

# 新疆西天山莫斯早特石英钠长斑岩铜矿床 —— 一个与埃达克质岩石有关的铜矿实例\*

赵振华 熊小林 王强 白正华 梅厚均

ZHAO ZhenHua, XIONG XiaoLin, WANG Qiang, BAI ZhengHua and MEI HouJun

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2003-09-19 收稿 2003-11-21 改回

Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Bai ZH and Mei HJ. 2004. A case study on porphyry Cu deposit related with adakitic quartz albite porphyry in Mosizaote, Western Tianshan, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2):249–258

**Abstract** Some large or giant porphyry Cu deposits related with adakite are widely spreaded around the circum-pacific area. This paper provides a case study on Cu deposit related with adakitic quartz albite porphyry in central Asia metallogenic province. The Mosizaote quartz albite porphyry possesses similar geochemical features of major and trace elements with metallogenic adakites in the world, such as rich in Na and Al; high contents of Sr and low contents of Y,  $Sr/Y > 40$ ; depleted in HREE,  $La/Yb > 20$ ; rich in Eu ( $\delta Eu/Eu^* 1.15 \sim 1.27$ ). The isotopic ages for the quartz albite porphyry are  $268 \pm 5Ma$  ( $^{40}Ar/^{39}Ar$ ),  $248 \pm 12Ma$  (Rb-Sr) and  $254.5Ma$  (K-Ar) respectively. The ore bodies are mainly in the forms of veins and network veins. Epidotization, propylitization and pyritization are the dominant alteration in the wall rocks. Chalcocite and bornite are the main industrial minerals. The ores are rich in Ag ( $5.35 \sim 240\mu g/g$ ), Pb ( $0.01\% \sim 0.16\%$ ), Zn ( $0.26\% \sim 2.40\%$ ) and Au ( $0.02 \sim 0.16\mu g/g$ ). The isotopic compositions of O and H for the inclusions of chalcocite, bornite and malachite are:  $\delta^{18}O -2.54\% \sim -8.11\%$ ,  $\delta D_{H_2O} -68.9\% \sim -98.8\%$ . The isotopic compositions of S and Pb for these Cu minerals are:  $\delta^{34}S -6.0\% \sim 5.81\% -0.28\%$  and  $^{207}Pb/^{204}Pb 15.46 \sim 15.77$ ,  $^{206}Pb/^{204}Pb 18.01 \sim 18.42$ , indicating the deep source of the metallogenic materials. Close relationship between the Cu mineralization and adakitic quartz albite porphyry can also be found from their similar isotopic compositions of Sr and Nd, such as ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )<sub>i</sub> 0.70596, ( $^{143}Nd/^{146}Nd$ )<sub>i</sub> 0.512403 and  $\epsilon_{Nd}(t) +1.5$  and the isochron ages of Sm-Nd (243Ma) for the Cu minerals in the Mosizaote Cu deposit. The Mosizaote adakitic quartz albite porphyry was generated in the post-collision stage: a significant turn of regional tectonodynamic framework from collision compress to extension. The following features, such as high temperature and pressure, and fluid rich in volatiles, high oxygen fugacity and quickly rising of the adakitic magma, may be the dominant factors controlling the mineralization of the adakitic magma.

**Key words** Adakite, Cu mineralization, Western Tianshan, Xinjiang, China

**摘要** 与埃达克质岩石有关,在环太平洋地区发现了大型、超大型斑岩型铜矿床。本文提供了一个产于中亚成矿域新疆西天山的莫斯早特铜矿床研究的实例。含矿岩体为石英钠长斑岩,岩体主量、微量元素地球化学特点与埃达克质岩石一致:富Na、Al;高Sr,低Y;  $Sr/Y > 40$ ,亏损HREE;  $La/Yb > 20$ ; Eu为正异常( $\delta Eu/Eu^*$ 为 $\sim 1.27$ )。全岩 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄 $268 \pm 5Ma$ , Rb-Sr年龄 $248 \pm 12Ma$ , K-Ar年龄 $254.5Ma$ ,属中晚二叠世。矿体呈脉状、网脉状;围岩蚀变为绿帘石化、青盘岩化和黄铁矿化。铜品位 $1\% \sim 5\%$ ,主要工业矿物为辉铜矿、斑铜矿。矿石富含Ag( $5.35 \sim 240\mu g/g$ )、Pb( $0.01\% \sim 0.16\%$ )、Zn( $0.26\% \sim 2.40\%$ )、Au( $0.02 \sim 0.16\mu g/g$ )。矿石矿物S同位素 $\delta^{34}S$ 为 $-6.0\% \sim 5.81\%$ ,平均 $-0.28\%$ ;辉铜矿、斑铜矿和孔雀石的 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 为 $15.46 \sim 15.77$ , $^{206}Pb/^{204}Pb$ 为 $18.01 \sim 18.42$ ,属造山带与地幔Pb之间;矿石矿物包裹体的 $\delta^{18}O -2.54\% \sim -8.11\%$ , $\delta D_{H_2O} -68.9\% \sim -98.8\%$ ,属岩浆水与大气降水之混合。矿石矿物的( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )<sub>i</sub>为0.70596, ( $^{143}Nd/^{146}Nd$ )<sub>i</sub>为0.512403,  $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 $+1.5$ ,其Sr-Nd同位素组成及同位素年龄与含矿埃达克质石英钠长斑岩一致。含矿埃达克质石英钠长斑岩形成于后碰撞阶段,属由碰撞、挤压向伸展、拉张转变的构造动力学格架转折期。埃达克岩浆的较高温度、压力、富挥发分、较高氧逸度和岩浆快速上升,可能是其成矿的重要控制因素。

**关键词** 埃达克岩;斑岩铜矿床;新疆西天山

中图法分类号 P588.13; P618.41

\* 国家重点基础研究计划(2001CB409803);国家“305”96-915-03-02;国家攀登计划预选项目(95-预-25)资助。

第一作者简介:赵振华,男,1941年生,研究员,博士生导师,地球化学专业,E-mail:zhzhao@gig.ac.cn

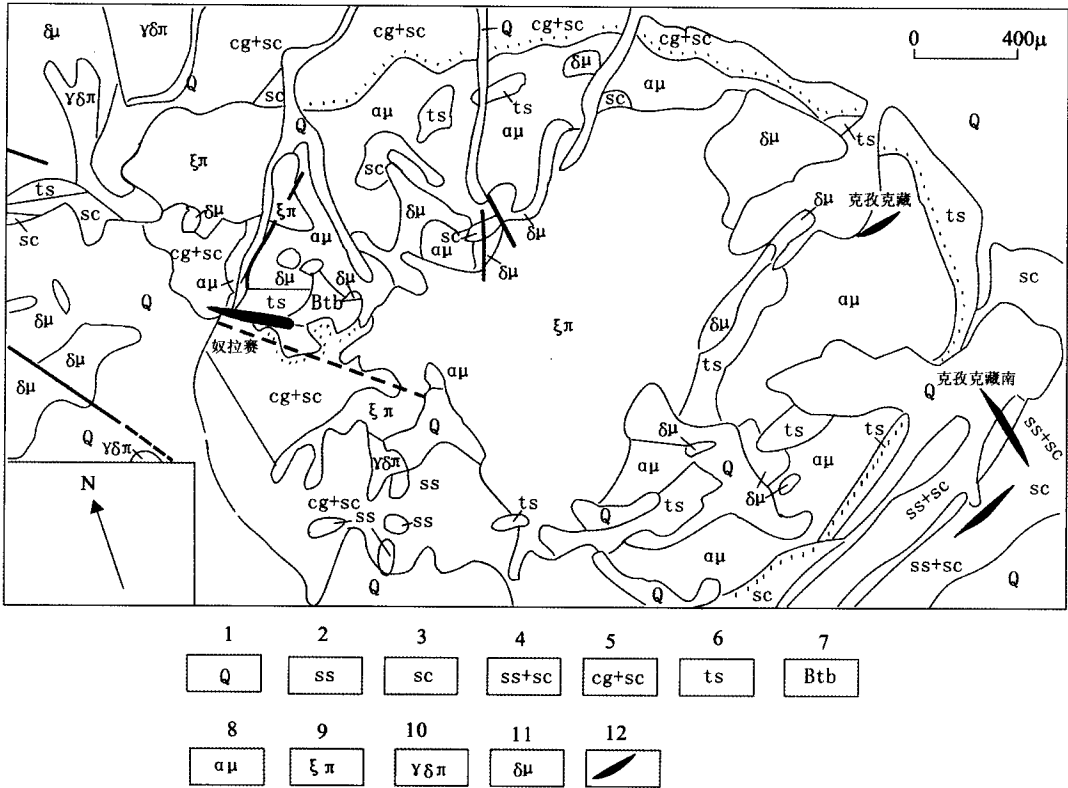


图1 西天山莫斯早特铜矿床地质平面图(据丁乾俊,1990)

1-第四系;2-砂岩;3-砂砾岩;4-砂岩、砂砾岩互层;5-砂岩、砂砾岩;6-凝灰质砂岩、角砾岩;7-层状凝灰岩;  
8-安山岩;9-石英钠长斑岩;10-花岗闪长斑岩;11-闪长斑岩;12-铜矿体

Fig. 1 Geological sketch map of Mosizaote Cu deposit in Western Tianshan

埃达克岩不仅具有重要的地球动力学意义,而且,与埃达克质岩石有关的成矿作用(特别是铜矿)近年来受到广泛重视(Defant, 1993, 2001; Oyarzun, 2001; Thieblemont, 1997; Sajona, 1998; Mungall, 2002; 王强等, 2002; 曲晓明等, 2002, 2003; 侯增谦等, 2003)。这些研究表明,在新生代埃达克质岩石非常发育的地区,同时也是热液和斑岩(Cu、Au、Mo)矿床非常发育的地区。如西太平洋菲律宾、巴布亚新几内亚,东太平洋的美国西部以及智利等, Oyarzun *et al.* (2001)通过对智利北部火山岩的研究发现,早期“正常的(稀土分布型式为右倾斜,但重稀土元素亏损不明显)”中酸性火成岩与小型斑岩铜矿床共生,但晚期埃达克质岩则与大型、超大型斑岩铜矿,如世界最大的超大型斑岩铜矿楚基卡马塔(Chuquicamata)紧密共生。我国冈底斯铜矿带与喜山晚期(20~14Ma)埃达克质花岗岩斑岩有关(曲晓明等, 2002, 2003; 侯增谦等, 2003),扬子地块东部长江中下游和德兴地区是我国重要的Cu-Au-Fe等金属成矿区,与其成矿密切相关的许多燕山期侵入岩,也为埃达克质岩石(王强, 2001, 2002; 张旗等, 2001; 许继峰等, 2001)。我们在2000年发现西天山尼勒克县的莫斯早特铜矿的含矿围岩石英钠长斑岩属埃达克质岩石(熊小林等, 2001),因此,莫斯早特铜矿是我国西部与埃达克质岩石有关的铜矿的一个实例。

## 1 矿区地质<sup>②</sup>

在西天山阿吾拉勒山西段二叠纪火山岩——浅侵位岩浆岩中,分布着十多处铜矿床(点),它们主要产于富碱的石英钠长斑岩中,其中以尼勒克县城南莫斯早特铜矿床为代表。该矿床以莫斯早特石英钠长石斑岩作为中心,包括该岩体周围穹隆状火山岩围岩中的奴拉赛、克孜克藏、克孜克藏南及三个矿体间的矿化地段,面积约10km<sup>2</sup>。矿体产于莫斯早特破火山穹隆内,穹隆面积15km<sup>2</sup>(图1),穹隆中心为石英钠长斑岩,面积1.5km<sup>2</sup>。区内出露的主要地层为上二叠统晓山萨依组(P<sub>2x</sub>)砂砾岩,哈密斯坦组凝灰岩、英安岩、玄武岩(P<sub>2h</sub>),铁木里克组泥质粉砂岩和砾岩。

矿区主要构造是一个中心被石英钠长斑岩穿切并占据的、角砾化的破穹隆构造,石英钠长斑岩占据破穹隆构造的

① 新疆维吾尔自治区人民政府国家305项目办公室. 2000. 西天山北部晚古生代火山-浅侵位岩浆活动与金、铜、多金属成矿关系的研究, 专题编号96-915-03-02

② 新疆维吾尔自治区人民政府国家305项目办公室. 1990. 博罗霍洛远景成矿区地物化探综合研究及找矿靶区圈定, 专题编号IV<sub>7</sub>。

中心,周围的二叠系以  $35^{\circ} \sim 60^{\circ}$  倾角外倾,穹隆面积约  $15 \text{ km}^2$ ,矿区集中于中心  $10 \text{ km}^2$ ,穹隆全部角砾化。外接触带为一个环状断裂破碎带,是矿区的主要断裂。此外还有三条主要控矿断裂,它们是奴拉赛-克孜克藏断裂,长  $3 \text{ km}$ ,宽  $40 \sim 70 \text{ m}$ ,走向  $280^{\circ} \sim 290^{\circ}$ ;奴拉赛-克孜克藏南断裂与上述断裂平行,长约  $3 \text{ km}$ ,宽约  $20 \sim 40 \text{ m}$ ;南翼断裂,长约  $1 \text{ km}$ ,宽  $10 \sim 20 \text{ m}$ ,走向与上述两断裂基本平行。

## 2 成矿岩体

对莫斯早特岩体的定名曾有花岗闪长岩、石英闪长斑岩、石英二长岩等,国家“305”项目IV,专题及本文将之定名为石英钠长斑岩。我们的研究表明,该岩体及周围的群吉萨依、黑山头 and 特铁达坂分布的英安岩、钠长斑岩,在岩石化学、微量元素特征上均属埃达克质岩石,是一个埃达克质岩石广泛发育的地区(熊小林等,2001,2002),它的主要特点是:岩石为中酸性岩( $\text{SiO}_2$  为  $62\% \sim 71\%$ ),富 Na ( $\text{Na}_2\text{O} = 4.40\% \sim 6.98\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  (分子比) =  $1.59 \sim 4.22$ ) 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $> 15\%$ );高 Sr ( $> 300 \mu\text{g/g}$ ,  $303 \sim 1633 \mu\text{g/g}$ );低 Y ( $\leq 18 \mu\text{g/g}$ ,  $4 \sim 7 \mu\text{g/g}$ ), Yb ( $\leq 1.9 \mu\text{g/g}$ ,  $0.32 \sim 0.65 \mu\text{g/g}$ ),强烈亏损重稀土 HREE ( $\text{La}/\text{Yb} > 20$ , 范围  $25 \sim 52$ ), Eu 具正异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 1.06 \sim 1.27$ ); Sr/Y 比值高 ( $> 20 \sim 40$ )。在 Sr/Y-Y 图解中落入埃达克型安山岩和英安岩区,与火山弧型安山岩和英安岩明显不同(图2)。

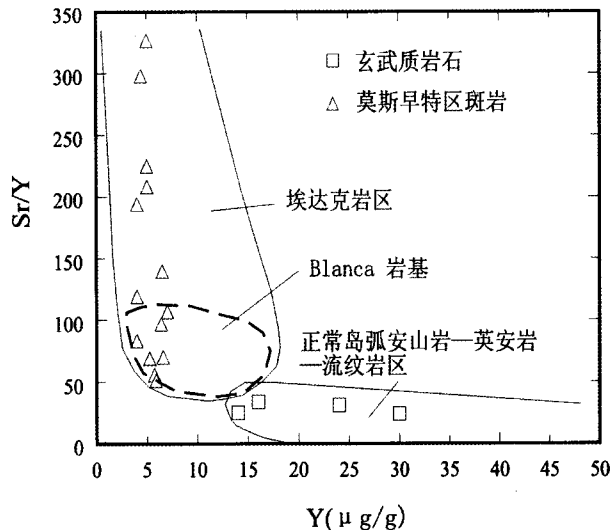


图2 西天山莫斯早特铜矿床含矿围岩的 Sr/Y-Y 图解 (据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 2 Plot of Sr/Y vs. Y for the host rocks of Mosizaote Cu deposit in western Tianshan

对该岩体进行了同位素定年,全岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄为  $268 \pm 5 \text{ Ma}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  等时线年龄为  $256 \pm 5 \text{ Ma}$

(赵振华等,2003a)。全岩 Rb-Sr 等时线年龄  $248 \pm 12 \text{ Ma}$  (李华芹等,1998), K-Ar 年龄为  $254.5 \text{ Ma}$ ①,表明该岩体属中晚二叠世。

莫斯早特岩体富含成矿元素, Cu:  $31 \sim 101 \mu\text{g/g}$ , Ag:  $2.4 \sim 3.6 \mu\text{g/g}$ , Pb:  $67 \sim 158 \mu\text{g/g}$ , Zn:  $102 \sim 185 \mu\text{g/g}$ , 明显高于酸性岩克拉克值几倍,甚至上百倍。岩石具斑状结构,斑晶主要为钠长石 ( $\text{Ab} = 98.4 \sim 98.9$ ), 未见钾长石。具绢云母化,个别沸石化。角闪石为镁角闪石,多发生绿泥石化。基质成分主要为钠长石,次为石英。

## 3 成矿特点

### 3.1 矿体形态

该矿床是新疆历史上开发较早的铜矿床。主要矿体有大脉型、中脉型、小脉型,还有细脉、网脉和微脉等。主要工业矿物为兰辉铜矿、斑铜矿、其次有少量黄铜矿、孔雀石、兰铜矿等。黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、白铁矿少见。脉石矿物主要为重晶石和方解石。在石英钠长斑岩体内为微细网脉状矿体;围绕莫斯早特岩体产出 20 多条矿脉,如奴拉赛、克孜克藏南大脉-小脉型矿体,发育在凝灰砂砾岩内;克孜克藏微细脉、网脉型矿体,发育在凝灰岩和安山岩内。可见,矿体的产出受构造控制明显。

### 3.2 围岩蚀变

矿床围岩蚀变很弱,地表露头难见蚀变,。在钻孔中可见绿泥石化、绿帘石化、青盘岩化和黄铁矿化,这些蚀变作用随深度增加而增强。

### 3.3 成矿元素

铜矿品位一般在  $1\% \sim 5\%$ , 局部地段可达  $10\% \sim 30\%$ 。Pb、Zn 具工业价值,20 个样品中 Pb 为  $0.01\% \sim 1.6\%$ , 最高达  $5.65\%$ ; Zn 为  $0.26\% \sim 2.40\%$ , 最高达  $10.49\%$ 。Au 含量也较高,为  $0.02 \sim 0.16 \mu\text{g/g}$ 。矿石富含银,本工作分析 20 件样品, Ag 含量一般为  $53.5 \sim 240 \mu\text{g/g}$ , 最高可达  $1584.43 \mu\text{g/g}$ , 达到工业品位。Ag 除以独立矿物如自然银、辉银矿和碘银矿等存在外,可能大部分以类质同象存在于铜、铅矿物中,一些铜矿物中的 Ag 含量列于表 1。

Ag、Cu、Pb 和 Zn 之间有密切关系, Ag 与 Cu 呈正相关, Ag 含量大于  $100 \mu\text{g/g}$  的样品, Cu 含量通常大于  $1\%$  (图 3)。Ag、Cu 含量与 Pb/Zn 比值成正相关趋势,而与 Pb、Zn 含量无关,一般情况下,  $\text{Pb}/\text{Zn} > 1$  的样品, Ag 含量大于  $100 \mu\text{g/g}$ , Cu 含量  $> 1\%$ ,  $\text{Pb}/\text{Zn} < 1$  的样品, Ag 含量  $< 100 \mu\text{g/g}$ , Cu 含量则  $< 1\%$ 。

① 新疆维吾尔自治区人民政府国家 305 项目办公室. 1994. 新疆阿吾拉勒山铜矿带成矿规律与重点靶区评价研究

表1 莫斯早特铜矿床中铜矿物的 Ag 含量

Table 1 The Ag contents of Cu minerals in Mosizaote Cu deposit

矿物	样品号	Ag( $\mu\text{g/g}$ )	Cu( % )	Fe( % )	S( % )
辉铜矿	Xy93-3	2478	70.29		21.94
	X93-142	2405	73.99		19.88
	X93-220	2855	60.31	9.35	17.55
斑铜矿	Xy93-93	763	60.49	10.54	25.47
	X93-175	2398	69.51		21.84
	藏南-2	529	56.80	11.29	24.78
	X93-192	937	56.49	10.04	20.01
赤铜矿	X93-263	199	85.57		
黄铜矿	X93-240	122	31.92	29.93	35.28
	N-242	69.6	24.35	33.69	39.77
黄铁矿	X93-160	160	9.37	43.65	44.96
	X93-169	82.8	4.60	47.10	42.12

分析者:中国科学院地球化学研究所陈晔虞

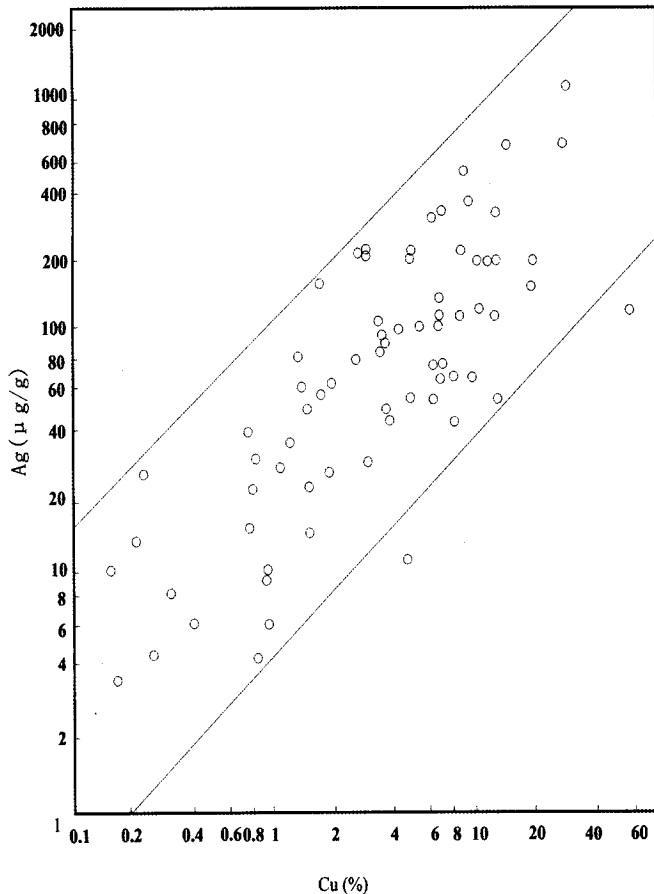


图3 尼勒克地区各种类型 Ag、Cu 矿石中 Ag 与 Cu 的关系  
Fig. 3 Diagram showing the relationship of different Ag、Cu ores in Nileke area

各类 Cu、Ag 矿石中均含有较高的 F、Cl、I 和 B 等矿化剂。F、Cl 和 I 的含量通常分别为 200 ~ 1800  $\mu\text{g/g}$ 、100 ~ 4000  $\mu\text{g/g}$  和 44.5 ~ 31.6  $\mu\text{g/g}$ ，最高值分别为 29000  $\mu\text{g/g}$ 、22120  $\mu\text{g/g}$  和 37  $\mu\text{g/g}$ ，而且 Cu，特别是 Ag 与 F、Cl 成正相关关系。辉铜矿和斑铜矿中包裹体 F、Cl 含量也较高，分别为 0.61 ~ 1.78  $\mu\text{g/g}$  和 4.30 ~ 31.32  $\mu\text{g/g}$ 。在铜矿体上方及上盘均出现极为清晰的 Cu、Hg、As、F、Cl 异常，F 异常范围 105 ~ 310  $\mu\text{g/g}$ ，平均 150  $\mu\text{g/g}$ ，说明 Ag 和 Cu 主要以卤化物或含卤族元素的配合物形式搬运成矿的。

### 3.4 包裹体温度

包裹体均一或爆裂温度一般 300 $^{\circ}\text{C}$  左右，例如奴拉赛脉矿石的形成温度，用均一法测得方解石的形成温度为 230 ~ 245 $^{\circ}\text{C}$ ；辉铜矿的爆裂温度为 200 ~ 245 $^{\circ}\text{C}$ ，黄铁矿为 345 ~ 380 $^{\circ}\text{C}$ 。克孜克藏南铜矿重晶石均一温度为 241 ~ 330 $^{\circ}\text{C}$ ；克孜布拉克铜矿辉铜矿爆裂温度为 415 $^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.5 成矿时代

由矿石矿物(黄铁矿、辉铜矿、斑铜矿)及方解石构成的 Sm-Nd 等时线年龄为 242.6  $\pm$  14.4 Ma(李华芹等, 1998); 区内不同类型铜矿石铜矿物的铅同位素 Doe 模式年龄为 248 ~ 306 Ma。表明成矿时代与石英钠长斑岩一致, 属中晚二叠世。

### 3.6 同位素组成

Sr、Nd 同位素: 对赋矿石英钠长斑岩和矿石矿物分别进行了 Sr、Nd 同位素组成测定(表 2)。石英钠长斑岩  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值低, 变化范围窄, ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 为 0.7051 ~ 0.7054。(  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  )<sub>i</sub> 比值较高, 范围为 0.51238 ~ 0.51247,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$

表2 莫斯早特铜矿含矿岩石与矿石矿物的 Nd、Sr 同位素组成

Table 2 Sr-Nd isotope compositions of host rocks and Cu minerals in Mosizaote Cu deposit

样品号	样品名称	Sm ( $\mu\text{g/g}$ )	Nd ( $\mu\text{g/g}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{2\text{DM}}$ (Ga)	Rb ( $\mu\text{g/g}$ )	Sr ( $\mu\text{g/g}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$
XT-88	Sd	2.03	12.72	0.09671	0.51256	11 0.51239	1.84	0.598	33.58	1353	0.07182	0.70527	10 0.70499	11.53
XT-90	Sd	2.46	15.85	0.09400	0.51257	13 0.51241	2.09	0.578	50.49	1648.1	0.08868	0.70570	12 0.7054	16.66
XT-91	Sd	2.44	16.24	0.09090	0.51256	11 0.51241	1.99	0.585	29.8	1118.01	0.07715	0.70547	13 0.7052	14.02
XT-104	Qap	2.25	14.19	0.09592	0.51255	8 0.51238	1.57	0.620	57.08	843.8	0.19820	0.70613	16 0.7054	17.30
NL2-3*	Qap	0.28	1.76	0.09778	0.51252	16 0.51236	0.75	0.699	83.28	292.02	0.8222	0.70826	4 0.7054	16.30
NL2-13*	Qap	1.51	8.35	0.10917	0.51254	11 0.51236	0.86	0.685	45.66	348.6	0.3777	0.70667	2 0.7054	16.00
XT-161	Qap	2.23	20.36	0.09610	0.51258	10 0.51241	2.17	0.568	28.23	788.68	0.10360	0.70510	8 0.7051	13.42
XT-162	Qap	3.23	20.25	0.09530	0.51257	13 0.51241	1.98	0.588	30.56	645.62	0.13700	0.70558	6 0.7051	12.53
XT-195	Qap	1.9	11.14	0.10320	0.51259	11 0.51241	2.15	0.571	29.4	367.27	0.23170	0.70620	11 0.7053	16.37
XT-196	Qap	1.73	10.38	0.10090	0.51264	10 0.51247	3.26	0.472	46.81	298.8	0.4534	0.70692	20 0.7053	15.7
NL1-6*	斑铜矿 + 辉铜矿	0.3	1.54	0.1188	0.51259	30 0.51239	1.65	0.631	1.91	588.53	0.00930	0.70583	1 0.7058	22.7
NL1-8-1*	斑铜矿 + 辉铜矿	0.12	0.67	0.1037	0.51257	9 0.51239	1.69	0.610	0.214	26.65	0.0232	0.70585	1 0.70576	22.3
NL1-8*	斑铜矿	0.5	2.98	0.1069	0.51257	12 0.51240	1.80	0.603	0.322	21.05	0.0441	0.70619	4 0.70603	26.03
NL1-4	方解石	3.86	21.63	0.1078	0.51257	22 0.51239	1.64	0.625	5.46	558.65	0.0282	0.70593	1 0.70582	23.17

Sd: 富钠英安岩, Qap: 石英钠长斑岩; \* 据李华芹等 1998

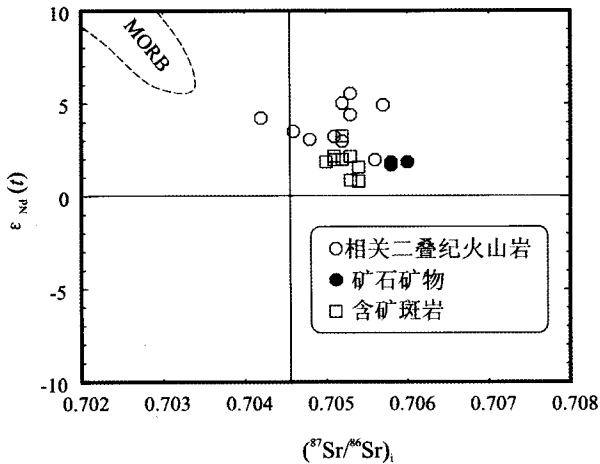


图4 莫斯早特铜矿床赋矿石英钠长斑岩和矿石矿物  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解

Fig. 4 Plot of  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  vs.  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  for the quartz albite porphyry and Cu minerals of Mosizaote Cu deposit

为正值: +1.57 ~ +3.26。矿石矿物(辉铜矿,斑铜矿,黄铁矿)及方解石的 Sr、Nd 同位素组成与石英钠长斑岩相似,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  变化范围窄,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  为 0.70596;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值较高, 范围为 0.512573 ~ 0.512592,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  为

0.512403,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  为 +1.5(李华芹等, 1998), 在  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图中(图4), 含矿围岩与矿石矿物投影位置相近, 并均位于第一象限, 在地幔排列线右侧, 反映了成矿作用与石英钠长斑岩的密切关系和地幔来源特点。

Pb 同位素: 区内不同类型矿石中辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、孔雀石及方铅矿的 Pb 同位素组成范围为:  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  18.01 ~ 18.35,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  15.46 ~ 15.53,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  37.72 ~ 38.15, 在铅构造模式图中落在造山带铅与地幔铅之间, 显示成矿物质来源于深部(图5)。

S 同位素: 组成稳定, 变化范围小, 且接近零值。从已分析的 20 多个硫同位素结果看,  $\delta^{34}\text{S}$  值变化在 -5.2‰ ~ 5.81‰, 平均为 -0.28‰(表3), 表明硫主要来源于深部。

## 4 成矿远景分析

自 1951 年起就对莫斯早特铜矿开始了找矿工作。1978 年曾作了 1:5000 次生晕化探与同比例尺的物探磁法与激电等工作。1985 年开始, 国家 305 项目对该矿作了大量勘查工作, 但对该矿远景存在不同认识, 一是认为该区无大矿, 目前见到的矿体已是矿体的根部, 矿体向下很快尖灭; 二是认为该矿床主要矿体尚隐伏于深部, 地表出露的是大矿床的边缘相。大量工作显示, 莫斯早特岩体深部存在另一岩体, 岩体

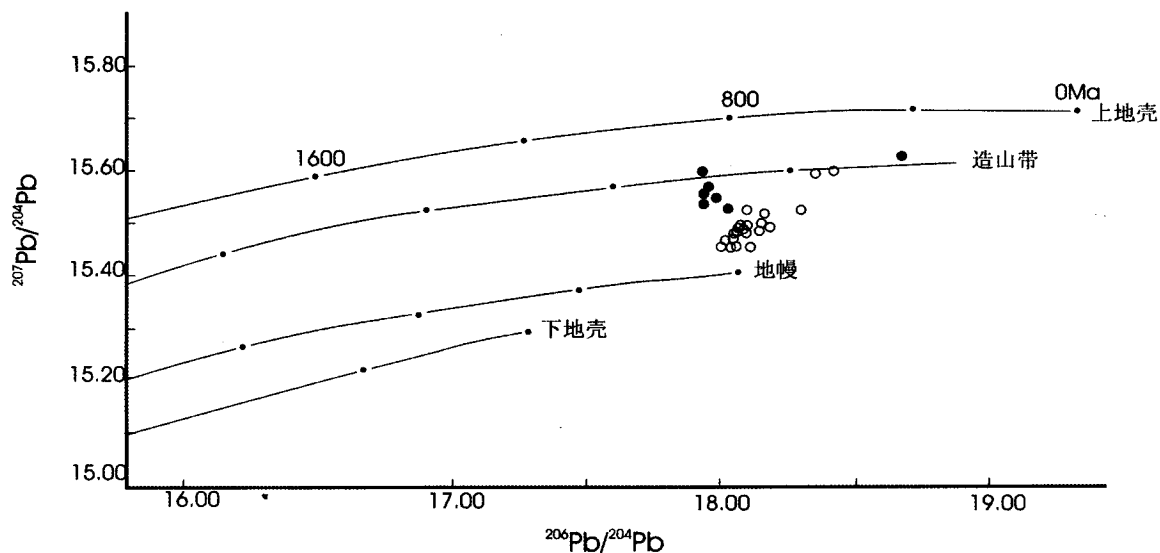


图5 莫斯早特铜矿区矿石矿物 Pb 同位素组成

(据中国有色金属工业总公司矿产地质研究院资料整理) 图中实心圆点为中国斑岩铜矿, 空心圆点为本矿区样品)

Fig.5 The Pb isotope composition of Cu minerals in Mosizaote Cu deposit

表3 莫斯早特铜矿区 Cu 矿点的硫同位素组成

Table 3 The S isotope compositions of Mosizaote Cu deposit

样品号	矿点	样品名称	测量对象	$\delta^{34}\text{S} \text{‰}$	资料来源
X93-93	无名沟	脉状铜矿石	斑铜矿	0.09	本文
X93-192	109 矿	石英钠长斑岩	斑铜矿	5.81	本文
J1-8		石英钠长斑岩	辉铜矿	2.80	桂林有色院
J2-7		石英钠长斑岩	辉铜矿	3.40	桂林有色院
Ch-1	穷布拉克	安山岩	黄铜矿	-6.00	桂林有色院
Ch-6		安山岩	黄铜矿	-5.20	桂林有色院
Ch-7		安山角砾岩	辉铜矿	-6.40	桂林有色院
Ch-8		安山角砾岩	斑铜矿	-4.60	桂林有色院
Xy93-169	奴拉赛	块状矿石	黄铁矿	-0.61	本文
Xy93-160		块状矿石	黄铁矿	1.23	本文
N <sub>ch</sub>		凝灰角砾岩	辉铜矿	4.20	桂林有色院
N <sub>py</sub>		凝灰角砾岩	黄铁矿	0.10	桂林有色院
X93-142		块状矿石	辉铜矿	-3.18	本文
MK	克孜克藏	安山岩	辉铜矿	-3.90	桂林有色院
	克孜克藏南	砂砾岩	辉铜矿	0.30	桂林有色院
ST-5	巴斯尔干	凝灰角砾岩		-1.10	新疆地质 9 队
ST-4		斜长花岗岩	黄铁矿	-1.50	新疆地质 9 队
ST-2		玄武岩	黄铁矿	-1.30	新疆地质 9 队
ST-1		斜长花岗岩	黄铜矿	-0.90	新疆地质 9 队
K-3	克孜布拉克	玄武岩	辉铜矿	-2.10	桂林有色院

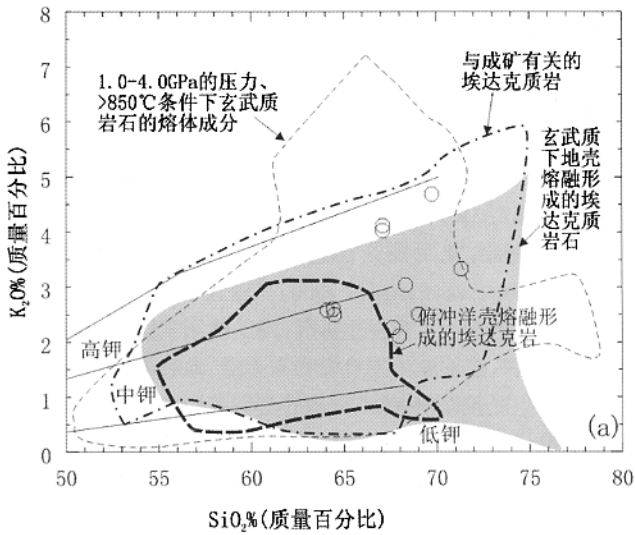
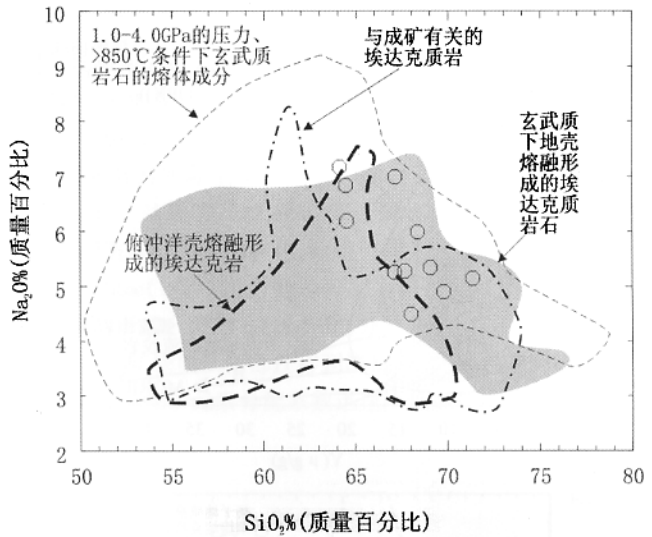


图6 不同成分源岩熔融形成的熔体成分的对比如(压力 1.0~4.0GPa, 温度 850~1150℃)

(图中空心圆点为本矿区样品)

Fig.6 Comparison of melts formed by different source materials (1.0~4.0GPa, 850~1150℃)



边部与顶盖下部为低阻异常,是矿体的反映。克孜克藏细脉型矿体向下延伸较大,沿走向也有一定出露,远景大。钻孔资料表明<sup>①</sup>,地表蚀变弱,向深部逐渐加强,出现强绿泥石化、绿帘石化、黄铁矿化、青盘岩化。化探发现 Hg 和卤素异常,推测深部存在接触带型富矿,并认为“莫斯早特铜矿床,在深处 400m 处,由钻孔获得的矿床地质现象可以与全国其它各地区铜矿床地质现象对比(围岩蚀变、岩体蚀变矿化特征等)。矿床所处阿吾拉勒远景成矿带的西段,若向下再剥蚀 400m,西天山各铜矿床的主矿体将会全部或部分暴露于地表”。“莫斯早特铜矿床具有较大的潜在远景”。

H、O 同位素: 矿区辉铜矿、斑铜矿、黄铁矿的  $\delta^{18}\text{O}$  (SMOW)  $-2.54\text{‰} \sim -8.11\text{‰}$ ,  $-68.9\text{‰} \sim -98.5\text{‰}$ , 介于岩浆水与大气降水之间<sup>①</sup>。

除莫斯早特铜矿床外,在其周围还分布群吉萨依、109 和克孜布拉克等铜矿床(点),它们与莫斯早特很相似,成矿均与石英钠长斑岩密切相关,均属于与埃达克质岩石有关的矿床。

109 铜矿床位于伊(宁)巴(仑台)公路 171km 里程碑以北 3km 阿勒马萨依沟中,矿区出露地层为上石炭统凝灰岩、凝灰熔岩、辉石安山岩。铜矿化主要赋存于埃达克质石英钠长斑岩中,地表普遍见辉铜矿和孔雀石;原生矿物主要为斑铜矿、黄铜矿、辉铜矿。铜品位一般在 0.1%~1%,科研预测储量 10 万吨<sup>①</sup>。

群吉铜(银)矿点位于尼勒克南群吉沟,赋矿岩石亦为石英钠长斑岩,属埃达克质岩石。点线法采样 Cu 含量为 0.14%~0.61%,最高 2.16%,富含 Ag,含量 5~27.8  $\mu\text{g/g}$ ,最高 134  $\mu\text{g/g}$ 。

莫斯早特铜矿床产于西天山埃达克岩石集中分布的地区,其成岩、成矿年龄一致,属与埃达克质岩石成矿作用有关

的矿床。综合上述该矿床的特点,参考近年来国外在埃达克质岩石成矿作用方面取得的进展,莫斯早特铜矿床以及尼勒克县城南地区 Cu 成矿潜力较大,应加强对该矿床及该区的进一步找矿勘查工作。

## 5 与埃达克质岩石有关的莫斯早特铜矿床成矿机理探讨

埃达克质岩石与大型、超大型 Cu 矿床密切的时空关系并非偶合,而是由于其形成的构造和动力学背景及岩浆体系特殊物理化学条件所决定的。

### 5.1 与世界其它地区 Cu-Au 等金属成矿有关的埃达克岩的对比

#### 5.1.1 形成于区域构造重大转折期

近年的研究表明,俯冲板片熔融成因的埃达克质岩常与 Cu-Au-Mo 等热液和斑岩矿床密切共生,成矿物质来源于埃达克质岩浆。但是,并不是所有的斑岩铜矿都形成于火山弧环境,且有俯冲洋壳熔体的参与。例如有些斑岩铜矿的成矿作用和板块俯冲作用有明显的时间差,差值可达几千万年。早在 1978 年, Hollister 就认为板块俯冲带不是斑岩铜矿形成的必要条件,斑岩母岩浆不一定来自洋壳在俯冲带的部分熔融作用,只要在下地壳或上地幔存在一个部分熔融带,并有深断裂带切穿这个部分熔融带,就可形成斑岩体。

<sup>①</sup> 新疆维吾尔自治区人民政府国家 305 项目办公室. 1990. 博罗霍洛远景成矿区地物化探综合研究及找矿靶区圈定, 专题编号 IV<sub>7</sub>

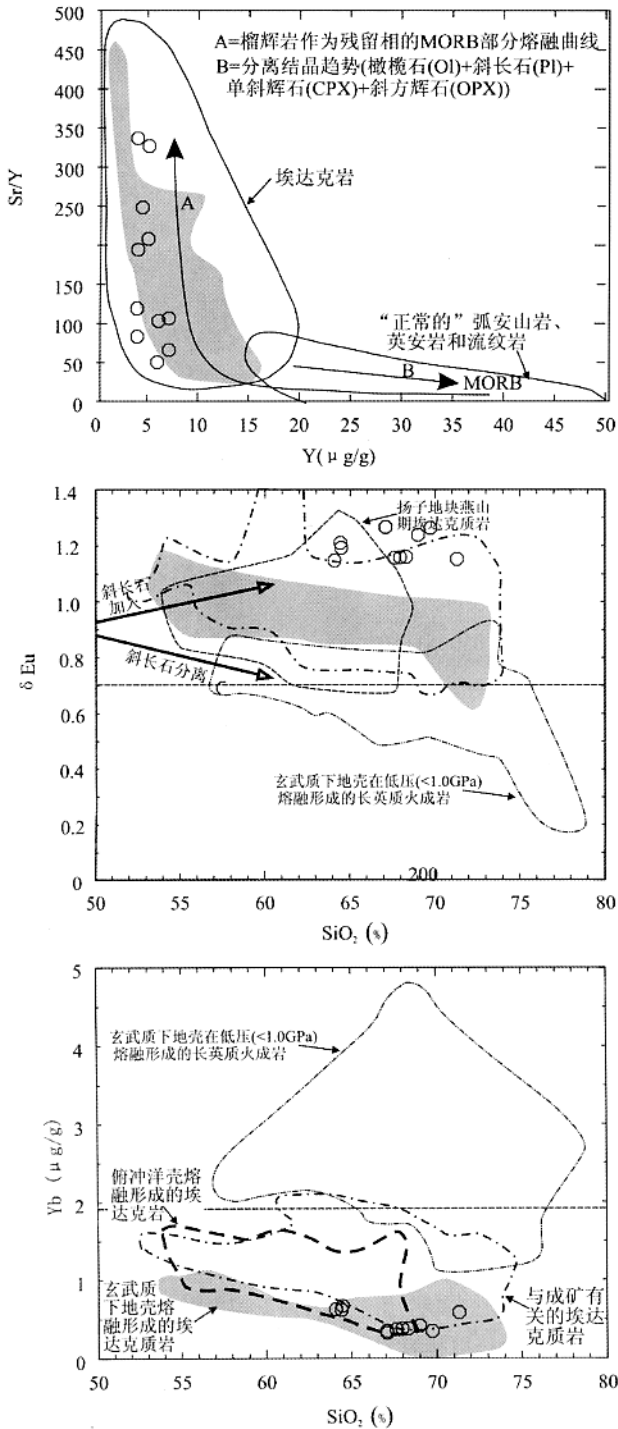


图7 西天山与 Cu、Ag 成矿有关的埃达克质岩石微量元素图解 (图中空心园点为本矿区样品)

Fig.7 The diagram of adakitic rocks related with Cu, Ag mineralization in western Tianshan

斑岩的物质也不一定来自经过初始富集的洋壳,如美国西南的亚利桑那州斑岩矿床,该矿床形成于大陆边缘弧环境,但是该矿床与俯冲流体交代的地幔楔或俯冲洋壳熔融形成的岩浆没有直接联系,而是来自地幔楔的玄武质岩浆的

底侵作用和增厚古老下地壳的熔融控制了成矿斑岩的形成,成矿斑岩的岩浆主要起源于下地壳玄武质岩石的熔融。Thiéblemont *et al.* (1997) 认为一些与 Cu-Au-Mo 矿床有关的埃达克质岩石形成于板内环境。

西天山与 Cu、Ag 成矿有关的埃达克质石英钠长斑岩与上述特点相似,其同位素年龄表明这些岩石形成于晚古生代末期的二叠纪,此时该区已进入造山运动的后碰撞阶段(韩宝福,1999; Zhao *et al.*, 2000)。碰撞导致的增厚岩石圈地幔部分因密度大可能发生拆沉,构造体制从碰撞挤压转变为伸展、拉张,热的软流圈地幔物质上涌,地幔岩浆上升到壳幔界面发生底侵作用,越来越多的研究表明本区在晚古生代发生了底侵作用(韩宝福等,1999; 熊小林等,2001)。底侵作用导致地壳增厚,使得莫霍面变得复杂化,形成壳幔混合层、壳幔过渡带。例如,西天山地区的地球物理资料揭示其地壳厚达 52~62km,平均 52km(贺日政等,2001),壳幔间由 7~8 个薄层叠合而成,厚 2~3km(赵俊猛等,2001)。这种构造体制转折造成的壳幔结构特点为壳幔的强烈相互作用、下地壳发生熔融形成埃达克质岩浆形成提供了充足的热源、深源成矿元素 Cu、Au 和大规模流体、挥发分。

#### 5.1.2 相似的主量、微量元素组成

与世界其它地区与 Cu-Au 等金属成矿有关的埃达克岩相比较,莫斯早特铜矿床的埃达克质石英钠长斑岩有类似的主量、微量元素组成,且都与埃达克岩或埃达克质岩以及玄武质岩石在高温高压条件下的熔体成分类似(图 6 和图 7)。

### 5.2 埃达克质岩浆体系的物理化学特点

#### 5.2.1 较高的温度和压力

无论是俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩,还是增厚的玄武质下地壳熔融形成的埃达克质岩石,它们都是高压(1.2~4.0GPa)、高温(850~1150°C)岩浆作用的产物。一些热液和斑岩铜矿中流体包裹体研究表明,其均一化温度可达到 600~900°C(如菲律宾的 Dinkidi 斑岩铜金矿床)。这些高温包裹体的存在,暗示这些矿床形成可能与高温的岩浆有关,在高温条件下形成的岩浆可能有利于 Cu-Au-Fe 等成矿元素的迁移。

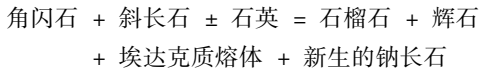
Khitarov *et al.* (1982) 发现在 700~900°C 时, Pb、Zn、Cu 在熔体中的含量与压力关系密切。Urabe(1987)通过实验发现,一些金属元素在蒸汽(相当于流体)与熔体之间的分配系数随着压力的增大而显著减小,即压力越高金属越容易在熔体而不是流体中存在。由于 H<sub>2</sub>O 在熔体中的较高溶解性,在地壳深处的较高压力环境中,与熔体共生流体中 H<sub>2</sub>O 的质量百分数很小,但是在地壳浅处的低压环境中, H<sub>2</sub>O 将从熔体中出溶并成为流体中的主体。在低岩浆压力条件下,由于压力的释放,岩浆流体将大规模出溶,一些金属元素如 Cu 等将进入到岩浆流体中而被带走。由于埃达克质岩浆形成于高压(1.2~4.0GPa)的条件下,因此,高压下形成的埃达克质岩浆不仅有很强的携带成矿物质的能力,而且很容易将其



从深部运送到浅处。

### 5.2.2 富挥发分的流体

在火山弧环境中,洋壳在俯冲过程中释放出大量流体或发生熔融形成埃达克质岩浆,这些流体或岩浆对成矿物质具有富集作用而形成 Cu-Au 等金属矿床。但在下地壳环境中,流体将通过埃达克质岩浆的形成而相伴产生:



在上述反应中,角闪石在高压(1.2~4.0GPa)、高温(850~1150℃)条件下的分解将产生大量的富挥发分的流体,即下地壳玄武质岩石在向榴辉岩转变的过程中将释放出大量的流体,这些流体不仅对产生埃达克质岩浆非常有利,而且对 Cu-Au 等金属的富集也非常有利。硅酸岩体系实验资料表明,在较高温度、压力下,溶液中主要阴离子是 Cl、OH、Au、Cu 主要与挥发分特别是 Cl 形成可溶性配合物而富集于流体中。Cl 的流体/熔体分配系数为 10~100(Killinc, 1972),Cu 的流体/熔体分配系数为 0.1~50 之间(Candela, 1984)。当 Cl 的分配系数很大时,形成体系的二次沸腾(这在大型-超大型斑岩 Cu 矿中很常见)使成矿元素在残余熔体中浓度停止增加,甚至降低,而大量进入挥发相,用下式可描述 Cu、Au 等成矿元素在上述条件下的行为(Zhao *et al.*, 2003b):

$$A_{cu} = M_{cu} \int_{f_1}^{f_2} (f_1 - f_2) dF$$

式中  $A_{cu}$  是活动的可供成矿的 Cu 的量,  $M_{cu}$  是熔体中 Cu 的总量,  $f_1$  和  $f_2$  分别是理想的 Raleigh 分离比例和由于挥发相逸出而产生实际分离的比例。富含挥发分的熔体可形成富 Cu 等成矿元素的岩浆挥发相 MVP,从硅酸盐熔体中被“清扫”出而达到富集。如上述,莫斯早特铜矿床的埃达克质石英钠长斑岩富 F、Cl、I 等挥发分,为 Cu、Ag 等富集成矿创造了条件。但是,在薄(<40km)地壳环境和低温(<850℃)条件下,角闪石将处于稳定区,产生的流体非常有限,不利于金属矿床的形成。

### 5.2.3 高氧逸度和岩浆的快速上升

俯冲带上方的岩石圈地幔比其它地幔区更为氧化。在俯冲结束及其后阶段构造环境所形成的岩浆是高氧化的(Sillitoe, 1997),在此阶段形成的埃达克质岩浆应具有高氧逸度。在高氧逸度( $f_{O_2}$ )的岩浆中, Cu 的 S 配合物不稳定,难以形成不混溶的 Cu 硫化物熔体,因而可保留在残留熔体中。另一方面, S 配合物的不稳定,使 S 呈  $SO_2$  进入挥发相,进而形成富挥发分和亲 Cu 元素的岩浆热液流体,抑制岩浆体系的 S 达到饱和。在恒温条件下,随  $f_{O_2}$  增加,溶解的硫化物( $S_2^{2-}$ )减少,硫酸盐( $SO_4^{2-}$ )增加,可最大程度地限制 Cu 进入硫化物相而被分离。此外, Cu 为变价元素,高  $f_{O_2}$  有利于  $Cu^{2+}$  在岩浆结晶过程中保留在残留熔体相,当体系发生二次沸腾时则易进入气相(特别是富 Cl 的相)。

埃达克质岩石一般不可能由岩浆分离结晶作用形成。与 Cu-Au 等金属成矿有关的埃达克质岩都显示高的  $\delta Eu$

( $\delta Eu > 1$ ),莫斯早特铜矿床的埃达克质石英钠长斑岩也不例外,且随  $SiO_2$  的增长  $\delta Eu$  变化不大(图7)。由于玄武质岩石熔融形成的埃达克质岩浆起源于石榴石的稳定区,斜长石为主要的熔融相,因此,埃达克质岩石所表现出来的正铜异常-弱负钼异常实际上反映了其初始岩浆(即没有分异的岩浆)的特征。这表明,与 Cu-Au 等金属成矿有关的埃达克质岩浆并没有经过充分的演化,而很可能为快速上升并结晶的产物。Sillitoe(1972)认为低分异的岩浆有利于斑岩 Cu-Au-Mo 矿床的形成。因此,快速上升、分异弱的埃达克质岩浆可能有利于成矿物质从深部迁移到浅部,压力的迅速降低使得融体中 Cu 等成矿元素分配系数迅速降低而析出成矿。

## References

- Candela P A, Holland H D. 1984. The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 373-380
- Defant M J, Drummond M S. 1993. Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21: 547-550
- Defant M J and Kepezhinskis P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS*, 82:62-69
- Han BF, He GQ, Wang SG. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating implications for basement of the Junggar basin. *Science in China (Series D)*, 42: 113-119
- He RZ, Gao R, Li QS, Guan Y and Li PW. 2001. Corridor gravity fields and crustal density structures in Tianshan( Dushanzi )-West Kunlun ( Quanshuigou ) GGT. *Acta Geoscientia Sinica*, 22: 553-558( in Chinese with English abstract )
- Hedenduij J W, Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370:519-527
- Hou ZQ, Mo XX, Gao YF, Qu XM and Meng XJ. 2003. Adakite, a possible host rock for porphyry copper deposit: Case studies of porphyry copper belts in Tibetan plateau and in northern Chile. *Mineral Deposits*, 22:1-12 ( in Chinese with English abstract )
- Khitarov N I, Malinin S P, Lebedev Y B, *et al.* 1982. The distribution of Zn, Cu, Pb, Mo between a fluid phase and a silicate melt of granitic composition at high temperatures and pressures. *Geochemistry International*, 19:123-136
- Killinc J A, Burnham C W. 1972. Partitioning of chloride between a silicate melt and coexisting aqueous phase from 2 to 8 kbar. *Economic Geology*, 67: 664-670
- Li HQ, Xie CF, Chang HL *et al.* 1998. Study on metallogenetic chronology of nonferrous and precious metallic ore deposits in north Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House, 195-201 ( in Chinese with English abstract )
- Mungall J E. 2002. Rostering the mantle: slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30: 915-918
- Oyarzun R, Rquez M, Lillo A J, *et al.* 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic

- versus normal calc-alkaline magmatism. *Mineralium Deposits*, 36: 794 – 798
- Qu XM, Hou ZQ and Li YG. 2002. Ore-bearing adakites found in the Gangdese collision-orogenic belt. *Mineral Deposits*, 21( suppl. ), 215 – 218( in Chinese with English abstract )
- Sajona F G, Maury R C. 1998. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines. *CR ACAD SCI II A*, 326: 27 – 34
- Sillitoe R H. 1997. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region. *Australian Journal of Earth Science*, 44: 373 – 388
- Sillitoe R H. 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 67: 184 – 197
- Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J L. 1997. Epithermal and porphyry deposits: the adakite connection. *CR ACAD SCI II A*, 325: 103 – 109
- Urabe T. 1987. The effect of pressure on the partitioning ratios of lead and Zinc between vapor and rhyolite melts. *Economic Geology*, 82: 1049 – 1052
- Wang Q, Zhao ZH, Xiong XL, Xu JF. 2001. Crustal growth and the melting of mafic lower crust: evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates in Anhui province, China. *Geochimica*, 30: 3543 – 362 ( in Chinese with English abstract )
- Xu JF, Wang Q, Zhao ZH and Xiong XL. 2001. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of the magma with HREE and Y depletion. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 576 – 584( in Chinese with English abstract )
- Zhao JM, Liu GD, Lu ZX, Zhang XK and Zhao GZ. 2001. Crust-mantle transitional zone of Tianshan orogenic belt and Junggar basin and its tectodynamic implication. *Science in China( Series D )*, 9: 824 – 836
- Zhang Q, Wang Y, Qian Q, Yang JH, Wang YL, Zhao TP and Guo H, 2001, The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the Mesozoic adakites in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17: 236 – 244 ( in Chinese with English abstract )
- Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL, Mei HJ and Wang YX. 2000. Geochemistry of alkali-rich igneous rocks of Northern Xinjiang and its implication for geodynamics, *Acta Geologica Sinica*, 74: 321 – 328
- Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL, Mei HJ, Wang YX. 2003a.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronological study of Late Paleozoic volcanic-hypabyssal igneous rocks in western Tianshan, Xinjiang. *Geochimica*, 32: 317 – 327 ( in Chinese with English abstract )
- Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q, Bao ZW, Zhang YQ, Xie YW and Ren SK. 2003b. Alkali-rich igneous rocks and related Au and Cu large and superlarge deposits in China, *Science in China( Series D )*, 46 ( Suppl. ):1 – 13

### 附中文参考文献

- 韩宝福,何国琦,王式光. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔基底性质, *中国科学*, 29, 16 – 21
- 贺日政,高锐,李秋生,管焯,李朋武. 2001. 新疆天山(独山子)-西昆仑(泉水沟)地学断面地震与重力联合反演地壳构造特征, *地球学报*, 22: 553 – 558
- 侯增谦,莫宣学,高永丰,曲晓明,孟祥金. 2003. 埃达克岩:斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩-以西藏和智利斑岩铜矿为例, *矿床地质*, 22: 1 – 12
- 李华芹,谢才富,常海量等. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学,北京:地质出版社, 195 – 201
- 曲晓明,侯增谦,李佑国. 2002. 冈底斯造山带发现埃达克岩, *矿床地质*, 21(增刊), 215 – 218
- 王强,赵振华,熊小林,许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融:来自沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. *地球化学*, 30: 353 – 362
- 许继峰,王强,徐义刚,赵振华,熊小林. 2001. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学:亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制. *岩石学报*, 17: 576 – 584
- 张旗,王焰,钱青,杨进辉,王元龙,赵太平,郭光军. 2001. 中国东部中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. *岩石学报*, 17: 236 – 244
- 赵俊猛. 刘国栋,卢造勋等. 2001. 天山造山带与准噶尔盆地壳幔过渡带及其动力学含义. *中国科学( D 辑 )*, 31: 272 – 282
- 赵振华,白正华,熊小林,梅厚均,王一先. 2003. 西天山北部晚古生代火山-浅侵位岩浆岩  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素定年, *地球化学*, 32: 317 – 327