

# 金堆城斑岩钼矿床 地质地球化学特征及成因<sup>①</sup>

徐兆文<sup>②</sup> 杨荣勇 陆现彩 任启江

(南京大学地球科学系, 南京, 210093)

**摘要** 金堆城斑岩钼矿是东秦岭超大型钼矿带内最重要钼矿床之一, 该矿床的形成与中生代花岗斑岩有关, 且岩体顶部发育了典型的钾长石-石英条纹岩。区内含脉率和裂隙发育程度可作为矿化强度的一个重要标志。成矿流体研究表明主要成矿阶段温度为 $200^{\circ}\text{C}$ ±; 成矿流体含盐度具有双配分模式特征, 盐度介于 $27.5\sim 42.5\text{ }w(\text{NaCl})\text{ eq}\%$ 和 $0.61\sim 17\text{ }w(\text{NaCl})\%$ 两个区间之内; 成矿流体成分以富 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、贫 $\text{F}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 为特征。稳定同位素研究表明 $\delta^{34}\text{S}\%$ 介于 $1.23\sim 4.34$ 之间;  $\delta^{18}\text{O}\%$ 介于 $11.83\sim 8.59$ 之间,  $\delta\text{D}\%$ 介于 $-57.22\sim -120.69$ 之间; 稳定同位素数值说明成矿热液早期以岩浆热液为主, 晚期有雨水加入。

**关键词** 斑岩钼矿床, 地质地球化学, 成因, 陕西省金堆城

金堆城斑岩钼矿床位于陕西省华县境内, 处于华北地台南缘, 黑沟-栾川断裂北侧, 南邻北秦岭造山带, 是东秦岭超大型钼矿带内最重要钼矿床之一, 其特点是规模大、矿石品位低<sup>[1][2]</sup>。本文借助于含矿裂隙、成矿流体和稳定同位素研究揭示金堆城斑岩钼矿地质地球化学特征及矿床成因。

## 1 矿区地质

矿区内出露地层为下中元古界熊耳群( $\text{Pt}_{2-1}$ ), 岩性主要为安山-橄榄安粗岩类, 以富钾质为特征, 主要分布于老牛山岩体东南部; 上中元古界官道口群高山河组( $\text{Pt}_{2-2}^1$ ), 岩性主要为石英砂岩、泥岩和板岩, 分布于矿区南部, 呈不整合盖于熊耳群火山岩之上。矿区内褶皱构造为金堆城背斜, 轴向大致呈NEE向展布, 由熊耳群火山岩构成; 断裂构造为NE—NEE和

① 本文为国家自然科学基金(编号: 49070101)和南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室资助项目

② 第一作者简介: 徐兆文, 男, 1950年3月生。副教授, 长期从事矿床学研究。

收稿日期 1998-08-30 改回日期 1998-10-12

NW—NNW 向,且矿区内节理构造发育,多为后期各种脉体所充填。矿区内火成岩为加里东期辉绿岩,燕山期改造型花岗岩(老牛山岩体)和同熔型钾长花岗斑岩(金堆城岩体)及脉岩(图 1)。

## 2 与矿化有关岩体特征

### 2.1 矿化岩体地质特征

与矿化有关的岩体是金堆城钾长花岗斑岩,该岩体呈岩筒状,地表长 450 m,宽 150 m,面积约 0.067 km<sup>2</sup>;钻孔证实深部长 2000 m,宽 450 m,面积约 0.35 km<sup>2</sup>。岩体为北宽南窄,向北西延伸。岩体侵入于下中元古界熊耳群火山岩中。岩石的主要矿物为石英、钾长石、斜长石、黑云母,且斜长石几乎全部被绢云母和白云母交代;副矿物主要为磁铁矿、磷灰石、锆石、黄铁矿、辉钼矿,以富磁铁矿为特征<sup>[3]</sup>。岩石结构为斑状结构,岩石蚀变强烈,主要为钾长石化、黑云母化、青盘岩化、硅化、绢云母化、黄铁绢英岩化,其中钾长石化最强烈<sup>[1]</sup>。且在岩体顶部或围岩接触部位发育了典型的钾长石-石英条纹岩,此特征可与美国西部超大型斑岩钼矿相对比<sup>[7,8]</sup>。

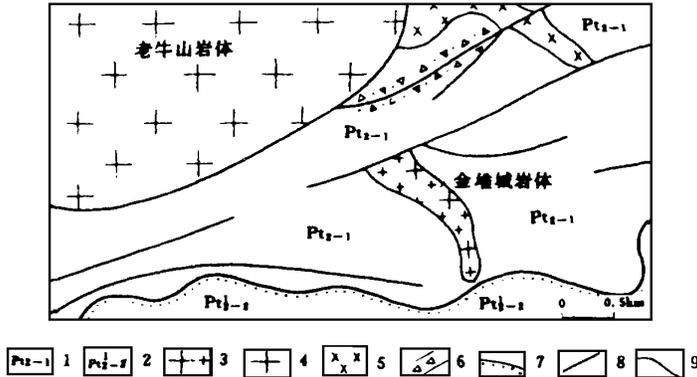


图 1 金堆城斑岩钼矿床地质简图(据聂凤军改制,1984)

Fig. 1 Sketch geological map of porphyry molybdenum deposit in Jindoucheng

1. 熊耳群 2. 高山河组 3. 花岗斑岩 4. 老牛山岩体 5. 辉绿岩脉 6. 破碎带
7. 不整合接触 8. 断层 9. 地质界线

### 2.2 矿化岩体地球化学特征及形成时代

岩石化学分析表明金堆城钾长花岗斑岩属于碱-钙碱系列岩类,岩石以高硅富碱为特征  $w(K_2O + Na_2O) = 8.24\% \sim 10.07\%$ ,  $K_2O/Na_2O = 1.51 \sim 2.55$ , DI 值比较高, SI 值偏低;微量元素分析表明岩体中 Li、Be、Sr、Co、Ni、Cl 偏低,而 Ba、Cr、Cu、Pb、Zn、Mo、F 偏高;稀土元素分析表明岩体中  $\Sigma REE = (32.88 \sim 84.31) \times 10^{-6}$ , 配分模式呈右倾平滑型,属于轻稀土富集;  $\delta Eu$

= 0.74 左右, Eu 属于中度亏损; La/Yb= 8.51~ 10.43。上述研究表明金堆城钾长花岗斑岩分异演化程度较高。

金堆城钾长花岗斑岩 Rb-Sr 同位素年龄值为 132 Ma(严阵等, 1983)<sup>[4]</sup>, (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> 为 0.7139, 与研究区太华群的初始比值相近<sup>[1]</sup>。钾长花岗斑岩中石英斑晶 δ<sup>18</sup>O ‰ 值介于 8.55~ 10.28 之间, 均值为 9.42 ‰。同位素资料研究表明成岩物质主要来自下部地壳。

## 3 矿床地质

### 3.1 矿体产状及规模

矿体呈一连续的扁豆体, 沿 325°~ 145°方向延伸, 延深 700 m, 向 ES 方向翘起尖灭。地表出露长度约 1600 m 左右, 钻孔控制长度约 2200 m, 厚度约 600~ 700 m。矿体赋存于花岗斑岩和与围岩接触带内, 矿化最强的地段为花岗斑岩或邻近花岗斑岩地段的围岩, 远离岩体矿化减弱。

### 3.2 矿石类型、结构构造及矿物组合

金堆城斑岩钼矿床矿石类型为斑岩型, 矿石结构为粒状结构, 矿石构造为浸染状—细脉状、网脉状、脉状。

矿石中主要矿石矿物为辉钼矿和黄铁矿, 次要矿石矿物为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和磁铁矿; 脉石矿物主要为钾长石、斜长石、石英、黑云母, 次要矿物为绢云母、白云母、萤石、绿帘石、方解石等。

### 3.3 矿化期矿化阶段

金堆城矿区热液活动大致可以分为早、中、晚三期, 早期为无矿化的钾长石-石英脉; 中期为成矿阶段, 主要为硫化物-石英、硫化物-萤石-钾长石-石英脉; 晚期为硫化物-方解石-石英、黄铁矿-沸石-石英脉(表 1)。

## 4 金堆城斑岩钼矿床含矿裂隙研究

区内含矿裂隙比较发育, 据矿区露天采场内 210 个观察点, 近 23 000 条裂隙观察和描述, 笔者发现含矿裂隙与矿化存在密切关系<sup>[5]</sup>。

### 4.1 含矿裂隙分布规律及相互关系

金堆城矿区裂隙主要为 325°~ 340°、310°~ 290°、220°~ 250°、210°~ 195° 四组, 以 325°~ 340°裂隙为主, 次为 310°~ 290°。成矿前、成矿期、成矿后裂隙产状变化不大。野外统计表明金堆城矿区露天采场平均每平方米内含矿裂隙为 44 条左右, 估计整个露天采场各种裂隙至少在 200 万条左右。经室内各种参数统计计算, 并用计算机绘制出钼品位、含脉密度、含脉率等值线。

表 1 金堆城斑岩钼矿床围岩蚀变及矿化期矿化阶段特征表

Table 1 Characteristics of alteration, mineralization period and mineralization stages in Jin duicheng porphyry molybdenum deposit

矿化期	蚀变类型	矿化阶段	特 征
早 期	角岩化		安山岩中铁镁矿物蚀变为黑云母、斜长石。
	钾长石化 石英化 黑云母化	钾长石-石英阶段,基本上 无矿化	以钾长石-石英、钾长石、石英细脉充填为主。
中 期		硫化物-石英阶段	①辉钼矿-石英、辉钼矿-黄铁矿-黄铁矿-石英、辉钼矿-石英-黄铁矿细脉交代充填。 ②云英岩化呈团块状集合体交代。 ③石英主要表现为粒间交代,硫化物呈浸染状,黑云母分布于脉壁两侧。
	硅化		
	钾长石化 硫化物矿化		①黄铁矿-辉钼矿-黄铜矿-(闪锌矿或方铅矿)-萤石-钾长石-石英细脉。
	萤石化 绢(白)云母化	硫化物-萤石-钾长石-石英 阶段	②黄铁矿-辉钼矿-黄铁矿-(闪锌矿或方铅矿)-萤石-绿帘石-钾长石-石英细脉。 ③闪锌矿-方铅矿-石英-萤石细脉。 ④辉钼矿-萤石-石英细脉。
晚 期	硅化		①黄铁矿-方解石-石英细脉。
	方解石化 硫化物矿化	硫化物-方解石-石英阶段	②黄铁矿-绿帘石-方解石-石英细脉。
	沸石化		
	绿帘石化 绿泥石化	黄铁矿-沸石-石英阶段	石英-沸石-黄铁矿,石英-黄铁矿,黄铁矿,石英细脉。

金堆城矿区钼品位等值线图(图 2-A),总含脉率等值线图(图 2-B)和总裂隙密度等值线图(图 2-C)对比研究,可以看出矿区内总含脉率等值线轮廓与钼品位等值线轮廓基本相似,两者极值区都位于图的东缘(露天采场的东南端,花岗岩体主体露头附近),而总裂隙密度等值线轮廓与钼品位等值线相差甚远,总裂隙密度等值线极值区接近图的中心部位,但是总裂隙密度等值线图型产状与金堆城斑岩钼矿床矿体产状大体相近。因此矿区内含脉密度和含脉率全面反映了裂隙与矿化和矿体之间的关系,特别是含脉率与含矿流体的运移直接有关,并且控制了矿石品位的变化。

#### 4.2 含矿裂隙与成矿关系

金堆城钼矿床含矿裂隙系统研究表明,①研究区含矿裂隙系统形成于以挤压为主的构造环境中,如用简单的板块碰撞-削减模式尚难解释该区中生代构造形式,它可能与壳内俯冲或 A 型俯冲有关(胡受奚, 1985; 贾承造, 1986),②含矿裂隙主要受两种因素控制,一是岩浆侵入的压力和热应力;二是岩浆上侵的部位,往往也是构造活动最强烈的部位因此也是裂隙最发育的部位;③成矿期的构造活动对含矿裂隙的形成起了重要作用,矿区内各阶段矿物和有用组份分布,取决于成矿期各成矿阶段裂隙的布局变化,因而主导的原生分带应属于脉动分带。金堆城花岗岩斑岩周围是高含脉率和高渗透率区,这一地区不仅有利于岩浆上升,同时也造成地下水与热液对流,导致成矿流体温度、盐度降低,使成矿物质迅速沉淀,形成充填式矿床。

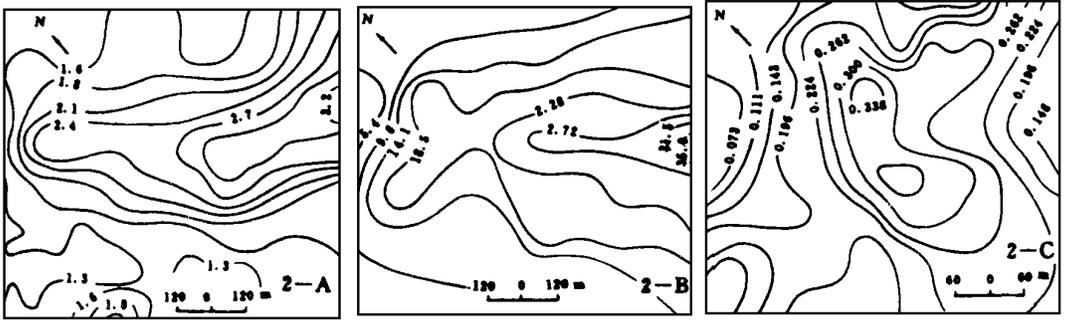


图 2 金堆城斑岩钼矿床钼品位、裂隙密度和含脉率等值线图

Fig. 2 Isopleth diagram of molybdenum tenor, crack density and fissure abundance in Jinducheng porphyry molybdenum deposit

2-A 矿区钼品位等值线图 2-B 矿区总含脉率等值线图 2-C 矿区总裂隙等值线图

$$\text{裂隙密度}(n) = \frac{\text{一定矿化期间内形成的裂隙总长度}}{50 \times 50 \text{ cm}^2} (\text{cm}^{-1})$$

$$\text{含脉率}(k) = \frac{\text{裂隙长度} \times \text{宽度}}{50 \times 50 \text{ cm}^2} \times 100\%$$

## 5 金堆城斑岩钼矿床成矿流体研究

### 5.1 流体包裹体特征

金堆城斑岩钼矿床流体包裹体形态主要呈椭圆形、圆形, 次为不规则形; 气液比为 1/5~1/10, 1/10 占多数; 颜色主要为无色, 次为褐色、浅褐色、黑色等; 包裹体直径为 3~30 μm, 主要为 10~20 μm; 包裹体主要呈零星分布, 偶见带状分布<sup>[6]</sup>。

### 5.2 流体包裹体均一温度

金堆城矿区流体包裹体均一化温度为 83~412 °C(图 3), 从图 3 可以看出金堆城矿区流体包裹体均一温度呈现两个峰值区, 其一为 100~170 °C, 其二为 200~230 °C, 但主要集中于 100~290 °C 之间, 且成矿温度为 200 °C 左右, 这一结果明显低于 Henderson 斑岩钼矿床流体包裹体均一温度<sup>[7]</sup>。

### 5.3 流体包裹体含盐度

金堆城斑岩钼矿床流体包裹体含盐度介于  $w(\text{NaCl}) \text{ eq}\% 0.61 \sim 42.5$  之间, 具有典型的双配分模式特征(图 4), 其一含盐度介于  $w(\text{NaCl}) \text{ eq}\% 0.61 \sim 17$  之间, 其二含盐度介于  $w(\text{NaCl}) \text{ eq}\% 27.5 \sim 42.5$  之间, 主要成矿阶段介于  $w(\text{NaCl}) \text{ eq}\% 0.61 \sim 17$  之间。其结果明显低于美国 Henderson 斑岩钼矿床流体包裹体含盐度<sup>[5, 7]</sup>。

### 5.4 流体包裹体成分研究

金堆城斑岩钼矿床流体包裹体成分分析显示, 包裹体中富  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  贫  $\text{F}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、

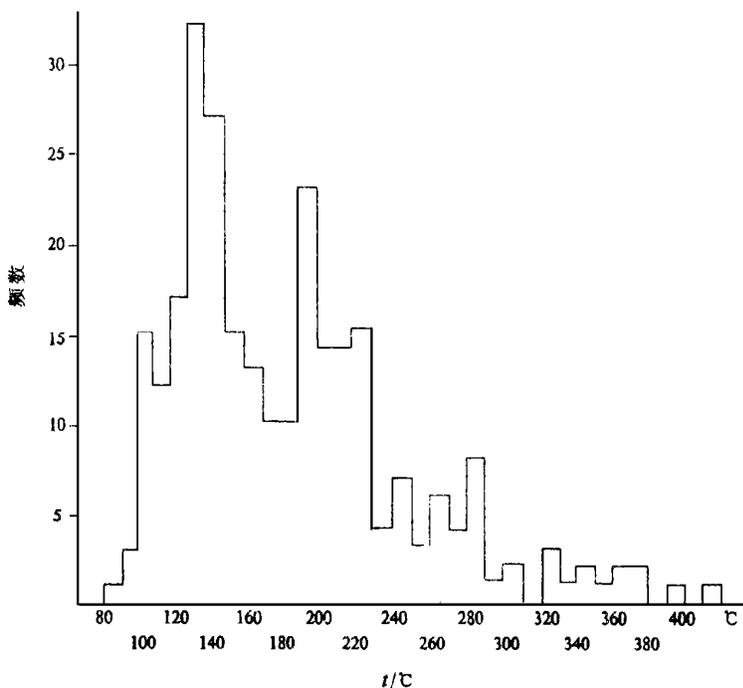


图 3 金堆城斑岩钼矿床流体包裹体均一温度频数直方图

Fig. 3 Frequency histogram of temperature of fluid inclusions in Jinduicheng porphyry molybdenum deposit

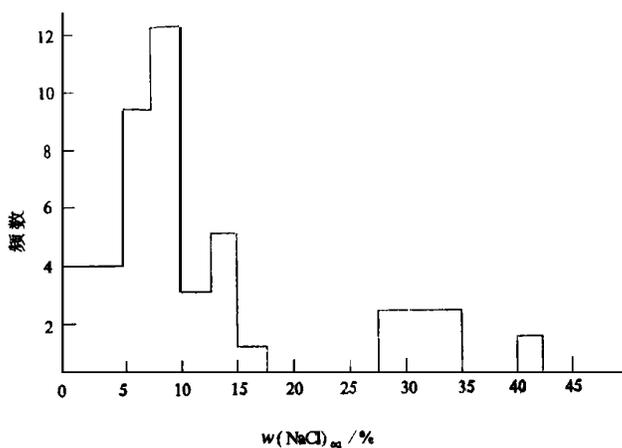


图 4 金堆城斑岩钼矿床含盐度频数直方图

Fig. 4 Frequency histogram of salinities of fluid inclusions in Jinduicheng porphyry molybdenum deposit

$\text{HCO}_3^-$ ,  $(\text{F}^- / \text{Cl}^-) / (\text{K}^+ / \text{Na}^+)$ 、 $\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{2-}$  比值低(图 5)。波谱分析显示包裹体中  $\text{CO}_2$  含量高<sup>[5]</sup>。

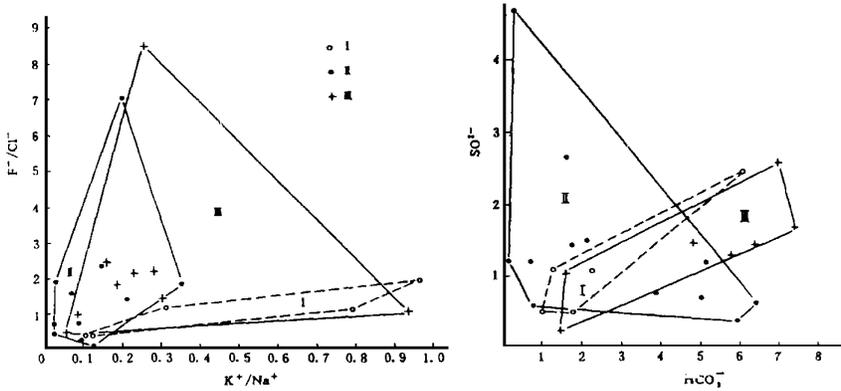


图5 金堆城斑岩钼矿床流体包裹体( $F^-/Cl^-$ )-( $K^+/Na^+$ )和 $SO_4^{2-}-HCO_3^-$ 图

Fig. 5  $F^-/Cl^-$  versus  $K^+/Na^+$  and  $SO_4^{2-}$  versus  $HCO_3^-$  of fluid inclusions' composition in Jinduicheng porphyry molybdenum deposit

I 成矿前 II 成矿期 III 成矿后

## 6 金堆城斑岩钼矿床稳定同位素研究

### 6.1 硫同位素

金堆城斑岩钼矿床硫同位素显示,辉钼矿与黄铁矿中的 $\delta^{34}S$ ‰组成基本一致,分布范围介于1.23~4.34之间,均值为3.43‰,具有明显的塔式分布特征(图6),说明硫的沉淀过程,其物理化学条件处在一个相对稳定的环境下。并且黄铁矿和辉钼矿 $\delta^{34}S_{\Sigma S} = 5$ ‰,证明金堆城斑岩钼矿床的硫主要来自岩浆。

### 6.2 氢、氧同位素

表2为金堆城斑岩钼矿床氢、氧同位素组成,从表中可以看出 $\delta^{18}O$ ‰介于11.83~8.59之间,均值为9.54‰,其中成矿前 $\delta^{18}O$ ‰介于10.03~8.99之间,成矿期 $\delta^{18}O$ ‰介于11.83~8.77之间,成矿后 $\delta^{18}O$ ‰介于9.87~8.59之间; $\delta^{18}O_{H_2O}$ ‰介于7.77~ - 10.12,均值为-1.03‰,其中成矿前 $\delta^{18}O_{H_2O}$ ‰介于7.77~3.16之间,成矿期 $\delta^{18}O_{H_2O}$ ‰介于1.83~3.03之间,成矿后 $\delta^{18}O_{H_2O}$ ‰介于1.85~ - 10.12之间;金堆城斑岩钼矿床氢同位素 $\delta D$ ‰介于-57.22~ - 120.69之间,均值为-82.83‰,其中成矿前 $\delta D$ ‰介于-57.22~ - 96.70之间,成矿期 $\delta D$ ‰介于-79.00~ - 84.35之间,成矿后 $\delta D$ ‰介于-79.79~ - 120.69之间。上述研究表明金堆城斑岩钼矿床从成矿前→成矿期→成矿后 $\delta^{18}O_{H_2O}$ ‰、 $\delta D$ ‰值有逐渐降低的趋势,而且成矿前或成矿后, $\delta D$ ‰值变化范围较大,说明从成矿前至成矿后,雨水的混入量不断增加,说明成矿热液早期主要来自岩浆热液,晚期伴有大量雨水(图7)。

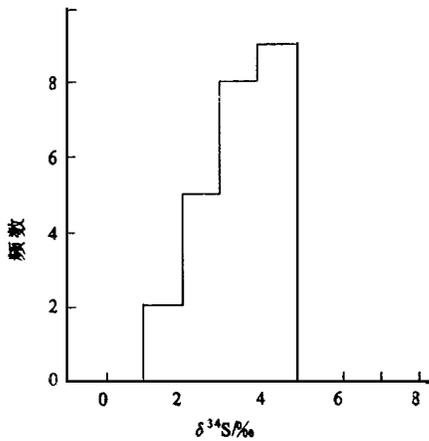


图 6 金堆城斑岩钼矿床硫同位素组成

Fig. 6 Composition of sulfur isotopes in Jinduicheng porphyry molybdenum deposit (部分资料来自孙晓明)

## 7 矿床成因

详细的野外工作和室内分析研究证明, 金堆城斑岩钼矿床的形成与  $f_{\text{CO}_2}$ 、 $f_{\text{HF}}$ 、 $f_{\text{O}_2}$  值高及富钼的花岗岩热液体系有关。花岗岩浆在侵入固结成岩的同时也使上覆火山岩蚀变为致密块状角岩, 由于晚期岩浆热液继续上移, 致使上部已固结的壳体破碎, 导致晚期岩浆热液发生减压沸腾而转变成富钼的成矿流体。在晚期岩浆热液减压沸腾过程中引起了花岗斑岩云英岩化和上覆角岩黑云母化及富钼的成矿流体在裂隙中运移。当雨水大量混入时, 富钼的成矿流体温度和盐度随之降低, 造成了富钼成矿流体沿裂隙充填形成钼矿床<sup>[8,9]</sup>。

表 2 金堆城斑岩钼矿床氢、氧同位素组成

Table. 2 Composition of H and O isotopes in Jinduicheng porphyry molybdenum deposit

序号	矿物	矿化期	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta\text{D}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	资料来源
			‰			
1	石英		10.03	-96.70	7.77	本文
2	石英	成	8.99		6.73	本文
3	石英		9.03	-66.14	6.77	本文
4	石英	矿	9.62	-57.22	7.36	本文
5	石英		9.69	-96.58	7.27	本文
6	石英	前	9.70	-64.97	3.16	孙晓明
7	石英		9.87		3.33	孙晓明
8	石英		9.77		3.23	孙晓明
9	石英		8.96		-1.55	孙晓明
10	石英		8.98		-1.53	孙晓明
11	石英	成	9.96		-1.90	本文
12	石英		8.69		1.83	本文
13	石英	矿	11.83	-84.35	1.66	本文
14	石英		9.03		-1.48	孙晓明
15	石英	期	10.39	-79.00	-3.03	本文
16	石英		8.77		-1.74	孙晓明
17	石英		9.74		-1.56	本文
18	石英		9.36	-120.69	-10.12	孙晓明
19	石英	成	8.59		-6.12	本文
20	石英	矿	9.41		-5.13	本文
21	石英	后	9.82		-5.59	本文
22	石英		9.87	-79.79	1.85	本文

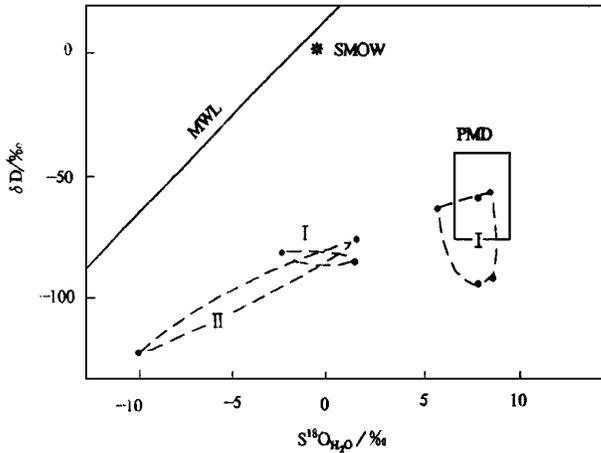


图7 金堆城斑岩钼矿床  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}-\delta\text{D}$  图

Fig. 7  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  versus  $\delta\text{D}$  diagram in Jinduicheng porphyry molybdenum deposit

MWL 天水演化线 SMOW 标准大洋水 PMW 原生岩浆水

I 成矿前 II 成矿期 III 成矿后

## 参考文献

1. 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 等. 华北板块与华南板块拼合带地质与成矿. 南京大学出版社, 1988
2. 任启江, 徐兆文, 杨荣勇, 等. 东秦岭超大型钼矿床的形成条件(秦岭造山带学术讨论会论文集). 西北大学出版社, 1991, 261~ 272
3. 徐兆文, 邱检生, 任启江, 等. 河南栾川南部地区与 Mo-W 矿床有关的燕山期花岗岩特征. 岩石学报, 1995, (4): 397~ 408
4. 尚瑞钧, 严阵, 等. 秦巴花岗岩. 中国地质大学出版社, 1988
5. 任启江, 吴俞斌, 武耀城, 等. 陕西金堆城斑岩钼矿含矿裂隙的分布规律与成因. 矿床地质, 1987, (3): 127~ 139
6. 张文淮, 陈紫英. 流体包裹体地质学. 中国地质大学出版社, 1995
7. Richard B Carten, Ennis R Geraghty, Bruce M Walker and Ames R Shannon. Cyclic development of igneous features and their relationship to high-temperature hydrothermal features in the Henderson porphyry molybdenum deposit. Colorado, Econ. Geol. 1988, vol. 85: 266~ 296
8. White W H, Bookstrom A, Kamali R J, Ganster M W, Smith R P, Ranta, D E and Steininger R C. Character and origin of Climax-type molybdenum deposits. Econ. Geol. 1981, vol. 75, 270~ 316
9. Westra G and Keith S B. Classification and genesis of stockwork molybdenum deposits. Econ. Geol. 1981, vol. 76, 864~ 873
10. Carten R B, Walker B M, Geraghty E P and Gunow A j. Comparison of field-based studies of the Henderson porphyry molybdenum deposit, Colorado with experimental and theoretical models of porphyry systems: Canadian Inst. Mining Metallurgy Spec. 1988, vol. 39, 351~ 366

# GEOLOGICAL- GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GENESIS OF THE JINDUICHENG PORPHYRY MOLYBDENUM DEPOSIT, SHANXI PROVINCE

*Xu Zhaowen Yang Rongyong Lu Xianchai Ren Qijiang*

*(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)*

## Abstract

Jinduicheng porphyry molybdenum deposit is one of the most important in the East Qinling Large molybdenum metallogenic belt. The porphyry molybdenum deposit is associated with a Mesozoic granite porphyry. There is potash feldspar-quartz crenulate on the top of the granitic porphyry. In this paper, authors point out that the fissure abundances and developing degree of the fissure are important indicators of mineralization scale. The ore-forming temperature is  $200^{\circ}\text{C} \pm$ . The salinity of mineralizing solutions manifests bimodal distribution pattern with two ranges from 27.5 to  $w(\text{NaCl}) \text{ eq } 42.5\%$  and from 0.61 to  $w(\text{NaCl}) \text{ eq } 17\%$  equiv. The composition of inclusion is characterized by rich in  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and poor  $\text{F}^{-}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ . The data of sulphur, oxygen and hydrogen have  $\delta^{34}\text{S}$  range from 1.25 to 4.34 ‰,  $\delta^{18}\text{O}$  ranges from 11.83 to 8.59 ‰,  $\delta\text{D}$  ranges from -57.22 to -120.69 ‰. These isotopic data suggest that the ore-forming fluids and materials were originated mainly from the magma system. But there entered meteoric water at late stage.

**Key Words** porphyry molybdenum deposit, geochemical characteristics, genesis, Jinduicheng Shanxi Province