

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

关于德兴斑岩铜矿成矿物质来源

——与梁祥济研究员商榷

金章东 朱金初

(南京大学成矿作用国家重点实验室, 210093)

内容提要 斑岩体内成矿元素分布、品位变化、水平分带及同位素资料均表明德兴斑岩铜矿的成矿金属主要来源于中酸性岩浆。矿区外围降低场的存在仅仅反映了(近)地表围岩成矿物质发生一定活化迁移,为矿床的形成提供了很小部分的成矿金属,并受中酸性岩浆的驱动,最后参与流体混合和成矿作用。

关键词 斑岩铜矿 成矿元素 降低场 德兴

斑岩铜矿,作为一种相当重要的与高硅质花岗斑岩浅成小岩体(一般出露面积 $<1 \text{ km}^2$)紧密联系的热液型矿床,有关的成矿物质来源、成因机制的探讨已有了大量的野外和实验研究工作^[1~9]。江西德兴斑岩铜矿作为中国特大型斑岩铜矿床,关于它的成矿物质来源,有人认为中酸性岩浆直接提供成矿金属元素,只有部分来源于围岩^[7~8];另一种观点则强调成矿物质主要来自围岩,是以矿床外围铜含量降低场的存在为重要依据的^[9]。

1995年,梁祥济研究员发表了“江西德兴斑岩铜矿成矿物质来源的实验研究”一文(以下简称“梁文”),作者采用德兴斑岩铜矿围岩——前震旦系九岭群九都组的变质岩和花岗闪长斑岩样品作实验材料,对Cu、Mo、Pb、Zn等金属元素在一定条件下的活化迁移行为进行了实验研究,认为前震旦系九岭群九都组浅变质围岩是德兴斑岩铜矿的矿源层^[10]。“梁文”的实验建立在前人大量地质研究基础上,构筑一套先进的系统方案,证明围岩中金属元素在一定条件下可以活化,并以 $[\text{CuCl}]$ 等稳定络合物形式迁移,为建立成矿物质可能多来源,热液成矿元素可以从围岩中来的新概念提供了实验依据,具有开拓性和启迪意义。根据笔者近年来对斑岩铜矿和德兴矿田的研究和考察,认为该实验研究存在一些误区,这些误区也是矿床成因研究中经常存在的。同时,结合前人的研究成果,进一步探讨德兴斑岩铜矿的成矿物质来源问题,并与梁祥济研究员商榷。

1 关于实验材料和条件

“梁文”实验所采用的花岗闪长斑岩样品取自斑岩体内“未矿化蚀变”的花岗闪长斑岩,以它代表母岩浆成分,并用来讨论Cu、Mo、Pb、Zn等成矿金属的活化量是不恰当的。因为在上侵冷却结晶过程中,原始岩浆的挥发份、金属物质等组分都发生过变化。特别是矿化斑岩岩浆这种富含金属、 H_2O 、 CO_2 、Cl、F等强溶解性挥发组分的体系,在上侵流体演化成矿过程中金属成分、挥发份及水含量都将因迁移、富集而完全改变原始岩浆的组成^[11,12]。其实,矿化还是未矿

注:本文为国家自然科学基金(编号49733120)资助项目。

本文1998年2月收到,4月改回,章雨旭编辑。

化只是一个生产性质的名词,对成因机制的探讨并非要进行严格划分,相反,类似的名词归类常会形成误导,如常将岩体下部“未矿化”的岩石当作未发生任何变化代表原始成分的代名词。另外,“梁文”以降低场(铜的含量 $<50 \times 10^{-6}$,平均 40×10^{-6})为前提,将远离矿区的前震旦系九岭群正常场的变质岩为实验材料,在特定的温度、压力、pH 值、溶液浓度、缓冲剂等条件下进行萃取活化实验。此仅能证明围岩中成矿物质可以在一定条件下活化迁移,具备提供金属储量的能力,但并不能确定现存矿体中的金属是来自围岩的,或说降低场围岩即是矿源层。

对于该实验所选择的实验参数包括温度(250~400℃)和反应溶液 pH 值(1.5~4.5)也是值得进一步斟酌的。在德兴矿田范围内,矿体主要赋存在以绢云母化为主的强蚀变带内,向矿体外围矿化和蚀变强度显著减弱,一般不形成矿体。岩浆上侵定位后产生的水平热梯度很大,自强蚀变带往围岩过渡,温度迅速降至 150℃ 以下,形成绿帘石、伊利石等低温蚀变矿物,至 5 km 以外就不会有多大影响了。可见,要使 2~5 km 降低场范围内的围岩达到高至 400℃,pH = 1.5 的强酸性环境是完全不可能的。根据包裹体资料^[7,8],成矿流体主要呈碱性—弱碱性。当然,为了实验时间的需要作一些适当的浮动也未尝不可。

2 关于降低场

德兴斑岩铜矿外围铜含量降低场的存在是“梁文”进行实验研究的地质依据之一^[10],反之,实验结果也为降低场存在的必然性提供了进一步的证据。元素地球化学异常场的存在表明在岩体侵入作用下围岩内 Cu、Mo、Pb、Zn 等金属发生了活化迁移。如果降低场的存在主要是由于浅成岩浆侵入和热液活动引起一定范围内成矿物质发生变化的结果,那么,对于岩石层位和岩性完全相同的正常场和降低场之间铜的含量应是渐变的,而不应该像断层一样的突变(见文献^[9]图 1-1-1)。同时,作为铜含量降低场和正常场划分依据的地层样品主要来自地表或近地表,而矿体周围由于勘探生产控矿的需要可得到大量深部钻孔样品^[9],于此,对围岩铜含量分布是否只是一个片面的评估也是值得怀疑的。而要系统全面地评价外围地层目前尚不可能。降低场至多只能限制地描述为“(近)地表降低场”。结合矿田范围内广泛存在的由赣东北深大断裂带衍生的 NE—NNE 向和 NW 向区域性 II 级断裂体系,该降低场极可能与断裂有关,因为 II 级断裂体系不仅控制了铜矿化斑岩体的定位,也控制了区域 Cu、Mo 等成矿元素地球化学异常的分布形态^[7,8],并且区域断裂体系骨架与降低场形态基本吻合。正常场、降低场之间的界线可以称为“地球化学降低场断层”或“地球化学断层降低场”。

退一步地讨论,假设成矿金属确实受深部热源温度梯度的驱动来源于存在的降低场,那么远离矿体 1.5~5 km 的降低场内的物质成分能否在岩体冷却之前运移至沉淀场所——岩体与围岩接触带附近——形成浸染状、细脉浸染状矿化呢(其实岩体内矿化的金属成分应在冷却前就运移到位)?对于流体—岩石体系,假定热液流体为连续介质,且忽略流体—岩石反应过程中流体的质量变化,多孔介质中流体行为服从 Darcy 定律:

$$\vec{Q} = - \frac{k}{\mu} (\nabla \vec{p} - \vec{\rho g})$$

式中 \vec{Q} 为 Darcy 流速, k 为渗透系数, $\nabla \vec{p}$ 为压力梯度, μ 为流体粘度, \vec{g} 为重力加速度, ρ 为流体密度。设岩石孔隙度为 ϕ , 则流体质量的实际平均流速为:

$$\vec{V} = \frac{\vec{Q}}{\phi}$$

由于 Darcy 定律是一经验定律,是 Navier—Stokes 方程在多孔介质模型上的平均^[13],因此,对于德兴矿田,根据围岩性质(密度为 $2.5\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)^[7]、以大气降水为主的热液流体特征^[14],设定 $k=1\times 10^{-6}$, $\mu=5\times 10^5\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $\nabla\bar{p}=2.5\times 10^4\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$, $\rho=1.2\times 10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 及 $\phi=0.35$ 。由此得到 $\bar{V}=7.56\times 10^{-8}\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,那么,要从 5 km 以外所谓“降低场矿源层”(最远的 12 km)将 Cu 等成矿金属物质搬运到岩体与围岩接触带附近沉淀成矿需要 $6.6\times 10^{10}\text{s}$ (即 2122 a)。而侵入岩体的冷却时间,引用 Jaeger (1968)导出的方程^[15]

$$x = 0.28 \cdot t^{\frac{1}{2}}$$

式中 x 为岩体半径(单位 cm), t 为冷却时间(单位 s)。根据德兴矿田内 3 个岩体的半径(分别为 400 m, 175 m 和 100 m)得到相应的冷却时间分别为 650 a(铜厂)、160 a(富家坞)和 40 a(朱砂红)。当然岩体冷却时间还受岩体侵位深度、侵位方式、形态产状、裂隙发育程度等因素的影响,但是在各斑岩体中心部位铜品位均很低($<0.05\%$),呈空心状矿体,可以推测成矿时间还应小于冷却时间。虽然有诸多因素制约,仍不难看出,即使围岩有提供矿床金属储量的能力,但是流体运移时间上的远大差距表明完全由围岩提供成矿物质是难以想像的。

另外,如果矿质来自降低场的千枚岩,受岩浆热能作用大气降水侧向从围岩中淋滤出金属物质而在中心成矿^[10],那么按照水—岩交换理论计算,受大气水淋滤交换后的围岩应有较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,向矿体中心蚀变岩石 $\delta^{18}\text{O}$ 值将有逐渐升高的现象。然而,季克俭等^[9]提供的数据及张理刚等^[14]在水—岩体系氢氧同位素演化研究中发现,铜厂铜矿矿体以南并没有出现 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低场,矿体以北反而出现升高现象,即蚀变岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值大于花岗闪长斑岩。因此,张理刚等认为热液活动中水—岩交换反应是由斑岩体内 5 个低 $\delta^{18}\text{O}$ 值中心垂直向上并向外扩散进行的^[14]。

因此,围绕矿田矿化带外围环状降低场的存在,只能说明(近)地表围岩部分 Cu、Mo 等金属元素发生了活化迁移。

3 关于斑岩体与成矿元素

德兴斑岩铜矿床与花岗闪长斑岩体之间存在紧密的时间—空间关系,矿体主要分布在斑岩体顶部和浅部内外接触带内。同位素地质年龄数据、硫同位素、氢氧同位素及流体包裹体资料均表明矿床的成矿物质主要来源于上侵中酸性岩浆^[7,8]。花岗闪长斑岩的成矿元素含量与中酸性岩平均值相比较,具有较大的富集系数,其中 Cu, 6.6~11.5; Mo, 3.7~4.1; Ag, 5.9~8.2^[7]。斑岩体中单矿物的铜含量也较高,如角闪石 $(50\sim 100)\times 10^{-6}$; 黑云母, $(91\sim 750)\times 10^{-6}$; 磷灰石 300×10^{-6} ; 磁铁矿 $(400\sim 500)\times 10^{-6}$; 锆石 100×10^{-6} 等^[7]。其实,浅变质围岩中成矿元素平均含量与区域地层之间的富集系数与斑岩体的相比较则小得多,如 Cu 为 1.78; Mo, 2.74; Ag, 7.14^[7]。同时,赋存有矿体的花岗闪长斑岩体中 Cu、Mo、 H_2O 等平均含量均明显高于正常花岗闪长斑岩(如铜厂花岗闪长斑岩的 Cu 平均含量达 230×10^{-6} , 比正常高出 15 倍以上), H_2O 含量可高达 5.2%^[16]。并且,铜含量由斑岩体上部至下部变化具渐变性,且十分缓慢,如 ZK006 自 45.49 m 至 484.11 m 铜含量从 0.44% 降至 0.11%。而围岩接触带向岩体内部过渡铜含量均有递增后再降低的趋势,如 ZK402 自 132.97 m(上覆为围岩)至 143.70 m 依次由 0.19%→0.21%→0.37%, 随后再降至 0.19%, 0.14%。

花岗闪长斑岩中较大富集系数和较高平均含量的成矿元素为岩浆成矿的可能性提供了物

质基础。同时,Cu、Mo 等成矿元素均为不相容元素,易于进入热液流体中富集迁移^[16]。通过斑岩铜矿床热液蚀变矿化特征及流体包裹体研究表明,铜将与高温(500~600℃)、高盐度(40~60wt%NaCl)岩浆流体和低盐度(<1~2wt%NaCl)气相挥发份不混溶流体一起发生迁移,并集中于黑云母-钾长石化带、云英岩化蚀变带沉淀成矿^[15,16]。这是由元素本身性质和岩浆演化趋势决定的,有动力源和必然性。其中,作为表征热液流体作用最主要的变量——铜品位,在单一体系内应具有分形结构,如果有外来铜的掺入将从铜品位分形特征中表现出来^[17,18]。通过对德兴铜厂斑岩体铜品位空间分布的分形结构研究表明^①,铜品位空间分布具统计相似性,铜品位分维值由斑岩体南东侧(下盘)向北西侧(上盘)逐次增大(1.39→3.75),并在上盘表现为双重分维结构,表明铜厂斑岩体内的铜主要来自岩浆,围岩矿质只掺入于岩体上盘底部低品位区,围岩铜源的贡献是很小且局部的,而不是矿源层;同时还表明,因流体固有的垂向、侧向流动的方向性流体势,越靠近上盘,分维值越大,矿化越好。

德兴斑岩铜矿成矿金属元素 Cu、Mo、Pb、Zn 等围绕着花岗闪长斑岩体由近至远呈水平分带,“梁文”在实验结果讨论中认为^[10],水平分带是由于升高温度有利于 Cu、Mo 沉淀成矿而降低温度有益于 Pb、Zn 富集的机理造成的,因为在萃取活化实验中,随着温度的升高(200~400℃)铜、钼活化量随之降低,铅、锌则正相反。那么,如果说成矿物质是来源于围岩,降低温度又有利于 Pb、Zn 沉淀富集的话,Pb、Zn 就没有被迁移至岩体附近再沉淀的可能,因为远离岩体的低值区(降低场)温度肯定比岩体附近低得多,因此上述水平分带机理的解释是自相矛盾的。而恰恰相反,如果成矿元素来自于斑岩体,那么用该实验所论证的 Cu、Pb、Zn、Mo 在不同温度下的行为来解释水平分带现象就顺理成章了。另一方面,该实验得出,从变质岩中活化出来的铜、钼主要呈 $[\text{CuCl}]^-$, $[\text{CuCl}]^0$, $[\text{HMoO}_4]^+$ 络合物形式,这与有关铜、钼在熔体与 NaCl-KCl-H₂O 超临界流体之间^[19]和人造花岗岩-H₂O-HCl 体系中^[20]的配分实验结果相吻合,并且认为 $[\text{CuCl}]^0$, $[\text{CuCl}]^-$, $[\text{HMoO}_4]^+$ 等稳定络合物与 H₂O、CO₂ 等一起进入热液流体发生迁移。近期笔者对德兴斑岩铜矿的流体包裹体进行研究时,发现在一些气液包裹体中存在石盐、钾盐及富含铜的暗色子矿物,表明铜等成矿元素可能以某种形式随同气液流体迁移富集^[12],它的形成机理和成因意义正在进一步探讨中。

在对各种热液矿床成矿物质来源、成因机制研究过程中,最好能得到代表母岩浆的原始组成,包括金属元素含量、挥发份组成等,而这恰恰是最困难的,因为在侵入岩浆结晶期间各种组份已发生了各种迁移和变化。为了研究美国 Utah 州西南部 Pine Grove 斑岩钼矿母岩浆的性质,Keith 和 Shanks^[11]并没有局限于矿化斑岩体内进行采样研究,而是通过研究矿田范围内各种未矿化侵入小岩体和喷出火山碎屑的年龄、组成等,认为其中 22Ma 的流纹岩是与矿化斑岩体同时代、组成相近并源于同一岩浆房的同源产物,可以将它用来代表母岩性质,进而结合岩体大小、结构、构造等方面探讨成因机制。这是一条很值得借鉴的好思路。

4 结论

(1) 德兴斑岩铜矿的成矿物质具有双重性,但主要来源于燕山期中酸性侵入岩浆,很小部分来自围岩——前震旦系九岭群九都组浅变质岩系。岩浆侵入结晶过程中,铜等金属元素随同 CO₂、H₂O、Cl⁻ 等挥发份富集于晚期热液流体中;同时岩浆活动带来的热能驱动围岩内地下水

① 金章东. 江西德兴铜厂斑岩体铜品位的分形结构. 1998. (待刊).

成为热水,活化迁移围岩及先固结岩体中部分成矿物质,多重复合性岩浆的侵入形成以岩体为中心的长期水循环,将岩体的成矿物质逐次叠加成矿。在围岩—斑岩体接触带附近,岩浆热液流体与地下热水混合,形成以接触带为中心的两侧对称的蚀变、矿化。

(2)矿区外围铜含量降低场的存在只能表明围岩成矿物质发生一定距离的活化迁移,而不应是矿源层的直接代名词。从运移时间、 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化情况及矿化矿物沉淀分带上都与侧向运移机制相悖。有关该降低场的成因是否与区域性断裂体系有关仍值得进一步商榷论证。

(3)对于斑岩体形成过程中热液流体的运移行为和铜等金属元素的迁移形成以及与地下水混合机制,是一个很有意义的研究方向,将有助于解决成矿物质来源问题。笔者目前正在参与有关这方面的国家自然科学基金研究课题。

参 考 文 献

- 1 Candela P A, Holland H D. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal system: The origin of porphyry-type ore deposit. *Econ. Geol.*, 1986, 81:1~19.
- 2 Carten R B, Geraghty E P, Walker B M, Shannon J R. Cyclic development of igneous features and their relationship to high-temperature hydrothermal features in the Henderson porphyry molybdenum deposit, Colorado. *Econ. Geol.*, 1988, 83:266~296.
- 3 Cline J S, Bodnar R J. Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt? *Journ. of Geophy. Research*, 1991, 96: 8113~8126.
- 4 Feiss P G. Magmatic sources of copper in porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, 1978, 73:397~404.
- 5 Henley R W, McNabb A. Magmatic vapor plumes and ground-water interaction in porphyry copper emplacement. *Econ. Geol.*, 1978, 73:1~20.
- 6 Sillitoe R H. The tops and bottoms of porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, 1973, 68:799~815.
- 7 朱训,黄崇轲,芮宗瑶,周耀华,朱贤甲,胡淙生,梅占魁. 德兴斑岩铜矿. 北京:地质出版社,1983. 1~336页.
- 8 芮宗瑶,黄崇轲,齐国明,徐珏,张洪涛. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京:地质出版社,1984. 171~200页.
- 9 季克俭,吴学汉,张国柄. 热液矿床的矿源、水源和热源及矿床分布规律. 北京科学技术出版社,1989. 3~22页.
- 10 梁祥济. 江西德兴斑岩铜矿成矿物质来源的实验研究. *地质论评*,1995, 41(5):463~471.
- 11 Keith J D, Shanks W C. Chemical evolution and volatile fugacities of the Pine Grove porphyry molybdenum and ash-flow tuff system, Southwestern Utah. *Canadian Mining and Metallurgy*, 1988, 39: 402~423.
- 12 Lowenstern J B, Mahood G A, Rivers M L, Sutton S R. Evidence for extreme partitioning of copper into a magmatic vapor phase. *Science*, 1991, 252:1405~1409.
- 13 郭东屏,张石峰. 渗流理论基础. 西安:陕西科学技术出版社,1994. 51~64页.
- 14 张理刚,刘敬秀,陈振胜,于桂香. 江西德兴铜厂铜矿水—岩体氢氧同位素演化. *地质科学*,1996, 31(3):250~263.
- 15 Candela P A. Physics of aqueous phase evolution in plutonic environments. *American Mineralogist*, 1991, 76:1081~1091.
- 16 Hedenquist J W, Lowenstern J B. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 1994, 370:519~527.
- 17 Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature. W. H. Freeman and company. New York, 1983. 1~486.
- 18 Turcotte D L. Implication of chaos, scale-invariance and fractal statistics in Geology. *Global and Planetary Change*, 1990, 89: 310~318.
- 19 Candela P A, Holland H D. The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, 48: 373~386.
- 20 Keppler H, Wyllie P J. Partitioning of Cu, Mo, Sn, W, U and Th between melt and aqueous fluid in the systems haplogranite-H₂O-HCl and haplogranite-H₂O-HF. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1991, 109:139~150.

作 者 简 介

金章东,男,1971年生。1996年毕业于西安地质学院,获理学硕士学位,现为南京大学地球科学系博士生。通讯地址:210093,南京市汉口路22号南京大学地球科学系。传真:(86)-25-3302728。

The Source of Ore-Forming Material in the Dexing Porphyry Copper Deposits, Jiangxi

—A Discussion with Professor Liang Xiangji

Jin Zhangdong and Zhu Jinchu

(State Key Laboratory for Research of Mineral Deposits, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093)

Abstract

The distribution of metal elements, oxygen isotopic, composition, variation of ore grades and horizontal zoning of the porphyry bodies, all indicate that the source of ore-forming materials of the Dexing porphyry copper deposits mainly came from intermediate-acid magmas. The existence of a ring-shaped low-copper-value region outside the ore district about 2~5 km across and 115 km², in area merely indicates that ore materials in near-surface wall rocks were remobilized to some extent and provided a very small percentage of ore metals for the formation of the porphyry deposits, which finally participated in fluid mixing and mineralization when they were driven and heated by intermediate-acid magmas.

Key words: porphyry copper deposit; ore-forming material; low-copper-value region; Dexing
