *地球化学*, 26(3): 79-88.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋. 2003. 相山钼矿田成矿机理研究[J]. *钼矿地质*, 19(4): 208-213.
- 高山, 张本仁, 金振民. 1999. 秦岭-大别造山带下地壳拆沉作用[J]. *中国科学(D辑)*, 29(6): 532-541.
- 葛小月, 李献华, 周汉文. 2003. 琼南晚白垩世基性岩墙群的年代学、元素地球化学和 Sr-Nd 同位素研究[J]. *地球化学*, 32(1): 11-20.
- 胡瑞忠. 1989. XW 钼矿床成矿机理[J]. *成都地质学院学报*, 16(3): 1-9.
- 胡瑞忠. 1990. 花岗岩型钼矿床一种可能的成矿模式[J]. *科学通报*, 35(7): 53-57.
- 胡瑞忠, 金景福. 1990. 上升热液浸取成矿过程中铀的迁移沉淀机制探讨——以希望钼矿床为例[J]. *地质论评*, 36(4): 317-325.
- 胡瑞忠, 李朝阳, 倪师军. 1993. 华南花岗岩型钼矿床成矿热液中 ΣCO_2 来源研究[J]. *中国科学(B辑)*, 23(2): 189-196.
- 黄典豪, 吴澄宇, 聂凤军. 1987. 陕西金堆城斑岩钼矿床矿床地质特征[J]. *矿床地质*, 6(3): 22-34.
- 黄典豪. 1989. 陕西金堆城钼矿床中铁钼华的矿物学特征及其意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 8(4): 352-360.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 何红蓼. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铷-锶同位素年龄及其意义[J]. *矿床地质*, 13(3): 221-230.
- 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 刘兰笙, 孙亚莉, 邹晓秋. 1996. 华北地台钼(铜)矿床成矿年代学研究——辉钼矿铷-锶年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 15(4): 365-373.
- 黄智龙, 刘从强, 朱成明. 1999. 云南老王寨金矿区煌斑岩成因及其与金矿化的关系[M]. 北京: 地质出版社. 30-112.
- 贾大成, 胡瑞忠, 卢焱. 2003. 湘东南汝城盆地基性岩元素地球化学及其大地构造环境[J]. *地质地球化学*, 31(2): 25-31.
- 李洪英, 毛景文, 王晓霞, 叶会寿, 杨磊. 2011. 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[J]. *中国地质*, 38(6): 1536-1550.
- 李献华. 1990. 诸广山岩体内中基性岩脉的成因初探—Sr、Nd、O 同位素证据[J]. *科学通报*, 35(6): 1247-1249.
- 李献华, 胡瑞忠, 烧冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学[J]. *地球化学*, 26(2): 15-31.

- 李永峰,毛景文,胡华斌,郭保健,白凤军. 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景[J]. 矿床地质, 24(3): 292-304.
- 李子颖,李秀珍,林锦荣. 1999. 试论华南中生代地幔柱构造、铀成矿作用及其找矿方向[J]. 铀矿地质, 15(1): 9-17.
- 刘军锋,孙勇. 2005. 东秦岭松树沟超基性岩体“热”侵位时代新知[J]. 地质论评, 51(2): 189-192.
- 刘长命,卢欣祥,张正伟. 1989. 东秦岭花岗岩类稀土元素的地球化学特征[J]. 河南地质, 7(2): 32-39.
- 卢欣祥,于在平,冯有利,王义天,马维峰. 2002. 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, 21(2): 168-178.
- 陆建军,吴烈勤,凌洪飞,沈渭洲,高剑锋,黄国龙,邓平,谭正中. 2006. 粤北下庄铀矿田黄陂-张光营辉绿岩脉的成因元素地球化学和 Nd-Sr-Pb-O 同位素证据[J]. 岩石学报, 22(2): 397-406.
- 罗金海,车自成,周新源,李勇,李建立,张敬艺. 2006. 塔里木盆地西部中生代早期伸展作用的辉绿岩证据[J]. 中国地质, 33(3): 566-571.
- 罗铭玖,张辅民,董群英. 1991. 中国钼矿床[M]. 郑州:河南科学技术出版社. 1-545.
- 罗铭玖,林潜龙,卢欣祥,陈铁华. 1993. 东秦岭含钼花岗岩的地质特征[J]. 河南地质, 11(1): 2-8.
- 毛景文,李延河,李红艳. 1997. 湖南万古金矿地幔流体成矿的氦同位素证据[J]. 地质论评, 43(6): 646-649.
- 毛景文,李晓峰,张作衡,王义天,李厚民,胡华斌. 2003. 中国东部中生代浅成热液金矿的类型、特征及其地球动力学背景[J]. 高校地质学报, 9(4): 620-637.
- 倪师军. 1994. 小秦岭基性岩脉与金矿成因关系新模式[M]. 成都:西南交通大学出版社. 1-139.
- 倪师军,李朝阳,张诚. 1994. 中基性岩脉对金矿成矿的贡献——以小秦岭金矿区为例[J]. 成都理工学院学报, 21(3): 70-78.
- 裴先志,李厚民,李国光,张维吉,王全庆. 1995. 东秦岭上单断裂南侧变质基性火山岩的时代和岩石地球化学特征[J]. 西北地质科学, 16(2): 49-57.
- 裴先志,李厚民,李国光. 2001. 东秦岭丹凤岩群的形成时代和构造属性[J]. 岩石矿物学杂志, 20(2): 180-188.
- 齐有强,胡瑞忠,刘 . 2008. 赣杭构造带中西段中生代基性脉岩地球化学特征[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 38(5): 784-794.
- 陕西省地质局金堆城地质队. 1959. 陕西渭南金堆城钼矿最终地质勘探报告[R]. 1-185.
- 宋峰,刘铁,王铭生,吴新强. 1999. 东秦岭二郎坪群蛇绿岩中的火山成因硫化物矿床[J]. 中国区域地质, 18(1): 80-85.
- 孙丰月,石淮立,冯本智. 1995. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿[M]. 长春:吉林人民出版社. 1-139.
- 王团华,毛景文,谢桂青,叶安旺,李宗彦. 2008. 小秦岭、熊耳山金矿区内基性岩墙的岩石化学研究[J]. 地质学报, 15(1): 250-266.
- 王学成. 1986. 贵东岩体地质地球化学特征及 339 矿床成因研究[硕士学位论文][D]. 南京:南京大学地球科学系.
- 王学成. 1989. 华南产铀花岗岩内暗色岩脉的成因及其与铀成矿关系研究[博士学位论文][D]. 南京:南京大学地球科学系.
- 王学成,章邦桐,张祖还. 1991. 暗色岩脉与铀成矿关系研究[J]. 矿床地质, 10(4): 359-370.
- 王艺芬,徐贵忠. 1991. 东秦岭桐柏-大别山碰撞造山带北部早古生代变质火山岩系特征及其形成环境[J]. 岩石学报, 1(1): 44-53.
- 夏林圻,夏祖春,任有祥,张诚,韩松,黄忠祥. 1990. 华南板块南缘熊耳群火山岩岩石学及其形成环境讨论[J]. 中国地质科学院地质矿产研究所所刊, 28: 1-14.
- 谢桂青,胡瑞忠,赵军红. 2001. 中国东南部地幔柱及其与中生代大规模成矿关系初探[J]. 大地构造与成矿学, 25(2): 179-186.
- 谢桂青,胡瑞忠,贾大成. 2002. 赣西北基性岩脉的地质地球化学特征及其意义[J]. 地球化学, 31(4): 329-337.
- 许志琴,卢一伦,汤耀庆. 1986. 东秦岭造山带的变形特征及构造演化[J]. 地质学报, 60(3): 237-247.
- 杨学明,杨晓勇,陈欢喜. 2000. 岩石地球化学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社. 1-275.
- 余达淦. 1992. 中国东南部中生代火山-岩浆带中铀的成矿环境及成矿模式[J]. 铀矿地质, 8(2): 75-82.
- 余研,鲍世聪,李先福,陈彰瑞. 1994. 东秦岭松树沟-洋淇沟超基性岩体稀土元素地球化学与岩体成因[J]. 武汉化工学院学报, 16(4): 44-48.
- 翟明国,杨进辉,刘文军. 2001. 胶东大型黄金矿集区及大规模成矿作用[J]. 中国科学(D辑), 44(8): 758-768.
- 张本仁,张宏飞,赵志丹,凌文黎. 1996. 东秦岭及邻区壳-幔地球化学分区和演化及其大地构造意义[J]. 中国科学(D辑), 26(3): 201-208.
- 张本仁,张宏飞,韩吟文. 2000. 东秦岭地球化学分区与构造格局[J]. 安徽地质, 10(3): 209-211.
- 张贵山,温汉捷,裘愉卓. 2004. 闽西晚中生代基性岩脉的地球化学研究[J]. 地球化学, 33(3): 243-253.
- 张国伟,孟庆任,于在平,孙勇,周鼎武,郭安林. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D辑), 26(3): 193-200.
- 张守本. 2004. 基性岩体周围铀矿的空间分布特征[J]. 世界核地质科学, 21(1): 20-22.
- 张正伟,朱炳泉,常向阳. 2001. 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, 7(3): 307-315.
- 赵太平,金成伟,翟明国,夏斌,周美夫. 2002. 华北陆块南部熊耳群火山岩的地球化学特征与成因[J]. 岩石学报, 18(1): 59-69.