

大别山地区沙坪沟斑岩型钼矿床蚀变及矿化特征研究^{*}

任志¹ 周涛发^{1**} 张达玉¹ 袁峰¹ 范裕¹ 李先初² Noel WHITE¹

REN Zhi¹, ZHOU TaoFa^{1**}, ZHANG DaYu¹, YUAN Feng¹, FAN Yu¹, LI XianChu² and Noel WHITE¹

1. 合肥工业大学资源与环境工程学院矿床成因与勘查技术研究中心, 合肥 230009

2. 安徽省地质矿产勘查局 313 地质队, 六安 237271

1. Ore Deposit and Exploration Centre, School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. No. 313 Geological Team, Anhui Bureau of Geology and Mineral Exploration, Lu'an 237271, China

2015-04-07 收稿, 2015-07-15 改回.

Ren Z, Zhou TF, Zhang DY, Yuan F, Fan Y, Li XC and White N. 2015. Characteristics of alteration and mineralization of Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Dabie orogenic belt. Acta Petrologica Sinica, 31(9): 2707–2723

Abstract Shapinggou, the second largest porphyry molybdenum deposit in the world, is located in the Dabie orogenic belt. Prior to this study, only limited geological investigations of the alteration and mineralization had been limiting the features in the deposit were minor, restricting application of these guides to explore and to further study of the metallogenesis of the region. Previous work and our detailed field observations, as well as petrographical, mineralogical and electron micro-probe studies show that the ore-forming processes of the Shapinggou molybdenum deposit involved multiple stages of alteration and mineralization, including potassic, phyllic and propylitic alteration. The phyllic alteration can be further divided into two types depending on whether quartz or sericite is the predominant mineral. The ore-forming stages include quartz-K-feldspar, quartz-sulfide, quartz-sericite and quartz-fluorite-gypsum stages. The characteristics of alteration and mineralization at Shapinggou suggest that the molybdenite began to precipitate during the late quartz-K-feldspar stage reaching a peak during the quartz-sulfide stage. The early quartz-sericite stage also contributed some molybdenum to the ore system. The types of alteration and mineralization are controlled by the varying physical and chemical components of the ore-bearing fluids. The alteration and mineralization characteristics of the deposit are generally similar to the porphyry molybdenum deposits in different tectonic environments in other parts of the world. The ore-forming rocks, alteration types, and mineralization characteristics in Shapinggou deposit are broadly similar to deposits formed in lithospheric thinning, conversion from compression to extension, continental collision, continental rift, island arc and post-orogenic extension environments, but the shape and position of ore body at Shapinggou is different from those at other deposits. The tectonic setting may control the formation and evolution and ore-bearing potential of magma, but the depth of emplacement and the nature of the wall rocks control the alteration and mineralization characteristics of porphyry deposits.

Key words Alteration; Mineralization; Ore-forming stage; Electron probe micro-analyzer; Shapinggou porphyry molybdenum deposit; Dabie orogenic belt

摘 要 沙坪沟钼矿床是大别山地区新近发现的、世界第二大的斑岩型钼矿床。本文在前期以及前人的工作基础上,通过详细的野外地质观察和系统的岩相学、矿相学以及探针测试分析工作,详细研究了沙坪沟钼矿床的蚀变与矿化特征。结果表明,沙坪沟钼矿床的围岩蚀变类型主要有钾硅酸盐化、青磐岩化和绢英岩化,绢英岩化又可细分为以石英为主和以绢云母为主。矿床中产出 16 种脉体类型,根据矿床的脉体类型划分了 4 个成矿阶段: (1) 石英-钾长石阶段; (2) 石英-硫化物阶段; (3) 石英-绢云母阶段; (4) 石英-萤石-石膏阶段。蚀变及矿化特征显示,沙坪沟钼矿床的钼矿化开始于石英-钾长石阶段晚期,结

^{*} 本文受国家自然科学基金项目(41320104003、41172086、41172084、40830426)、中国地质调查局地质调查工作项目(1212011220243、1212011121115、12120114039701)和国家深部专项(SinoProbe-03-02-05)联合资助。

第一作者简介: 任志,男,1989 年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: hfut_renzh@163.com

^{**} 通讯作者: 周涛发,男,1964 年生,教授,博导,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: tfzhou@hfut.edu.cn

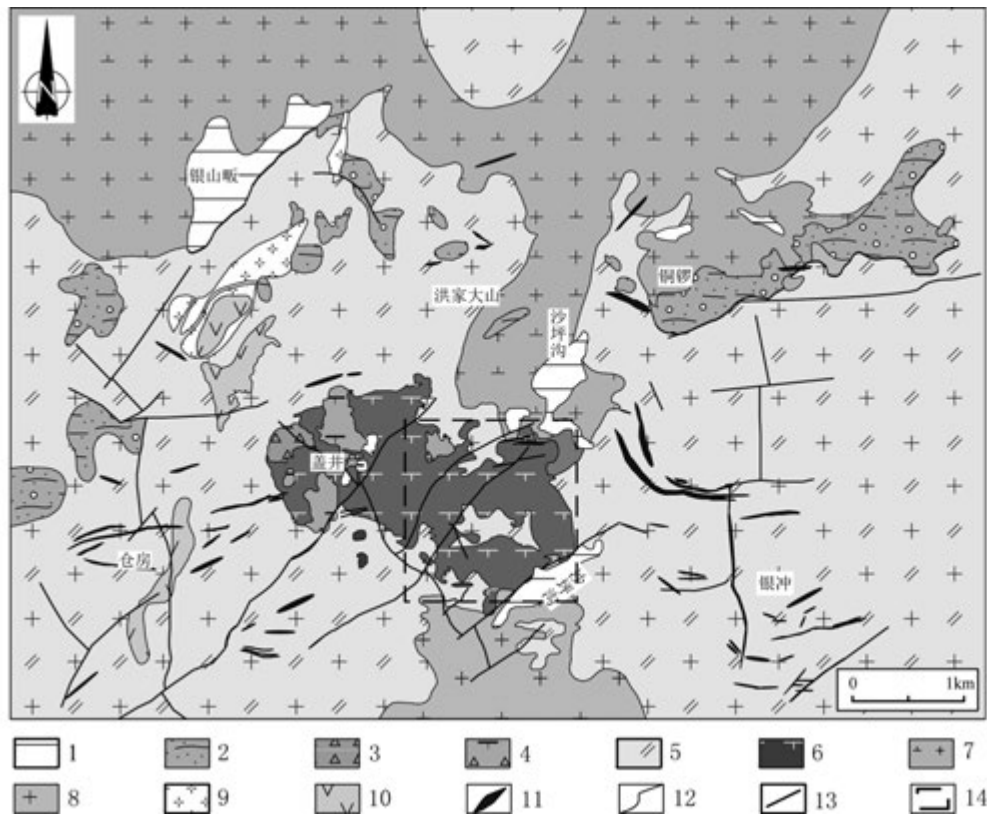


图2 沙坪沟钼矿区地质图(据安徽省地质矿产勘查局 313 地质队 2011^①修改)
1-第四系;2-卢镇关岩群;3-隐爆角砾岩;4-角砾正长斑岩;5-二长花岗岩;6-正长岩;7-花岗闪长岩;8-细粒花岗岩;9-闪长岩;10-辉石角闪岩;11-铅锌矿脉;12-地质界线;13-断层;14-沙坪沟钼矿范围

Fig.2 Sketch geological map of Shapinggou molybdenum deposit
1-Quaternary; 2-Luzhenguan Group; 3-cryptoexplosive breccia; 4-breccia orthophyre; 5-monzonitic granite; 6-syenite; 7-granodiorite; 8-granite; 9-diorite; 10-pyroxene amphibolite; 11-galena and sphalerite bearing vein; 12-geological boundary; 13-fault; 14-Shapinggou molybdenum deposit

(黄凡等 2011; 张红等 2011; 孟祥金等 2012) 和成矿流体特征(于文等 2012; 黄凡等 2013; 刘啟能 2013; 范丽逢 2014) 等开展了很多研究工作,但针对矿床矿化蚀变特征以及两者之间关系的研究还较为薄弱,一定程度上影响了对沙坪沟钼矿床成矿作用的深入认识。基于此,本文在作者及前人工作成果和详细地质观察基础上,开展岩相学、矿相学以及矿物探针测试分析等工作,深入系统地阐述了沙坪沟钼矿床的蚀变矿化特征,讨论蚀变与矿化之间的关系,为沙坪沟钼矿床成因和成矿系统研究提供基础资料。同时,还选取世界部分典型斑岩型钼矿床进行蚀变和矿化特征的系统对比,指出不同类型、不同构造背景下斑岩型钼矿床矿化蚀变特征的异同。

2 矿床地质特征

沙坪沟钼矿床位于大别造山带东段,桐柏-桐城断裂和商城-麻城断裂交汇部位的北东侧(图1)。该区出露地层主要为元古界卢镇关岩群的变火山-沉积岩,岩性主要为黑云

斜长片麻岩、二长片麻岩、斜长角闪片麻岩和云母片岩等,由于受到燕山期强烈的岩浆作用的影响,呈残留体和捕虏体出露于区内西部和北部(图2)。

区内断裂构造发育,晓天-磨子潭区域性深大断裂从该区南部穿过(图1),并发育一系列的次级断裂。次级断裂多为压性及压扭性,按走向分为四组,以NE向、NW向断裂为主,次为近SN向、近EW向断裂(图2),其中,NW向断裂是沙坪沟钼矿床重要控岩、控矿构造,同时,节理构造广泛发育,为钼、铅、锌等金属成矿提供运移通道和容矿空间。

区内岩浆岩广泛分布(图2),岩性从基性岩-酸性岩-偏碱性岩均有分布,岩石类型主要有辉长岩、闪长岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、正长岩、正长斑岩等。辉长岩少量出露于矿区中部,闪长岩仅在矿区西部少量出露,二长花岗岩出露最广,为商城花岗岩的南延部分,按其结构可分为中粒二长花岗岩、细粒二长花岗岩等,花岗闪长岩主要出露于矿区东北部,并在沙坪沟区内局部出露。正长岩按其矿物成分可分为石英正长岩和黑云母正长岩,出露于矿区中部地区,为银

① 安徽省地质矿产勘查局 313 地质队. 2011. 安徽省金寨县沙坪沟外围地形地质图

山复式岩体的主要岩性(图2)。经钻孔揭露,在银山复式岩体下部存在隐伏的花岗斑岩体,主要岩性为花岗斑岩。花岗斑岩和正长岩是钼矿床最主要的赋矿岩石(张怀东等, 2012)。

沙坪沟钼矿床位于银山复式岩体东部,为隐伏矿床。矿体主要赋存于花岗斑岩和正长岩中,保存完整,矿化连续,与围岩呈渐变接触关系,无明显界线。勘探资料表明,沙坪沟钼矿床的主矿体只有一个,占总金属资源量的99.93%,呈球体状,数量众多的零星小矿体多围绕主矿体分布,以分布在主矿体两侧的居多。

矿石类型有网脉状矿石、细脉浸染状矿石、浸染状矿石,前两者为辉钼矿主要的产出矿石类型。矿石中金属矿物以辉钼矿、黄铁矿为主,少量或微量磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿等;非金属矿物主要为钾长石、石英,次为黑云母、白云母、斜长石、硬石膏、石膏,少量或微量金云母、萤石、绿泥石、绿帘石、方解石等。矿石结构以自形-半自形鳞片结构、他形-半自形粒状结构、交代结构、固溶体出溶结构、填隙结构、斑状结构等为主,构造以浸染状构造、网脉状构造、细脉浸染状构造等为主。沙坪沟钼矿床中的含钼矿物仅为辉钼矿,其粒径变化为0.02~0.16mm,辉钼矿的Mo含量为59.70%~60.75%,平均为60.23%;S含量为38.56%~40.25%,平均为39.67%;Re含量为0~0.16%,平均为0.043%,辉钼矿中类质同象替代甚微(张怀东等, 2012)。

3 矿化蚀变特征研究

3.1 蚀变特征

沙坪沟钼矿床围岩蚀变强烈,蚀变类型多样,与世界典型斑岩矿床类似,主要蚀变类型有早期的钾硅酸盐化(钾长石-黑云母化),以及随后的青磐岩化(绿泥石-绿帘石化)、绢英岩化(石英-绢云母-黄铁矿化),绢英岩化强烈,叠加在早期钾硅酸盐化蚀变之上。以下分别对各种类型蚀变产出特征进行详细阐述。

3.1.1 钾硅酸盐化

钾硅酸盐化以钾长石、黑云母等含钾矿物和石英的发育为特征,可分为钾长石化和黑云母化。钾长石化与黑云母化分布并没有完全套合在一起,钾长石化比黑云母化发育更为广泛,分布于花岗斑岩内部以及花岗斑岩与正长岩的接触部位,主要表现为弥散状、细脉状及脉体晕的形式产出。弥散状钾长石化分布范围较小,发育在花岗斑岩体内部较深的位置,主要表现为岩石基质中斜长石等矿物被细小的弥散状的钾长石和石英交代,当交代不强时,钾长石化沿斜长石颗粒的边缘、解理、双晶缝和裂隙发生(图3b),在正交偏光下观察见明显的干涉色变化。呈细脉状及以脉体晕的形式出现的钾长石化主要产于矿床较深部花岗斑岩和正长岩中,蚀变规模较大,为沙坪沟钼矿床最主要的钾化类型。细脉状钾长

石化常呈不规则细脉状,脉体具有较弱的石英、钾长石蚀变晕,常切穿岩石中自形、半自形的斜长石颗粒,脉宽常为1~1.5cm(图3a)。另外,沿石英脉、石英-黄铁矿脉等脉体两侧也常可见钾长石化,即以蚀变晕形式存在的钾长石化,晕宽通常为1~3cm不等。

沙坪沟钼矿床也发育黑云母化,总体强度较弱,主要分布于花岗斑岩与正长岩的接触带部位,产出形式分为弥散状和脉状2种。弥散状黑云母的颗粒小,颜色较明亮,自形程度较好(图3c);脉状黑云母沿岩石裂隙或微裂隙充填,黑云母黄褐色,颗粒较大,单个颗粒具有较长的单向延长。镜下可见斜长石边缘部位发生黑云母化,蚀变黑云母在单偏光下主要呈褐黄色,颜色较原生黑云母浅,叶片状、鳞片状,片径为0.02~0.3mm不等,解理较发育,多色性较明显。总体上,这两类黑云母颗粒一般较小(几十微米),颜色明亮,且后期受流体影响较少,没发生明显蚀变。

在钾硅酸盐化带内侧发育石英内核,石英内核与钾硅酸盐化带渐变接触。蚀变矿物主要为石英,多呈他形粒状,粒径在0.05~1mm之间,弥散状分布。原岩矿物被石英强烈的交代,结构完全被破坏,仅有少量的原岩物质残留(图3e)。

3.1.2 青磐岩化

矿床围岩中青磐岩化普遍发育较弱,仅局部稍强,具有脉状和弥散状两种产出形式,主要蚀变矿物为绿泥石、绿帘石、高岭土、绢云母等。脉状青磐岩化多沿裂隙或微裂隙发育,宽<0.5mm,矿物主要为绿泥石,含量约70%~90%,此外还有少量石英、碳酸盐、高岭土等,分布于矿床较深部,局部可见绿泥石脉穿切钾长石脉。弥散状青磐岩化主要表现为正长岩中黑云母发生强烈的青磐岩化,以及基质中长石类矿物的弱青磐岩化。与脉状蚀变类似,弥散状青磐岩化蚀变也以绿泥石为主,含有少量的绿帘石等,绿泥石主要呈鳞片状、叶片状交代黑云母、斜长石等,片径为0.05~0.5mm不等,集合体呈黑云母假象,主要分布于矿床中部的正长岩中(图3d)。在离矿体较远的浅部及外围,弱的青磐岩化零星发育,以绿帘石、绿泥石为主,绿帘石交代角闪石、斜长石、黑云母和钾长石等矿物,属围岩蚀变外带。

3.1.3 绢英岩化

在沙坪沟钼矿床中,按蚀变矿物组成成分,绢英岩化可分为两种:一种是以石英为主,另一种是以绢云母为主。

以石英为主的绢英岩化主要产于矿床中深部,叠加在钾硅酸盐化蚀变之上,相对较早于以绢云母为主的绢英岩化,主要有两种形式,即弥散状和脉体晕。弥散状的绢英岩化蚀变主要发育在矿床的中部,使围岩的结构遭受破坏(图3f),显微镜下可见长石颗粒大部分被石英等矿物交代,部分蚀变成绢云母、黄铁矿等矿物,基质中也有大量有微细粒的次生石英形成,岩石整体变硬,表面具有弱的玻璃光泽。脉体晕形式的绢英岩化蚀变主要出于叠加钾硅酸盐化蚀变区域,石英和少量的绢云母等主要沿斜长石、钾长石等矿物裂隙和

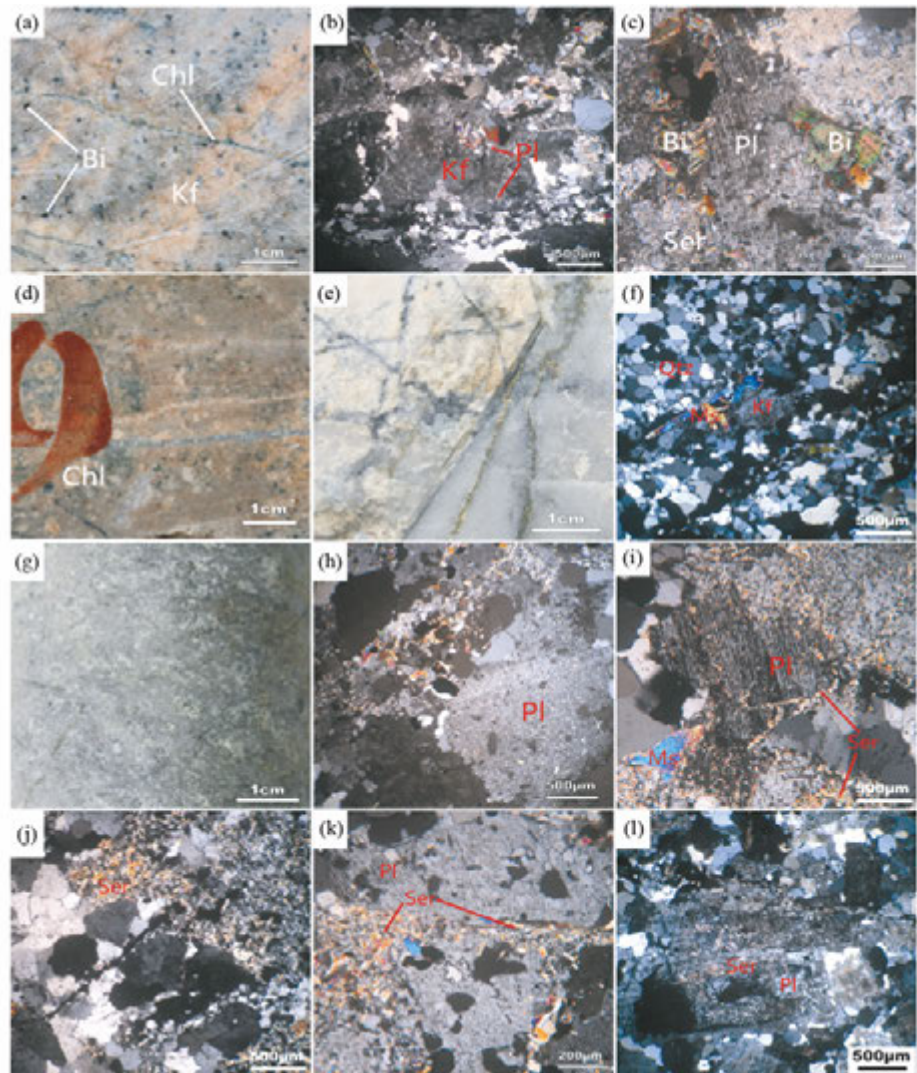


图3 沙坪沟钼矿床围岩蚀变特征

(a) 脉状钾长石化 ,并被含绿泥石裂隙穿切; (b) 斜长石发生钾长石化 ,钾长石显示悬浮的云雾状现象; (c) 黑云母化 ,黑云母叶片状 ,沿斜长石颗粒边缘发育; (d) 岩石中发生浸染状绿泥石化蚀变; (e) 石英内核 ,岩石基本被完全交代; (f) 硅化 ,石英呈细粒他形 ,仅残留少量钾长石颗粒 ,钾长石边缘发育白云母; (g) 强绢英岩化 ,岩石结构被完全破坏; (h) 斜长石发生绢云母化 ,绢云母极细小; (i) 斜长石发生绢云母化 ,绢云母沿斜长石边缘、解理、裂隙分布 ,局部重结晶成白云母; (j) 钾长石发生绢云母化 ,仅局部残留原矿物成分; (k) 斜长石发生绢云母化 ,绢云母沿斜长石边缘和裂隙分布; (l) 斜长石发生绢云母化 ,绢云母沿斜长石解理和双晶缝分布 . Kf-钾长石; Pl-斜长石; Bi-黑云母; Qtz-石英; Mo-辉钼矿; Ms-白云母; Ser-绢云母; Chl-绿泥石

Fig. 3 Different types of alteration in the Shapinggou porphyry molybdenum deposit

(a) potassic alteration in veins , and was cut by chlorite-containing fissure; (b) plagioclase feldspar occurred potassic alteration , and the K-feldspar display nebulous phenomenon suspended; (c) biotite alteration , biotite leaf-shaped , developed along plagioclase grain boundaries; (d) disseminated chlorite alteration occurs in rocks; (e) quartz core , the rocks were completely destroyed; (f) quartz core , quartz was with a fine shape , only a small amount of K-feldspar was left over , along the K-feldspar edge developed muscovite; (g) strong phyllic alteration , the rocks were completely destroyed; (h) Plagioclase developed sericite alteration , and the sericite was very small; (i) plagioclase developed phyllic alteration , along the edge of plagioclase , cleavage , fracture distribution , partial recrystallization into muscovite; (j) K-feldspar developed sericite alteration , and only a small amount of minerals was left over; (k) plagioclase feldspar developed sericite alteration , sericite distribute along the edge and fracture; (l) plagioclase developed sericite alteration. Kf-K-feldspar; Pl-plagioclase; Bi-biotite; Qtz-quartz; Mo-molybdenite; Ms-muscovite; Ser-sericite; Chl-chlorite

双晶面交代。

以绢云母为主的绢英岩化主要产出于矿床中上部 ,常与黄铁矿等矿物共生 ,产出形式也可进一步分为两种: 弥散状和脉体晕。弥散状的绢英岩化主要发育在矿床的上部 ,使围

岩的结构遭受破坏 ,岩石颜色发绿 ,变得松软易碎 ,肉眼可见细小鳞片状绢云母(图 3g ,l) 。脉体晕形式的绢英岩化主要发育在矿床的中上部 ,产出于脉体边缘 ,呈暗绿色到灰绿色 ,宽多在 1 ~ 3cm 之间 ,绢云母和少量的石英主要沿矿物裂隙

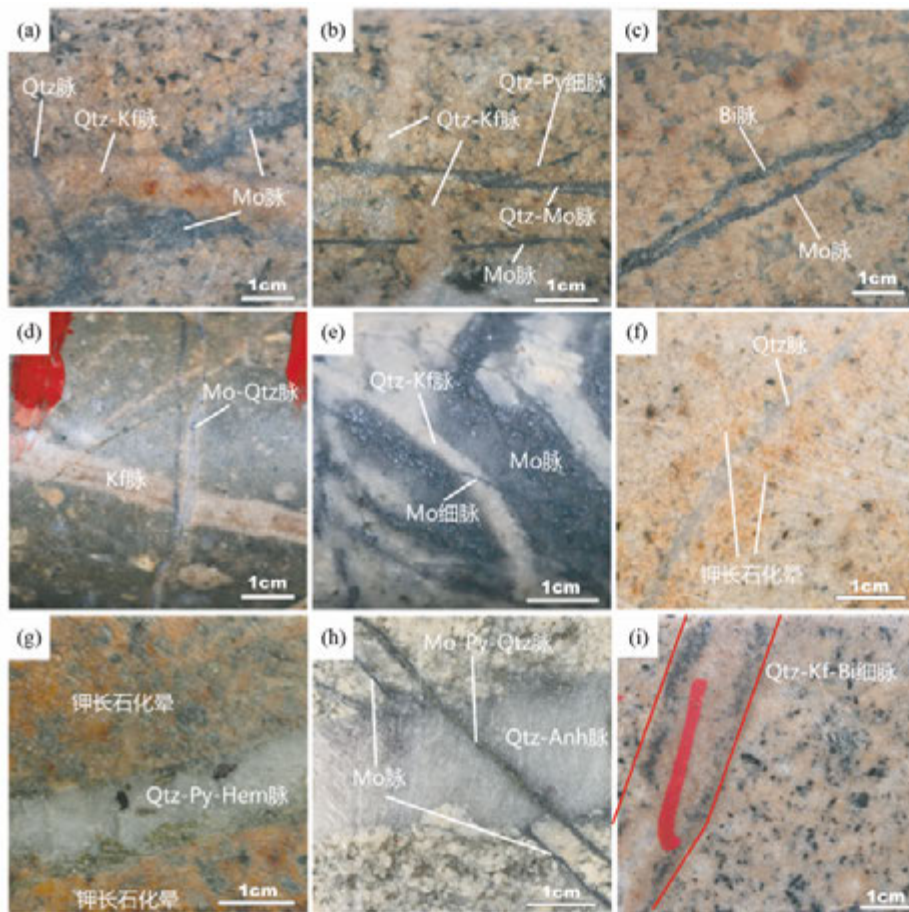


图4 沙坪沟钼矿床石英-钾长石阶段脉体类型及其相互之关系

(a) 石英-钾长石脉穿切辉钼矿脉,并被石英脉穿切;(b) 石英-黄铁矿脉穿切石英-辉钼矿脉,石英-辉钼矿脉穿切石英-钾长石脉,石英-钾长石脉穿切辉钼矿脉;(c) 黑云母脉与辉钼矿脉;(d) 钾长石脉被辉钼矿-石英穿切,辉钼矿-石英脉两侧发育弱钾长石化晕,辉钼矿脉穿切钾长石脉;(e) 辉钼矿脉被石英-钾长石脉穿切,石英-钾长石脉被辉钼矿脉穿切;(f) 石英脉,发育钾长石化晕;(g) 石英-黄铁矿-赤铁矿脉,发育较宽的钾长石化晕;(h) 辉钼矿脉被石英-硬石膏脉穿切,石英-硬石膏脉被辉钼矿-黄铁矿-石英脉穿切;(i) 石英-钾长石-黑云母脉,黑云母分布于脉边缘。Py-黄铁矿; Hem-赤铁矿; Anh-硬石膏

Fig. 4 Photographs of veins in quartz-K-feldspar stage, showing different vein characteristics

(a) quartz-K-feldspar vein cuts molybdenite vein, and quartz vein cuts both; (b) quartz-pyrite vein cuts quartz-molybdenite vein, quartz-molybdenite vein cuts quartz-K-feldspar vein, and quartz-K-feldspar vein cuts molybdenite vein; (c) biotite vein and molybdenite; (d) molybdenite-quartz vein, with narrow K-feldspar halo and molybdenite vein cut K-feldspar vein; (e) quartz-K-feldspar vein cuts molybdenite vein, and molybdenite veinlet cut quartz-K-feldspar vein; (f) quartz vein, with K-feldspar halo; (g) quartz-pyrite-hematite vein, with a wide K-feldspar halo; (h) quartz-anhydrite vein cut molybdenite vein, and molybdenite-pyrite-quartz veins cut quartz-anhydrite vein; (i) quartz-feldspar-biotite vein, biotite distributed in the edge. Py-pyrite; Hem-hematite; Anh-anhydrite

和双晶面交代(图3h,i)。黄铁矿含量较高时称为黄铁绢英岩化(图3j),沙坪沟钼矿中黄铁绢英岩化较为常见,黄铁矿含量一般大于5%,或10%左右,甚至更多,他形-自形晶结构,粒径变化亦大,在0.1~2mm之间。黄铁矿化也可分为两种类型,即浸染状和脉状,浸染状黄铁矿自形程度稍高,呈浸染状分布于各类岩体中,含量一般低于5%,颗粒较细,粒径均小于0.1mm。脉状黄铁矿化主要表现为黄铁矿叠加于石英脉、石英-辉钼矿脉或石英-绢云母脉之上,黄铁矿呈不规则的连续或间断状分布于脉中(图3k)。

3.2 脉体特征

沙坪沟钼矿床脉体非常发育,是引起矿化蚀变的流体的

最好记录。脉体产出具有多样性和多期次的特征。对各种脉体(图4、图5)穿插关系的厘定有助于正确认识成矿阶段和成矿演化。依据矿物组合、切穿关系及蚀变类型的不同,初步厘定了16种脉体类型,划分了沙坪沟钼矿床的成矿阶段,由中高温到低温,由早到晚依次为:石英-钾长石阶段、石英-硫化物阶段、石英-绢云母阶段、以及石英-萤石-石膏阶段。

3.2.1 石英-钾长石阶段

石英-钾长石阶段形成的脉体主要为黑云母-磁铁矿脉、石英细脉、石英-钾长石±黑云母脉、辉钼矿±石英脉、硬石膏±石英脉。其特征描述如下:

(1) 黑云母-磁铁矿脉(图4c):主要产于深部的花岗岩

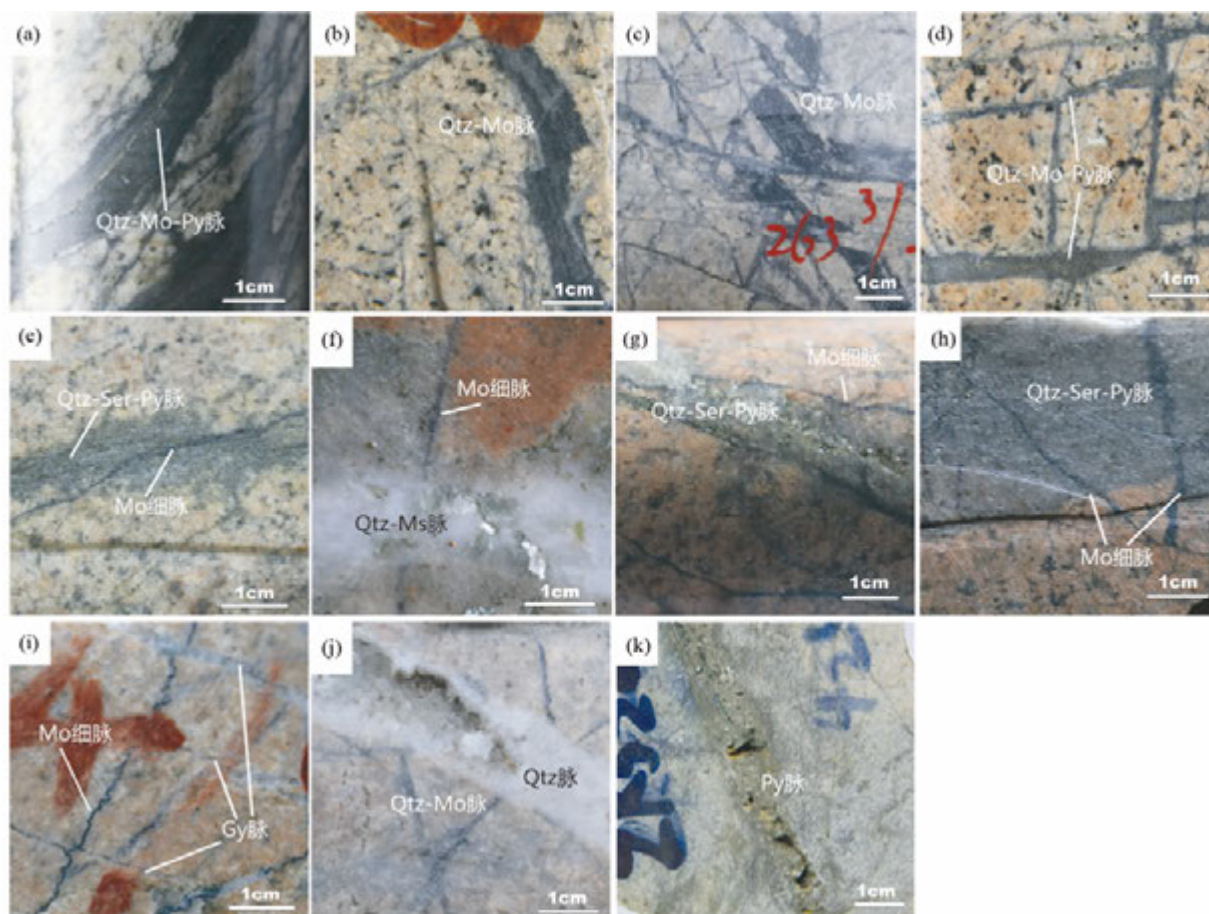


图5 沙坪沟钼矿床有关阶段主要脉体类型及其相互关系

(a) 石英-辉钼矿-黄铁矿脉, 黄铁矿分布于脉中央; (b) 被错断的石英-辉钼矿脉; (c) 网脉状石英-辉钼矿脉; (d) 网脉状石英-辉钼矿-黄铁矿脉; (e) 石英-绢云母-黄铁矿脉被辉钼矿细脉穿切; (f) 辉钼矿细脉被石英-白云母脉穿切; (g) 辉钼矿细脉被石英-绢云母-黄铁矿脉穿切; (h) 石英-绢云母-黄铁矿宽脉被辉钼矿细脉穿切; (i) 辉钼矿细脉被多条石膏脉穿切; (j) 石英-辉钼矿脉被石英脉穿切, 石英脉中具晶洞构造; (k) 黄铁矿脉, 具晶洞构造. Gy-石膏

Fig. 5 Photographs of veins in related stages, showing different vein characteristics

(a) quartz-molybdenite-pyrite vein, with pyrite in the center; (b) quartz-molybdenite vein be faulted; (c) quartz-molybdenite stockwork veins; (d) quartz-molybdenite-pyrite stockwork veins; (e) molybdenite veinlet cuts quartz-sericite-pyrite vein; (f) quartz-muscovite vein cuts molybdenite veinlet; (g) quartz-sericite-pyrite vein cuts molybdenite veinlet; (h) molybdenite veinlet cuts quartz-sericite-pyrite vein; (i) gypsum veins cuts molybdenite veinlet; (j) quartz vein cuts quartz-molybdenite veins, and the quartz vein with geode texture; (k) pyrite vein, with geode texture. Gy-gypsum

岩和正长岩中, 脉体不规则, 宽 $< 0.5\text{mm}$, 常具有较窄的 (0.3cm 左右) 的钾长石蚀变晕。

(2) 石英细脉(图4f): 主要产于较深部的花岗斑岩和正长岩中, 脉体不规则至板状, 通常脉宽在 $0.3 \sim 0.5\text{mm}$ 之间, 脉中石英颗粒多为粒状, 无矿化, 脉两侧发育钾长石蚀变晕, 晕宽 $0.3 \sim 0.5\text{cm}$ 。

(3) 石英-钾长石 ± 黑云母脉(图4a, b, d, i): 主要产于较深部的花岗斑岩和正长岩中, 该脉以存在连续或不连续的钾长石为显著特征, 少数脉体靠外侧发育有细粒黑云母, 脉宽通常在 $0.5 \sim 2\text{cm}$ 之间, 当被晚期蚀变叠加时, 脉体颜色变浅, 常被后期脉体穿切。

(4) 石英-黄铁矿 ± 白云母 ± 赤铁矿脉(图4g): 脉体呈板状, 以存在连续的石英、连续或不连续的半自形-自形黄铁

矿为显著特征, 部分脉体中含有白云母/和赤铁矿等矿物, 脉宽 $0.1 \sim 1\text{cm}$, 常发育钾长石化晕, 晕宽 $2 \sim 5\text{cm}$ 。

(5) 辉钼矿 ± 石英脉(图4a, b, d, e): 脉体中辉钼矿呈连续或不连续鳞片状沿脉分布, 脉宽 $0.1 \sim 0.5\text{mm}$, 常发育较窄的 ($0.3 \sim 0.5\text{cm}$) 钾长石化晕, 与石英-钾长石脉相互穿插。

(6) 硬石膏 ± 石英脉(图4h): 硬石膏多呈浅紫色, 连续或不连续分布于脉中, 脉宽约 $0.5 \sim 3\text{cm}$, 脉中偶见有少量金云母、辉钼矿等, 发育钾长石化晕, 晕宽 $0.5 \sim 1\text{cm}$, 穿插辉钼矿 ± 石英脉。

在上述脉体或脉体边缘蚀变晕中, 均发育钾硅酸盐蚀变的代表矿物, 如钾长石、黑云母等, 除辉钼矿脉 ± 石英外, 其它脉体不含或仅含微量的辉钼矿。

3.2.2 石英-硫化物阶段

石英-硫化物阶段主要产出3种脉体类型,与上述石英-钾长石脉体相比,脉边缘一般不发育蚀变晕,有时可见浅色、不规则的褪色晕。其特征描述如下:

(1) 石英-辉钼矿脉(图5b,c):产于矿床中深部(约400m~700m),广泛存在于花岗斑岩、正长岩和二长花岗岩中,脉体不规则至板状,脉宽常为0.1~1cm,相互穿插呈网脉状,金属呈连续线状分布于脉中心或边部,这种脉大量发育,是矿床中辉钼矿最主要的产出形式,穿插前期形成的脉体也可被晚期脉体穿切。这种脉与辉钼矿±石英脉组成矿物较为相似,但脉体明显变宽,边部较规则,金属矿物含量更高,且没有钾长石蚀变晕。

(2) 石英-辉钼矿-黄铁矿脉(图5a,d):广泛产于钻孔中部,脉体不规则至板状,脉宽多在0.2~1.5cm之间,黄铁矿通常呈连续线状分布在脉中部。

(3) 石英-绿泥石±黄铁矿脉:产于钻孔深部较远离斑岩体的正长岩中,脉体多不规则,宽约0.1cm左右。

上述3种脉体中,除石英-绿泥石±黄铁矿脉因主要产于远离斑岩体的位置,观察不到与其它脉体之间的明显穿切关系外,其他2种脉体明显切穿了石英-钾长石阶段各种脉体(图4b,d,h)。根据世界著名斑岩钼矿床蚀变特征及沙坪沟钼矿床蚀变特征,将石英-绿泥石±黄铁矿脉划归石英-硫化物阶段。

3.2.3 石英-绢云母阶段

石英-绢云母阶段产出有3种脉体类型,主要产于花岗斑岩边部、正长岩与二长花岗岩中,常具有绢英岩化蚀变晕。其特征描述如下:

(1) 石英-绢云母±黄铁矿脉(图5e,g):在矿床中上部大量发育,脉宽在1~4cm之间,脉中发育绢云母、石英,常含有黄铁矿,偶见方铅矿,穿切石英-辉钼矿脉、石英-辉钼矿-黄铁矿脉等,并被无矿的石英脉、石膏脉等穿切,局部可见在脉边缘发育有褪色晕。

(2) 石英-绢云母-辉钼矿±黄铁矿脉(图5h):多呈连续细脉产出,脉宽多在0.1~0.5cm之间,脉体边界平直,具石英-绢云母蚀变晕。这种脉体较发育,产于矿床中部,切穿早期的脉体。

(3) 辉钼矿±绢云母细脉(图5e,f,g):少量发育于矿床中部。脉中除辉钼矿外,还可见少量粘土矿物,如伊利石、高岭土等,脉宽常<0.5mm,穿插前期的各类脉体。

3.2.4 石英-萤石-石膏阶段

石英-萤石-石膏阶段主要产出四种脉体,产于矿床上部的正长岩和二长花岗岩中,与石英-绢云母阶段脉体相比,更加远离斑岩体。这类脉体中矿物单一,为中低温矿物,通常形成晶洞构造,脉宽在0.5~3cm之间,并切穿了早期的各种脉体。其特征描述如下:

(1) 石膏脉(图5i),连续板状细脉,脉边界平直,脉宽多在1~2mm之间,脉中石膏含量>90%,且透明干净。

(2) 石英脉(图5j),呈连续的板状脉产于正长岩和二长花岗岩中,脉宽在0.5~2cm之间,脉两侧无蚀变晕,脉中石英含量>95%,且石英较自形、干净,有时可出现晶洞构造。

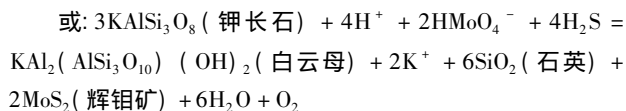
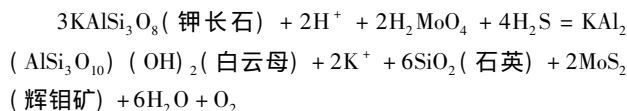
(3) 萤石±石英脉,呈连续的板状脉,不甚发育,脉宽在1cm左右,脉中主要矿物有萤石和石英,萤石呈浅绿色,较自形,在脉中连续或不连续分布,脉两侧无蚀变晕。

(4) 黄铁矿脉(图5k),连续板状脉,脉中矿物常比较单一,主要为黄铁矿,脉宽在0.5~2cm之间,脉中黄铁矿自形-半自形,细粒,脉两侧无蚀变晕,有时可出现晶洞构造。

4 讨论

4.1 蚀变与矿化

前人对斑岩型矿床的蚀变研究显示,斑岩铜矿床早期发生钾化、硅化和青磐岩化,晚期发生绢英岩化和高级泥化(Gustafson and Hunt, 1975; Sillitoe, 2010),斑岩钼矿床蚀变由早到晚具有钾化、硅化→青磐岩化→泥化以及绢英岩化的特征(Mutschler *et al.*, 1981; Seedorff and Einaudi, 2004)。钼矿床中,与钼矿化关系最紧密的蚀变类型为绢(云)英岩化,其次为钾硅酸盐化、硅化,而青磐岩化、泥化、黄铁绢英岩化与成矿的关系是间接的,仅作为同一系统的蚀变现象而存在(Wallace *et al.*, 1978; Seedorff and Einaudi, 2004)。如Selby *et al.* (2000)研究Endako钼矿床显示,钼矿化与绢云母化蚀变关系最密切,在条带状矿化脉两侧绢云母呈团块集合体(0.1~0.5mm)分布并与辉钼矿共生,靠近矿化脉的斜长石、钾长石和黑云母被强烈蚀变成绢云母和绿泥石,远离矿化脉,绢云母化蚀变减弱。在野外地质观察及上述对沙坪沟钼矿床中产出的脉体类型、特征以及蚀变类型的统计和研究显示,本矿床蚀变发生顺序由早到晚为钾硅酸盐化→青磐岩化、绢英岩化。矿床中与钼矿化关系最为密切的是以石英为主绢英岩化,其次为钾硅酸盐化,以下方程(黄凡等, 2013)说明了绢英岩化、钾硅酸盐化与辉钼矿的沉淀关系较为密切。



成矿流体演化早期,钾化持续发生,体系中 K^+ 值增大,钾长石含量增加,促进以上方程正反应,辉钼矿形成量增加,并开始形成白(绢)云母;随后大量辉钼矿开始沉淀,同时形成较多的石英、白(绢)云母等。成矿晚期,绢云母含量增加到了较大程度,抑制以上方程的正反应,辉钼矿形成减少,最终反应彻底停止。因此,辉钼矿沉淀与钾硅酸盐化和绢英岩化关系密切。

综合上述研究结果,沙坪沟钼矿各成矿阶段蚀变与矿化

表 1 沙坪沟钼矿床主要蚀变矿物钾长石、绿帘石、绿泥石和石英电子探针分析结果(wt%)

Table 1 Electron microprobe analyzing results of K-feldspar ,epidote ,chlorite and quartz in Shapinggou molybdenum deposit (wt%)

测点号	矿物及特征	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	Total
214-kfs-3	脉中钾长石	65.6	—	17.8	0.116	—	0.008	—	1.14	14.4	—	99.1
214-kfs-4		66.0	0.023	17.9	0.059	—	—	—	1.13	14.9	0.008	100
214-kfs-5		65.4	0.042	17.8	0.056	—	—	—	0.785	14.9	0.031	99.1
406-kfs-8		65.8	0.019	17.8	0.142	—	0.006	0.001	1.13	14.8	0.004	99.7
406-kfs-9		65.4	—	17.7	0.128	—	—	—	1.01	15.2	0.010	99.5
406-kfs-10		66.6	—	17.9	0.089	—	—	0.005	1.23	15.0	0.016	100.8
602-4KF-2		63.6	0.138	17.8	0.043	0.001	0.012	—	0.176	17.2	—	99.0
602-4KF-3	绿帘石	63.8	0.069	17.9	—	—	—	—	0.151	17.4	—	99.2
3-EPI-5		41.1	0.109	18.6	15.9	0.057	0.223	22.5	0.021	0.098	—	98.6
3-EPI-4		40.6	—	17.9	16.9	0.01	0.058	23.1	0.024	—	0.025	98.7
3-EPI-3		40.9	0.039	20.0	14.5	0.003	0.394	23.2	—	—	0.042	99.1
1-chl-15	绿泥石	28.8	0.094	18.4	19.8	17.1	1.76	0.079	0.104	0.337	—	86.5
1-chl-16		28.0	0.035	18.3	20.3	17.8	1.88	0.098	0.057	0.04	—	86.5
4-Qtz-8	石英-辉钼矿脉中石英	97.1	0.027	0.048	0.004	—	0.006	—	0.004	0.001	—	97.2

注 “—”为低于检出限。分析单位: 合肥工业大学资源与环境工程学院电子探针实验室; 仪器型号: JEOL(日本电子) ——JXA-8230 电子探针 (Electron Probe Micrialyzer , EPMA) ; 测试条件: 加速电压 15kV ,束流 20nA ,光束直径 5μm ,特征峰测量时间 10s ,背景测量时间 5s。元素标样: 硅酸盐矿物: Fe-周建雄标样黄铁矿; S-周建雄标样黄铁矿; Cu-周建雄标样黄铜矿; Pb-周建雄标样方铅矿; Mo-金属标样 Mo; Cr-金属标样 Cr; Au-金属标样 Au; Ag-Ag₆As₂S₆; 硫化物矿物: Te-周建雄标样 TeO₂; Zn-周建雄标样 ZnS; Ni-周建雄标样 NiO; Re-无 ,系统自带 Cal-STD ,Se-Bismuthselenide(SPI 标样) ; Co-周建雄标样 Co; As-周建雄标样 TiOAs。定量分析检测限 100 × 10⁻⁶

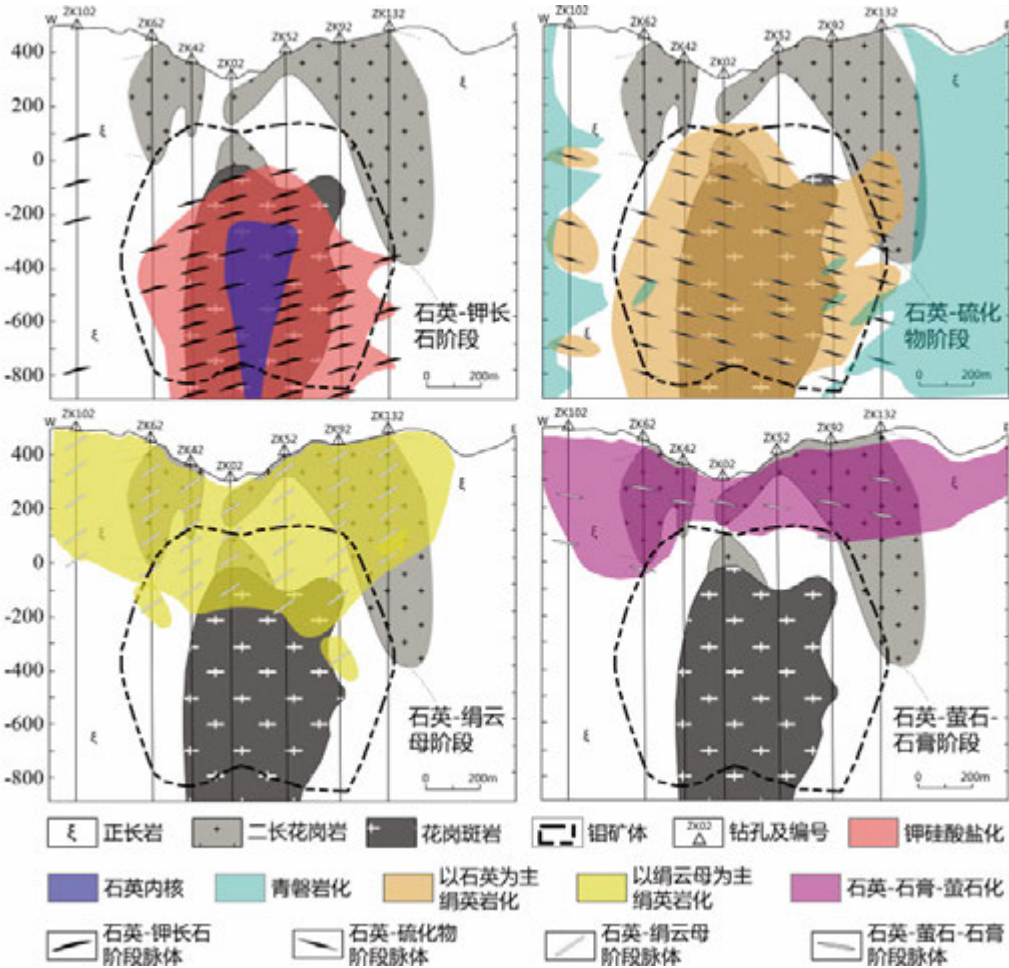


图 6 沙坪沟钼矿床纵 2 线各矿化蚀变阶段主要蚀变、脉体类型分布图
Fig.6 Alteration zone and veins mapping of vertical line 2 and the alteration-mineralization patterns in Shapinggou porphyry molybdenum deposit

表2 沙坪沟钼矿床蚀变矿物绢云母电子探针分析结果(wt%)

Table 2 Electron microprobe analyzing results of sericite in Shapinggou molybdenum deposit (wt%)

测点号	寄主岩石	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O (计算)	Total
27-MS-1	绢英岩化岩石	46.3	0.371	33.44	0.29	0.867	—	0.001	0.788	10.5	4.84	97.4
27-MS-2		48.0	0.275	31.813	0.31	1.583	—	0.011	0.513	10.6	4.87	98.0
27-MS-3		48.3	0.323	31.918	0.38	1.64	0.031	0.002	0.605	10.6	4.90	98.6
41-MS-4		50.7	0.395	30.382	0.19	1.752	0.009	0.000	0.287	11.1	4.97	99.8
41-MS-7		49.5	0.245	30.969	0.34	1.665	—	0.001	0.242	11.1	4.92	99.0
41-MS-8		48.5	0.163	33.337	0.32	0.763	—	—	0.399	10.7	4.94	99.2
41-MS-9		48.7	0.259	32.359	0.55	0.898	0.031	—	0.353	11.1	4.93	99.2
124-MS-1		48.7	0.109	32.196	0.44	0.568	0.12	0.024	0.152	11.2	4.89	98.3
124-MS-2		48.8	—	32.766	0.69	0.422	0.034	0.032	0.317	10.6	4.91	98.5
124-MS-3		47.3	0.068	32.367	2.57	0.021	0.009	0.019	0.476	11.0	4.85	98.7
38-MS-1	石英-绢云母脉	51.5	0.384	28.318	0.56	2.673	—	0.020	0.264	10.8	4.95	99.4
38-MS-3		49.7	0.206	31.761	0.20	0.848	—	0.000	0.324	10.6	4.93	98.6
38-MS-6		49.7	0.329	30.602	0.47	1.724	—	0.011	0.238	10.6	4.92	98.7
406-MS-1	正长岩	49.6	0.467	27.415	0.38	4.057	—	0.020	0.396	11.0	4.86	98.2
406-MS-2		50.0	0.302	27.838	0.26	3.878	0.004	0.001	0.427	11.0	4.89	98.6
406-MS-6		48.2	0.553	28.158	0.83	3.299	—	0.011	0.521	10.7	4.80	97.1
452-MS-1		51.0	0.15	28.723	0.24	2.375	0.062	0.017	0.258	10.6	4.91	98.4
452-MS-4		49.7	0.462	27.95	0.33	3.027	—	0.009	0.300	10.9	4.84	97.5
452-MS-5		50.9	0.258	25.932	1.12	3.809	—	0.014	0.286	10.9	4.85	98.1
214-MS-4	二长花岗岩	48.9	0.189	30.145	0.62	2.295	0.028	0.000	0.389	10.8	4.88	98.2
214-MS-5		48.1	0.42	30.75	0.76	2.498	—	0.031	0.396	11.0	4.88	98.8
214-MS-6		47.7	0.947	29.709	1.52	2.223	0.005	0.000	0.554	10.9	4.84	98.4
214-MS-8		49.1	0.316	29.424	0.52	2.687	—	0.000	0.511	10.7	4.87	98.1
44-MS-2		44.4	0.205	11.625	1.48	25.095	0.147	0.014	0.149	10.6	4.66	98.4
44-MS-4		49.0	0.409	28.315	1.41	3.047	0.018	0.012	0.71	10.3	4.85	98.0
44-MS-5		48.7	0.398	28.458	1.49	3.036	0.026	0.027	0.753	10.5	4.84	98.2
51-MS-4		49.0	0.245	30.022	0.34	2.124	—	0.002	0.438	10.6	4.86	97.6
51-MS-5		47.9	0.344	31.344	0.13	1.84	—	0.010	0.463	10.6	4.85	97.4
51-MS-7		52.8	0.021	27.481	0.06	3.139	0.014	0.060	0.105	9.78	4.96	98.4
51-MS-9	花岗斑岩	49.3	0.419	28.846	0.34	2.974	—	0.124	0.526	10.5	4.87	98.0
226-MS-1		49.5	0.625	29.207	0.52	2.176	0.006	0.021	0.357	11.1	4.88	98.3
226-MS-2		50.7	0.272	30.316	0.40	1.791	—	0.009	0.345	10.6	4.97	99.5
226-MS-3		49.9	0.109	28.847	0.95	2.224	0.009	0.000	0.249	11.1	4.87	98.3
671-MS-3		45.6	0.479	11.695	5.43	20.294	0.262	0.036	0.262	10.5	4.63	99.1
671-MS-5		48.1	0.402	28.09	0.89	3.192	0.03	0.018	0.505	10.8	4.78	96.7
671-MS-6		49.2	0.403	28.278	0.72	3.304	0.046	0.026	0.518	10.8	4.86	98.1
602-MS-1	花岗斑岩	47.8	0.217	27.287	6.19	0.224	0.049	0.023	0.085	10.3	4.69	96.8
602-MS-2		51.4	0.123	27.456	0.92	3.026	0.04	0.006	0.29	10.6	4.91	98.8
602-MS-3		51.0	0.286	25.818	4.68	1.225	0.015	0.028	0.047	10.5	4.82	98.4
602-MS-4		49.1	0.082	30.313	2.61	0.434	0.003	0.000	0.025	10.7	4.84	98.1
986-MS-1	花岗斑岩	47.4	0.455	23.243	4.99	5.489	0.735	0.000	0.346	10.3	4.69	97.6
986-MS-2		48.2	0.359	23.781	4.35	4.762	0.568	0.019	0.429	10.3	4.71	97.5
986-MS-3		47.6	0.357	23.765	4.79	4.778	0.788	0.000	0.399	10.4	4.69	97.5

的关系探讨如下:

石英-钾长石阶段发生的蚀变类型主要是早期的钾硅酸盐化,并在钾硅酸盐化带内部形成石英内核。沙坪沟钼矿石英-钾长石阶段的6种脉体中或脉边缘蚀变晕中均含有与早期钾硅酸盐化蚀变相关的如钾长石、黑云母等代表性矿物,这些蚀变与脉体的分布位置如图6所示。辉钼矿化应始于

此阶段晚期,以辉钼矿±石英脉(脉两侧具弱钾长石化晕)的出现为标志。本次工作选取了较浅部和较深部的两种脉状钾长石化,对其中的钾长石进行了电子探针分析,结果如表1所示,两个部位的钾长石均为正长石,化学式通过计算为: $[K_{0.8735}Na_{0.0956}]_{0.9691}[Al_{0.9686}Si_{3.0313}]_{3.9999}O_8$,富含SiO₂,较浅部的钾长石K₂O/Na₂O在12.17~18.96之间,深部的钾长石

表3 沙坪沟钼矿床主要蚀变矿物黄铁矿电子探针分析结果(wt%)

Table 3 Electron microprobe analyzing results of pyrite in Shapinggou molybdenum deposit (wt%)

测点号	寄主岩石	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Co	Se	As	Mo	S	Ni	Total
27-2-py-1	弥散状绢英化岩石	—	—	—	45.7	—	0.123	—	0.834	52.5	—	99.2
27-2-py-2		—	—	—	45.6	0.304	—	0.022	0.818	52.6	0.010	99.3
27-2-py-3		—	—	—	45.7	0.296	0.333	—	0.793	52.8	—	99.9
27-1-py-7		—	—	—	46.0	0.528	0.358	—	0.814	52.7	—	100
27-1-py-8		—	—	—	45.5	0.224	0.185	0.009	0.853	52.3	—	99.0
27-3-py-9		—	—	—	45.1	0.377	0.037	—	0.884	53.1	0.005	99.6
27-3-py-10		—	—	—	45.1	0.104	0.543	—	0.798	53.0	—	99.5
27-3-py-11		—	—	—	45.6	0.464	0.234	—	0.812	52.8	—	99.9
44-1-py-7		—	—	—	46.4	0.241	—	0.011	0.835	51.8	—	99.3
44-1-py-8		—	—	—	45.9	0.603	0.236	0.004	0.813	52.3	—	99.9
44-6-py-19		—	—	—	46.2	0.344	0.148	—	0.878	51.6	0.009	99.1
44-6-py-21	石英-黄铁矿-绢云母脉	—	—	—	45.5	0.216	0.617	—	0.845	51.9	0.029	99.1

K₂O/Na₂O 在 97.69 ~ 115 之间。阳珊等(2013) 对沙坪沟钼矿床中部蚀变钾长石也进行了探针分析以及 X 射线粉晶衍射分析结果显示,沙坪沟钼矿床早期的蚀变钾长石为钾微斜长石(与正长石同质多像),钾长石具有相比本次工作更高的 SiO₂ 含量, K₂O/Na₂O 在 28.46 ~ 45.47 之间。综合上述分析结果,可见,钾长石含钾量由深部到浅部,不断降低,即在流体和向上/外运移过程中, K⁺ 数逐渐减少。

石英-硫化物阶段发生的蚀变类型主要包括青磐岩化、以石英为主的绢云母化、黄铁矿化等,产出矿床中深部的花岗斑岩与正长岩中,与石英-钾长石阶段的蚀变和矿化相比范围更大,在远离花岗斑岩体的位置发育青磐岩化(图 6)。此阶段 3 种脉体或脉体晕中均含有与以石英为主的绢英岩化、黄铁矿化或青磐岩化相关的石英、金属硫化物、绿泥石等矿物,不含或含少量钾长石、绢云母等矿物。这一阶段以大量发育含辉钼矿的脉体为特征,是辉钼矿最主要的形成阶段。本次工作选取了与辉钼矿共生的石英、绿泥石、绿帘石进行了探针分析,分析结果如表 1 所示,石英成分较为复杂,含 Al₂O₃ 为 48 × 10⁻⁵, FeO 为 4 × 10⁻⁵, TiO₂ 为 27 × 10⁻⁵, K₂O 为 1 × 10⁻⁵, Na₂O 为 4 × 10⁻⁵, 并含少量 Fe、Ti、K、Na、Mn 等,指示此阶段成矿流体中元素成分较为复杂,除 Mo 过饱和外,还含有较多种类的其它金属。绿泥石、绿帘石成分显示,沙坪沟钼矿床中绿泥石主要为富镁的正绿泥石和富铁的鳞绿泥石,绿帘石则富铝、富钙。

石英-绢云母阶段发生的蚀变类型主要有以绢云母为主的绢英岩化、黄铁矿化等,产出于矿床较浅部位的正长岩和二长花岗岩中,主要的蚀变矿物有石英、绢云母、黄铁矿等,绢云母成分主要为白云母,其次为金云母(细小的金云母与白云母生长于同一部位,导致了这一测试结果的出现)(图 7)。沙坪沟钼矿床中 3 种脉体划分到此阶段,这类脉体发育大量的绢云母或脉体边缘发育绢英岩化晕。此阶段蚀变与脉体的分布位置如图 6 所示。这一阶段产出一定量的含辉钼矿脉体,也是沙坪沟钼矿床钼沉淀的重要阶段之一。本次工作选取了矿床各部位的绢云母进行了系统地探针测试分

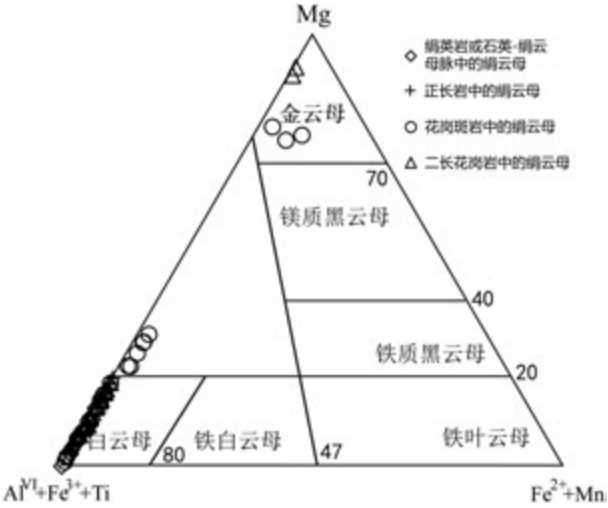


图7 沙坪沟钼矿床绢云母分类图解

Fig. 7 Classification of sericite from Shapinggou molybdenum deposit

析,其成分特征见电子探针分析数结果(表 2)。分析结果显示,这些绢云母元素组成较为一致,主量元素总和在 92% ~ 96% 之间,经过换算,与白云母标准式(K₂O 含量为 11.8%, Al₂O₃ 含量为 38.4%, SiO₂ 含量为 45.3%) 相比, Si 含量偏高, K₂O、Al₂O₃ 含量基本一致,指示了成矿热液中富硅质,与斑岩型钼矿床成矿岩浆-热液高硅质特征相吻合。强绢英岩化岩石、石英-绢云母脉中的绢云母和正长岩中的绢云母均为白云母,少量为金云母(图 7)。以绢云母为主的绢英岩化蚀变中的石英成分简单,除 SiO₂ 外,仅含微量的 Al(阳珊等 2013)。石英-绢云母-黄铁矿脉中的黄铁矿成分特征见表 3 所示,分析结果显示,黄铁矿中 Mo 含量平均为 0.829%, Co 含量 0.311%, Se 含量平均为 0.234%, As 平均含量为 0.004%, Co 成类质同象替换 Fe, As、S 呈替换 S,排除样品在制作和测试过程中可能的污染,矿物中 Mo 元素含量相对升高。同时,在

表 4 沙坪沟斑岩型钼矿床主要矿物生成顺序
Table 4 Paragenetic sequence of Shapinggou porphyry molybdenum deposit

成矿阶段 矿物成分	石英-钾长石阶段	石英-硫化物阶段	石英-绢云母阶段	石英-萤石-石膏阶段
钾长石	——			
黑云母	——			
磁铁矿	——			
钛铁矿	——			
石英	——	——	——	——
赤铁矿	——			
白云母	——		——	
黄铜矿	——			
磁黄铁矿	——			
黄铁矿	——	——	——	——
硬石膏	——			
金云母	——			
辉钼矿	——	——	——	
方铅矿		——		
闪锌矿		——		
绿帘石			——	
绿泥石			——	
石膏				——
萤石				——
方解石				——

弥散状黄铁绢英岩化岩石中的黄铁矿的 S/Fe 在 1.149 ~ 1.178; 而石英-黄铁矿-绢云母脉中黄铁矿的 S/Fe 在 1.117 ~ 1.141 之间。这一阶段形成的黄铁矿中 Mo 含量较高, 指示热液演化到石英-绢云母阶段, 流体中还有一定量的钼, 辉钼矿的沉淀还在继续。

石英-萤石-石膏阶段蚀变较弱, 蚀变类型主要有石英-萤石-石膏化、黄铁绢英岩化等蚀变, 产出于矿床的上部的正长岩和二长花岗岩中, 距离矿体较远的位置。沙坪沟钼矿床中此阶段有 4 种脉体, 即石英脉、石英-萤石脉、石膏脉和黄铁矿脉等。这类脉体中矿物成分较单一, 常形成晶洞构造。这些蚀变与脉体的分布位置如图 6 所示。石英-萤石-石膏阶段的出现也标志着沙坪沟斑岩钼矿成矿流体系统演化到达晚期。

根据矿床中各阶段脉体中的矿物组合以及围岩蚀变特征, 厘定了矿床中主要矿物生成顺序如表 4 所示。

4.2 流体演化过程

作者的前期工作中(任志等 2014), 将研究区中酸性侵入岩成岩作用划分为两个阶段, 第一阶段处于总体挤压的构造背景, 而第二阶段为以伸展为主的板内构造背景, 沙坪沟钼矿床与第二阶段成岩作用末期的岩浆-热液活动有关。在伸展背景下, 花岗质岩浆携带着 Mo、Fe、Cu、Pb、Zn 等和大量的挥发性组分(如 S、CO₂、H₂、N₂、CO、CH₄、F⁻ 等)沿薄弱带

侵位于第一阶段形成的正长岩和二长花岗岩中, 随着岩浆流体的不断出溶, 成矿金属聚集(Hedenquist and Lowenstern, 1994), 形成早期的成矿流体, 早期围岩蚀变及矿化相伴而生, 形成了较小规模的钾硅酸盐化, 并未见 Mo 矿化。出溶流体的不断积聚, 钾硅酸盐化蚀变的范围逐渐增加, 强度逐渐增大, 斜长石蚀变为钾长石或黑云母, Ca、Si 的大量释放, 流体中 K 减少, 早期与钾化、硅化蚀变有关的石英-钾长石 ± 黑云母脉、黑云母-磁铁矿微脉、石英细脉及石英-黄铁矿 ± 白云母 ± 赤铁矿脉、硬石膏 ± 石英脉等脉是此时流体活动的产物。此时流体的温度在 550 ~ 350℃ 之间, 盐度则在 5% ~ 15% NaCleqv 之间(于文等 2012; 范丽逢 2014)。硬石膏开始沉淀, 促进了 SO₂ 水解反应的进行(Burnham, 1979; Hemley and Hunt, 1992), H₂S 含量增加。挥发性组分的压力不断增大, 当其增大至超过岩浆房顶部围岩的压力时, 引起爆破作用, 导致裂隙连通, 体系开放, 温压降低, 成矿流体开始发生沸腾, 挥发性组分如 CO₂ 逸出。成矿流体温压降低以及 pH 值变小, 导致了含 Mo 的钼酸、离子对和钼-氧-氯络合物不稳定, 辉钼矿开始结晶(Klemm *et al.*, 2008; Selby *et al.*, 2000), 沿裂隙形成石英-钾长石阶段的含钾化晕的辉钼矿 ± 石英脉。此时, 沙坪沟钼矿床成矿流体中富含 Mo、Al、Fe、Ti、Ca、Na、Mn、Mg、S 等元素; 温度在 500 ~ 300℃ 之间, 盐度则在 3% ~ 10% NaCleqv 和 30% ~ 60% NaCleqv 之间(于文等 2012; 范丽逢 2014)。

成矿流体中挥发性组份大量逸出, 辉钼矿大量结晶, 沿裂隙形成石英-硫化物阶段网脉状的石英-辉钼矿 ± 黄铁矿脉, 并在围岩中引起较广泛的以石英为主的绢英岩化, 同时, 远离岩体的位置, 地下水被岩体加热, 并富集了一定的量 Ca、Mg、Fe 等元素, 引起了青磐岩化(Titley and Beane, 1981; 芮宗瑶等 1984; 高合明, 1995), 这一阶段石英-辉钼矿脉中的石英含 Fe、Ti、K、Na、Mn 等多种元素; 成矿流体温度在 400 ~ 300℃ 之间, 盐度在 5% ~ 15% NaCleqv 和 35% ~ 45% NaCleqv 之间(于文等 2012; 范丽逢 2014)。在这一阶段末期, 成矿流体中的 Al₂O₃、MgO 等对早期形成的长石类矿物进行改造, 开始出现绢云母等矿物, 并释放出 Si。

成矿流体继续向上/外迁移, 温度的继续下降, 更多的地下水的加入, 大量的绢云母、黄铁矿等矿物结晶, 并叠加早期的钾硅酸盐化等早期蚀变, 形成了石英-绢云母阶段的各类脉体(Lowell and Guilbert, 1970; 高合明, 1995), 此时, 成矿流体的温度下降至 300 ~ 150℃ 之间, 盐度则为 0 ~ 10% NaCleqv(于文等 2012; 范丽逢 2014), 结晶出的黄铁矿中富含 Mo 元素。

流体演化到晚期, 元素种类大大减少, 仅 Si、Fe、S²⁻、F⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺ 等, 沿新的裂隙或早期的各类脉体, 形成了石英-萤石-石膏阶段的脉体以及脉体周边的蚀变。

4.3 与著名斑岩型钼矿床的对比

沙坪沟钼矿与成矿有关的斑岩为花岗斑岩-钾长花岗斑

表 5 沙坪沟及世界上典型斑岩型钼矿床的蚀变与矿化特征对比表

Table 5 Characteristics of alteration and mineralization of the selected typical porphyry molybdenum deposits in the world

矿床	国家	成矿 区带	构造 背景	矿床 分类	成矿 岩体	围岩	围岩蚀变	与钼矿化有关的 蚀变类型	矿体特征	矿化类型	矿石矿物	含氟 矿物	资料来源
沙坪沟	中国	大别山 地区	以伸展 为主的 板内环 境	碱性- 碱性	花岗 斑岩	正长 岩、 二长 花岗岩 等	钾化、绢英岩 化、青磐岩化等	以石英为主 的绢英岩化， 次为钾硅酸 盐化和以绢 云母为主的 绢英岩化	矿体保存完整，矿化 连续，与围岩呈渐变 关系。主矿体只有 一个，椭圆形，主要 分布于 6~9 号勘探 线之间，赋存标高在 180 ~ - 770 米范围 内	网脉状矿石、细脉浸染 状矿石、浸染状矿石， 前两者为辉钼矿主要 的产出矿石类型。以 石英-辉钼矿脉为主， 少量石英-辉钼矿-黄铁 矿脉、石英-绢云母-辉 钼矿脉、辉钼矿±石英 脉等	辉钼矿、黄铁矿，少 量或微量磁铁矿、赤 铁矿、黄铜矿、方铅 矿、闪锌矿、钛铁矿、 磁黄铁矿、白钨矿等	萤石 发育	本课题
东沟	中国	东秦岭 地区	岩石圈 减薄引 发的伸 展环境	碱性- 性- 碱性	花岗 斑岩	安山 岩	硅化、钾长石 化、黑云母化、 绢云母化、萤石 化和绿泥石-碳 酸盐化	硅化和钾长 石化	呈水平的似层状(在 岩体的外接触带，平 均厚度 190m)	细脉浸染状和浸染状 矿化为主	辉钼矿，少量黄铁 矿、黄铜矿、闪锌矿、 方铅矿、白钨矿，大 量磁铁矿	萤石 发育	叶会寿等，2006； Mao <i>et al.</i> ，2008
金堆城	中国	东秦岭 地区	由挤压 向伸展 转换的 环境	碱性- 性- 碱性	花岗 斑岩	火山- 变质 岩	钾硅酸盐化、硅 化、绢云母-黄 铁矿化和青磐 岩化	绢英岩化和 硅化，次为钾 硅酸盐化	长宽比为 4 : 1 的矿 体，两侧围岩呈锯齿 状尖灭(在斑岩体和 其外接触带上)	以脉状、网脉状辉钼矿 矿化及纹层状石英-辉 钼矿脉为主，少量微细 脉状矿脉状矿化	辉钼矿、黄铁矿，少 量黄铜矿、磁铁矿、 闪锌矿、方铅矿	萤石 发育	Mao <i>et al.</i> ，2008； 郭波，2009
沙让	中国	冈底斯 多钼金 属成矿 带	大陆碰 撞的主 碰撞环 境	碱性- 性- 碱性	似斑 状花 岗岩- 花岗 斑岩	沉积 变质 杂岩	钾硅酸盐化、绢 英岩化、硅化、 粘土化(高岭土 化和伊利石-水 白云母化)和青 磐岩化	绢英岩化，次 为钾硅酸盐 化	呈披覆状产出的延 伸稳定的水平透镜 体(平均厚度 120m)	以脉状、网脉状辉钼矿 矿化及纹层状石英-辉 钼矿脉为主，少量浸染 状矿化，呈星点状分布 在角砾岩的基质矿化 和微细辉钼矿脉状矿 化	辉钼矿、黄铁矿，少 量黄铜矿、磁铁矿、 闪锌矿、白钨矿	非常 少量 的萤 石	秦克章等，2008

续表 5

Continued Table 5

矿床	国家	成矿 区带	构造 背景	矿床 分类	成矿 岩体	围岩	围岩蚀变	与钼矿化有关的 蚀变类型	矿体特征	矿化类型	矿石矿物	含氟 矿物	资料来源
Climax					花岗 斑岩		钾化、绢英岩 化、上下泥化、 青磐岩化、脉状 硅化、弥散状硅 化、磁铁矿和黄 玉化、云英岩化 和石榴石化	钾长石化、次 为绢英岩化	三个矿体呈近平行 倒钟形披覆在岩株 的顶部和上部	脉状辉钼矿化为主	辉钼矿、黄铁矿、黑 钨矿、锡石、菱锰矿、 闪锌矿、磁黄铁矿、 方铅矿、磁铁矿、少 量黄铜矿、钨锰矿	萤石、 黄玉	Wallace <i>et al.</i> , 1978; White <i>et al.</i> , 1981; Carten <i>et al.</i> , 1993; Seedorf and Einaudi, 2004a
Urad- Henderson	美国	科罗拉 多成矿 带	Rio Grande 裂谷系 伸展环 境	碱性- 碱性	—— 流纹 斑岩	岩浆- 变质 岩		钾长石化、绢 英岩化和黄 玉化	复合、非对称、与同 一侵入中心有关的 三个相互叠加的倒 钟形矿体	脉状、细脉状辉钼矿化 和矿化角砾岩墙	辉钼矿、黄铁矿、黑 钨矿、菱锰矿、闪锌 矿、磁黄铁矿、方铅 矿、磁铁矿、少量黄 铜矿、锡石		
Questa	美国	科罗拉 多成矿 带	Rio Grande 裂谷系 伸展环 境	碱性- 碱性	流纹 斑岩	细晶 岩、 石英 二长 岩等	钾硅酸盐化、硅 化、石英绢云 母化、青磐岩化	绢英岩化、钾 长石化	碟状、马蹄铁的角砾 岩矿体呈近水平分 布	主要为热液角砾岩型 矿化，常与石膏/硬石 膏以及绿柱石共生，少 量网脉状矿化	辉钼矿，少量黄铁 矿、方铅矿、黄铜矿、 白钨矿	萤石 发育	Ross <i>et al.</i> , 2002; Klemm <i>et al.</i> , 2008
Endako	加拿大	中加拿 大科迪 勒拉成 矿带	岛弧环 境	钙碱 性	石英 二长 岩	石英 二长 岩	钾长石化、石 英-绢云母-黄铁 矿化、高岭土 化、碳酸盐化和 少量的表生蚀 变	钾长石化、绢 英岩化和高 岭土化	呈水平的层状矿体 (沿北西-南东向延 伸,长约3.4km)	网脉状和纹层状辉钼 矿化,少量裂隙面矿 化和浸染状矿化	辉钼矿、黄铁矿、磁 铁矿,少量黄铜矿、 斑铜矿、辉铋矿、白 钨矿、镜铁矿、方铅 矿	无或 微量	Drummond and Kimura, 1969; Sel- by <i>et al.</i> , 2000
Malala	印度 尼西亚	北苏 拉威 岩浆带	俯冲后 的晚碰 撞到后 碰撞环 境	钙碱 性	正长- 二长 花岗 斑岩	花岗 岩、 花岗 闪长 岩	钾硅酸盐化、强 硅化、绢云母- 绿泥石-碳酸盐 化和碳酸盐-粘 土化	绢英岩化,次 为钾硅酸盐 化	约50m厚的矿化壳 (成矿岩体内)	网脉状石英-辉钼矿、 脉状含辉钼矿矿化, 少量纹层状石英-辉钼 矿矿化	辉钼矿、黄铁矿,少 量黄铜矿、闪锌矿、 磁黄铁矿、方铅矿、 磁铁矿	无或 微量	Van Leeuwen <i>et al.</i> , 1994

岩, 岩石介于高钾钙碱性-钾玄岩系列之间, 新鲜的岩石具高钾钙碱性的特征(任志等 2014)。Westra and Keith(1981)将斑岩型钼矿床分为碱钙性-碱性斑岩钼矿床和钙碱性斑岩钼矿床, 沙坪沟钼矿床属于碱钙性-碱性斑岩钼矿床。斑岩型钼矿床可产于与俯冲相关的弧后扩张环境、大陆弧后扩张环境、板块内部裂谷环境、与洋盆形成有关的裂谷环境、汇聚大陆板块边缘的岩浆弧环境以及板块内部伸展环境等多种构造背景(Sillitoe, 1972; Cooke *et al.*, 2005; Hou *et al.*, 2003), 沙坪沟钼矿床产于板块内部伸展背景。本次工作选取世界部分典型斑岩型钼矿床进行蚀变和矿化特征的系统对比(表5), 可见:

(1) 沙坪沟钼矿床与世界上其它重要钼矿床类似, 与成矿关系密切的岩石都是中酸性浅成侵入岩, 碱钙性-碱性斑岩型矿床相比钙碱性斑岩钼矿床, 有关侵入岩的酸性程度更高。

(2) 各矿床的围岩性质各异, 显示斑岩型钼矿床的产出与围岩性质没有明显的关系, 但围岩性质的不同, 可以导致各矿床的矿体产出位置及产状存在差异。产于板内伸展背景的沙坪沟钼矿床矿体为椭球状, 矿化连续, 产出于花岗岩与围岩的接触带中。东沟、金堆城、沙让、Endako、Malala 和 Questa 等矿床中的钼矿体则常呈披覆状水平产出, 常见有多层矿体。产于板内裂谷背景的 Climax 和 Urad-Henderson 矿床中具有多个矿化中心, 矿体呈复合、非对称、相互叠加的倒钟形产出。

(3) 各矿床中的矿石矿物种类具有一致性, 均以辉钼矿为主, 少量的黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等。沙坪沟钼矿中含有少量的赤铁矿, 但 Climax 和 Urad-Henderson 矿床中还含有锡石、菱锰矿等矿物。碱钙性-碱性斑岩型钼矿床中通常含有一定量的含氟矿物, 如萤石或黄玉等矿物, 而钙碱性斑岩型钼矿床中通常不含含氟矿物。

(4) 沙坪沟钼矿床与国内外典型斑岩型钼矿床具有较相似的矿化特征, 以网脉状和细脉状矿化为主, 沙让、Urad-Henderson、Questa 等钼矿床中还产出角砾岩型矿化。沙坪沟钼矿床发育的脉体类型与其它典型矿床基本一致, 但各类脉体的比例不尽相同, 主要矿脉为石英-辉钼矿脉, 少量为辉钼矿脉、石英-绢云母-辉钼矿脉等。

(5) 沙坪沟钼矿床产出的蚀变类型与其它典型矿床在总体上较为一致, 均以钾硅酸盐化、绢英岩化、青磐岩化等蚀变为主; 蚀变分带与其他典型矿床相似, 中心发育钾硅酸盐化带, 外围发育青磐岩化带, 后期绢英岩化叠加在前期蚀变之上。

(6) 不同构造背景产出的斑岩型钼矿床在与矿化关系最为紧密的蚀变类型上具有一定的差异。沙坪沟钼矿床中与矿化关系最为紧密的蚀变为以石英为主的绢英岩化, 次为钾硅酸盐化和以绢云母为主的绢英岩化, 与产于岩石圈减薄引发伸展环境的东沟钼矿床类似, 但产于挤压向伸展转换背景(金堆城)、板内裂谷环境(Climax, Urad-Henderson, Questa) 和

岛弧环境(Endako) 的斑岩型钼矿床中与矿化关系最为紧密的蚀变类型为钾长石化和/或绢英岩化, 产于陆陆碰撞主碰撞环境(沙让) 和俯冲后晚碰撞到后碰撞背景(Malala) 的斑岩钼矿中与矿化关系最为紧密的蚀变类型为绢英岩化, 次为钾化和硅化。

5 结论

(1) 沙坪沟钼矿床围岩蚀变类型主要有钾硅酸盐化、绢英岩化、青磐岩化等, 绢英岩化可细分为两种。矿床中产出 16 种脉体, 据此将成矿划分为四个阶段, 各阶段具有特征的蚀变和脉体类型。

(2) 沙坪沟钼矿床中与钼矿化关系最为紧密的围岩蚀变是以石英为主的绢英岩化。辉钼矿沉淀开始于石英-钾长石阶段晚期, 石英-硫化物阶段是辉钼矿主要的沉淀阶段, 结束于石英-绢云母阶段早期。

(3) 沙坪沟钼矿床的形成经历多阶段的蚀变-矿化作用, 成矿流体在不同阶段的物化条件和流体组分特征是控制蚀变类型以及不同脉体中矿物组合的重要因素。

(4) 产于板内环境的沙坪沟钼矿床与其他构造环境下的斑岩钼矿床在与成矿关系密切的岩浆岩地球化学特征和蚀变分带特征相似; 而在矿物种类、矿化赋存位置及产状、与矿化关系最为紧密的蚀变类型等方面存在差异。构造背景可能控制了成矿岩浆的形成、演化以及含矿性, 岩体侵位深度和围岩等条件是控制蚀变-矿化特征的重要因素。

References

- Burnham CW. 1979. Magmas and hydrothermal fluids. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 2nd Edition. New York: Wiley, 71-136
- Carten RB, White WH and Stein HJ. 1993. High-grade granite-related molybdenum systems classification and origin. In: Kirkham RV, Sinclair WD, Thorpe RI and Duke JM (eds.). *Mineral Deposit Modeling*. Geological Association of Canada Special Paper, 40: 521-554
- Chen HJ, Chen YJ, Zhang J, Chen XZ and Zhang HD. 2013. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics of the ore-bearing intrusion from the Shapinggou molybdenum deposit, Jinzhai County, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 131-145 (in Chinese with English abstract)
- Cooke DR, Hollings P and Walshe JL. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 100(5): 801-818
- Drummond AD and Kimura ET. 1969. Hydrothermal alteration at the Endako: A comparison to experimental studies. *Canadian Mining Metallurgical Bulletin*, 62: 709-714
- Fan LF. 2014. The geochemical formation mechanism of Shapinggou molybdenum deposit in Anhui Province. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English summary)
- Gao HM. 1995. A summary of researches on porphyry copper deposits. *Advance in Earth Science*, 10(1): 40-46 (in Chinese without English abstract)
- Guo B. 2009. *Geology, geochemistry and geodynamics setting of*

- Jinduicheng porphyry molybdenum deposit in East Qinling. Master Degree Thesis. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English summary)
- Gustafson LB and Hunt JP. 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, 70(5): 857–912
- Hedenquist JW and Lowenstern JB. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370(6490): 519–527
- Hemley JJ and Hunt JP. 1992. Hydrothermal ore-forming processes in the light of studies in rock-buffered system: II. Some general geologic applications. *Economic Geology*, 87(1): 23–43
- Hou ZQ, Ma HW, Zaw K, Zhang YQ, Wang MJ, Wang Z, Pan GT and Tang RL. 2003. The Himalayan Yulong Porphyry copper belt: Product of large-scale strike-slip faulting in Eastern Tibet. *Economic Geology*, 98(1): 125–145
- Huang F, Wang DH, Lu SM, Chen YC, Wang BH and Li C. 2011. Molybdenite Re-Os isotopic age of Shapinggou Mo deposit in Anhui Province and Mesozoic Mo ore-forming stages in East Qinling-Dabie Mountain region. *Mineral Deposits*, 30(6): 1039–1057 (in Chinese with English abstract)
- Huang F, Chen YC and Wang DH. 2013. Research on Part of Typical Molybdenum Deposits of Mesozoic in Eastern China. Beijing: Geological Publishing House, 1–272 (in Chinese without English abstract)
- Klemm LM, Pettke T and Heinrich CA. 2008. Fluid and source magma evolution of the Questa porphyry Mo deposit, New Mexico, USA. *Mineralium Deposita*, 43(5): 533–552
- Liu QN. 2013. Relationship between porphyry molybdenum deposit and magmatic rocks from Shapinggou in Jinzhai region, Anhui Province. Master Degree Thesis. Hefei: Hefei University of Technology (in Chinese with English summary)
- Lowell JD and Guilbert JM. 1970. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 65(4): 373–408
- Mao JW, Xie GQ, Bierlein F, Qü WJ, Du AD, Ye HS, Pirajno F, Li HM, Guo JB, Li YE and Yang ZQ. 2008. Tectonic implications from Re-Os dating of Mesozoic molybdenum deposits in the East Qinling-Dabie orogenic belt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(18): 4607–4626
- Meng XJ, Xu WY, Lü QT, Qu WJ, Li XC, Shi DF and Wen CH. 2012. Zircon U-Pb dating of ore-bearing rocks and molybdenite Re-Os age in Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Anhui Province. *Acta Geologica Sinica*, 86(3): 486–494 (in Chinese with English abstract)
- Mutschler FE, Wright EG, Ludington S and Abbott JT. 1981. Granite molybdenite systems. *Economic Geology*, 76(4): 874–897
- Qin KZ, Li GM, Zhao JX, Li JX, Xue GQ, Yan G, Su DK, Xiao B, Chen L and Fan X. 2008. Discovery of Sharang large-scale porphyry molybdenum deposit, the first single Mo deposit in Tibet and its significance. *Geology in China*, 35(6): 1101–1112 (in Chinese with English abstract)
- Ren Z, Zhou TF, Yuan F, Zhang DY, Fan Y and Fan Y. 2014. The Stages of magmatic system in Shapinggou molybdenum deposit district, Anhui Province: Evidence from geochronology and geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 1097–1116 (in Chinese with English abstract)
- Ross PS, Jébrak M and Walke BM. 2002. Discharge of hydrothermal fluids from a magma chamber and concomitant formation of a stratified breccia zone at the Questa porphyry molybdenum deposit, New Mexico. *Economic Geology*, 97(8): 1679–1979
- Rui ZY, Huang CK, Qi GM, Xu Y and Zhang HT. 1984. Porphyry Copper (-Molybdenum) Deposits in China. Beijing: Geological Publishing House, 1–350 (in Chinese without English abstract)
- Seedorff E and Einaudi MT. 2004. Henderson porphyry molybdenum system, Colorado: I. Sequence and abundance of hydrothermal mineral assemblages, flow paths of evolving fluids, and evolutionary style. *Economic Geology*, 99(1): 3–37
- Selby D, Nesbitt BE, Muehlenbachs K and Prochaska W. 2000. Hydrothermal alteration and fluid chemistry of the Endako porphyry molybdenum deposit, British Columbia. *Economic Geology*, 95(1): 183–202
- Sillitoe RH. 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 67(2): 184–197
- Sillitoe RH. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41
- Titley SR and Beane RE. 1981. Porphyry copper deposits: Part I. Geology setting, petrology, and tectogenesis. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume: 214–269
- Van Leeuwen TM, Taylor R, Coote A and Longstaffe FJ. 1994. Porphyry molybdenum mineralization in a continental collision setting at Malala, Northwest Sulawesi, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50(1–3): 279–315
- Wallace SR, Mackenzie WB, Blair RG and Muncaster NK. 1978. Geology of the Urad and Henderson molybdenite deposits, Clear Creek County, Colorado, with a section on a comparison of these deposits with those at Climax, Colorado. *Economic Geology*, 73(3): 325–368
- Wang BH, Wu ZL, Zhang HD and Peng HH. 2007. Geological and geochemical features of Mesozoic igneous rocks in the Yinsha area, Jinzhai, Anhui Province, and the implications. *Geology of Anhui*, 17(4): 244–248 (in Chinese with English abstract)
- Wang P. 2013. The characteristics and genesis of magmatic rocks in Shapinggou molybdenum ore district, Jinzhai, Anhui. Master Degree Thesis. Hefei: Hefei University of Technology (in Chinese with English summary)
- Westra G and Keith SB. 1981. Classification and genesis of stockwork molybdenum deposits. *Economic Geology*, 76(4): 844–873
- White WH, Bookstorn AA, Kamilli RJ, Ganster MW, Smith RP, Ranta DE and Steininger RC. 1981. Character and origin of Climax-type molybdenum deposit. *Economic Geology*, 75th Anniversary Volume: 270–316
- Xu G, Tang ZL, Jiao JG, Han XB, Zhong JX, Wei X and Qiu GL. 2012. The comparative study on small intrusion type molybdenum deposits of Shapinggou and Jinduicheng. *Northwestern Geology*, 45(4): 357–369 (in Chinese with English abstract)
- Xu XC, Lou JW, Lu SM, Xie QQ, Chu PL and Yin T. 2009. Re-Os ages of molybdenum-lead-zinc polymetallic deposits and ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages of related magmatic rocks in Yinshan area, Jinzhai, Anhui Province. *Mineral Deposits*, 8(5): 621–632 (in Chinese with English abstract)
- Xu XC, Lou JW, Xie QQ, Xiao QX, Liang JF and Lu SM. 2011. Geochronology and tectonic setting of Pb-Zn-Mo deposits and related igneous rocks in the Yinshan region, Jinzhai, Anhui Province, China. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 132–141
- Yang S, Jiang ZP, Zhang Q, Chen SY, Yuan YL and Zhang P. 2013. Alteration and its zoning features of the Shapinggou molybdenum ore deposit in Anhui Province. *Geology of Anhui*, 23(2): 98–103 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZM, Hou ZQ, Li ZQ, Song YC and Xie YL. 2008. Direct record of primary fluid exsolved from magma: Evidence from Unidirectional Solidification Texture (UST) in quartz found in Qulong porphyry copper deposit, Tibet. *Mineral Deposits*, 27(2): 188–199 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZQ. 2007. Re-Os isotopic ages of Tangjiaping molybdenum deposit in Shangcheng County, Henan and their geological significance. *Mineral Deposits*, 26(3): 289–295 (in Chinese with English abstract)
- Ye HS, Mao JW, Li YF, Guo BJ, Zhang CQ, Liu J, Yan QR and Liu GY. 2006. SHRIMP Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the super-large Donggou porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1078–1088 (in Chinese with English abstract)
- Yu W, Ni P, Wang GG, Shang L, Jiang LL, Wang BH and Zhang HD. 2012. Evolution of ore-forming fluids of the Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Jinzhai, Anhui Province. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 48(3): 240–255 (in Chinese with English abstract)

English abstract)

- Zhang H, Sun WD, Yang XY, Liang HY, Wang BH, Wang RL and Wang YX. 2011. Geochronology and metallogenesis of the Shapingou giant porphyry molybdenum deposit in the Dabie Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 85(12): 2039–2059 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HD, Shi DF, Hao YJ and Wang BH. 2010a. Geological features of the Shapingou porphyry molybdenum ore deposit, Jinzhai County, Anhui Province. *Geology of Anhui*, 20(2): 104–108 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HD, Wang GJ, Wang NH, Hao YJ, Xiang B and Peng HH. 2010b. Shapingou porphyry molybdenum ore-bearing intrusion and its alteration features. *Geology of Anhui*, 20(4): 260–266 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HD, Wang BH, Hao YJ, Cheng S and Xiang B. 2012. Geological characteristics and comprehensive ore-prospecting information of Shapingou porphyry-type molybdenum deposit in Anhui Province. *Mineral Deposits*, 31(1): 41–51 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈红瑾, 陈衍景, 张静, 陈秀忠, 张怀东. 2013. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿含矿岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 29(1): 131–145
- 范丽逢. 2014. 安徽沙坪沟钼矿床形成的地球化学机理. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 高合明. 1995. 斑岩铜矿床研究综述. *地球科学进展*, 10(1): 40–46
- 郭波. 2009. 东秦岭金堆城斑岩钼矿床地质地球化学特征与成矿动力学背景. 硕士学位论文. 西安: 西北大学
- 黄凡, 王登红, 陆三明, 陈毓川, 王波华, 李超. 2011. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿辉钼矿 Re-Os 年龄——兼论东秦岭-大别山中生代钼成矿作用期次划分. *矿床地质*, 30(6): 1039–1057
- 黄凡, 陈毓川, 王登红. 2013. 中国东部中生代典型钼矿研究. 北京: 地质出版社, 1–272
- 刘啟能. 2013. 安徽金寨沙坪沟斑岩钼矿床及其与岩浆岩的关系. 硕士学位论文. 合肥: 合肥工业大学
- 孟祥金, 徐文艺, 吕庆田, 屈文俊, 李先初, 史东方, 文春华. 2012. 安徽沙坪沟斑岩钼矿锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄. *地质学报*, 86(3): 486–494
- 秦克章, 李光明, 赵俊兴, 李金祥, 薛国强, 严刚, 栗登奎, 肖波, 陈雷, 范新. 2008. 西藏首例独立钼矿——冈底斯沙让大型斑岩钼矿的发现及其意义. *中国地质*, 35(6): 1101–1112
- 任志, 周涛发, 袁峰, 张达玉, 范裕, 范羽. 2014. 安徽沙坪沟钼矿区中酸性侵入岩期次研究——年代学及岩石化学约束. *岩石学报*, 30(4): 1097–1116
- 芮宗瑶, 黄崇轲, 齐国明, 徐钰, 张红涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京: 地质出版社, 1–350
- 王波华, 邬宗玲, 张怀东, 彭海辉. 2007. 安徽省金寨银沙地区中生代岩浆岩地质地球化学特征及其找矿意义. *安徽地质*, 17(4): 244–248
- 王萍. 2013. 安徽金寨沙坪沟钼矿区岩浆岩特征及成因. 硕士学位论文. 合肥: 合肥工业大学
- 徐刚, 汤中立, 焦建刚, 韩晓宝, 仲佳鑫, 魏翔, 邱根雷. 2012. 金堆城与沙坪沟小岩体斑岩钼矿床对比研究. *西北地质*, 45(4): 357–369
- 徐晓春, 楼金伟, 陆三明, 谢巧勤, 褚平利, 尹滔. 2009. 安徽金寨银山钼-铅-锌多金属矿床 Re-Os 和有关岩浆岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定. *矿床地质*, 28(5): 621–632
- 阳珊, 姜章平, 张青, 陈寿椅, 袁小玲, 张鹏. 2013. 安徽省沙坪沟钼矿床蚀变及其分带特征. *安徽地质*, 23(2): 98–103
- 杨泽强. 2007. 河南商城县汤家坪钼矿辉钼矿-钨同位素年龄及地质意义. *矿床地质*, 26(3): 289–295
- 叶会寿, 毛景文, 李永峰, 郭保健, 张长青, 刘珺, 闫全人, 刘国印. 2006. 东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义. *地质学报*, 80(7): 1078–1088
- 于文, 倪培, 王国光, 商力, 江来利, 王波华, 张怀东. 2012. 安徽金寨县沙坪沟斑岩钼矿床成矿流体演化特征. *南京大学学报(自然科学版)*, 48(3): 240–255
- 张红, 孙卫东, 杨晓勇, 梁华英, 王波华, 王瑞龙, 王玉贤. 2011. 大别造山带沙坪沟特大型斑岩钼矿床年代学及成矿机理研究. *地质学报*, 85(12): 2039–2059
- 张怀东, 史东方, 郝越进, 王波华. 2010a. 安徽省金寨县沙坪沟斑岩型钼矿成矿地质特征. *安徽地质*, 20(2): 104–108
- 张怀东, 王根节, 王波华, 郝越进, 项斌, 彭海辉. 2010b. 沙坪沟斑岩型钼矿含矿岩体及其蚀变特征. *安徽地质*, 20(4): 260–266
- 张怀东, 王波华, 郝越进, 程松, 项斌. 2012. 安徽沙坪沟斑岩型钼矿床地质特征及综合找矿信息. *矿床地质*, 31(1): 41–51