与陆相火山岩有关的铁、铜、金矿床 成矿地质特征及矿床成因

马 芳,蒋少涌

(南京大学 地球科学系,成矿作用国家重点实验室,南京 210093)

摘 要: 文章对与陆相火山岩有关的浅成低温金矿、斑岩铜矿和玢岩铁矿产出的大地构造背景、 火成岩性质和矿化蚀变特征、成矿流体以及成矿物质来源等方面进行了综述。三类矿床在成矿地 质条件上各具特色,表现在:成矿构造背景上,斑岩铜矿和浅成低温金矿均以岛弧和活动大陆边缘 为主,其次是陆内环境;而长江中下游玢岩铁矿的形成环境可能为陆内似裂谷环境。浅成低温金 矿、斑岩铜矿及玢岩铁矿的主要围岩分别为中、酸性火山岩系、中酸性次火山岩及中基性次火山 岩;围岩蚀变分别以硅化、钾化、钠化为特征。浅成低温金矿床成矿流体以低盐度、低温(200~ 300℃)为主;而斑岩铜矿中则主要是高温(400~800℃)高盐度的流体;玢岩铁矿成矿温度介于两 者之间。从低硫亚类浅成热液矿床、高硫亚类浅成热液矿床到斑岩型矿床,流体中大气水含量逐 渐减少,岩浆水含量逐渐增多。成矿物质来源上,Fe主要来源于赋矿的火山、次火山岩或原始岩 浆,Cu,Au,S和 Na等成矿物质的来源更为复杂,还可能来源于与岩浆无关的围岩,其他的可能还 包括 Cu,S 的岩浆混合来源以及 Na 的高盐卤水来源。一些特殊的岩石类型,如埃达克岩、橄榄玄 粗岩及碱性岩与陆相火山岩矿床有密切联系。

关键词: 陆相火山岩; 浅成低温金矿; 斑岩铜矿; 玢岩铁矿 中图分类号: P511.3; P618 文献标识码: A 文章编号: 100 -- 1412(2005) 04 02 33-09

1 前言

在 Stillitoe^[1] 对与陆相火山作用有关的金属矿 化的论述中, 与铁、铜、金矿产有关的矿床有三种类 型: 浅成低温(epithermal) 矿床(以Au 为主)、平伏 层状铜矿床和火山成因磁铁矿矿床。而与陆相次火 山- 热液有关的矿床类型一般划分为斑岩型矿床(以 Cu、Mo 为主)和玢岩铁矿。本文讨论的是相对重要 的浅成低温金矿、斑岩铜矿和玢岩铁矿。

浅成低温金矿是主要的金矿床类型之一。根据 资料计算^[2],全球已探明的浅成低温热液金矿床的 储量为11705t,占已探明金总储量的6.748%,是 金的重要来源。近20年来,世界上新发现的陆相火 山岩型金矿床多属于大型和超大型金矿床;我国台 湾金瓜石金矿床达到超大型规模,福建紫金山金矿 床达到大型规模。

斑岩铜矿是世界铜矿最重要的工业类型,储量 约占世界铜储量的 55%,且多集中在大型超大型斑 岩矿床中。据统计,世界 99 个 500 万 t 以上的超大 型铜矿中,斑岩型有 63 个,占铜总储量的 63%^[3]。 在我国各类铜矿中,斑岩型铜矿探明储量亦居首位, 占总储量的 45.5%^[4]。

玢岩铁矿是我国地质工作者通过对长江中下 游宁芜地区的系统研究总结出来的与火山岩、次火 山岩有关的铁矿床成矿模式,用以概括矿集区内不 同成因类型(矿浆、岩浆晚期、伟晶、高温气液交代 充填、高温接触交代、中低温热液及火山喷发沉积) 的铁矿床^[5]。玢岩铁矿并非主要的铁矿类型,但由 于我国是一个富铁矿较贫的国家,玢岩铁矿模式在 长江中下游火山盆地具有普遍性,因而具有重要意 义。

收稿日期: 2004-10-25; 修订日期: 2005-01-23

基金项目:国家自然科学基金项目(40221301和40234051)资助。

作者简介:马芳(1975),女,江西南昌人,博士,研究方向为同位素地球化学、矿床学。

2 矿床产出的大地构造背景

浅成低温金矿床形成的构造环境主要为岛弧环 境和大陆边缘环境(常常是弧后扩张带),这样的构 造在全球主要有3条,即环太平洋地区、地中海一喜 马拉雅带和蒙古一鄂霍次克带,这三条成矿带都经 过我国。在太平洋沿岸,浅成低温金矿床的分布相 对集中,如墨西哥、美国、日本、中国、菲律宾、巴布亚 新几内亚、新西兰等国家。但近几年在内陆地区的 陆相火山岩中也发现了很有价值的浅成低温热液金 矿。如紫金山铜金矿床,陆志刚等^[6]和高天钧⁷¹均 认为其处于板内靠近陆缘或板内与陆缘的过渡位置 宽阔的深大断裂带上。

斑岩铜矿产出的构造环境大体有3类:与板块 俯冲消减作用有关的岛弧环境和活动陆缘环境以及 陆内环境。前二者以环太平洋斑岩铜矿带为代表, 世界斑岩铜矿主要集中在该地区。据统计,全世界 34个500万t级以上的超大型斑岩铜矿床中有26 个集中形成于太平洋东岸中新生代^[8]。而中国发现 的斑岩铜矿,尤其是大型超大型矿床大多属于陆内 环境。世界级规模的玉龙斑岩铜矿带^[9,10]和冈底斯 斑岩铜矿带^[11,12]即产于青藏高原碰撞造山带环境。

斑岩铜矿和浅成低温金矿具有大体叠置的构造 环境。Sillitoe^[13] 根据对环太平洋斑岩型矿床和浅成 低温热液矿床的研究,提出浅成低温热液矿床与斑 岩型矿床相伴生的成矿模式,认为一些浅成热液矿 床是斑岩型矿床的高位体系。如美国北布莱克山第 三纪火山岩中的金矿床和福建省紫金山铜金矿床。

玢岩铁矿主要产于长江中下游的宁芜、庐枞等 火山盆地,长江中下游还产有中生代斑岩型及热液 型铜、金矿,其形成环境归属于活动陆缘还是陆内环 境一直存在不同的观点。早期多认为受库拉一太平 洋脊的潜没及太平洋板块俯冲的影响,属活动大陆 边缘^[14,15]。但基于俯冲带距离该区近千公里,加之 整个沿江火山岩带呈 NE 向延伸,与大陆边缘呈大 角度相交的客观事实,现已很少将其作为太平洋板 块向亚洲大陆板块俯冲的直接产物。目前多数人认 同长江中下游成矿带形成于陆内环境:徐志刚^[16]认 为宁芜地区中生代处于由郯庐断裂左行剪切运动而 派生的似裂谷环境;王德滋等^[17]认为该区属大陆边 缘内侧的断裂活动带;翟裕生等^[18]认为构造环境是 板内断块活动带。

3 成矿地质特征

3.1 火山机构的控矿性

陆相火山岩矿床的产出位置多受区域性深大断 裂的控制,但大多数情况下,矿床并不直接产于深大 断裂中,区域性大断裂与火山机构交汇部位是成矿 最有利的部位^[19],其中最常见的火山机构是破火山 口和隐爆角砾岩筒。但火山机构对矿床的控制意义 尚有不同的认识,陶奎元等^[20]和陆志刚等^[6]均强调 火山机构对矿床的控制意义,他们的研究发现东南 沿海火山岩区的金属矿床主要产于火山机构(破火 山口、隐爆角砾岩筒及火山构造洼地)与区域性断裂 的复合部位。任启江^[21] 根据对我国和美国 25 个斑 岩铜矿矿区的观察指出,在斑岩铜矿矿体附近常可 出现不同类型的角砾岩,其中爆发角砾岩或爆发侵 入角砾岩可以作为斑岩铜矿的找矿标志,如果这类 岩石中出现铜异常,往往指示附近出现较大规模的 工业矿体。冯建忠等^[22]在与火山岩斑岩有关的金 银多金属矿中划分出一类隐爆角砾岩筒型。魏仪 方^[23]认为浅成低温金矿最常见的控矿构造是破火山 口或富硅质火山穹窿构造:高天钧^[7] 亦认为产于陆 相火山条件下的金矿床与火山构造关系密切,成矿 火山构造有负的火山构造(如破火山口、火山构造洼 地)或与正的火山构造(如火山穹隆等)有关。另外, 有些金矿床的分布受火山口环形边界控制,其中环 状断裂为年轻的热液系统提供极佳的流体通道系 统。玢岩铁矿中潜火山气液型铁矿床由于气液来源 丰富,其角砾岩筒也较多,如宁芜的尖山铁矿、庐枞 的何家大岭以及繁昌的白马山矿床,接触隐爆类型 凹山矿床和矿浆(喷溢)型姑山矿床也有相当部分矿 石具有角砾岩构造:火山穹窿构造、破火山口构造和 潜火山岩构造对玢岩铁矿的产出亦有直接的控制作 用^[24]。

但也有一些矿床与火山口关系不密切,甚至直 接产于沉积岩中的构造破碎带中。据统计^[19],美国 内华达州 31 个破火山口中只有 2 个已知含矿;美国 西部 125 个破火山口中也仅有 14 个具有伴生矿。 此外,放射性同位素年龄数据表明,美国西南部第三 纪火山岩区的浅成低温热液矿床,其矿石的形成年 龄远比破火山口的形成年轻得多。因此,有些学者 认为破火山口边缘及其周围环状和放射状断裂中的 热液活动似乎与破火山口活动无关,但与后期的次 火山岩浆活动有关。

3.2 赋矿围岩的岩石特征

3.2.1 岩性特征

陆相火山岩矿体主要赋存于火山岩次火山岩 之中,亦可产于其周围的沉积岩和变质岩之中。其 中浅成低温热液金矿的赋矿围岩为中、酸性火山岩 系,特别是安山岩类和英安岩类^[25]。在 Mckee (1997)统计的 98 个浅成低温热液型金矿床中,仅有 5 个矿床产于硅质凝灰岩中,多数矿床产于安山质浅 成岩和火山岩中^[19]。斑岩型铜矿的赋矿围岩一般为 中酸性次火山岩,包括闪长岩、斜长花岗岩、花岗闪 长岩、二长花岗岩和石英斑岩等。与玢岩型铁矿有 成因联系的是一套中基性次火山岩,以辉长闪长玢 岩为主,属富钠的碱钙性岩石。

基于赋矿岩石中通常含有大量的原生磁铁矿, 一般认为与斑岩铜矿成矿有关的岩浆体系往往具有 高氧的特性^[26]。Sillitoe^[13] 根据对全球大型热液铜 金矿床特征的总结,提出氧化型岩浆是大型斑岩铜 矿形成的必要条件。Streek 等^[27] 指出大多数斑岩铜 矿母岩浆的氧逸度比 N÷NiO₂ 缓冲线高 2 个对数单 位(logf o₂= N÷(NiO₂ + 2))或更高,因此产斑岩铜 矿的岩浆应属氧化型岩浆。Muller 等^[28] 首次对 Papua New Guinea 地区 Lihir 岛与浅成低温金矿有关 的碱性岩的氧逸度进行了直接测定,获得了高的氧 逸度值,在 787~965℃的温度下,岩石的氧逸度值 比 FQM 缓冲线高 1.4~4.8 个对数单位。

此外,浅成低温热液金矿^[28]和斑岩型 Cu 矿^[29] 中云母的高 Cl,F 浓度反映了赋矿岩石高的卤素含 量。富硫、高的水含量亦是斑岩铜矿赋矿围岩的特 征。

3.2.2 与埃达克岩的关系

最近的研究发现, 埃达克岩(adakite)及埃达克 质岩(adakitic rock)与浅成低温热液和斑岩金、铜的 成矿作用有密切联系。Thieblemont 等^{30]}统计了全 球 43 个 Ag, Au, Cu 和 Mo 低温热液和斑岩矿床, 发 现其中 38 个与埃达克岩有关, 其表现形式主要有两 种: 一种是埃达克岩直接矿化(尤其是对斑岩型矿床 而言), 另一种是矿化与埃达克岩有时空联系(主要 为浅成低温矿床)。这种密切关系表现在不同的规 模上: 在全球规模上(美国西部、智利、巴布亚新几内 亚), 多数埃达克省也是重要的成矿省; 在地区规模 上,多数矿床的主岩为埃达克岩;在矿区规模上,当 埃达克岩与非埃达克岩共存时,成矿主要与前者有 关。Sajona 等^[31] 在对菲律宾 16 个地区的斑岩铜矿 和浅成低温金矿的研究中也发现其中的 14 个地区 的矿化在时间和空间上与埃达克质岩浆有关或与其 有成因联系。许多大型矿床赋存于埃达克岩中,以 智利为例,至少有3个千万吨级的斑岩铜矿与埃达 克岩有关。Oyarzun 等^[32] 通过对智利北部斑岩铜矿 的研究发现,古新世早始新世较小规模的斑岩铜矿 (< 500 万 t, 如 Lomas Bayas) 与正常的钙碱性中酸 性火成岩有关, 而晚始新世, 早渐新世大型斑岩铜矿 (如 Chuquicamata,铜金属储量 6000 万 t 以上)则与 埃达克岩有关。张旗等[33]通过调研发现,我国的斑 岩铜矿大多与埃达克岩有关,如江西德兴、安徽沙 溪^[34]、黑龙江多宝山、内蒙乌奴格吐山、新疆乌伦布 拉克、四川西范坪和新近发现的可能达到超大型规 模的东疆土屋等。有些被划归富碱侵入岩或 A 型花 岗岩的斑岩铜矿,如西藏玉龙和马场箐,也具有高 Sr 低 Y 和 Yb 以及高 Sr/Yb 比值的地球化学特征。候 增谦等[35] 提出不论是岛弧 陆缘弧环境, 还是碰撞造 山带环境 最具成矿潜力的含矿斑岩通常具有埃达 克岩岩浆的亲合性,而非典型的弧岩浆特征。

至于埃达克岩与浅成低温金矿和斑岩铜矿密切 联系的原因,目前尚不清楚,因为并没有证据表明埃 达克岩更富集 Au, Cu 等成矿元素。Sajona 等^[31] 认 为可能由于埃达克岩具有高的水流体含量、容易被 地壳捕获,并且通常形成于俯冲的开始或结束,因而 更容易建立起有效的热液对流体系。

3.2.3 与橄榄玄粗岩的关系

另外一些研究则涉及到陆相火山岩矿床与橄榄 玄粗岩(shoshonite)及碱性岩的关系。Muller^[28]指 出,世界上约 20% 的最大的金矿床与橄榄玄粗岩和 碱性岩有关,而这些岩石在与俯冲有关的火成岩中 的比例不可能超过 20%,这其中还未包括那些与其 他富钾岩石系列(如高钾钙碱性岩石)有关的矿床。 如希腊 Skouries 斑岩 Cu-Au 矿床即产于橄榄玄粗 岩系列的碱性岩石中,其他产于碱性岩中的斑岩矿 床还包括 Bajo de la Alumbrera, Bingham, Grasberg 和 OK Tedi^[29]。

新南威尔士 Lachlan 褶皱带东部斑岩型 Au-Cu 矿化具有与橄榄玄粗质岩浆密切相关的特征,包括 澳大利亚东部最大的热液侵入金矿所在的 Cadia 斑 岩 Au-Cu 矿区以及 Goonumbla 地区,而在 Copper Hill和Cargo等中钾钙碱性石英闪长岩杂岩体出露 地区,则未发现有经济价值的Au-Cu矿化,Holliday 等^[30]据此认为橄榄玄粗质二长岩杂岩体更适合发育 有经济价值的矿化。

候增谦等^[35]研究发现,岛弧环境的含矿斑岩常 常是典型的钙碱性系列,而碰撞造山环境的含矿斑 岩则主要是高钾钙碱性系列和钾玄岩系列。环太平 洋带 14 个浅成低温热液矿床的形成围岩,其中有 8 个矿床与从流纹岩到安山岩的钙碱性火山岩有关,2 个矿床与高钾钙碱性火山岩有关^[19]。而青藏高原的 冈底斯斑岩铜矿带含矿斑岩主要属高钾钙碱性系列 和橄榄玄粗岩系列,玉龙斑岩铜矿带通常属橄榄玄 粗岩系列^[35]。

Keith, Swan, Ishihara, Nielson 等也发现 I 型、A 型岩浆形成的富碱的火山岩有利于浅成低温热液金 矿床的形成^[25]。

宁芜、庐枞等地区玢岩铁矿的围岩为富钠的碱钙性岩石,但与之处于同一火山盆地的喷出岩属于橄榄玄粗岩系列^{37-40]},主要赋矿岩体辉长闪长(玢) 岩与其中的大王山组火山岩密切共生,一般都将其 归为大王山组的次火山岩。宁芜研究项目编写小 组^[5]认为火山岩与次火山岩是同源异相的产物;薛 怀民^[41]则用岩浆房中的梯度和分带性(顶部相对富 K₂O,SiO₂及挥发分,向下 Na₂O 相对增高)来解释龙 王山组富 K₂O,而大王山组及次火山岩相对富 Na₂O (K₂O 的含量也较高)的原因。

3.3 矿化蚀变特征

3.3.1 浅成低温金矿床

浅成低温金矿床的围岩蚀变包括矿体周围的围 岩蚀变和整个热液系统的围岩蚀变,前者只是后者 很小的一部分。通常矿化与硅化有关,但是不同类 型的浅成热液矿床又具有不同特征的蚀变类型。根 据蚀变矿物组合的不同,Bonham^[42]将矿床分为3大 类:低硫型、高硫型及碱性岩型。而 Heald 等^[43]将 矿床分为明矾石-高岭石型(酸性硫酸盐型)和冰长 石-绢云母型,分别对应于高硫型和低硫型。其中冰 长石-绢云母型在靠近脉壁的围岩中发育钾长石化 (主要是冰长石)、硅化和绿泥石化;向外为绢云母 化,绢云母化带的外带可含少量泥化蚀变矿物(高岭 石和蒙脱石);最外带为青磐岩化。矿物组合以绢云 母蚀变占主要地位,并伴有冰长石,常见有硒化物、 锰矿物和绿泥石,无辉铋矿和硫砷铜矿。而明矾石-高岭石型在靠近脉壁的围岩中发育硅化和高级泥化 (主要是高岭石和明矾石),其中高级泥化的范围略 宽于硅化;往外为泥化带,靠近矿脉一侧以高岭石为 主,远离矿脉的一侧以蒙脱石为主,泥化带内可包含 少量绢云母化;最外带为青磐岩化。矿物组合与冰 长石-绢云母型刚好相反,含硫砷铜矿、铜蓝、蓝辉铜 矿,广泛发育明矾石,数量较多的高岭石,无冰长石、 硒化物,锰矿物和绿泥石稀少,有时有辉铋矿等。已 知浅成低温金矿床的蚀变以冰长石-绢云母型为主, 明矾石-高岭石型较少。

3.3.2 斑岩铜矿

斑岩铜矿的围岩蚀变很发育,形成有规律的水 平和垂直分带现象。典型的斑岩铜矿蚀变自岩体中 心向外可分为钾质蚀变带、似千枚岩化带、粘土化带 和青磐岩化带,其中最重要的是钾质蚀变带和似千 枚岩化带。钾质蚀变带的主要矿物为钾长石、黑云 母和石英,似千枚岩化带的主要矿物为石英、绢云母 及少量黄铁矿。

Dilles 等^[44] 通过对美国 Ann-Mason 斑岩铜矿 的研究,发现了一种新的蚀变类型 ——钠钙蚀变,它 发育于钾质蚀变之后,由于钠钙活度升高,形成更长 石-阳起石-榍石组合。钠钙蚀变从早期结晶的石英 二长岩中淋滤出铜和铁并用于成矿,因而往往增大 了矿床的规模。

A rancibia 等^[45] 发现在大不列颠哥伦比亚省 Island Copper 斑岩铜 金钼矿床的热液蚀变的最早期, 发育了磁铁矿蚀变相,形成磁铁矿-角闪石-斜长石组 合。并且在世界其他地区的斑岩铜矿中也存在类似 的蚀变矿化相,如 Puerto Rico 的 Tanama 斑岩 Cu-Au 矿床和 Utah 的 Park Premier 斑岩 Cu-Au-Mo 矿床。但他们同时指出,这一矿物组合不能归入普 遍接受的斑岩成矿体系的蚀变矿化相,而是记录了 独特的水-岩反应。

3.3.3 玢岩铁矿

玢岩铁矿具有特征的磁铁矿-磷灰石 阳起石共 生组合。在矿体及围岩存在着广泛的蚀变分带,陈 毓川等^[46]从时间上将蚀变划分为早期类夕卡岩化、 中期类青磐岩化和晚期泥英岩化,早期蚀变主要位 于辉长闪长玢岩岩体内,从下到上依次为碱性长石 岩相、方柱石岩相(下部浅色蚀变带)、辉石岩相,在 岩体与安山质火山岩接触附近或粗安岩中形成石榴 石岩相(中部深色蚀变带);中期蚀变叠加在早期蚀 变之上;晚期蚀变除对早期蚀变进行叠加外,主要在 岩体顶部的火山岩中形成上部浅色蚀变带。其中钠 长石化带和方柱石岩相为玢岩铁矿最鲜明的蚀变特 征。

4 矿床成因

4.1 成矿流体

许多浅成低温金矿床脉石矿物的流体包裹体研 究显示,矿石是从低盐度(w (N aCL) < 10%,多数 < 5%)、低温(200~300°C)的流体中沉淀的。而在斑 岩铜矿中则普遍出现高温(400~800°C)高盐度的流 体(卤水中w(NaCl) = 35% ~ 60%,甚至更高),这些 流体与同心热液蚀变,尤其是钾化和千枚岩化带关 系密切^[47]。

斑岩铜矿流体包裹体的一个显著特征是以气相 为主的包裹体往往和高盐度、以液相为主的包裹体 共存,两者具有相同的均一温度,表明沸腾体系的广 泛存在^[48]。但 Cline 等^[49] 对氯和铜在结晶熔体和出 溶的水流体之间的分配进行了数值模拟,得到出溶 流体的总盐度的变化范围从< 2% 到饱和水平 (700℃时 w(NaCl) = 84%),认为沸腾不是生成高盐 度卤水的必要条件。在浅成低温金矿床包裹体中也 普遍存在流体相分离(沸腾)的依据。

浅成低温金矿床成矿热液的 $\delta(^{18}O)$ 值较低, 多 为负值, \mathcal{X}^{18} O)- δ (D) 值远离岩浆水而靠近雨水线, 有些矿床直接落在雨水线上,表明大部分浅成低温 热液金矿床的成矿流体主要是雨水来源的地下水。 不同矿床还有不同比例的其他来源的流体,如岩浆 水和海水。明矾石高岭石型矿床的成矿流体具有 从早到晚岩浆水逐渐减少、大气降水逐渐增多的演 化趋势。斑岩型矿床中高盐度包裹体流体 $\delta(D)$ 的 测试值为-41×10⁻³~-83×10⁻³,与根据共生含 水矿物平衡计算得到的 $\delta(D)$ 值(- 51×10⁻³~- 83 ×10⁻³) 一致, 非常接近于普遍认可的岩浆 δ(D) 值 (- 40×10⁻³~ - 80×10⁻³)。然而 Batchelder^[50]报 道了内华达第三纪 Copper Canyon 斑岩体系中高盐 度包裹体流体的亏损 $\delta(D)$ 值(- 76 × 10^{-3} ~ - 102 ×10⁻³)。Sheets 等^[51] 对具有亏损氘的 Babine Lake 地区斑岩铜矿中矿化的石英和碳酸岩脉中的包裹体 进行了研究,确定这一低值(δ (D) = -100×10⁻³~ -153×10^{-3}) 代表了高盐度流体包裹体的真实值, 并将其解释为深部对流、演化的大气水注入岩浆熔 体。Sheets 等同时指出, 在所研究的局部大气降水

明显亏损氘的地区发育的斑岩铜矿,多数具有低于 典型岩浆 δ(D)值的岩浆流体,因而提出外来流体注 入岩浆是斑岩铜矿形成的一个重要因素。华仁民 等^[52]在对中国东部晚中生代斑岩 浅成热液金铜成 矿体系成矿流体的研究中发现,形成于地壳最浅部 的低硫亚类浅成热液矿床的成矿流体基本上是大气 降水;高硫亚类浅成热液矿床虽有相当多的岩浆挥 发组分参与,尤其是硫主要来自岩浆,但成矿流体的 主体仍是大气降水;而对斑岩型矿床,岩浆水在早期 热液蚀变中具有重要作用,但到了中晚期铜、金矿化 阶段,大气降水的作用越来越重要。

玢岩铁矿成矿温度变化较大,卢冰等^[53]测得各 矿区磁铁矿的最大起爆温度在 220~ 500℃之间变 化,以 350℃左右最为集中,与磁铁矿共生的磷灰石 包裹体均一温度为 295~400℃, 而晚期晶洞中石英、 石膏、方解石包裹体则具有较低的均一温度,为180 ~ 344 ℃。对梅山、吉山矿区中磁铁矿以及凹山、东 山矿区中磷灰石气液包裹体成分的分析,表明气相 以 CO, H₂O 为主, 东山矿床含 CH₄, 反映了较还原 条件下的成矿作用;成矿溶液的盐度很高,且 Ca²⁺ $> Mg^{2+} > Na^{+} > K^{+} . SO^{2-} > F^{-} > HCO^{3-} > Cl^{-}$ 关于成矿流体的来源,胡文宣等[54]对向山和罗河一 大鲍庄矿区中石英的氢氧同位素测试与换算,得到 靠近大气水附近的流体 H-O 同位素组成,反映了地 表水为主要流体来源。但石英往往形成于晚期蚀变 而产于晶洞之中,因而不能很好地代表矿化时的流 体性质。

4.2 物质来源

矿石铅同位素研究(图 2)表明,很多浅成低温热 液型金矿床中的铅同位素组成落在造山带演化曲线 之上,金属成矿元素来自上地壳,由循环到深部的地 下水与源区岩石发生水岩反应,将源区岩石中的金 属成矿元素萃取出来。但也有一部分铅同位素组成 与周围的火山岩组成极为相似,指示铅的来源可能 与火山岩或岩浆流体有关^[19]。大部分金矿床的硫化 物 (^{34}S) 值介于 – 2×10⁻³~ + 5×10⁻³之间,与流 体中总硫的 $\delta(^{34}S)$ 几乎相同,硫来自岩浆流体或由 大气水从火山岩中萃取出来^[55]。对加拿大大不列颠 哥伦比亚省的 Shasta Au Ag 矿床中黄铁矿的硫同 位素研究也表明流体中的硫来自大气水与火山岩围 岩的水岩反应以及部分来自岩浆的释气作用^[56]。

关于斑岩铜矿中硫和金属的来源仍有争议,正 岩浆模式^[57]认为其来源于长英质岩浆,主要依据是

硫化物矿石与长英质侵入体具密切联系以及许多斑 岩铜矿中的硫化物矿石的 $\delta({}^{34}S)$ 组成接近于 0。 Campos 等^[58] 对智利 Zaldivar 斑岩铜矿 Llamo 斑岩 中石英斑晶的熔融包裹体进行了研究,包裹体内铜 的平均值为 0.10%, 支持铜主要来源于长英质岩浆 的观点。但硫在长英质熔体中的溶解度通常很 低^[59],铜和其他金属元素含量小,尽管如此,Cline 等^[49]的数值模拟结果表明,典型的钙碱性岩浆含有 形成具有经济意义的斑岩铜矿所需的氯、铜和水。 但 Dilles 等^[60] 认为与斑岩铜矿有关的岩体通常为小 的长英质侵入体,直径 0.5~2 km,这需要有至少 50 km³的深部母岩浆房才能提供足够的铜及其他金 属。即便如此,也不能提供成矿所需的硫。而与正 常的长英质岩浆不同,埃达克质岩浆以高水含量、高 氧逸度(fo,)和富硫为特征^[32],可能为斑岩铜矿提供 大量的金属和硫。

另一种观点认为硫和金属来源于与岩浆无关的 围岩^[61],主要依据是矿床氢氧同位素具有大气水的 特征。Force^[62]在对美国滴泉山地区斑岩铜矿的研 究中,根据矿床的空间分布特征及区内元古代辉绿 岩遭受与岩浆作用有关的热液蚀变时有铜迁出的事 实,提出斑岩铜矿床中 56%的铜是在蚀变过程中从 辉绿岩中淋滤出来的。Dilles 等^[44]也曾提出 Ann-Mason 斑岩铜矿中约有 1/3 的铜是由热液从早已冷 凝的石英二长岩岩基中淋滤出来的。但是,围岩种 类繁多,而硫化物矿石却具有十分狭窄的 $\delta(^{34}S)$ 值 变化范围,平均 $\delta(^{34}S)$ 值接近于 0,这是围岩来源观 点所难以解释的。

最近, Hattori 等^[63] 根据菲律宾现代火山 Mount Pinatubo 和 U tah 的 Binghom Canyon 斑岩 铜矿的研究, 认为下伏的镁铁质熔体为长英质岩浆 提供了硫和铜等金属。镁铁质熔体含有高浓度的铜 和硫, 少量熔体即可提供大型矿床所需的物质。这 一来源可使其具有与地幔相似的硫同位素组成。 Arancibia 等^[45] 也在对 Island Copper 斑岩铜金钼 矿床的研究中也谈到岩浆的混合作用。

玢岩铁矿的铁质主要来源于岩浆。富钠、钙及 挥发分的原始气液交代次火山岩,造成铁的富集,富 集铁的气液交代围岩或充填成矿。胡受奚等^[64]、陈 毓川等^[46]通过计算表明凹山铁矿、吉山铁矿、太山铁 矿、南山一陶村矿区以及罗河矿区的下部碱交代岩 较之原岩辉长闪长玢岩和粗安质岩石所缺失的铁含 量可以满足这些矿区中铁的总量的需求。另一种可 能来源则是铁矿浆从岩浆源直接熔离出来,充填成 矿。

在宁芜玢岩铁矿的围岩中普遍存在着强烈的钠 质蚀变,说明钠化与成矿作用关系密切。但对于钠 质来源还存在着广泛的争议,吴思本等^[65] 通过对钟 九矿区钠长石岩的矿物学研究论证该钠长石岩为岩 浆成因;邢凤鸣^[66] 发现钠长岩和钠长闪长岩具有与 辉石闪长岩一致的长石铅同位素组成,支持了钠质 来源于岩浆的观点。但由蔡本俊^[67] 首先提出钠质来 源于中三叠统周冲村组膏盐层的观点,受到普遍重 视,膏盐层对成矿的重要作用逐渐为许多学者所接 受。然而胡文宣等^[54] 对此提出了质疑,其依据有:区 内膏盐层未见石盐分布、膏盐层本身贫钠质、膏盐层 中的钠质难以迁移,并根据矿化蚀变的时空分布提 出钠质主要来源于当时火山洼地中高盐卤水的观 点。

5 结论

(1)浅成低温热液型金矿、斑岩铜矿和玢岩铁矿 是与陆相火山岩有关的三种主要金属矿床类型。其 中斑岩铜矿和浅成低温金矿形成的构造环境类似, 均以岛弧和活动大陆边缘为主,其次是陆内环境。 尤其是在我国陆内环境下的铜、金矿化显得更为重 要。区域性大断裂与火山机构的交汇部位是成矿最 有利的部位。

(2) 岩石的矿化在一定程度上具有专属性: 浅成 低温热液金矿的赋矿围岩为中、酸性火山岩系; 斑岩 型铜矿的赋矿围岩一般为中酸性次火山岩, 岩浆体 系往往具有高氧、高卤和高的水含量及富硫的特性, 通常为复式岩体末期的长英质小侵入体; 与玢岩型 铁矿有成因联系的是一套中基性次火山岩, 以辉长 闪长玢岩为主。埃达克岩及埃达克质岩与浅成低温 热液和斑岩金、铜的成矿作用有密切联系, 是最具成 矿潜力的含矿斑岩。而陆相火山岩与橄榄玄粗质岩 石的关系仍处于探索之中。

(3) 硅化和/ 或碱交代是矿床形成的重要环节, 但不同类型的矿床中围岩蚀变各具特色。其中浅成 低温金矿床的围岩蚀变常常与硅化有关, 蚀变矿物 组合包括低硫型(冰长石-绢云母型)、高硫型(明矾 石-高岭石型)及碱性岩型; 斑岩铜矿的围岩蚀变很 发育, 形成有规律的水平和垂直分带现象, 以钾质蚀 变为重要特征; 钠化则是玢岩铁矿最鲜明的蚀变特 征。

(4) 浅成低温金矿床成矿流体以低盐度、低温 (200~300℃)为主;而斑岩铜矿中则主要是高温 (400~800℃)高盐度的流体(卤水中 w(NaCl) = 35%~60%,甚至更高);玢岩铁矿成矿温度介于两 者之间。在流体演化过程中普遍存在沸腾作用。从 低硫亚类浅成热液矿床、高硫亚类浅成热液矿床到 斑岩型矿床,流体中大气水含量逐渐减少,岩浆水含 量逐渐增多。

(5) 矿床中 Fe 主要来源于赋矿的火山 次火山 岩或原始岩浆, Cu, Au, S 和 Na 等成矿物质的来源 更为复杂,还可能来源于与岩浆无关的围岩。其他 的可能还包括 Cu, S 的岩浆混合来源以及 Na 的高 盐卤水来源。

参考文献:

- [1] Stillitoe R H. 与陆相火山作用有关的金属矿化[A]. 李文达. 火山成矿作用[C], 北京: 地质出版社, 1983. 116-137.
- [2] Singer D A. 世界级金银铜铅锌矿床的定量分析[J]. 地质地球 化学, 1996, (6): 5-13.
- [3] 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 新疆斑岩铜矿的成矿条件和远景[J].新疆地质, 2001, 19: 43-48.
- [4] 项仁杰, 茹湘兰. 中国斑岩铜矿中的铂族元素[J]. 国外地质科 技, 1999, (3): 29-33.
- [5] 宁芜研究项目编写小组. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京: 地质出版 社, 1978.
- [6] 陆志刚,陶奎元,谢家莹,等.中国东南大陆火山地质及矿产[M].北京:地质出版社,1997.
- [7] 高天钧. 福建紫金山铜金矿床类型与环太平洋浅成低温矿床的 比较[J]. 福建地质, 1999, (4): 167-177.
- [8] 芮宗瑶. 西北、华北、东北斑岩铜矿床研究[A]. 见: 涂光炽. 中国 超大型矿床(1)[C]. 北京: 科学出版社, 2000. 397 425.
- [9] 芮宗瑶,黄崇轲,齐国明,等.中国斑岩铜(钼)矿床[M].北京: 地质出版社,1984. 350.
- [10] 唐仁鲤,罗怀松. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿带地质[M]. 北京: 地 质出版社, 1995. 320.
- [11] 侯增谦,曲晓明,黄卫.冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏 第二条玉龙铜矿带[J].中国地质,2001,28:27-29.
- [12] 曲晓明,侯增谦,黄卫.冈底斯斑岩铜成矿带:西藏第二条"玉龙"斑岩铜矿带?[J].矿床地质,2001,20(4):355-366.
- [13] Sillitoe R H. Characteristics and controls of the largest porphyry copper-gold and epithermal gold deposits in the circum-Pacific region[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1997, 44: 373-388.
- [14] 邱家镶, 王人镜, 王方正, 等. 和江下游中生代火山岩岩石化学

及成因分析[J]. 地球科学, 1981, (1): 170-181.

- [15] 吴利仁,齐进英.长江下游中生代火山岩[A].岩石学研究(第 五辑)[C].北京:地质出版社,1985.1-9.
- [16] 徐志刚. 从构造应力场特征探讨中国东部中生代火山岩成因[J]. 地质学报, 1985, 59(2): 109-126.
- [17] 王德滋,周金城,邱检生.橄榄安粗岩系的研究现状[J].南京 大学学报(地球科学),1991,(4):321-328.
- [18] 翟裕生,姚书振,林新多,等.长江中下游地区铁铜(金)成矿规 律[M].北京:地质出版社,1992.
- [19] 陈根文,夏斌,肖振宇,等.浅成低温热液矿床特征及在我国的 找矿方向[J].地质与资源,2001,10(3):165-171.
- [20] 陶奎元,薛怀民,毛建仁,等.中国东南沿海大(中)型浅成中低 温热液矿床 斑岩矿床评价的地质准则[J].火山地质与矿产, 1996,17(1):26-39.
- [21] 任启江. 据角砾岩体的类型和特征寻找斑岩铜矿[J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(6): 342.
- [22] 冯建忠, 王京彬. 中国与火山岩 斑岩有关的金银多金属矿成矿 地质特征[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 146 153.
- [23] 魏仪方, 刘春华. 中国陆相火山岩型金矿床找矿模型[J]. 吉林 地质, 1996, 15(2): 16-21.
- [24] 常印佛,刘湘培,吴言昌. 长江中下游铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社. 1991, 308.
- [25] 庞奖励. 浅成低温热液金矿研究现状及其趋势[J]. 黄金地质, 1995, 1(3): 34-38.
- [26] 王奖臻,李朝阳,胡瑞忠.斑岩铜矿研究的若干进展[J].地球 科学进展,2001,16(4):514-519.
- [27] Streck M J, Dilles J H. Sulfur evolution of oxidized arc magm as as recorded in apatite from a porphyry copper batholith[J]. Geology, 1998, 26(6): 523-526.
- [28] Muller D, Franz L, Herzig P M, et al. Potassic igneous rocks from the vicinity of epithermal gold mineralization, Lihir Island, Papua New Guinea[J]. Lithos, 2001, 57: 163-186.
- [29] Kroll T, Muller D, Seifert T, et al. Petrology and geochemistry of the shoshonite-hosted Skouries por phyry Cn Au deposit, Chalkidiki, Greece[J]. Mineralium Deposita, 2002, 37: 137-144.
- [30] Thieblemont D, Stein G, Lescuy er J-L. Epithermal and porphyry deposits: the adakite connection [J]. Earth and Planetary Sciences, 1997, 325: 103-109.
- [31] Sajona F G, Maury R C. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines[J]. Earth and Planetary Sciences, 1998, 326: 27-34.
- [32] Oyarzun R, Marquez A, Lillo J, et al. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: adakitic versus normal cale alkaline magmatism [J]. Mineralium Deposita, 2001, 36: 794-798.
- [33] 张旗, 王元龙, 张福勤, 等. 埃达克岩与斑岩铜矿[J]. 华南地质 与矿产, 2002, (3): 85-90.
- [34] 王强, 赵振华, 熊小林, 等. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 353-362.
- [35] 侯增谦,莫宣学,高永丰,等.埃达克岩:斑岩铜矿的一种可能 的重要含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例[J].矿床地

质,2003,22(1): 12.

- [36] Holliday J R, Wilson A J, Blevin P L, et al. Porphyry goldcopper mineralisation in the Cadia district, eastern Lachlan Fold Belt, New South Wales, and its relationship to shoshonitic magmatism[J]. M ineralium Deposita, 2002, 37: 100-116.
- [37] 薛怀民,陶奎元. 宁芜地区中生代火山岩系列的新认识及其地 质意义[J]. 江苏地质, 1989, (4): 9-14.
- [38] 邢凤鸣. 宁芜地区中生代岩浆岩的成因——岩石学与 Nd、Sr、 Pb 同位素证据[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(2): 126-137.
- [39] 唐永成,吴言昌,储国正,等.安徽沿江地区铜多金属矿床地质 [M].北京:地质出版社,1998.
- [40] 王元龙,张旗,王焰. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义[J]. 岩石学报, 2001, 17(4): 565-575.
- [41] 薛怀民. 宁芜中生代火山岩地球化学特征及岩浆的成因与演化(硕士论文)[D]. 南京: 南京地质矿产研究所, 1987.
- [42] Bonham H F. Models for volcanie-hosted epithermal precious metal deposits: a review [A]. In: Volcanism, hydrothermal systems and related mineralization [C]. International Volcanological Congress, Symposium 5. Hamilton, New Zealand, 1986. 13-17.
- [43] Heald P, Foley N K, Hayba D O. Comparative anatomy of volcanie-hosted epithermal deposits Acid sulphate and adularia-sericite types [J]. E con Geol, 1987, 80: 1-26.
- [44] Dilles J H, Einaudi M T. Wall-rock alteration and hydrothermal flow paths about the Ann-Mason porphyry copper deposit, Nevada- A 6 km vertical reconstruction[J]. Economic Geology, 1987, 87: 1963-2001.
- [45] Arancibia O N, Clark A H. Early magnetite-amphibole-plagieclase alteration-mineralization in the Island Copper porphyry copper-gold-molybdenum deposit, British Columbia [J]. Economic Geology, 1996, 91: 402-438.
- [46] 陈毓川,张荣华,盛继福,等.玢岩铁矿矿化蚀变作用及成矿机
 理[J].中国地质科学院矿床地质研究所所刊,1982,第1号, +
 24.
- [47] Lowell J D, Guilbert J M. Lateral and vertical alteration minemalization zoning in porphyry ore deposits [J]. Economic Geology, 1970, 65: 373-408.
- [48] Pichavant M, Ramboz C, Weisbrod A. Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data:. Phase equilibria analysis – a theoretical and geometrical approach[J]. Chemical Geology, 1982, 37: 1–27.
- [49] Cline J S, Bodnar R J. Can economic porphyry copper mineralzation be generated by a typical calc- alk aline melt? [J] Journal of Geophysical Research, 1991, 96(B5): 8113-8126.
- [50] Batchelder J. Light stable isotope and fluid inclusion study of the porphyry Cu deposit at Copper Canyon, Nevada[J]. Economic Geology, 1977, 72: 60-70.
- [51] Sheets R W, Nesbitt B E, Muehlenbachs K. Meteoric water component in magmatic fluids from porphy ry copper mineraliza-

tion, Babine Lake area, British Columbia[J]. Geology, 1996, 24 (12): 1091-1094.

- [52] 华仁民,陆建军,陈培荣,等.中国东部晚中生代斑岩浅成热液 金(铜)体系及其成矿流体[J].自然科学进展,2002,12(3):240 244.
- [53] 卢冰, 胡受奚, 蔺雨时, 等. 宁芜型铁矿床成因和成矿模式的探 讨[J]. 矿床地质, 1990, 9(1): 13-24.
- [54] 胡文宣, 胡受奚. 宁芜和庐枞地区钠长石化的钠质来源新探[J]. 地质找矿论丛, 1991, 6(2): 36-46.
- [55] 应汉龙. 浅成低温热液金矿床的全球背景[J]. 贵金属地质, 1999, 8(4): 241-250.
- [56] Thiersch P C, Williams-Jones A E, Clark J R. Epithermal mineralization and ore controls of the Shasta Att Ag deposit, Toodoggone District, British Columbia, Canada [J]. Mineralium Deposita, 1997, 32: 44-57.
- [57] Burnham C W. Magma and hydrothermal fluids [A]. In: Barnes H L. Geochemistry of hydrothermal ore deposits (2nd ed) [C]. New York: Wiley. 1979, 71-136.
- [58] Campos E, Touret J L R, Nikogosian I, et al. Overheated, Cu-bearing magmas in the Zaldivar porphyry-Cu deposit, Northern Chile. Geodynamic consequences[J]. Tectono-physics, 2002, 345: 229-251.
- [59] Wallace P, Carmicheal I S E. Sulfur in basaltic magmas[J].Geochim Cosmochim Acta, 1992, 56: 1863-1874.
- [60] Dilles J H, Farmer G L, Field C W. Sodium-calcium alteration by non-magmatic saline fluid in porphyry copper deposits: results from Yerington, Nevada[J]. Mineralogical Association of Canada Short Cources Series, 1995, 23: 309-339.
- [61] Ohmoto H, Goldhaber M B. Sulfur and carbon isotopes[A].
 In: Barnes H L. Geochemistry of hydrothermal ore deposits (2nd ed) [C]. New York: Wiley, 1997. 517-611.
- [62] Force E R. Laramide alteration of Proterozoic diabase: A likely contributor of copper to porphyry systems in Dripping Spring Mountains area, Southeastern Arizona[J]. Economic Geology, 1998, 93: 171-183.
- [63] Hattori K H, Keith J D. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36: 799-806.
- [64] 胡受奚,孙明志.长江中下游成矿带中接触交代型铁、铜矿床中碱质交代作用及有关火成岩的成矿专属性[C].宁芜火山岩地区铁矿会议文献(马鞍山会议).1972.
- [65] 吴思本, 徐志刚. 以钟九岩体为例试论熔浆成因钠长石的存在
 [J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1982, 第2号: 15-26.
- [66] 邢凤鸣. 安徽沿长江地区中生代岩浆岩的碱质来源[J]. 安徽 地质, 1996, 6(1):15-18.
- [67] 蔡本俊. 长江中下游内生铁铜矿床与蒸发岩的关系[J]. 山西 地质科技, 1979, (3): 1-10.

METALLOGENIC CHARACTERISTICS AND GENESIS OF Fe Cu Au DEPOSITS RELATED TO CONTINENTAL VOLCANIC ROCKS

MA Fang, JIANG Shao-yong

(State Key Laboratory f or Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The article made an overview on the epithermal Au, porphyry Cu and Fe deposits related to continental volcanic rocks in the respects of the tectonic setting, igneous rocks attributions and features of mineralization and alteration, the ore forming fluids and the origin of the ore forming materials. The three kind of deposits are different in the ore-forming conditions: the tectonic setting of epithermal Au and por phyry Cu deposits is mainly island arc or active continental margin, with minor inland environment; while porphyry iron depositssit at middle lower reach of Yangtze River is probably formed in inland riftoid envi ronment. The host rocks of the epithermal gold, the porphyry copper and the porphyry iron deposits are intermediate acidic volcanic assemblage, intermediate acidic subvolcanic rocks and intermediate basic subvolcanic rocks respectively, and alteration of the wall-rocks are characterized by silicification, K silicate and Na silicate respectively. The ore-forming fluids of epithermal gold deposits are mainly low salinities and temperatures (200 \sim 300 °C), while the fluids of porphyry copper deposits are mainly high temperatures (400~ 800°C) and salinities, the ore-forming temperatures of porphyry iron deposits are between the former two kinds of deposits. From low-sulfidation epithermal depostis, high-sulfidation epithermal depostis to porphyry deposits, the meteoric water content decreased and the magmatic water content increased in the ore forming fluids. For source of the ore forming materials, Fe are mainly from the host volcanie subvolcanic rocks or primitive magma; Cu, Au, S and Na are even more complex with another probability of wall rocks which have no relevance to magma, some other probability include magma mixing origin for Cu and S and high salinities brine origin for Na. Some special rock types such as adakite, shoshonite and alkali rocks are closely related to continental volcanic rocks deposits.

Key words: continental volcanic rocks, epithermal gold deposits, porphyry copper deposits, porphyry **+** ron deposits