

doi: 10.12029/gc20160621

陈超, 牛树银, 张建珍, 等. 河北省木吉村铜(钼)矿床蚀变分带过程中元素迁移定量分析[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2118–2130.
Chen Chao, Niu Shuyin, Zhang Jianzhen, et al. A quantitative discussion on element mass migration during alteration processes in the Mujicun Cu (Mo) deposit, Hebei Province[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2118–2130(in Chinese with English abstract).

河北省木吉村铜(钼)矿床蚀变分带过程中元素迁移定量分析

陈 超¹ 牛树银¹ 张建珍¹ 马宝军¹ 张福祥¹

孙爱群¹ 王宝德¹ 张 醒¹ 张浩亮¹ 马国玺² 陈志宽²

(1.河北地质大学资源学院,河北 石家庄 050031;2.河北省保定地质工程勘察院,河北 保定 071051)

摘要:为了研究木吉村斑岩型铜(钼)矿床蚀变过程中元素的迁移规律,拟推流体演化规律,笔者通过对赋矿闪长玢岩体的强硅化带、钾长石化带、石英绢云母化带、青磐岩化带中分别取样测试分析,利用 Grant 方程定量探讨了各蚀变带围岩中主量元素、稀土元素和微量元素的带入、带出特征,结果表明:岩浆初始热液流体富 K 而贫 Na。相对原岩(蚀变弱的青磐岩化带),在各蚀变带中 Fe₂O₃、MgO、P₂O₅ 和 TiO₂ 从深部强硅化带到浅部石英绢云母化带总体上由带出变为带入, SiO₂、MnO 则与上述大体相反, FeO 在各蚀变带主体为带出元素。各稀土元素从深部向浅部石英绢云母化带带入特征明显,同时各蚀变带在稀土元素球粒陨石标准化曲线上表现出斜率一致的右倾型特征,说明轻重稀土分馏较明显,轻稀土富集,重稀土亏损。Cu 和 Mo 在石英绢云母化带中富集尤为明显,其次在钾长石化带也明显富集,即海拔 400~500 m 为主要的 Cu、Mo 富集区。

关键词:幔枝构造;铜(钼)矿床;元素迁移;Grant 方程;闪长玢岩;河北木吉村

中图分类号:P618.41;P618.65 文献标志码:A 文章编号:100-3657(2016)06-2118-13

A quantitative discussion on element mass migration during alteration processes in the Mujicun Cu (Mo) deposit, Hebei Province

CHEN Chao¹, NIU Shu-yin¹, ZHANG Jian-zhen¹, MA Bao-jun¹,
ZHANG Fu-xiang¹, SUN Ai-qun¹, WANG Bao-de¹, ZHANG Xing¹, ZHANG Hao-liang¹,
MA Guo-xi², CHEN Zhi-kuan²

(1. College of Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Baoding Institute of Geological Engineering and Exploration of Hebei Province, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: In order to deeply study the migration regularity of element and preliminarily infer the fluid evolution during alteration

收稿日期:2015-11-01;改回日期:2016-03-07

基金项目:国家自然科学基金(40872137)、河北省自然基金(D2015403013、D2013403018)、危机矿山项目(20109901、20089948)、河北地质大学博士基金(BQ201320)和河北省教育项目(ZC2016060)联合资助。

作者简介:陈超,男,1981年生,博士,主要从事构造地质学与构造控矿的教学与科研工作;E-mail:goldcc@163.com。

processes in the Mujicun Cu (Mo) deposit, the authors tested and analyzed the samples which were respectively collected from the strongly silicified zone, the potassic zone, the quartz-sericitic zone and the propylitic zone in the ore-bearing diorite porphyrite body. Through calculation based on the formula by Grant, the authors made a tentative quantitative discussion on characteristics of the gains and losses of elements during their migration. The results demonstrate that mass migration of different elements show certain regularities within the range of mineralized alteration: (1) the initial hydrothermal fluid is rich in K and is poor in Na. Compared with least-altered rocks (the propylitic zones), the losses of Fe_2O_3 , MgO , P_2O_5 and TiO_2 turn into the gains in altered rocks from deep strongly silicified zone to shallow quartz-sericitic zone, with the generally opposite migration regularity of SiO_2 and MnO , and FeO is depleted in the three alteration zones. (2) The migration regularity of rare earth elements is similar to that of Fe_2O_3 and some other components. The REE curves assume a rightly dipping REE pattern, indicating obvious fractionation between LREE and HREE, with the enrichment of LREE and the losses of HREE. (3) Cu and Mo are especially enriched in the quartz-sericitic zone and also relatively enriched in the potassic zone. These data suggest that the altitude of 400–500 m in the diorite porphyrite body is the main Cu and Mo enrichment area.

Key words: mantle branch structure; copper (molybdenum) deposit; element migration; Grant equation; diorite porphyrite; Mujicun in Hebei Province

About the first author: CHEN Chao, male, born in 1981, doctor, engages in teaching and scientific research on tectonics and its related mineralization; E-mail: goldcc@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40872137), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. D2015403013 and No. D2013403018), National Crisis Mine Project (No. 20109901 and No. 20089948), Doctor Foundation of Hebei University of Geology (No. BQ201320) and Science and Technology Research Project of Colleges and Universities in Hebei Province (No. ZC2016060).

众所周知,太行山中北段是一典型的金、银、铅-锌多金属矿集区,而目前该区域探明的大型铜矿稀少。木吉村铜(钼)矿床位于河北省涞源县杨家庄镇木吉村,经过近年的钻探控制,目前控制矿体南北长度1500 m,东西宽度在400~800 m,埋深在200~1200 m,矿带南东侧深部尚未控制,已探明铜资源量98.11万t、钼3.14万t,伴生金6.13 t、银243 t,为铜(钼)金银多金属矿床,且展示了很好的找矿潜力。

近年来,前人对本区矿床地质特征^[1-2]、构造控矿作用^[3-4]、成岩成矿年龄^[5-8]、岩体特征^[9]、成矿模式^[10-11]及区域成矿规律^[12-17]等多方面进行了专题研究和系统总结。很显然,对于本矿床来说,通过对岩矿地球化学特征来分析成岩成矿年龄和岩体成因是近年来的一大热点。但是,对于木吉村斑岩型铜矿床来说,其赋矿闪长玢岩体的蚀变分带较为明显,系统对比分析各个蚀变带的岩石地球化学特征,对于探讨成矿流体演化、成矿作用分析、地球化学勘探等方面均具有重要科学意义。尤其是近几年部分专家、学者相对定量地探讨了某些地区斑岩型铜矿各蚀变带元素富集、迁移规律,取得了很好的研究进展,并起到了很好的示范作用^[18-23],因而,本文尝试着利用Grant方程原理

对本矿床各蚀变带元素富集、迁移规律进行专题研究,力求取得更好的进展。

1 成矿地质背景

木吉村铜(钼)矿床产于太行山脉中北段阜平幔枝构造的北东倾伏端,哑铃状王安镇—司各庄岩体连接处西侧上盘拆离带的次级断陷盆地中,加上外围构成斑岩型铜(钼)–矽卡岩型铁铜–热液脉型铅锌等构成了三位一体的铜多金属矿田,是NNE向展布的中生代构造–岩浆–多金属成矿带内的重要组成部分。

区内地层主要由基底太古界阜平—五台群片麻岩系和盖层中上元古界—古生界碳酸盐岩地层组成。区内构造活动较为强烈,以断裂构造、古火山构造为主。古火山构造位于矿区东北部,断裂构造有NNE、NE、NEE、近SN、NW等多方向、多组合特征,以NNE、NE向乌龙沟断裂系为主,大多具多次活动历史。成矿控矿断裂主要为 F_4 ,位于矿区中部小立沟—磨石沟一带,木吉村及其周围鸽子岭、小立沟、浮图峪、茅儿峪等矿床(段)均受其控制。矿区周边岩浆岩属于涞源杂岩体的一部分,岩浆活动期次较多,岩石类型复杂,其中出露在矿区西南部主要呈岩株状产出的潜火山岩侵入岩体闪长玢岩

和邻近东北部为绵胡坨安山质角砾熔岩(图1)。

2 闪长玢岩地质特征

区内岩浆以闪长玢岩体为主,分布于矿区中部木吉村一带,北由铁岭南至磨石沟,西自F₄断裂东到顾家沟,地表出露面积约1.5 km²,是主要赋矿岩体。岩体总体呈“蘑菇状”,顶盖展布受NNE向断裂(F₄)及层间滑脱带控制,呈岩枝、岩床状迭层产出,呈扁桶状隐伏于木吉村古河床之下。岩体一般厚度150~200 m,主体“岩颈”长轴近南北向,东西两壁陡立,向SE深部延伸,目前长度大于1000 m(东南

界尚未控制),宽度约400 m。

矿区在地表平面和深部纵剖面上大体形成以闪长玢岩为中心的矿化分带明显,岩体内部为斑岩型铜钼矿化,岩体周围的碳酸盐岩围岩为矽卡岩型含铜磁铁矿化。根据野外地质特征、蚀变类型及矿物组合,可分为岩体内、外两个蚀变带:其中内蚀变带为典型斑岩热液蚀变带,从岩体中心向外大体分为强硅化带、钾长石化带(顶部局部发育硬石膏化)、石英-绢云母化带、青磐岩化带,其中钾化和石英-绢云母化带与斑岩型铜(钼)矿化关系最密切。外蚀变带为热液交代型蚀变带,主要发育于闪长玢

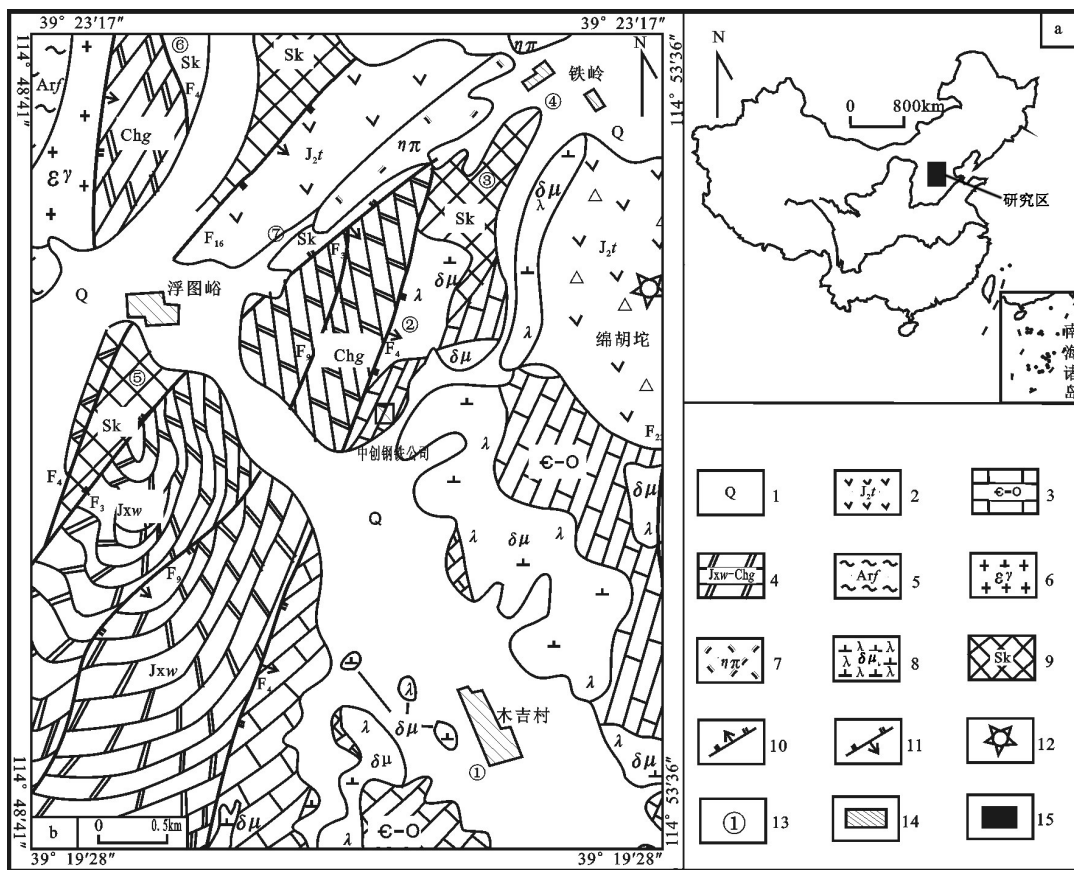


图1 木吉村矿田地质略图(据[1]修改)

a—木吉村矿田区域位置图;b—木吉村矿田地质简图:1—第四系;2—侏罗系髻髻山组安山岩;3—寒武—奥陶系灰岩;4—长城系—蓟县系白云岩;5—太古宇五台群片麻岩;6—钾长花岗岩;7—二长斑岩;8—闪长玢岩;9—矽卡岩;10—正断层;11—逆断层;12—古火山口;13—矿床(段):①—木吉村铜钼矿;②—鸽子岭铁铜矿;③—小立沟铁铜矿;④—铁岭铁铜矿;⑤—浮图峪铁铜矿;⑥—茅儿峪铁铜矿;⑦—东沟铁铜矿;14—村庄;15—矿田位置

Fig. 1 Geological sketch map of the Mujicun orefield (modified after reference [1])

a—Location of Mujicun orefield; b— Geological sketch map of the Mujicun orefield: 1—Quaternary; 2—Andesite of Jurassic Tiaojishan Formation; 3—Cambrian—Ordovician limestone; 4— Changcheng— Jixian System dolomite; 5— Gneiss of Archean Wutai Group; 6—Moyite; 7—Monzonite porphyry; 8—Diorite porphyrite; 9—Skarn; 10—Normal fault; 11—Inverse fault; 12—Paleo—crater; 13—Ore deposit (segment): ①—Mujicun copper (molybdenum) deposit; ②—Geziling iron—copper deposit; ③—Xiaoligou iron—copper deposit; ④—Tieling iron—copper deposit; ⑤—Futuyu iron—copper deposit; ⑥—Maoeryu Fe—Cu deposit; ⑦—Donggou iron—copper deposit; 14—Village; 15— Location of orefield

岩与围岩间接触带,及外围构造裂隙,从接触带向外主要划分为矽卡岩带、矽卡岩化碳酸盐岩带、大理岩带和灰岩带(图2、图3、表1)。

3 元素迁移定量分析

3.1 样品测试

本研究系统采集了岩体地表和本区目前最深钻孔 ZK7604 中不同蚀变带标本,共计 10 件样品做了主量元素、稀土元素和微量元素的分析(表 2)。样品数据皆是在中国地质科学院分析测试中心测试,主要氧化物用 X 射线荧光光谱仪(PW4400)分析,稀土元素和微量元素用等离子质谱仪(X-series)分析,最低检出限为 0.05×10^{-6} 。

3.2 Grant 方程简介

为了更准确地解决岩石在热液蚀变过程中元素的带入带出问题,Gresens(1967)依据蚀变岩石的组份浓度-体积关系,提出用于估算元素迁移的定量方程及其图解法^[24]。在此基础上,Grant(1986)考虑原岩和蚀变岩组分含量之间的关系,并提出更为简单的等浓度表示法^[25]。此方法在国内、外铜、钼、金等多金属矿均取得了较好的应用^[18-23,26-31]。

Grant 的等浓度法方程式形式如下:

$$C_i^A = (M^0/M^A)(C_i^0 + DC_i) \quad (1)$$

其中, C_i^0 、 C_i^A 为原岩、蚀变岩中第 i 中组分的浓度, M^0 、 M^A 分别为原岩和不同类型蚀变岩石的质量,可以通过确定惰性组分求得, DC_i 是组分 i 的质量分数变化,对于完全不活动的惰性组分 j 来说,蚀变前后质量一般没有变化, $DC_j=0$, 上式变为:

$$C_j^A = (M^0/M^A)C_j^0 \quad (2)$$

所以,惰性组分 j 在蚀变前后岩石组分的相关图上会构成一条通过原点的直线,直线的斜率就是 M^0/M^A ,该比值是蚀变前后对应质量的基本比值,这条 $DC_j=0$ 的直线可以称为等浓度线。将化学分析数据投在等浓度线图上,图上一系列点最佳拟合可构成该直线,落于直线上方的为带入元素,落在直线下方的为带出元素。

如果某些元素是绝对不活动的,则这些元素的点应该主要落在该直线上,但由于元素的相对不活动性和分析误差的存在,也会有少量相对不活动元素落在直线附近。选取不活动元素,用(2)式解联立方程,可以求出斜率 M^0/M^A 的值。然后用(1)式变换后,可以求出活动组分的带入带出量 DC_i , 见(3)式:

$$DC_i = C_j^0 \cdot C_i^A / C_j^A - C_i^0 \quad (3)$$

3.3 计算过程与结果分析

由于在矿区范围内出露的闪长玢岩整体发生蚀

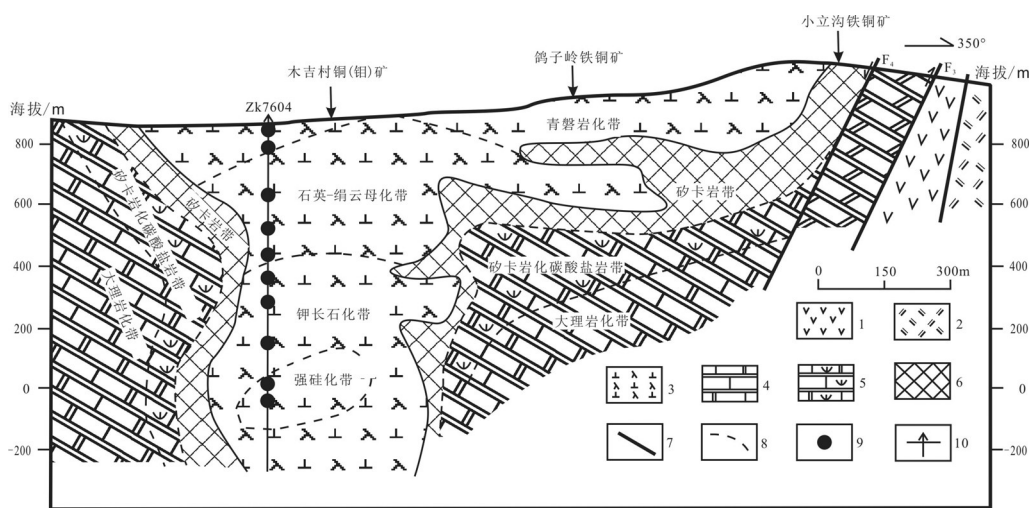


图2 木吉村铜(钼)矿田蚀变分带模式

- 1—安山岩; 2—二长斑岩; 3—蚀变闪长玢岩; 4—大理化碳酸盐岩; 5—蛇纹石化碳酸盐岩; 6—矽卡岩; 7—断层;
- 8—蚀变带界线; 9—大致取样位置; 10—钻孔

Fig. 2 Mode of alteration zone in the Mujicun Cu (-Mo) orefield

- 1—Andesite; 2—Monzonite porphyry; 3—Altered diorite porphyrite; 4—Marbleized carbonate; 5—Serpentinized carbonate; 6—Skarn;
- 7—Fault; 8—Alteration zone boundary; 9—Sampling position; 10—Drill hole

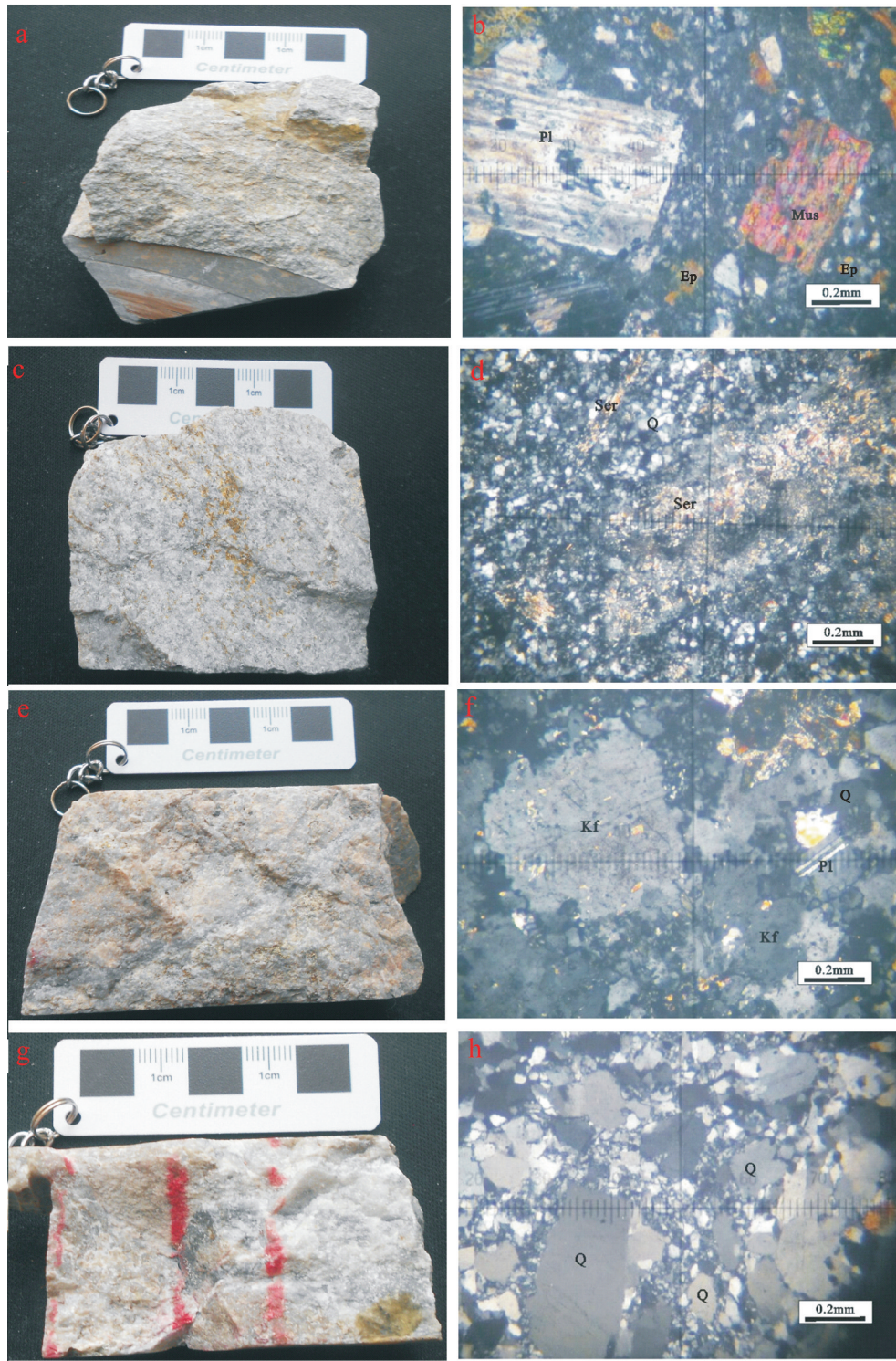


图3 木吉村铜(钼)矿闪长玢岩体蚀变特征和显微照片

a—青磐岩化闪长玢岩;b—青磐岩化中斜长石(Pl)、绿帘石(Ep)和云母(Mus);c—石英绢云母化闪长玢岩;d—石英绢云母化中绢云母(Ser)和石英(Q);e—硅化—钾长石化闪长玢岩;f—钾长石化中钾长石(Kf)、斜长石(Pl)和石英(Q);g—钾长石—硅化闪长玢岩;h—硅化中石英(Q)

Fig. 3 Features of the altered diorite porphyrite body and microphotographs of the Mujicun Cu (-Mo) deposit
a—Propylitic diorite porphyrite;b—Plagioclase, epidote and muscovite of propylitic zone;c— Quartz-sericitic diorite porphyrite;d— Sericite and quartz of quartz-sericitic zone;e— Silicified-potassic diorite porphyrite;f—K-feldspar, plagioclase and quartz of potassic zone;g—Potassic-silicified zone;h— Quartz of silicified zone

表1 木吉村矿区围岩蚀变带及矿物组合特征

Table 1 Characteristics of rock alteration zone and the mineral assemblage in the Mujicun mining area

岩石	闪长玢岩(内带)				碳酸盐岩围岩(外带)	
	强硅化带	钾长石化带	石英-绢云母化带	青磐岩化带	钙质砂卡岩带	镁质砂卡岩带
蚀变矿物	石英、钾长石	钾长石、石英、黑云母、硬石膏、绢云母、水云母等	绢云母、白云母、钠长石、钾长石、石英等	绿帘石、绿泥石、钠长石、石英、碳酸盐矿物	石榴石、透辉石、绿帘石、蛇纹石、绿泥石、方解石	透辉石、透闪石、蛇纹石、滑石、绿泥石、方解石、(硬石膏)
主要矿化金属矿物	少量钼-铜矿化 少量黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿	铜-钼矿化 黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿	铜-钼矿化 黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿	黄铁矿化 黄铁矿	铁铜-锌矿化 黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、镜铁矿、闪锌矿	铁铜-锌矿化 黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、闪锌矿、(方铅矿)

变,没有发现未蚀变的新鲜岩石标本。为研究各蚀变带的元素迁移规律,故本次选取近地表(及浅部)蚀变相对较弱的青磐岩化闪长玢岩(Fmj-21和Zk7604-8)代表未蚀变原岩,Zk7604-1、Zk7604-9、Zk7604-11代表石英-绢云母化带岩石,Zk7604-16、Zk7604-3、Zk7604-21代表钾长石化带岩石,Zk7604-23和Zk7604-24代表硅化带岩石。考虑面型蚀变各蚀变带宽窄不等,同一蚀变带中蚀变强度也不够均匀的特点,本文用不同蚀变带中分析样品的化学成分平均值代表各蚀变带的化学成分(如青磐岩化SiO₂含量为(63.48%+62.30%)/2=62.89%)来计算不同蚀变带中元素的带入或带出量。

前人研究表明Zr、TiO₂、Al₂O₃、Th和REE均可能在热液活动中保持惰性^[25,32],尤其是Al₂O₃、TiO₂在很多热液矿床蚀变中均可作为惰性组份且具有普遍意义^[33]。结合元素质量得失率计算结果,本文中选定相对稳定的Al₂O₃为惰性组分,作为计算元素迁移的参照标准。依据Grant方程计算结果详见表3:

4 讨论

4.1 主要元素迁移规律

从不同蚀变带的主要氧化物含量变化看(表2),地表和浅部青磐岩化岩石SiO₂含量高于标准闪长玢岩的SiO₂含量,从石英绢云母化带到强硅化带SiO₂的含量总体逐渐增加。全碱(Na₂O+K₂O)数值位于6.46%~8.92%(平均值),虽有所变化,但变化不大,规律性不明显,而Na₂O/K₂O的比值从青磐岩化带(1.18,平均值)到强硅化带(0.03,平均值)依次明显减小。MgO/(FeO+Fe₂O₃)的比值在矿化强度大的石英绢云母化带(0.63,平均值)和钾长石化带(0.76,平均值)蚀变岩石中比较高,在没有形成矿体

的青磐岩化带(0.47,平均值)和强硅化带(0.46,平均值)蚀变岩石中比值相对较低。

选择以斑岩铜矿远矿围岩青磐岩化闪长玢岩作为原岩,Al₂O₃为惰性组分,根据表1中不同蚀变带主要氧化物各自平均值制作C^A-C^o等浓度线图,如图4所示,各蚀变带等浓度斜率K=C^A(Al₂O₃)/C^o(Al₂O₃)分别为1.02,0.79,0.54(K<1时说明在蚀变过程中岩石的质量有所增加,K>1时表示岩石的质量有所减小),等浓度线上方为带入元素,等浓度线下方为带出元素。需要说明的是因为不同氧化物之间的含量级次相差较大,故而为了便于观察在同一图中体现其变化规律,部分元素的投点不是按实际含量,而是按照其相互比率乘以某个系数,并不影响其带入带出结果。依据(3)式所计算的各自带入带出量详见表3。

从图4可见,SiO₂从矿化强烈的石英绢云母化带向深部硅化带的带入量明显快速增加,以至于形成深部“石英核”。K₂O一直是强烈带入的元素,而Na₂O则是强烈带出的元素,说明引起闪长玢岩体蚀变的流体富含K₂O、SiO₂等,主要体现在斜长石和角闪石被钾长石和黑云母所交代,带入K的同时释放Na。Fe₂O₃、MgO、P₂O₅和TiO₂从深部到浅部总体上由带出变为带入,MnO则大体相反,FeO在各蚀变带主体均为带出元素,由Fe₂O₃与FeO带入带出特征说明晚期流体从深部向浅部迁移部伴随有氧逸度逐渐升高,而Ti等元素的变化可能与黑云母等矿物有关。CaO在钾长石化带中为带入元素,在其它蚀变带则为带出元素,Ca与S的结合在钾化带中形成硬石膏。

4.2 稀土元素迁移规律

从不同蚀变带的主要稀土元素含量(SREE,平

表2 木吉村铜矿各蚀变带岩石中元素化学分析结果

Table 2 Element chemical analyses of different alteration zones from the Mujicun Cu (Mo) deposit										
样品号	FmJ-21	7604-8	7604-1	7604-9	7604-11	7604-16	7604-3	7604-21	7604-23	7604-24
钻孔深度	地表	71 m	295 m	390 m	478 m	537 m	618 m	769 m	843 m	916 m
蚀变类型	青磐岩化 (原岩)		石英-绢云母化			钾长石化		强硅化		
SiO ₂	63.48	62.30	58.91	64.27	63.00	71.04	65.73	68.01	76.52	82.13
TiO ₂	0.45	0.56	0.65	0.56	0.56	0.36	0.35	0.37	0.31	0.15
Al ₂ O ₃	15.59	16.33	16.49	16.72	15.64	12.69	12.71	12.30	10.33	6.92
Fe ₂ O ₃	1.54	2.87	5.00	1.22	0.93	0.25	1.09	0.10	0.34	0.50
FeO	2.44	1.46	0.54	1.20	1.85	0.99	0.75	1.02	0.88	1.13
MnO	0.08	0.13	0.04	0.04	0.05	0.06	0.11	0.07	0.07	0.08
MgO	1.55	2.35	1.71	2.09	2.93	1.28	0.93	0.96	0.86	0.45
CaO	3.12	3.06	0.87	0.89	2.35	1.17	5.74	2.51	0.61	0.87
Na ₂ O	3.53	3.93	4.07	1.06	2.43	0.90	0.15	1.42	0.29	0.09
K ₂ O	3.57	2.75	4.36	6.39	5.44	8.34	7.59	8.37	7.55	4.98
P ₂ O ₅	0.24	0.28	0.29	0.25	0.27	0.11	0.12	0.18	0.09	0.05
LOI	3.64	3.04	4.27	3.25	3.02	1.43	3.76	4.00	1.40	1.81
Tot	99.23	99.06	97.20	97.94	98.47	98.62	99.03	99.31	99.25	99.16
ALK	7.10	6.68	8.43	7.45	7.87	9.24	7.74	9.79	7.84	5.07
Na ₂ O/K ₂ O	0.99	1.43	0.93	0.17	0.45	0.11	0.02	0.17	0.04	0.02
Na ₂ O/CaO	1.13	1.28	4.68	1.19	1.03	0.77	0.03	0.57	0.48	0.10
MgO/TFe	0.39	0.54	0.31	0.86	1.05	1.03	0.51	0.86	0.70	0.28
La	33.10	43.80	78.20	54.20	42.30	23.20	23.90	15.80	3.51	3.43
Ce	61.50	86.30	135.00	102.00	82.30	48.80	46.70	32.50	7.39	6.71
Pr	7.21	9.63	15.70	11.10	9.25	5.84	5.28	3.77	0.92	0.79
Nd	27.20	36.10	55.40	39.50	33.70	23.30	19.90	14.80	3.94	3.16
Sm	4.10	5.43	7.75	5.85	5.03	3.63	2.94	2.61	0.73	0.46
Eu	1.31	1.55	1.91	1.72	1.46	0.98	0.81	0.65	0.21	0.18
Gd	3.13	3.69	4.87	3.27	3.55	2.66	1.89	2.02	0.69	0.46
Tb	0.41	0.51	0.68	0.50	0.49	0.33	0.28	0.29	0.09	0.06
Dy	1.99	2.30	2.70	2.22	2.23	1.39	1.06	1.34	0.42	0.30
Ho	0.34	0.41	0.45	0.38	0.40	0.26	0.19	0.25	0.08	0.06
Er	0.99	1.18	1.26	1.11	1.13	0.65	0.57	0.70	0.24	0.18
Tm	0.13	0.15	0.15	0.14	0.13	0.08	0.07	0.09	--	--
Yb	0.92	1.00	0.87	0.95	0.99	0.50	0.47	0.58	0.24	0.14
Lu	0.13	0.16	0.12	0.14	0.14	0.08	0.07	0.09	--	--
δEu _球	0.95	1.07	1.00	0.89	1.10	1.00	0.99	0.98	0.83	0.89
LREE	134.42	182.81	293.96	214.37	174.04	105.75	99.53	70.13	16.70	14.73
HREE	8.04	9.40	11.10	8.71	9.06	5.95	4.60	5.36	1.76	1.20
ΣREE	142.46	192.21	305.06	223.08	183.10	111.70	104.13	75.49	18.46	15.93
LREE/HREE	16.72	19.45	26.48	24.61	19.21	17.77	21.64	13.08	9.49	12.28
Cs	3.34	1.01	2.32	3.54	2.05	0.47	1.77	0.92	1.65	1.10
Rb	58.40	41.20	48.80	82.90	63.30	76.20	88.70	135.00	95.10	68.80
Ba	2210.00	2176.00	2603.00	1887.00	1306.00	1474.00	1249.00	1108.00	994.00	715.00
Th	3.27	4.03	4.16	4.43	3.41	3.78	3.47	3.28	1.48	0.96
U	1.04	1.00	1.13	1.08	0.89	0.42	0.56	0.57	0.30	0.20
Ta	0.52	0.52	0.54	0.45	0.50	0.42	0.45	0.36	0.40	0.21
Nb	7.72	8.54	9.44	8.16	8.09	7.38	7.72	6.37	6.33	2.24
Pb	30.30	71.50	62.80	20.00	30.50	20.00	7.25	83.10	21.60	31.50
Sr	844.00	1149.00	560.00	410.00	845.00	584.00	472.00	435.00	202.00	160.00
Zr	116.00	161.00	149.00	148.00	140.00	118.00	101.00	114.00	87.00	48.00
Hf	3.40	4.45	4.11	4.20	3.77	3.36	2.88	3.14	2.40	1.46
Y	10.50	11.40	12.90	11.00	12.00	7.42	6.19	7.42	2.68	1.79
Li	17.20	15.20	7.21	9.50	18.50	8.71	10.60	9.93	9.94	3.40
Be	1.49	1.56	1.00	1.02	1.30	0.67	0.53	0.51	0.44	0.32
Sc	6.17	7.91	5.42	7.11	8.97	4.11	3.63	3.75	4.00	2.06
V	59.80	81.10	66.70	77.00	87.20	62.70	44.50	44.30	35.20	25.70
Cr	13.90	17.30	31.80	67.40	51.40	44.30	12.70	13.90	95.30	10.90
Ni	5.83	7.11	16.70	5.00	10.80	5.24	5.57	4.64	5.47	3.53
Cu	13.30	21.00	464.00	4293.00	3307.00	2471.00	310.00	46.50	65.50	103.00
Zn	79.20	90.90	97.70	60.50	42.80	42.20	34.70	52.00	48.70	41.40
Mo	12.10	1.85	32.60	221.00	186.00	91.40	78.40	25.10	7.20	6.38

注:常量元素单位%,微量元素单位10⁻⁶,--为未检测到,下同。

表3 蚀变岩石中元素质量迁移计算结果
Table 3 Calculation results of elements migration in different alteration zones

蚀变带	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Y
	/%	/%	/%	/%	/%	/%	/%	/%	/%	/%	/%	/10 ⁻⁶
石英绢云母化	-2.07	0.00	0.13	-0.78	-1.75	0.25	2.13	-1.26	0.07	-0.06	0.00	0.78
钾长石化	23.80	0.00	-1.60	-0.78	0.90	-0.61	7.13	-2.68	-0.05	0.00	-0.09	-2.05
硅化	83.86	0.00	-1.43	-0.09	-1.72	-0.74	8.43	-3.38	-0.08	0.03	-0.13	-6.82
蚀变带	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶
石英绢云母化	18.62	30.40	3.36	10.36	1.32	0.23	0.41	0.09	0.19	0.03	0.06	0.00
钾长石化	-11.82	-19.71	-2.12	-7.10	-0.88	-0.40	-0.63	-0.08	-0.54	-0.08	-0.27	-0.04
硅化	-32.03	-60.86	-6.84	-25.08	-3.66	-1.07	-2.35	-0.32	-1.48	-0.25	-0.70	--
蚀变带	Yb	Lu	ΣREE	Li	Be	Sc	V	Cr	Ni	Rb	Sr	Zr
	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶
石英绢云母化	-0.04	-0.01	65.00	-4.70	-0.44	-0.02	4.98	33.60	4.15	13.90	-403.60	4.25
钾长石化	-0.30	-0.04	-44.01	-3.82	-0.80	-2.18	-6.32	14.41	0.07	77.16	-365.31	2.47
硅化	-0.61	--	-135.69	-3.86	-0.82	-1.43	-14.12	82.64	1.86	101.81	-661.65	-13.44
蚀变带	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Pb	Th	U	Cu	Mo	Zn
	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶
石英绢云母化	0.26	0.41	-299.64	0.02	-0.03	2.16	-13.89	0.27	-0.01	2617.09	136.63	-19.39
钾长石化	0.96	-0.84	-571.21	0.05	0.00	1.51	-4.19	0.81	-0.36	1179.83	75.53	-30.48
硅化	-0.20	0.37	-612.18	-0.35	0.04	3.16	-1.78	-1.39	-0.56	138.71	5.59	-1.71

均值)变化看(表2),从石英绢云母化(237.08×10^{-6})—钾长石化带(97.11×10^{-6})—硅化带(17.20×10^{-6})逐渐降低,石英绢云母化带稀土元素的总量高于外围的青磐岩化闪长玢岩(167.34×10^{-6})。轻重稀土的比值(LREE/HREE)变化范围介于23.43~10.89(各带平均值)。 δEu 变化范围介于1.01~0.86(各带平均值),Eu异常较弱。在各蚀变带稀土元素球粒陨石标准化曲线上表现出斜率基本一致的右倾型(图5),说明轻稀土富集,重稀土亏损,轻重稀土分馏较明显,同时在蚀变作用过程中轻重稀土基本上呈一致的带出或带入。具体来说:

当玢岩体发生强硅化蚀变后,SREE由 167.34×10^{-6} 变为 17.20×10^{-6} ,降低0.90倍,各稀土元素含量均发生强烈的减少, $\delta\text{Eu}_{\text{球}}$ 由1.01变为0.86。蚀变后,LREE($158.62 \times 10^{-6} \rightarrow 15.72 \times 10^{-6}$)、HREE($8.72 \times 10^{-6} \rightarrow 1.48 \times 10^{-6}$)、LREE/HREE(18.09→10.89)均明显的降低。

当玢岩体发生钾长石化蚀变后,SREE由 167.34×10^{-6} 变为 97.11×10^{-6} ,降低0.42倍,各稀土元

素含量均发生强烈的减少, $\delta\text{Eu}_{\text{球}}$ 由1.01变为0.99。蚀变后,LREE($158.62 \times 10^{-6} \rightarrow 91.80 \times 10^{-6}$)、HREE($8.72 \times 10^{-6} \rightarrow 5.30 \times 10^{-6}$)、LREE/HREE(18.09→17.50)均明显的降低。

当玢岩体发生石英绢云母化蚀变后,SREE由 167.34×10^{-6} 变为 237.08×10^{-6} ,升高0.42倍,除Lu、Yb和Tm含量基本持平之外,各稀土元素含量均发生升高, $\delta\text{Eu}_{\text{球}}$ 由1.01变为1.00。蚀变后,LREE($158.62 \times 10^{-6} \rightarrow 227.46 \times 10^{-6}$)、HREE($8.72 \times 10^{-6} \rightarrow 9.62 \times 10^{-6}$)、LREE/HREE(18.09→23.43)均明显的升高。

经过统计分析,钾化带中REE亏损(-70.23×10^{-6})和石英绢云母化带中REE富集($+69.74 \times 10^{-6}$)具有很好的互补性,这说明在流体演化和岩石蚀变过程中,REE总体上有从深部向浅部迁移和富集规律。前人对本矿床热液活动期次和流体包裹体做了较好的总结,认为流体演化主要分为早、中、晚三个期次^[34]。早期流体为属于高温、高盐度、富CO₂的H₂O-CO₂体系,而强硅化形成于玢岩体弱固结时期,与早期钾硅酸盐化蚀变密切相关。由于REE络

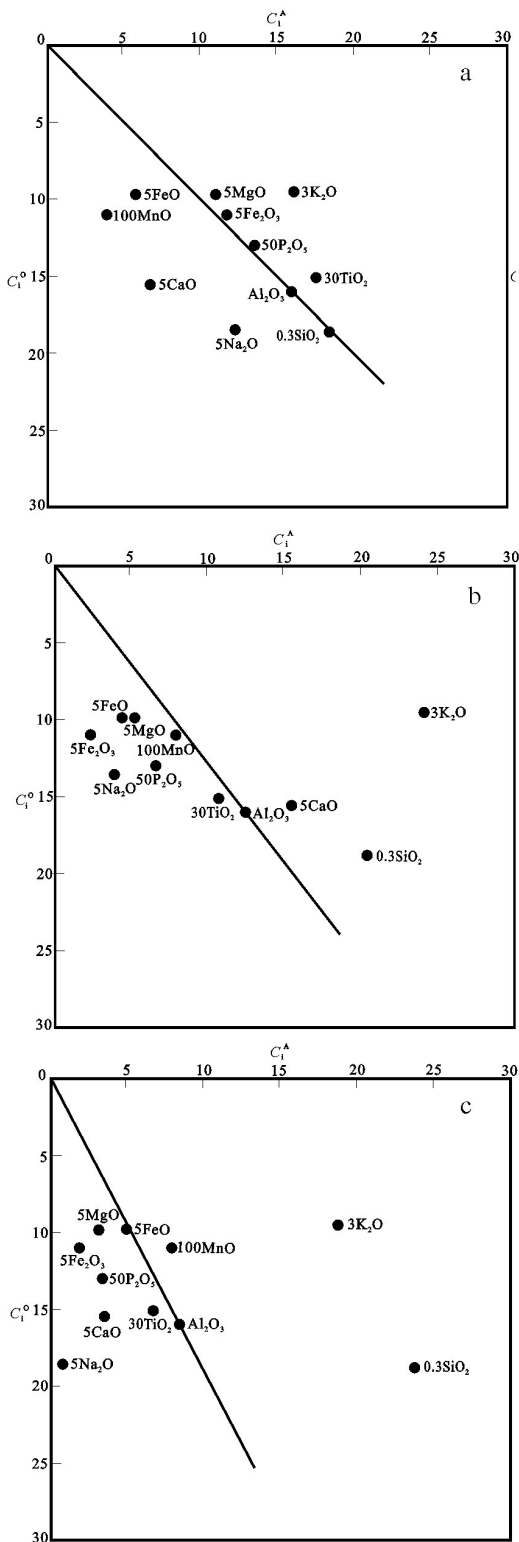


图4 木吉村铜(钼)矿不同蚀变带常量元素等浓度线 $C_1^A-C_1^O$ 图
a—石英绢云母化带;b—钾长石化带;c—硅化带

Fig. 4 An isocon diagram of major elements in alteration zone of the Mujicun Cu (Mo) deposit

a—Silicified zone; b—Potassic zone; c—Quartz-sericitic zone

合物在酸性溶液中不稳定^[35],导致REE主要呈离子化合物形式迁移,说明本矿床早期流体处于酸性环境,使得硅化带中的REE向外迁移,硅化交代越强烈,REE亏损越显著,这就解释了硅化带中的REE含量极少和钾化带中REE相对亏损的缘故。中期流体属于中温、中等盐度的 H_2O-CO_2-NaCl 体系。随着降温降压过程,继续向上运移的流体发生了沸腾作用, CO_2 等气体大量逸出导致 Cl^- 溶解度降低,而载REE的氯络合物失稳会引发REE沉淀。因此当流体演化由钾长石化带进入到石英绢云母化带时,强烈的沸腾作用使得REE沉淀和开始富集。晚期流体为低温、低盐度的 $H_2O-NaCl$ 体系。随着流体继续向外迁移,大气降水的混入,水岩反应的持续等因素使得在石英绢云母化带上部的REE得到进一步富集。

此外,不同蚀变带中不相容元素的原始地幔标准化蛛网图显示(图5),总体上图富集大离子亲石元素Ba、K、Sr,而亏损高场强元素Nb、Ta、P、Ti,就各蚀变带而言高场强元素(如Zr、Hf、U、Th、Ti、P和大部分稀土元素)从石英绢云母化带—钾长石化带—硅化带也呈现比较一致的降低趋势,而大离子亲石元素(如Rb、K、Pb)规律不明显,可能大离子亲石元素的迁移受交代蚀变矿物的控制,而高场强元素的迁移受热液扩散运移的控制。

4.3 微量元素迁移规律

在闪长玢岩成矿地质体中,斑岩型铜钼矿床表现为面型蚀变与矿化,地表及钻孔中所见到的闪长玢岩普遍发育不同类型、不同程度的蚀变作用。根据表2矿区钻孔(ZK7604)闪长玢岩主要成矿元素不同深度的蚀变带的各自平均值与岩浆岩中闪长玢岩的平均含量^[37]相比可知:对于成矿元素而言,由于矿化剂元素S的大量带入,导致大量的金属元素诸如Cu、Mo等沉淀富集,特别是在石英绢云母化带中富集尤为明显,其次在钾长石化带也明显富集,Cu和Mo含量总体以闪长玢岩体海拔400~500 m为中心向周边递减(按目前勘探程度而言),其中Cu在青磐岩化岩石中亏损,而Mo在所有蚀变岩石中都呈富集状态,Pb总体呈弱富集状态,Zn在青磐岩化岩石中亦显弱富集,在其它蚀变带中略亏损。过渡元素Sc与Pb呈现一致的变化规律,而V、Cr、Ni都表现为亏损状态(表4、图6)。

4.4 流体演化规律

河北省木吉村铜矿具有与典型Clinmax斑岩铜矿床相似的热液蚀变特征:即从岩体中心向外依次是钾硅酸盐化(主要是钾长石化)、石英绢云母化和青磐岩化^[38]。不同的是,Clinmax斑岩铜矿床成矿物质沉淀主要发生在钾硅酸盐化阶段,而木吉村铜矿主要发生在石英绢云母化阶段,即石英绢云母化带是钼、铜矿(化)的主要赋存部位(从微量元素富集规律可知,Cu和Mo在石英绢云母化带中富集尤为明显,其次为在钾长石化带富集)。其次,从Fe₂O₃和FeO在各蚀变带中带入带出关系,可知流体从深部往浅部迁移,其氧逸度总体上逐渐升高。尤其在石

英绢云母化带中由于矿质S²⁻的加入,使得Cu和Mo快速沉淀。当流体处于相对高氧逸度环境,O元素与S元素结合形成SO₄²⁻等状态,当流体处于相对低氧逸度环境,才可能允许S元素以S²⁻的形式存在。结合各蚀变带元素迁移规律,推测:流体演化早期属于高温、高盐度、富CO₂的H₂O-CO₂体系,处于相对还原环境,硅化带中S主要与Fe形成黄铁矿,少量黄铜矿和辉钼矿;而在钾长石化带主要形成黄铁-黄铜矿化(中下部)、铜-钼矿化(中上部),向上迁移过程中氧逸度逐渐升高,特别是在钾长石化带上部局部形成硬石膏化,消耗了大量氧而控制了流体中氧逸度升高速率,同时充分的多期硅化过程

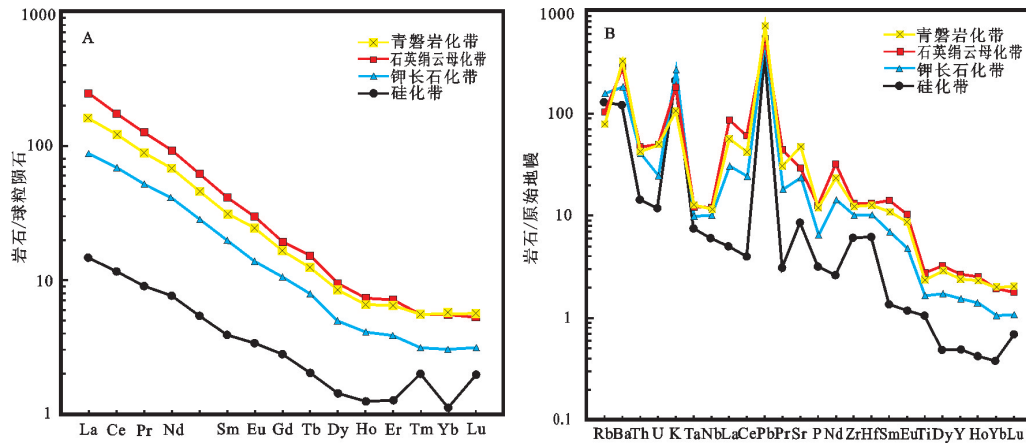


图5 不同蚀变带中稀土元素球粒陨石标准化分布图和微量元素原始地幔标准化蛛网图球粒陨石、原始地幔标准化值据参考文献[36]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram of different alteration zones from the Mujicun Cu (-Mo) deposit (primitive mantle and chondrite data after reference [36])

表4 闪长玢岩不同蚀变带中成矿元素和部分过渡元素分析结果

Table 4 Analytical results of ore-forming elements and some transition elements in different alteration zones from the diorite-porphryrite

岩性	样品数 / 件	元素/10 ⁻⁶							
		Cu	Pb	Zn	Mo	Sc	V	Cr	Ni
青磐岩化带平均值	2	17.15	50.90	85.05	6.98	7.04	70.45	15.60	6.47
比值		0.49	3.39	1.18	7.75	2.82	0.70	0.26	0.12
石英绢云母化带平均值	3	2688.00	37.77	67.00	146.53	7.17	76.97	50.20	10.83
比值		76.80	2.52	0.93	162.81	2.87	0.77	0.85	0.20
钾长石化带平均值	3	942.50	36.78	42.97	64.97	3.83	50.50	23.63	5.15
比值		26.93	2.45	0.60	72.19	1.53	0.51	0.40	0.09
硅化带平均值	2	84.25	26.55	45.05	6.79	3.03	30.45	53.10	4.50
比值		2.41	1.77	0.63	7.54	1.21	0.30	0.90	0.08
闪长玢岩平均值 ^[37]		35.00	15.00	72.00	0.90	2.50	100.00	59.00	55.00

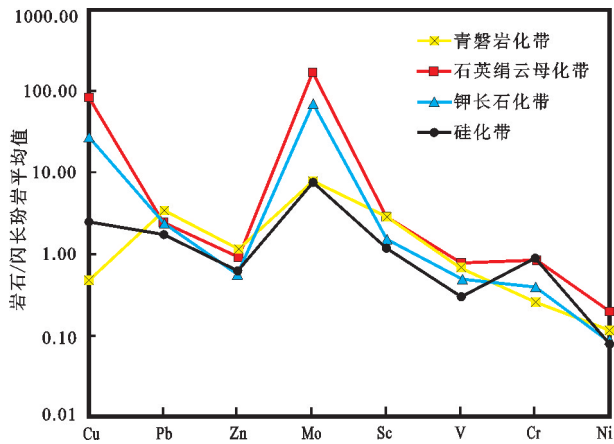


图6 不同蚀变带主要成矿元素和过渡元素闪长玢岩均值标准化图

Fig. 6 The diorite porphyrite-normalized diagram of main ore-forming elements and some transition elements in different alteration zones

(及水/岩环境)使得岩体中稀土向外迁移。中期流体属于中温、中等盐度的 H_2O-CO_2-NaCl 体系,流体总体处于低氧逸度、高硫逸度环境,伴随温压降低向上迁移至钾化带与石英绢云母化带接壤部位(特别是石英绢云母化带下部)时,开始发生沸腾作用,大量气体逸出,致使载矿组份溶解度降低,不仅形成黄铁矿,而且导致大量的Cu和Mo矿质沉淀,形成一定规模的工业铜和钼矿化,同时使得稀土元素因卸载而得到初步富集。因而,此过程中的成矿环境可能由相对还原环境过渡到氧化环境,而石英绢云母化带中下部可能就是最主要的氧化-还原转换地带。晚期流体为低温、低盐度的 $H_2O-NaCl$ 体系,随着流体继续向外迁移,大气降水混入的增加,水岩反应的持续,在石英绢云母化带中上部形成一些次要黄铜矿体,而稀土元素亦得到进一步富集。

5 结 论

(1)各蚀变带的常量元素分析表明:从岩体浅部石英绢云母化带至深部强硅化带, SiO_2 的强烈带入以至于形成深部“石英核”。热液流体富K而贫Na, Fe_2O_3 、 MgO 、 P_2O_5 和 TiO_2 从深部到浅部总体上表现为由带出变为带入, MnO 则大体相反, FeO 在各蚀变带中主要为带出元素。此外, $MgO/(FeO+Fe_2O_3)$ 的比值高低可作为找矿的重要标志。

(2)各蚀变带的稀土元素分析表明:稀土元素

的总量(SREE)从石英绢云母化-钾长石化带-硅化带逐渐降低,这可能是深部充分的硅化过程使得岩体中稀土总量急剧减少而于流体相富集,迁移至石英绢云母化带时则因地球物理-地球化学环境变化卸载而富集所致。在稀土元素球粒陨石标准化曲线上表现出斜率较为一致的右倾型,说明各蚀变带轻重稀土分馏较明显,同时在蚀变作用过程中轻重稀土基本上呈一致的带出或带入。

(3)各蚀变带的微量元素分析表明:Cu和Mo在石英绢云母化带中富集尤为明显,其次为在钾长石化带也明显富集,Cu和Mo含量总体以闪长玢岩体海拔400~500m为中心向周边逐渐递减,其中Cu在青磐岩化岩石中亏损,而Mo在所有蚀变岩石中都成富集(或者略富集)状态,Pb总体呈弱富集状态,Zn在青磐岩化岩石中弱富集,在其它蚀变带略亏损。

(4)成矿环境可能由相对还原环境逐渐过渡到氧化环境,而石英绢云母化带下部最可能就是主要的氧化-还原转换地带。这就是木吉村形成大型铜(钼)矿的主要成矿地质背景和成矿地质作用。值得提出的是在太行山中北段多有相类似成矿条件,应该注重在典型矿床解剖研究的基础上,加以规律性总结,举一反三推广并扩大地质找矿经验,指导新一轮地质找矿。

参考文献(References):

- [1] 马国玺. 河北省涞源县木吉村铜矿地质特征及成矿模式[J]. 华北地质矿产杂志, 1997, 12(1): 52-66.
Ma Guoxi. Geological characteristics and metallogenic model of copper deposit at Muji Village of Laiyuan County, Hebei Province[J]. Journal of Geology and Mineral Resources of North China, 1997, 12(1):52-66(in Chinese with English abstract).
- [2] 马国玺, 陈志宽, 陈立景, 等. 木吉村铜(钼)矿床地质特征[J]. 矿床地质, 2010, 29(6): 1101-1111.
Ma Guoxi, Chen Zhikuan, Chen Lijing, et al. Geological characteristics of Mujicun copper (molybdenum) deposit[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(6): 1101- 1111 (in Chinese with English abstract).
- [3] 吕贻峰, 秦松贤, 邓兆伦. 河北涞源木吉村-浮图峪铁铜多金属矿田成矿构造条件分析及成矿模式研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1989, 14(5):563-572.
Lu Yifeng Qin Songxian, Deng Zhaolun. Analysis of mineralizing tectonic setting and study of metallogenetic model in Mujicun-Futuyu Fe-Cu polymetallic orefield, Laiyuan, Hebei Province[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1989, 14(5):563-572(in Chinese with English abstract).
- [4] 陈超, 牛树银, 马宝军, 等. 河北省木吉村铜(钼)矿床构造控矿分

- 析[J].地质与勘探, 2013, 49(5):861-871.
- Chen Chao, Niu Shuyin, Ma Baojun, et al. An analysis on ore-controlling structures of the Mujicun Cu (-Mo) deposit in Hebei Province[J].Geology and Exploration, 2013, 49(5):861-871(in Chinese with English abstract).
- [5] Dong G C, Santosh M, Li S R, et al. Mesozoic magmatism and metallogenesis associated with the destruction of the North China Craton: Evidence from U-Pb geochronology and stable isotope geochemistry of the Mujicun porphyry Cu-Mo deposit[J].Ore Geology Reviews, 2013, 53: 434-445.
- [6] Gao Y, Santosh M, Hou Z, et al. High Sr/Y magmas generated through crystal fractionation: Evidence from Mesozoic volcanic rocks in the northern Taihang orogen, North China Craton[J].Gondwana Research, 2012, 22(1):152-168.
- [7] Li S R, Santosh M, Zhang H F, et al. Inhomogeneous lithospheric thinning in the central North China Craton: Zircon U-Pb and S-He-Ar isotopic record from magmatism and metallogeny in the Taihang Mountains [J]. Gondwana Research, 2012, 23(1) :141-160.
- [8] 陈超, 王宝德, 牛树银, 等.河北木吉村铜(钼)矿床辉钼矿Re-Os年龄及成矿流体特征[J].中国地质, 2013, 40(6):1889-1901.
- Chen Chao, Wang Baode, Niu Shuyin, et al. Re-Os dating of molybdenite from Mujicun Cu (-Mo) Deposit in Hebei Province and characteristics of ore-forming fluids[J].Geology in China, 2013, 40(6):1889-1901(in Chinese with English abstract).
- [9] 曲凯, 董国臣, 李胜荣, 等.太行山木吉村斑岩铜(钼)矿床岩石地球化学、Sr-Nd-Pb同位素特征及其地质意义[J].现代地质, 2014, 28(3):449-460.
- Qu Kai, Dong Guochen, LI Shengrong, et al. Lithogeochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of Mujicun porphyry Cu-Mo deposit in Taihang Mountains and their significances[J].Geoscience, 2014, 28(3): 449-460(in Chinese with English abstract).
- [10] 陈超, 王宝德, 牛树银, 等.河北涞源县木吉村铜(钼)多金属矿田成矿物质来源探讨[J].吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(1): 106-118.
- Chen Chao, Wang Baode, Niu Shuyin, et al. Discussion on the ore-forming material sources of Mujicun copper (molybdenum) polymetallic orefield in Laiyuan County, Hebei Province, China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(1):1-14(in Chinese with English abstract).
- [11] 高永丰, 魏瑞华, 侯增谦, 等.木吉村斑岩铜矿成矿作用:华北克拉通中生代岩石圈减薄的响应[J].矿床地质, 2011, 30(5):890-902.
- Gao Yongfeng, Wei Ruihua, Hou Zengqian, et al. Mujicun porphyry copper mineralization: Response to Mesozoic thinning of lithosphere in North China Craton[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(5):890-902(in Chinese with English abstract).
- [12] 王宝德, 牛树银, 孙爱群, 等.深部矿源与幔枝构造成矿[M].北京:地质出版社, 2010:129-207.
- Wang Baode, Niu Shuyin, Sun Aiqun, et al. Deep Source of Ore-Forming Materials and the Metallogenesis of Mantle Branch Structure[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010:129-207(in Chinese).
- [13] 牛树银, 陈路, 许传诗.太行山区地壳演化及成矿规律[M].北京:地震出版社, 1994:131-141.
- Niu Shuyin, Chen Lu, Xu Chuanshi. Crustal Evolution and Metallogeny in the Taihang Mountains[M]. Beijing : Seismological Press, 1994 :131-141(in Chinese).
- [14] 喻学惠, 任建业, 张俊霞.太行山中段铜-金成矿条件及找矿方向[M].北京:地质出版社, 1996:61-84.
- Yu Xuehu, Ren Jianye, Zhang Junxia. Themetallogenic Condition and Prospecting Direction of the Copper-gold in the Middle of Taihangshan Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996:61-84 (in Chinese).
- [15] 冯钟燕, 陈廷礼, 赵永超.太行山北段中生代成矿时间演化[J].地质前缘, 1999, 6(2):343-349.
- Feng Zhongyan, Chen Tingli, Zhao Yongchao. The evolution of metallization during Mesozoic ERA in the Northern Taihang Mountains[J].Earth Science Frontiers , 1999, 6(2):343-349(in Chinese with English abstract).
- [16] 秦大军.太行山北段多金属矿床地球化学特征[J].贵金属地质, 1997, 6(3):161-170.
- Qin Dajun. Geochemical features of polymetallic deposits in the Northern Section of Taihang Mountains[J]. Journal of Precious Metallic Geology, 1997, 6(3):161-170(in Chinese with English abstract).
- [17] 许洪才, 毕伏科, 张德生, 等.河北省涞源县王安镇杂岩体多金属成矿规律[J].地质调查与研究, 2006, 29(1):11-20.
- Xu Hongcai, Bi Fuke, Zhang Desheng, et al. Polymetallic metallogenic regularity of the Wang'an zhen complex in Laiyuan County, Hebei Province[J]. Geological Survey and Research, 2006, 29(1):11-20(in Chinese with English Summary).
- [18] 马生明, 朱立新, 刘崇民, 等.斑岩型Cu(Mo)矿床中微量元素富集贫化规律研究[J].地球学报, 2009, 30(6):821-830.
- Ma Shengming, Zhu Lixin, Liu Chong-min, et al. A study of the enrichment and depletion regularity of trace elements in porphyry Cu (Mo) deposits [J].Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30 (6):821-830(in Chinese with English abstract).
- [19] 艾金彪, 马生明, 樊连杰.内蒙古乌努格吐山斑岩型铜钼矿床元素迁移定量探讨[J].地球学报, 2013, 34(2):193-202.
- Ai Jinbiao, Ma Shengming, Fan Lianjie. A quantitative discussion on element mass migration in the Wunugutushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia[J].Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(2):193-202(in Chinese with English abstract).
- [20] 艾金彪, 马生明, 朱立新, 等.长江中下游马头斑岩型铜钼矿床常量元素、稀土元素特征及迁移规律[J].地质学报, 2013, 87(5): 691-702.
- Ai Jinbiao, Ma Shengming, Zhu Lixin, et al. Characteristic and migration regularity of major elements and REEs in Matou

- porphyry Mo–Cu deposit in the Middle–Lower Reaches of Yangtze River[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(5):691–702(in Chinese with English abstract).
- [21] 宓奎峰, 柳振江, 李春风, 等. 内蒙古乌努格吐山大型铜钼矿床元素迁移及成矿过程探讨[J]. *中国地质*, 2014, 41(4):1270–1287.
Mi Kuifeng, Liu Zhenjiang, Li Chunfeng, et al. Metallogenic processes and migration of ore-forming elements in the Wunugutushan porphyry Cu–Mo deposit, Inner Mongolia[J]. *Chinese Geology*, 2014, 41(4):1270–1287(in Chinese with English abstract).
- [22] 魏少妮, 朱永峰, 安芳. 新疆包古图地区斑岩型铜矿化特征和成矿元素迁移规律初探[J]. *矿床地质*, 2014, 33(1):165–180.
Wei Shaoni, Zhu Yongfeng, An Fang. Mineralization and elements migration characteristics of porphyry copper deposits in Baogutu area, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(1):165–180(in Chinese with English abstract).
- [23] 李培, 邓小虎, 陈守余. 个旧蚀变岩型铜多金属矿床围岩蚀变过程中元素迁移定量研究[J]. *地质找矿论丛*, 2011, 26(2):176–181.
Li Pei, Deng Xiaohu, Chen Shouyu. Quantitative study of elements migration during the wall–rock alteration on Gejiu altered rock–type copper–polymetallic deposit[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2011, 26(2):176–181(in Chinese with English abstract).
- [24] Gresens R L. Composit ion—volume relation of metasomatism[J]. *Chem.Geol.*, 1967: 247–65.
- [25] Grant J A. The isocon diagram—a simple solution to Gresens' s equation for metasomatic alteration[J]. *Econ.Geol.*, 1986, 81 : 1976–1982.
- [26] Appleyard E C. Mass balance computations in metasomatism: Metagabbro/nepheline syenite pegmatite interaction in northern Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1980, 73 (2): 131–144.
- [27] Morton R L, Nebel M L. Hydrothermal alteration of felsic volcanic rocks at the Helen siderite deposit, Wawa, Ontario[J]. *Economic Geology*, 1984, 79(6): 1319–1333.
- [28] 王祖伟, 周永章, 张海华, 等. 粤西廉江银金矿床围岩蚀变特征及元素迁移的定量估计[J]. *地球化学*, 1998, 27(3): 251–257.
Wang Zuwei, Zhou Yongzhang, Zhang Haihua, et al. Characteristics and quantitative estimation on element migration in hydrothermal wall–rock alteration in Lianjiang silver–gold deposit, western Guangdong Province, south China[J]. *Geochimica*, 1998, 27(3): 251–257(in Chinese with English abstract).
- [29] 唐相伟, 李运冬, 易善涛. 河南商城县汤家坪钼矿床围岩蚀变过程中元素迁移规律[J]. *四川地质学报*, 2010, 30(3): 284–287.
Tang Xiangwei, Li Yundong, Yi Shantao. Element migration during wall–rock alteration in the Tangjiaping Mo deposit, Shangcheng, Henan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2010, 30(3): 284–287(in Chinese with English abstract).
- [30] 魏俊浩, 刘丛强, 丁振举. 热液型金矿床围岩蚀变过程中元素迁移规律——以张家口地区东坪、后沟、水晶屯金矿为例[J]. *矿物学报*, 2000, 20(2): 200–206.
Wei Junhao, Liu Congqiang, Ding Zhenju. Active laws of element migration in wall–rock alteration processes for hydrothermal gold deposits: As evidenced by Dongping, Hougou and Shuijingtun gold deposits[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2000, 20(2): 200–206(in Chinese with English abstract).
- [31] 李春风, 柳振江, 宓奎峰, 等. 内蒙古八大关斑岩型铜钼矿床形成时代与成因分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(4): 1253–1269.
Li Chunfeng, Liu Zhenjiang, Mi Kuifeng, et al. Metallogenic age and ore genesis of the Badaguan porphyry copper–molybdenum deposit in Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2014, 41(4): 1253–1269(in Chinese with English abstract).
- [32] 杨新岳, 谢国源, 李志纯. 变形过程中的流体–围岩作用和变形岩石质量平衡[J]. *中国科学(B 辑)*, 1995, 25(3):329–336.
Yang Xinyue, Xie Guoyuan, Li Zhichun. The interaction of fluid–surrounding rock and the mass balance of deformed rock during deformation process[J]. *Science in China(Series B)*, 1995, 25(3):329–336(in Chinese with English abstract).
- [33] 魏俊浩, 刘丛强, 张德会, 等. 蚀变岩岩石质量平衡及主成分变异序列[J]. *地球化学*, 1999, 28(5):479–486.
Wei Junhao, Liu Congqiang, Zhang Dehui, et al. The mass balance of alteration rock and the variation sequence of principal component[J]. *Geochimica*, 1999, 28(5):479–486(in Chinese with English abstract).
- [34] 曲凯. 太行山北段木吉村斑岩铜–钼–矿床地质特征与成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 1–58.
Qu Kai. *Geology and Mineralization in Mujicun Porphyry Cu–Mo Deposit, Northern Taihang Mt., China*[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012: 1–58.
- [35] 秦克章, 王之田. 内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿床稀土元素的行为及意义[J]. *地质学报*, 1993, 67(4):323–335.
Qin Kezhang, Wang Zhitian. Rare earth element behavior in the Wunugutushan Cu–Mo deposit, Inner Mongolia, and its implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1993, 67(4):323–335(in Chinese with English abstract).
- [36] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[C]//Saunders A D, Norry M J(eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313–345.
- [37] Vinogradov A P. Average contents of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the earth's crust[J]. *Geochemistry*, 1962, 7: 641.
- [38] White W H, Bookstrom A A, Kamilli R J, et al. Character and origin of Clinmax type molybdenum deposits[J]. *Economic Geology*, 1981, 75:270–316.