

文章编号: 1006-544X (2009) 02-0216-07

# 斑岩铜矿研究最新进展

李晓峰<sup>1</sup>, 梁金城<sup>2</sup>, 冯佐海<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 桂林理工大学 资源与环境工程系, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 综述了目前斑岩铜矿研究内容中的几个重要进展, 如斑岩铜矿的大地构造背景及其成矿环境; 成矿斑岩岩浆源区及其侵位; 岩浆-热液转换过程以及不同成矿阶段石英-硫化物矿脉时空分布等等。斑岩铜矿研究正朝着宏观和微观两个方面发展, 宏观方面表现在斑岩铜矿形成的构造地质背景, 微观方面表现在成矿过程的精细厘定。随着 SEM-CL 和 LA-ICP-MS 分析测试技术的运用, 斑岩铜矿成矿过程中铜(钼)硫化物的沉淀聚集过程将逐步展示于人们面前。

**关键词:** 斑岩铜矿; 构造环境; 岩浆源区; 成矿流体; 脉体

**中图分类号:** P618.41

**文献标志码:** A

斑岩铜矿在经济地质研究中一直占有很大的比重, 世界经济地质学界著名的刊物《Economic Geology》的创刊就与斑岩铜矿的研究有关。斑岩铜矿的形成过程就是构造、岩浆和热液演化的系统过程, 它包括岩浆的起源、岩浆的侵位、岩浆-热液转换(即岩浆热液流体的出溶)以及矿质沉淀和后期隆升、剥蚀和保存等过程。近百年来, 经济地质学家对斑岩铜矿的成矿斑岩岩石类型、矿物学、热液蚀变分带、矿石分带、岩浆和流体的氧化还原状态以及流体包裹体和矿床模型等方面进行了大量的研究, 取得了丰硕的研究成果。在斑岩铜矿形成和演化的共性以及形成斑岩铜矿所必须的物理化学条件等方面取得了许多共识。近年来斑岩铜矿研究主要集中在对著名斑岩铜矿带和典型矿床解剖的基础上, 向宏观和微观两个方面发展, 即环境对斑岩铜矿形成的制约以及斑岩铜矿成矿过程的精细解析。

## 1 斑岩铜矿的构造环境

世界上大多数斑岩铜矿分布于岩浆弧环境, 它们的形成与俯冲作用有关的钙碱性岩浆有关。由于斑岩铜矿时空分布比较广泛, 常常用来示踪地球演化的过程, 故而许多地质学家从大地构造

背景和区域构造的角度来探讨有利于斑岩铜矿形成的环境。

世界上斑岩铜矿形成于几个特定的地质时期, 与地体的地球动力学演化密切相关, 主要形成于构造-岩浆旋回的晚期阶段<sup>[1]</sup>。一些地质学家特别强调大地构造背景对形成斑岩铜矿的重要性<sup>[2-4]</sup>, 提出了在压缩背景有利于斑岩铜矿的形成<sup>[5]</sup>。在智利中北部、美国亚利桑那州西南部以及伊朗等地区, 地壳增厚和压缩构造作用与大型斑岩铜矿的形成时期是基本一致的。在南美洲的转换压缩构造带中, 秘鲁南部处于压缩背景, 形成了超大型的 Cujaone 矿床和大型的 Toquepala 矿床, 而智利中部处于伸展环境, 则只有较小规模斑岩铜-钼矿床产出<sup>[5]</sup>; 然而, Camus 认为在智利的中部也是压缩构造背景, 只不过其他的因素导致了只能产出较小规模的斑岩铜钼矿床<sup>[6]</sup>。大量的地质事实表明, 世界上一些主要斑岩铜矿主要形成于区域收缩的地质事件过程中<sup>[7]</sup>。Sillitoe 认为弧环境下的快速隆升是形成超大型斑岩铜矿的前兆<sup>[3]</sup>。许多斑岩铜矿的形成时间与缓倾俯冲(shallow-dipping)、加大的汇聚速率、无震洋脊的俯冲、俯冲带的反转和隆升作用发生的时间是一致的, 而且斑岩铜矿也主要形成于区域岩

收稿日期: 2009-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40872065, 40772126, 40403006)

作者简介: 李晓峰(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事与花岗岩有关的矿床地质和地球化学研究, E-mail: x-f-li@hotmail.com。

浆作用、收缩应变或者转换压缩应变的晚期阶段。压缩构造背景、快速隆升以及基底断裂的重新活动以及由于地壳增厚而造成的火山作用的间歇,是形成斑岩铜矿的有利环境<sup>[5]</sup>。Cook 等人认为不同类型的板块俯冲也影响着斑岩铜矿的成矿类型,如 Papua New Guinea – Irian Jaya 褶皱带斑岩型矿床由东南部的铜金转变为西北部的铜钼是俯冲地壳由大洋地壳向大陆地壳转换的结果<sup>[1]</sup>。

斑岩铜矿并不是弧岩浆作用的典型产物,构造扰动(trigger)是触发斑岩系统形成的主要因素<sup>[8]</sup>。然而,构造扰动是非常短暂的,它们往往发生在板块俯冲作用的前几个百万年内。一些学者认为泛太平洋地区的斑岩铜矿与板块的低角度俯冲有关<sup>[1,4,9]</sup>,而另一些学者则强调了俯冲作用转换与斑岩铜矿形成的对应关系<sup>[10]</sup>。如 Cook 等认为智利中部的斑岩铜矿可能与洋岭俯冲的初始阶段有关,而菲律宾 Luzon 北部和 Mindanao 东部的斑岩铜矿带则与走滑断层系统中的挠曲有关<sup>[1]</sup>。侯增谦等认为在中国大陆内部斑岩铜矿产出的背景与大洋板块俯冲无关,其产出至少有 4 类环境:晚碰撞走滑环境、后碰撞伸展环境、后造山伸展环境和非造山崩塌环境。大陆环境含矿斑岩的浅成侵位主要受大规模走滑断裂系统、切割造山带的断裂系统和基底线性断裂构造控制。无论是岩浆弧环境还是大陆环境,斑岩铜矿系统的发育均有 3 个关键的过程,即岩浆起源的深部过程、岩浆浅成侵位的输导系统和流体排放—金属淀积的伸展环境<sup>[11]</sup>。赵文津从深部地球物理的角度,把安第斯斑岩铜矿带、冈底斯斑岩铜矿带和玉龙铜矿带进行了对比,认为要形成大型的斑岩铜矿,至少需要 6 个基本条件:(1)有上地幔来源的高温岩浆热液的大量供给;(2)有区域性铜的萃取来源;(3)有上地壳的部分熔融层或者岩浆房;(4)地壳上层构造体系中的张性断裂;(5)围岩的化学性质对矿质沉淀是重要的;(6)构造的相对稳态期<sup>[12]</sup>。

矿田尺度的结构和构造对于斑岩铜矿的侵位和成因也是至关重要的。如果说大地构造背景是判断是否可能形成斑岩铜矿的话,那么矿田尺度的结构和构造则是制约在何时何地形成斑岩铜矿的重要因素。成矿带的构造格架以及基底断裂的复活制约着斑岩铜矿的侵位。一般情况下,斑岩铜矿形成于低差异应力、近均质水平应力的特定

环境中,而伸展环境则往往不利于斑岩铜矿的形成<sup>[13]</sup>。因此,对岩浆弧的演化历史和动力学研究,不仅可以指示成矿带的位置,而且有可能指示这些成矿带中单个斑岩铜矿的位置。

## 2 成矿斑岩岩浆的源区和侵位

热液矿床的成矿过程其实就是成矿元素的分配过程,它主要受扩散作用、矿物与熔体之间的分配、溶解度和氧化还原性质所决定,因此,岩浆的源区性质、岩浆的侵位机制和岩浆的混合作用是制约岩浆能否携带金属元素、进入成矿流体、最终沉淀成矿的主要因素。

对于斑岩铜矿岩浆源区的研究结果都强调下地壳或者地幔对岩浆成因的贡献。如侯增谦等认为斑岩铜矿含矿斑岩的岩浆源区为加厚的新生镁铁质下地壳或拆沉的古老下地壳,石榴石角闪岩和角闪岩是斑岩铜矿成矿斑岩的源岩<sup>[11]</sup>。芮宗瑶等在总结大量  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  和 REE 资料的基础上,认为成矿斑岩的源岩与大洋玄武岩比较接近,成矿斑岩主要是洋壳或上地幔部分熔融的产物<sup>[14-16]</sup>。最近通过对美国 Bingham 斑岩铜矿成矿斑岩中的包体研究结果显示,之所以形成 Bingham 特大型斑岩铜矿的原因在于岩浆的源区含大量的富铜的硫化物<sup>[17]</sup>。Keith 等则认为岩浆硫化物和铁镁质碱性岩浆制约了斑岩铜矿的形成<sup>[18]</sup>,而 Halter 等则强调了异常的富硫的岩浆,而不是富铜的岩浆是形成斑岩铜矿的关键因素<sup>[19]</sup>。

Vigneresse 从岩浆的起源、分离、上升、侵位等方面对矿床的成矿制约提出了新的观点和认识<sup>[20]</sup>,他认为岩浆的起源、分离、上升和侵位不是 MASH 模式,而是 MSAE 模式;压实作用和剪切作用是岩浆从岩浆房分离出来的主要原因;岩浆侵位晚期的变形作用同样控制着矿床的形成;岩浆发生熔融的条件制约着金属元素与岩浆的结合程度,岩浆从源区分离方式和上升速率决定了元素通过扩散作用能否在熔体中再结合。岩浆的上升和结晶作用与大量岩浆流体的出溶密切相关。岩浆的混合作用可以发生在岩浆上升过程中,而岩浆侵位之后也往往被铁镁质岩浆叠加<sup>[21-22]</sup>。微量元素和同位素地球化学研究表明,先后侵位的铁镁质岩浆和长英质岩浆之间可以产生大量的物质交换<sup>[23]</sup>。如果相同组成的岩浆连续侵位,则先

后侵位岩浆之间不会产生较大的温度差,如长英质岩浆侵入到长英质岩浆中,其产生的温度效应较小,因而对于岩浆的扩散、分馏和还原条件影响较小。但是如果铁镁质岩浆侵入到长英质岩浆中,将会产生 300 ℃ 的温差,使岩浆的扩散、分馏和还原条件参数产生几个数量级的改变,从而有利于金属元素的富集。侵入体中的矿物分带不是岩浆分异的结果,而是岩浆不连续侵入的结果<sup>[20,24]</sup>。

在大陆地壳中,长英质岩浆的上升与特定的构造变形类型无关<sup>[25]</sup>,大量的事实表明,花岗岩上升和侵位主要与走滑条件或者压缩环境有关<sup>[26]</sup>。Rabinowica 和 Vignerresse 认为压实和剪切作用是长英质熔体产生分离作用的主要因素<sup>[27]</sup>,也是岩浆上升侵位的主要动力<sup>[20]</sup>。

Glazner 认为最终影响岩浆侵位的还是大地构造背景,板块俯冲的倾斜度影响着岩浆侵入作用和火山作用的比率<sup>[28]</sup>。倾斜俯冲可以产生走向滑动以及使与俯冲带大角度相交的先存的断层,在压缩背景下产生局部的伸展。这类构造可以为成矿岩浆的侵位提供空间<sup>[8,29]</sup>。侯增谦等认为与走滑断裂系统相伴发育的走滑拉分盆地、切割造山带的张性断裂系统与平行造山带的逆冲断裂带交汇部位以及不同方向的线性断裂构成的棋盘格子构造控制着斑岩岩浆-热液系统的空间定位<sup>[11]</sup>。大量的事实表明,岩浆侵位晚期的变形作用对矿床的控制主要表现在成矿脉体的展布和组成上。

### 3 岩浆-热液转换

岩浆-热液流体的转换是能否形成大型斑岩铜矿的关键,即使岩浆携带大量的金属成矿元素,如果这些成矿元素不能进入到成矿流体中,那么也不能形成具有经济意义的矿床。金属元素如何进入成矿流体中以及在岩浆-热液转换过程中,成矿元素在结晶相和流体相之间的分配问题都是制约金属成矿作用发生的关键。已有的研究表明,岩浆-热液的转换过程其实也是岩浆的结晶历史过程。比如, Hedenquist 认为侵入体的内在特性,包括其组成和结晶历史是决定能否形成斑岩矿床的关键<sup>[30]</sup>。

以往对岩浆-热液转换的研究多集中于石英斑晶或者长石斑岩中的熔融包裹体的研究。Kirwin 认为单向固结结构、晶洞构造和环状构造是岩浆

阶段向热液流体阶段转换的岩石结构证据。晶洞构造代表了岩浆内部的含水溶液状态,而单向固结结构则代表了热液流体从岩浆中出溶及热液流体与含水岩浆界面的物理化学状态<sup>[31-32]</sup>。但是,这些岩石结构和构造的特点及其对成矿的指示意义得到了越来越多经济地质学家的重视<sup>[33-39]</sup>。在我国的一些斑岩铜矿和钼矿矿床中已经厘定出单向固结结构<sup>[40]</sup>。

与岩浆热液矿床有关的浅成斑岩很多应该称之为“石英斑岩”,通常,这些岩石的斑晶由石英、长石及一些其他矿物组成,在经过热液蚀变后,其中的斑晶石英在岩石中更加醒目<sup>[8]</sup>,如形成石英眼结构等。因此,这些石英斑岩记录了岩浆-热液转换的部分信息<sup>[41-45]</sup>。

### 4 石英-硫化物脉体研究

在岩浆-热液转换之初直至成矿作用的结束,自始至终伴随着脉状岩墙、热液角砾岩、含矿(或非含矿)脉体的形成和发育。这些脉体中所含的矿石矿物量在整个斑岩成矿系统金属沉淀量中占有很大的比例,它们代表了大量热液流体的局部渗滤作用结果。因此,脉体和热液角砾矿物、岩石结构、流体包裹体、所处的位置以及密度和排列方向提供了岩浆-热液转换过程及其之后成矿流体的组成和运移的时空演化的重要信息<sup>[46-47]</sup>。White 首次对 Climax 斑岩钼矿脉状岩墙进行了研究<sup>[48]</sup>。Meyer 首次在美国 Butte 斑岩铜矿主成矿阶段鉴别出不同类型的脉体<sup>[49]</sup>。Gustafson 和 Hunt 把智利 El Salvador 斑岩铜矿中的脉体划分为 A、B、D 3 种类型<sup>[50]</sup>,随后 Gustafson 和 Quiroga 又增加了早期的黑云母脉(EB)和 C 脉<sup>[51]</sup>。Clark 则增加了 M 型脉<sup>[52]</sup>。Muntean 和 Einaudi(2000)在智利 Maricunga 成矿带的斑岩金矿中鉴别出带状的石英网脉<sup>[53]</sup>。Li 等在德兴斑岩铜矿中鉴别出 A、C、D 和 E 4 种脉体,这 4 种脉体分别代表了不同蚀变和矿化阶段及铜钼硫化物的沉淀<sup>[54]</sup>。脉状岩墙与单向固结结构一样是连接岩浆和热液过程的桥梁,脉状岩墙的发育往往与单向固结结构密切相关<sup>[46]</sup>。脉状岩墙通常包括自形的石英、黑云母和辉钼矿,由脉壁向细晶的斑岩±辉钼矿中心生长。随着流体的演化,从早期高温阶段到晚期的低温阶段,形成一系列与蚀变有关的脉体(如与钾化蚀变有关的、富磁铁矿的脉,与钠

质蚀变和钙质蚀变有关的脉体,与强烈水解作用有关的脉体等)。斑岩铜矿系统中早期的脉体(如 Gustafson 和 Hunt 所命名的 A 型脉)形成于韧性环境下的近岩浆的温度和岩石静压条件下。这些早期的脉体往往被后期脆性特征占优势的水压致裂作用所产生的脉体替代。由于岩石流变性质的差异,韧性和脆性环境的转换主要发生在斑岩内部或者近岩体的围岩中。随着岩体的冷却,晚期的脉体主要形成于静水压力和脆性环境。在韧性区域,破裂的产生主要是由于岩体内部流体压力的突变(包括新的岩浆、富含挥发分岩浆的侵入)、快速的应变速率或者突然由静岩压力到静水压力的转换。在这种情况下,挥发分发生相的分离,产生大量的水压致裂破裂。随着温度的降低,脉体在定向方向上逐渐变得比较规则,只是因为它们形成于脆性破裂环境,这些脆性破裂构造主要受外部构造应力场的影响。只要有足够热液流体的供给,破裂的形成和脉体的充填就会周期性发生。

斑岩铜矿中脉体的定向和演化特征反映了浅成侵入体的岩浆和构造格架<sup>[13]</sup>。在较浅深度的斑岩铜矿,同心状或者准同心状破裂和放射状破裂是某些矿床的典型特征<sup>[55]</sup>。例如,美国亚利桑那州的 San Juan 斑岩铜矿,同心状、放射状破裂和脉体围绕岩株分布,而岩墙则与这些破裂构造和脉体呈正交。在智利 El Salvador 斑岩铜矿系统中,西北方向伸展的“D”型脉不仅反映了斑岩岩株侵位的岩浆应力,也反映了与区域转换压缩变形有关的北东-南西方向的最小应力<sup>[13]</sup>。在深度较深的斑岩铜矿,以单一展布的脉体为特征,如美国亚利桑那州的 Sierrita 斑岩铜矿。

## 5 成矿过程的精细解析

斑岩铜矿中矿脉的定向测量和分布以及不同类型脉体之间的度量关系和物质组成是正确认识 and 了解斑岩铜矿成矿过程应力状态和流体物理化学状态的关键,对于了解成矿时期的应力状态、流体运移轨迹和流体的物质组分演化都具有重要的意义。近年来,随着 SEM-CL、LA-ICP-MS 等技术的运用,人们在研究矿脉的基础上,开始对斑岩铜矿成矿过程进行精细解析研究。如 Redmond 等认为斑岩铜矿中石英脉记录了次火山岩浆热液系统的物理化学演化历史,利用阴极发光图

像和流体包裹体测温揭示单个石英脉的生长历史与铜矿形成的关系<sup>[56]</sup>。Landtwing 等研究了美国犹他州 Bingham 斑岩铜矿主成矿阶段复杂结构石英网脉的流体演化和矿石的沉淀,发现在 Cu-Fe 硫化物沉淀前、沉淀中和沉淀后,流体的主要元素和微量元素变化不大,而 Cu 则有较大的变化。Cu-Fe 硫化物的沉淀只是在较窄的温度(425~350℃)和压力(21~14 MPa)范围内,气相流体包裹体是 Cu 的载体<sup>[34]</sup>。Rusk 利用流体包裹体和阴极发光技术以及 LA-ICP-MS 对美国蒙大拿州 Butte 斑岩铜矿主要成矿阶段矿脉的热液流体组成研究,认为与成矿前流体相比,成矿期流体相对富集 As 和 Sb,但是含较少的 Cu、Pb、Zn 和 Mn<sup>[39]</sup>。Audétat 通过研究斑岩铜矿和斑岩钼矿中流体包裹体的物质组分后认为,形成斑岩铜矿和斑岩钼矿差异的根本原因在于成矿流体中 Cu 和 Mo 含量的差异<sup>[57]</sup>。Grün 对美国 Bingham 斑岩铜矿矿脉的定向和分布以及脉的幅度进行了测量和统计<sup>[58]</sup>,发现从早到晚,主要有 3 期脉体,即网脉(包括无石英脉和薄层的石英-硫化物脉)、石英-辉钼矿脉、石英-绢云母-黄铁矿脉,局部的应力场控制着这 3 期脉体的分布。Williams-Jones 和 Heinrich 提出了岩浆-热液系统中气相迁移金属元素的观点<sup>[59]</sup>,并得到了广泛的重视<sup>[57,60]</sup>。

## 6 研究展望

虽然斑岩铜矿的研究历史已有百余年,但是经济地质学家对其关注的程度和兴趣却丝毫未减。到目前为止,有关斑岩铜矿的成矿岩石类型、热液蚀变类型和矿石的分带特征以及成矿物质的来源和流体的演化有大量的文献报道,经济地质学家在某些方面也达成共识。但是有些问题的争论还是一直不断,如:岩浆冷却过程和热状态<sup>[56]</sup>、热液蚀变<sup>[42]</sup>、流体的混合作用<sup>[61]</sup>是不是斑岩成矿系统形成高品位、大型斑岩铜矿的主要因素?洋脊俯冲或者缓倾斜俯冲是不是形成大型斑岩铜矿的必需条件?岩浆-热液系统持续的时间长短<sup>[61-62]</sup>以及走滑、压缩和伸展环境哪种更有利于形成斑岩铜矿<sup>[63]</sup>?在岩浆-热液转换和矿脉的沉淀过程中,应力场是如何转化的?Cook 等认为斑岩铜矿的形成是由地幔到地壳以及矿田尺度和矿床尺度多种因素综合的结果<sup>[1]</sup>。比如,大尺度规

模的因素(如地球动力学背景、岩性和构造格架)制约着流体的生成和流体的运移轨迹,流体储存库位置、性质和大小以及流体释放的时间。而矿田尺度和矿床尺度的因素则是决定了能否形成具有经济意义斑岩铜矿。然而,在岩浆-热液作用过程中,流体的物理化学条件(温度、压力、盐度、酸碱度、氧化还原程度和硫的还原性)的变化与斑岩铜矿形成过程的关系还是个谜。而且由于难以建立铜硫化物沉淀与石英中流体包裹体形成的时空关系,导致对岩浆-热液成矿系统中一些科学问题的解释变得十分复杂而又十分困难<sup>[56]</sup>。因此,一些斑岩铜矿成矿过程的科学问题值得进一步探讨。

(1) 斑岩铜矿成矿岩浆的源区是什么? 不同期次、先后侵位的岩浆对成矿岩浆的分异和结晶有何影响? 虽然大家认为斑岩铜矿的物质来源主要是上地幔和下地壳,但是岩浆的源区是不是富硫或者富铜的源区? 是不是稍后侵入的、偏铁镁质的岩浆是影响成矿岩浆分异和结晶,导致成矿元素铜优先进入流体的关键因素? 最近,姑婆山-花山地区花岗岩侵位机制和岩相学研究发现,岩浆的侵位方式和先后侵入次序以及岩浆的化学成分制约着该地区钨锡铜钼金属的成矿作用及其成矿规模的大小。

(2) 成矿元素是如何从岩浆熔体进入到流体相的? 结晶相和流体相之间元素是如何分配的? 导致岩浆-热液转化的机制是什么? 岩浆的结晶过程、流体物理化学的演化过程和斑岩铜矿的成矿过程是如何联系的? 斑岩铜钼矿床矿质沉淀的不同是由于成矿元素分离原因造成的还是由富铜或者富钼的成矿流体沉淀而产生的?

(3) 大量的同位素、流体包裹体和熔融包裹体研究表明,在斑岩铜矿系统中,岩浆流体占主导作用。然而在单个矿床中,矿床的成因不能简单地解释为正岩浆来源,在成矿作用中,外来的流体参与成矿作用是非常可能的。由于流体的降温、相分离造成的化学影响、水-岩反应以及岩浆流体和大气降水的混合反应,导致流体在上升过程中发生沉淀。然而,最近的研究表明水岩反应、流体相的分离以及岩浆流体与低盐度的大气降水的混合作用不是造成具有经济意义的铜硫化物沉淀的主要机制<sup>[34]</sup>,那么导致铜硫化物沉淀的机制是什么? 为什么在不同的矿床中,成矿元素沉淀的主要阶段也是

不同的? 这与热液蚀变有何关系? 为什么在不同的矿床中 Cu(Mo) 硫化物沉淀温度却相差很大(如, Bingham 斑岩铜矿热液流体中 99% 的铜在 425 ~ 350 °C 较窄的温度区间内沉淀下来<sup>[34]</sup>, 阿根廷的 Alumbra 斑岩铜矿 Cu(Mo) 硫化物主要在 400 °C 沉淀,而伊朗的 Sungun 斑岩铜矿中黄铜矿主要在 360 ± 60 °C 发生沉淀)? 难道热液流体的快速冷却是导致 Cu(Mo) 硫化物沉淀的唯一因素?

上述问题的解决,必将使我国斑岩铜矿成矿机制研究上升一个崭新的台阶,对我国斑岩铜矿的勘查和深部找矿工作起到一定的指导作用。

### 参考文献:

- [1] Cook D R, Hollings P, Walshe J. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution and tectonic controls[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(5): 801-818.
- [2] Solomon M. Subduction, arc reversal, and the origin of porphyry copper - gold deposits in island arc[J]. *Geology*, 1990, 18: 630-633.
- [3] 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.
- [4] Kerrich R, Goldfrab R, Groves D, et al. The geodynamics of world-class gold deposit: characteristics, space-time distributions, and origin[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2000, 13: 501-551.
- [5] Sillitoe R H. Major regional factors favoring large size, high hypogene grade, elevated gold content and supergene oxidation and enrichment of porphyry copper deposit: a Global perspective [C]//Perth, Conference Proceedings: Glenside, South Australia, Australian Mineral Foundation, 1998: 21-34.
- [6] Camus F. Geología de los Sistemas Porfíricos en los Andes de Chile [M]. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003.
- [7] Cunningham C G, Singer D A, Zappettini E Z. A preliminary quantitative mineral resource assessment of undiscovered porphyry copper resources in the Andes Mountains of South America[J]. *Society of Economic Geology Newsletter*, 2007(71): 1, 8-13.
- [8] Candela P A, Piccoli P M. Magmatic processes in the development of porphyry-type ore systems [C]//*Economic Geology* 100th Anniversary Volume, 2005: 25-38.
- [9] Gutscher M A, Maury R, Eissen J P, et al. Can slab melting be caused by flat subduction? [J]. *Geology*, 2000, 28(6): 535-538.
- [10] James D, Sacks I S. Cenozoic formation of the central Andes: A geophysical perspective [M]//Skinner B F. *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. Society of Economic Geologists, Special Publication No. 7, 1999: 1-25.
- [11] 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 等. 初论大陆环境斑岩铜矿[J]. *现代地质*, 2007, 21(2): 332-351.
- [12] 赵文津. 大型斑岩铜矿成矿的深部构造岩浆活动背景[J].

- 中国地质,2007,34(2):179-205.
- [13] Tosdal R M, Richards J P. Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu  $\pm$  Mo  $\pm$  Au deposits [J]. Reviews in Economic Geology, 2001, 14: 157-181.
- [14] 芮宗瑶, 张立生, 陈振宇, 等. 斑岩铜矿的源岩或源区探讨 [J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 229-238.
- [15] 芮宗瑶, 侯增谦, 李光明, 等. 俯冲、碰撞、深断裂和埃达克岩与斑岩铜矿 [J]. 地质与勘探, 2006, 42(1): 1-6.
- [16] 芮宗瑶, 张洪涛, 陈仁义, 等. 斑岩铜矿研究中若干问题探讨 [J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 491-500.
- [17] Core D P, Kesler S E, Essene E J. Unusually Cu-rich magmas associated with giant porphyry copper deposits: evidence from Bingham, Utah [J]. Geology, 2006, 34(1): 41-44.
- [18] Keith J D, Whitney J A, Hattori K, et al. The role of magmatic sulfides and mafic alkaline magmas in the Bingham and Tintic mining district, Utah [J]. Journal of Petrology, 1997, 38(12): 1679-1690.
- [19] Halter W E, Heinrich C A, Pettke T. Magma evolution and the formation of porphyry Cu-Au ore fluids: evidence from silicate and sulfide melt inclusions [J]. Mineralium Deposita, 2005, 39(8): 845-863.
- [20] Vigneresse J L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation [J]. Ore Geology Reviews, 2007, 30(3/4): 181-216.
- [21] Collins W J, Richards S R, Healy B E, et al. Origin of heterogeneous mafic enclaves by two-stage hybridisation in magma conduits (dykes) below and in granitic magma chambers, Transactions of the Royal Society of Edinburgh [J]. Earth Sciences, 2000, 91: 27-45.
- [22] Weinberg R F, Sial A N, Pessoa R R. Magma flow within the Tavares pluton, northeast Brazil: compositional and thermal convection [J]. Geological Society of America Bulletin, 2001, 113: 508-520.
- [23] Holden P, Holden A N, Halliday W E, et al. Chemical and isotopic evidences for major mass transfer between mafic enclaves and felsic magma [J]. Chemical Geology, 1991, 92: 135-152.
- [24] Vigneresse J L. A new paradigm for granite generation [J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 2004, 95: 11-22.
- [25] Rabinowicz M, Vigneresse G L. Melt segregation under compaction and shear channelling: Application to granitic magma segregation in a continental crust [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109, B04407, doi: 10.1029/2002JB002372.
- [26] Kalakay T J, John B E, Lageson D R. Fault-controlled pluton emplacement in the Sevier fold-and-thrust belt of southwest Montana, USA [J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23: 1151-1165.
- [27] Vigneresse J L. Could felsic magmas be considered as tectonic objects, just like faults or folds [J]. Journal of Structural Geology, 1999, 21: 1125-1130.
- [28] Glazner A F. Plutonism, oblique subduction, and continental growth: an example from the Mesozoic of California [J]. Geology, 1991, 19: 784-786.
- [29] Hill K C, Kendrick R D, Crowhurst P V, et al. Copper-gold mineralization in New Guinea: Tectonics, lineaments, thermochronology and structure [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2002, 49: 737-752.
- [30] Hedenquist J W. Transitions from porphyry environments: ore versus barren epithermal systems determined by magma history [C]//19th General Meeting of the International Mineralogical Association, Expansion to Nano, Bio, and Planetary Worlds, 2006.
- [31] Kirwin D. Unidirectional solidification textures associated with intrusion-related Mongolian mineral deposits [Z]//Seltmann R, Gerel O, Kirwin D J. Geodynamics and Metallogeny of Mongolia with a Special Emphasis on Copper and Gold Deposits: International Association on the Genesis of Ore Deposits, Guidebook Series 11, CERCAMS/NHM London, 2005: 63-84.
- [32] Kirwin D. Unidirectional solidification textures, miarolitic cavities and orbicules: field evidence for the magmatic to hydrothermal transition in intrusion-related mineral deposit [C]//Proceedings of 19th General Meeting of the International Mineralogical Association, 2006.
- [33] Lowenstern J B, Sinclair W D. Exsolved magmatic fluid and its role in the formation of comb-layered quartz at the Cretaceous Logtung W-Mo deposit, Yukon Territory, Canada [J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1996, 87: 291-303.
- [34] Landtwing M, Pettke T, Halter W, et al. Fluid evolution and ore mineral precipitation at the Bingham porphyry Cu-Au-Mo deposit, Utah [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 235: 229-243.
- [35] Kamenetsky V S, Wolfe R C, Eggins S M, et al. Volatile exsolution at the Dinkidi Cu-Au porphyry deposit, Philippines: A melt-inclusion record of the initial ore-forming process [J]. Geology, 1999, 27(8): 691-694.
- [36] Rusk B, Reed M. Scanning electron microscope-cathodoluminescence analysis of quartz reveals complex growth histories in veins from the Butte porphyry copper deposit, Montana [J]. Geology, 2002, 30(8): 727-730.
- [37] Rusk B G, Reed M H, Dilles J H, et al. Compositions of magmatic hydrothermal fluids determined by LA-ICP-MS of fluid inclusions from the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, MT [J]. Chemical Geology, 2004, 210: 173-199.
- [38] Rusk B G, Reed M H, Dilles J H, et al. Intensity of quartz cathodoluminescence and trace-element content in quartz from the porphyry copper deposit at Butte, Montana [J]. American Mineralogist, 2006, 91: 1300-1312.
- [39] Rusk B, Miller B, Reed M. Compositions of hydrothermal fluids that formed main stage veins in Butte, Montana: evidence from fluid inclusions [C]//Ore and Orogenesis, A Symposium Honoring the Career of William R. Dickinson Program with Abstracts, 2006: 52.
- [40] 李晓峰, Yasushi W, 屈文俊. 江西永平铜矿花岗质岩石的岩石结构、地球化学特征及其成矿意义 [J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2353-2365.
- [41] Harris A C, Kamenetsky V S, White N C, et al. Volatile phase separation in silicic magmas at Bajo de la Alumbrera porphyry Cu-Au deposit, NW Argentina [J]. Resource Geology, 2004, 54(3): 341-356.
- [42] Harris A C, Golding S D, White N C. Bajo de la Alumbrera copper-gold deposit: Stable isotope evidence for a porphyry-related hydrothermal system dominated by magmatic aqueous

- fluids[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(5): 863 – 886.
- [43] Chang Z S, Meinert L D. The magmatic – hydrothermal transition—evidence from quartz phenocryst textures and endoskarn abundance in Cu – Zn skarns at the Empire Mine, Idaho, USA [J]. *Chemical Geology*, 2005, 210: 149 – 171.
- [44] Müller A, Lennox P, Trzebski R. Cathodoluminescence and micro-structural evidence for crystallization and deformation processes granites in the Eastern Lachlan Fold Belt (SE Australia) [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143: 510 – 524.
- [45] Müller A, Breiter K, Seltnann R, et al. Quartz and feldspar zoning in the eastern Erzgebirge volcano-plutonic complex (Germany, Czech Republic): evidence of multiple magma mixing [J]. *Lithos*, 2005, 80: 201 – 227.
- [46] Seedorf E, Dilles J H, Proffett J R J, et al. Porphyry deposits: characteristics and orogin of hypogene features[C]//*Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005, 100: 251 – 298.
- [47] Proffett J M. Geology of the Bajo de la Alumbrera porphyry copper gold deposit, Argentina [J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 1535 – 1574.
- [48] White W H, Bookstrom A A, Kamilli R J, et al. Character and origin of Climax-type molybdenum deposits[J]. *Economic Geology 75th Anniversary Volume*, 1981, 75: 270 – 316.
- [49] Meyer C. An early potassic type of wall rock alteration at Butte, Montana [J]. *American Mineralogist*, 1965, 50: 1717 – 1722.
- [50] Gustafson L B, Hunt J P. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile [J]. *Economic Geology*, 1975, 70: 857 – 912.
- [51] Gustafson L B, Quiroga J. Patterns of mineralization and alteration below the porphyry copper orebody at El Salvador, Chile [J]. *Economic Geology*, 1995, 90: 2 – 16.
- [52] Clark A H. Are outsize porphyry copper deposits either anatomically or environmentally distinctive? [C]//Whiting B H, Mason R, Hodgson C J. *Giant Ore Deposits. Society of Economic Geologists Special Publication 2*, 1993: 213 – 283.
- [53] Muntean J L, Einaudi M T. Porphyry gold deposits of the Refugio district, Maricunga belt, northern Chile [J]. *Economic Geology*, 2000, 95: 1445 – 1472.
- [54] Li X F, Munetake S. The hydrothermal alteration and mineralization of Middle Jurassic Dexing porphyry Cu – Mo deposit, Southeast China [J]. *Resource Geology*, 2007, 57(4): 409 – 426.
- [55] Heidrick T L, Titley S R. Fractures and dike patterns in Laramide plutons and their structural and tectonic implications, American southwest [M]//Titley S R. *Advances in geology of the porphyry copper deposits*. Tucson: University of Arizona Press, 1982: 73 – 91.
- [56] Redmond P B, Einaudi M T, Inan E E, et al. Copper deposition by fluid cooling in intrusion-centered systems: New insights from the Bingham porphyry ore deposit, Utah [J]. *Geology*, 2004, 32(3): 217 – 220.
- [57] Audétat A. What makes the difference between porphyry Mo and porphyry Cu deposits: Insight by LA – ICP – MS analysis of fluid inclusions from Cave Peak and Santa Rita [C]//*Ore and Orogenesis, A Symposium Honoring the Career of William R. Dickinson Program with Abstracts*, 2007: 52.
- [58] Grün G. Distribution and orientation of veins in the Bingham porphyry Cu – Mo – Au deposit, Utah [C]//*Ore and Orogenesis, A Symposium Honoring the Career of William R. Dickinson Program with Abstracts*, 2007: 53.
- [59] Williams-Jones A E, Heinrich C A. Vapor transport of metal and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(7): 1287 – 1312.
- [60] Heinrich C A, Furrer C, Landtwing M R, et al. Fluid evolution and ore-metal zonation in the Bingham Canyon porphyry Cu – Mo – Au deposit [C]//*Ore and Orogenesis, A Symposium Honoring the Career of William R. Dickinson Program with Abstracts*, 2007.
- [61] Frikken P H, Cook D R, Walshe J L. Mineralogical and isotopic zonation in the Sur – Sur tourmaline breccia, Río Blanco – Los Bronces Cu – Mo Deposit, Chile: Implications for ore genesis [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(5): 935 – 961.
- [62] Cannell J C, Cook D R, Hollings P, et al. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu – Mo deposit [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(5): 979 – 1003.
- [63] Masterman G, Berry R, Cook D R. Fluid chemistry, structural setting and emplacement history of the Rosario Cu – Mo porphyry and Cu – Ag – Au epithermal veins, Collahuasi district, northern Chile [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(5): 835 – 862.

## Development of Porphyry Copper Deposit Research

LI Xiao-feng<sup>1</sup>, LIANG Jin-cheng<sup>2</sup>, FENG Zuo-hai<sup>2</sup>

(1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*;

2. *Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China*)

**Abstract:** Porphyry copper deposit is the main resource of the copper product in the world. As a result, scientists pay much attention to its exploration and scientific research. The paper reviews recent study on porphyry copper deposit, such as the tectonic setting, the sources and the emplacement of porphyry, the transition between the magma and hydrothermal activity, as well as quartz-sulfide vein formed in different stages. Important study of porphyry copper deposit falls into two fields. One is tectonic setting and its structures, the other is the ore-forming process. The process of Cu – Mo – sulfide precipitation during the formation of porphyry copper deposit will be clear with the development of scanning electron microscopy – cathodoluminescence (SEM – CL) and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA – ICP – MS) analytical technique in the future.

**Key words:** porphyry copper deposit; tectonic setting; magma source; ore-forming fluid; vein