第 26 卷 第 11 期
2011 年 11 月

地球科学进展
ADVANCES IN EARTH SCIENCE

Vol. 26 No. 11
Nov. ,2011

张云国,周朝宪. 斑岩铜矿床研究进展[J]. 地球科学进展,2011,26(11):1173-1190. [Zhang Yunguo, Zhou Chaoxian. Review on porphyry copper deposit[J]. Advances in Earth Science,2011,26(11):1173-1190.]

斑岩铜矿床研究进展

张云国,周朝宪

(1. 有色金属矿产地质调查中心,北京 100012;2. 北京矿产地质研究院,北京 100012)

摘 要:斑岩铜矿不但形成于环太平洋成矿域,还形成于特提斯成矿域和中亚成矿域(古亚洲洋成矿域)。成矿物质来源于深部,经过"洋壳—地幔熔岩流"、"原始岩浆"、"浅部富矿岩浆"和"岩浆结晶—成矿"4 个阶段,其中在"原始弧岩浆"阶段,通过 MASH 过程,有大量成矿物质和能量的聚集。成矿流体为富 H_2O、高温、高压、高盐度、强氧化性、高氧逸度的富矿气液相流体,这些特点有利于成矿物质在岩浆—热液分离过程中向流体富集,并以氯络合物的形式运移。随着成矿流体的上侵,温度和压力的降低是成矿物质沉淀的主要影响因素。磁铁矿的结晶为成矿流体提供了大量的 S^{2-} 离子,也是导致成矿物质沉淀的主要因素。斑岩型蚀变带从里向外为石英内核、钾化带、SCC 带和泥化带,铜矿化主要发育在矿化带外围以及 SCC 带。目前,斑岩铜矿成矿模型主要有经典模型、系统模型和多阶段叠加模型。

关 键 词:斑岩铜矿;地质特征;蚀变带;源岩;沉淀机制;成矿机理;模型

中图分类号:P611; P588.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-8166(2011)11-1173-18

1 引 言

自 20 世纪初以来,国外学者就开始了对斑岩型 Cu(-Mo-Au) 矿床(Porphyry Cu(-Mo-Au) Deposits,或 PCDs,以下简称斑岩铜矿)的研究工作。近百年来,许多学者对斑岩铜矿的构造环境、动力学背景、成矿物质来源、成矿物质的迁移和沉淀机制等方面进行了大量的研究工作,取得了丰硕的研究成果。近些年,对斑岩铜矿的研究主要是在对大型斑岩铜矿研究基础上的构造环境约束和成矿精细过程方面。在整理斑岩铜矿相关文献的基础上,本文对制约斑岩铜矿形成的宏观和微观方面的研究进展进行了总结,希望对斑岩铜矿的成矿理论研究和找矿实践有所参考。

2 概 念

1904 年,Ransome[1] 通过对美国亚利桑那州 Bisbee "浸染状铜矿"的详细野外观察,提出了浸染状铜矿化与斑岩体成因相关的学术思想,拉开了斑岩铜矿研究的序幕。1918 年,Emmons[2] 正式把这种与斑岩体有关的"浸染状铜矿"定名为斑岩铜矿。

斑岩铜矿系统(Porphyry Cu Systems)是一种大体积热液蚀变岩体(10 ~ 100 km^3),以含有金属矿物的斑岩铜矿脉为主要特征,外围可能含有矽卡岩、置换碳酸盐岩、沉积岩等高—中温硫化物热液系统[3]。斑岩铜矿是"与侵入岩有关金属矿床"家族的重要成员之一,其成矿作用与岩浆活动具有密切时空分布关系[4]。

3 特 征

3.1 成矿环境

(1) 斑岩铜矿不但产于环太平洋一带成矿域,与俯冲作用有关,也产于特提斯成矿域和中亚成矿

① 收稿日期:2011-07-28;修回日期:2011-09-19.

作者简介:张云国(1982-),男,山东聊城人,工程师,主要从事矿床学研究、矿产勘查和矿山地质等工作.
E-mail: zhangyg0603@163.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

域(古亚洲洋成矿域),且几乎所有斑岩铜矿都产出于俯冲带的上盘。中亚成矿域由于古亚洲洋的闭合而显得不太明显。

(2) 斑岩铜矿常成群成带出现,构成成矿区和成矿带,有时还和其他矿床类型相伴产出,构成一个成矿系列。

(3) 斑岩铜矿的形成往往与深大断裂有直接关系,但直接分布在深断裂带上的斑岩铜矿很少,矿体受更次一级的构造控制。

3.2 有用组分

(1) 绝大多数斑岩铜矿储量巨大,埋藏较浅,Cu 的品位在 0.5% 左右,适宜大规模露天开采。

(2) 一般斑岩铜矿矿石中有用组分以 Cu、Cu-Au 或 Cu-Mo-Au 为主,常伴有 Ag、Re、Se、Os、Pt、Pd 等稀有分散元素,选矿过程中可综合回收利用。

3.3 侵入体及围岩特征

(1) 在空间和形成时间上,金属矿化与浅成斑岩类侵入体具有密切关系,且出露面积较小(1 ~ 2 km^2),个别达 10 km^2。

(2) 斑岩铜矿的侵入体主要是浅成、超浅成相,极少数为中深成相,侵位深度大多介于 2 ~ 5 km 之间。

(3) 与 Cu 矿化有关的斑岩侵入体属于中酸性的钙碱性系列,岩性变化于石英闪长岩—花岗岩之间。其中,岛弧环境的含矿斑岩通常属于典型钙碱性系列,岩性以石英闪长岩为主,少数为花岗闪长岩、石英二长岩[5];而陆缘弧环境的含矿斑岩属于钙碱性系列,少量属于高钾钙碱性系列,岩性以花岗闪长岩和石英二长岩为主[6]。

(4) 含矿斑岩侵入体的化学成分以富 K 为特征,通常 $K_2O > Na_2O$,$^{87}Sr/^{86}Sr$ 较小,一般为 0.703 ~ 0.706,少数可到 0.709[7]。

(5) 含矿侵入岩体及围岩均遭受到普遍和强烈的断裂与破碎作用,含矿斑岩侵入体及其附近常具有含矿的隐爆角砾岩。

(6) 矿体可产在斑岩体内部,也可以产在围岩中,多数产于岩体之中[8]。

(7) 围岩性质对斑岩铜矿的形成有重要影响。与斑岩铜矿有关的围岩主要有 2 类:一类为硅铝质岩,主要为片岩、片麻岩、中—酸性侵入岩或喷出岩、火山碎屑岩、泥质粉砂岩以及各种角砾岩等;另一类为碳酸盐岩,有石灰岩、白云岩及泥灰岩等。共同的特征是硬、脆、易碎,有利于矿液的运移和沉淀。

(8) 斑岩体外围常伴有矽卡岩型—脉状矿床存在,与斑岩成矿系统互为找矿标志[9]。

3.4 蚀变特征

斑岩铜矿在热液蚀变类型、强度和规模等方面变化很大,但是代表性的蚀变带普遍存在,并具明显的分带性。斑岩铜矿有其特征的蚀变组合及其分带模式,俗称“大白菜模式”,由内到外依次为:石英内核→钾化带(黑云母—钾长石带)→似千枚岩化带(绢云母—石英带)→泥化带→青磐岩化带。

石英内核是早期岩浆结晶的产物;黑云母—钾长石的交代现象是一种阳离子交换反应;石英—绢云母带围绕和部分叠加在钾化带上,由于它与泥化带往往赋存在内部钾化带和外部青磐岩带之间,故也称之为中间带,其特点是钾长石和斜长石均绢云母化,角闪石和部分黑云母也变成了绢云母、黄铁矿、金红石等;泥化带(高岭石—蒙脱石化)的斜长石变化最为明显,靠近矿体的斜长石多蚀变成为高岭石。

3.5 矿石矿物

(1) 矿石矿物主要以硫化物为主,主要金属矿物有黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿、辉铜矿,在有些矿床中为斑铜矿、硫砷铜矿和辉铜矿等,与其相伴的非金属矿物主要有石英、绢云母、钾长石、黑云母、高岭石类矿物等。

(2) 斑岩铜矿中富矿体的形成并不是某一期岩浆活动造成的,而是多期岩浆活动相互叠加的结果[10,11]。

(3) 金属硫化物矿化在斑岩体及围岩中从内向外呈浸染→浸染 + 微细脉→浸染 + 细脉→细脉状产出。

(4) 在较贫的原生矿(0.3% ~ 0.8%)顶部常覆盖有氧化作用形成的次生硫化物富集带(1% ~ 1.5%)。

3.6 成矿年代

绝大多数斑岩铜矿的形成时代主要集中在中、新生代,其次是古生代(图 1)。中、新生代正是现代洋壳的俯冲时间和印度板块与亚洲板块的碰撞时间,造就了环太平洋成矿域和特提斯成矿域,而古生代也是古亚洲洋洋壳的俯冲、消亡和闭合时间,造就了中亚成矿域。

斑岩铜矿作为世界上最重要的铜矿类型,对其研究和开发已历经百年,其成矿理论研究一直是矿床学和找矿勘查研究的热点[12,13],也是众多地质学家非常感兴趣的前沿课题之一。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

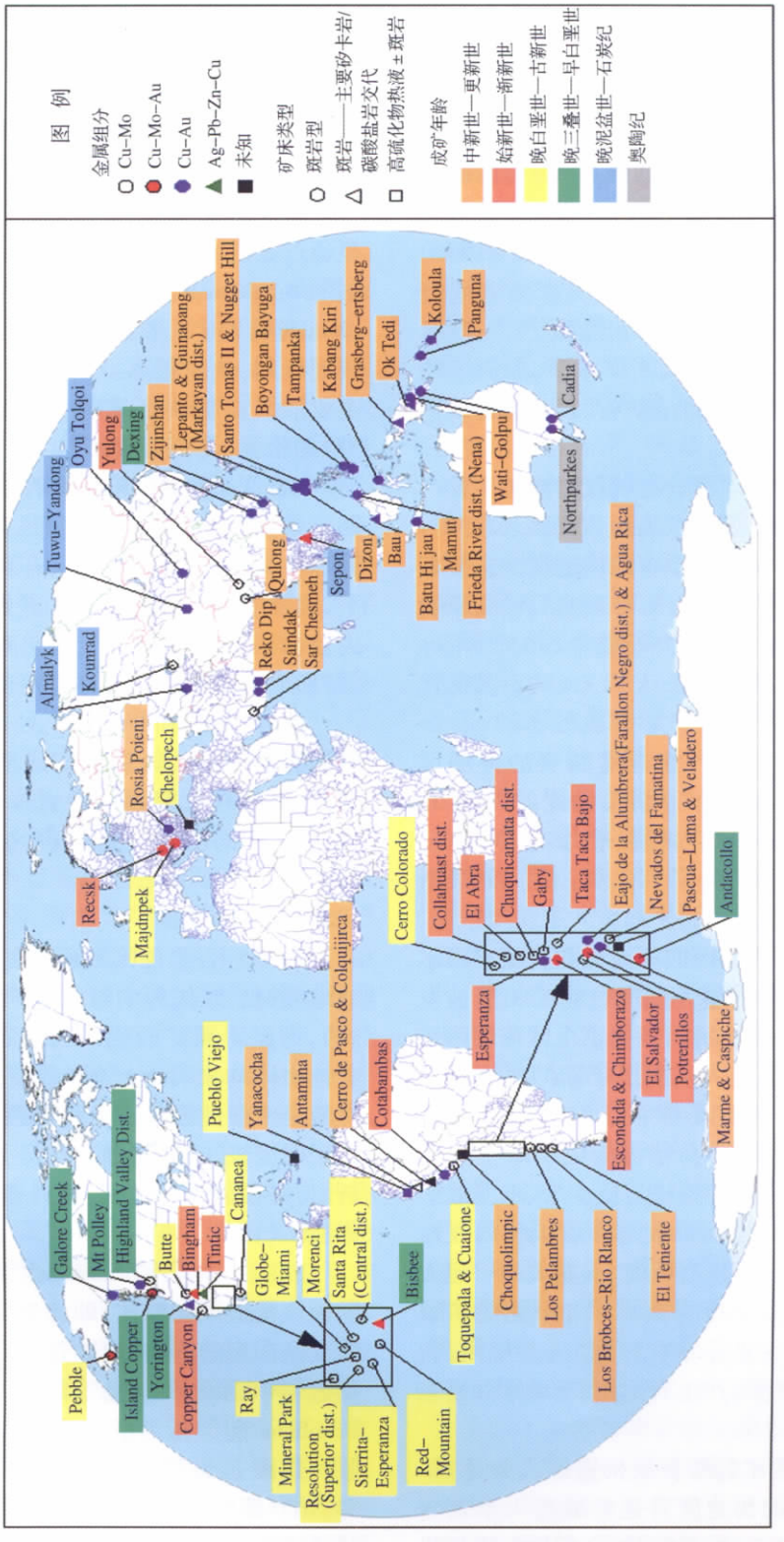


图 1　世界斑岩铜矿床分布(据 Sillitoe[3] 修改)

Fig. 1　Worldwide locations of porphyry Cu systems

(The principal deposit types, contained metals, and age are also indicated, Modified from Sillitoe[3])

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 成矿机理

4.1 构造及动力学背景

据统计,世界范围内(图1),97%的大型—巨型斑岩铜矿产于岩浆弧环境(包括弧后)[14],包括岛弧和陆缘弧,呈现出明显的线性分布,通常与造山带平行,延伸几十、几百甚至几千千米,如安第斯山脉[15]和科迪勒拉山脉。岛弧环境的成矿省主要分布于太平洋西岸,如印尼和菲律宾岛弧[16,17];陆缘弧环境的成矿省主要分布于太平洋东岸,如美国的亚利桑那成矿省、墨西哥北部成矿省、智利北部成矿省和智利中部成矿省[6,17]。

环绕西太平洋边缘广泛分布的斑岩铜矿主要产于与板片俯冲相关的I型深成火山岩岛弧环境[18]。一般在岛弧环境中形成斑岩系统的构造类型主要有3种:①增生构造,如巴布亚新几内亚的Frieda斑岩系统就产在Frieda断层的次级断裂中,并且Frieda断层的右旋运动形成了一条长达12 km的有高硫化物的构造空间[19];又如菲律宾很多斑岩(Lepanto FSE斑岩铜矿等)侵入体产在走滑断裂的伸展区域[20]。②调整构造,如巴布亚新几内亚的Wafi和Yandera斑岩侵入体。③陆内裂谷带,如菲律宾Cagayan地堑的Emperor金矿,所罗门岛弧深断裂[21,22]。

进入21世纪,在中国冈底斯地区和新疆准格尔地区,许多中型—大型—超大型斑岩铜矿相继被发现,并进行了大量的研究工作,改变了全球范围内斑岩铜矿的分布格局,促使人们提出了新的斑岩铜矿成矿域[23~25]:特提斯成矿域和中亚成矿域(古亚洲洋成矿带)。在中国范围内,特提斯成矿域主要分布在西藏境内,包含有冈底斯斑岩成矿带、玉龙成矿带和班公湖成矿带,矿床的形成与印度板块向亚欧板块的碰撞密切相关,产出有驱龙、玉龙大型—超大型斑岩铜矿和多龙富金斑岩铜矿[26];中亚成矿域(古亚洲洋成矿带)主要分布在新疆、内蒙境内,包含有土屋—延东成矿带,产出有土屋、土屋东和延东斑岩铜矿[27,28]等。

最早建立斑岩铜矿起源板块构造模式的是Sillitoe[29]。弧环境下的快速隆升是形成超大型斑岩铜矿的前兆[30],板块俯冲时的侵蚀和板块汇聚边缘地体的增生可能与斑岩铜矿带的形成有关[31,32]。汇聚板块边缘的挤压构造背景对形成斑岩铜矿床有重要作用,并指出挤压环境有利于斑岩型矿床形成的一些关键因素,如挤压环境可有效阻止岩浆直接穿过上地壳喷出地表,而形成浅部岩浆房,从而促进了岩浆房的结晶分异,导致挥发分的饱和及大规模岩浆热液的形成[33]。Cooke等[17]通过对主要斑岩铜矿带成矿背景的综合研究发现大洋板块的低角度俯冲有利于挤压背景形成,也支持上述观点。同时,斑岩铜矿形成也遭受一系列的区域应力的改变,明显通过走滑或者俯冲适度伸展至收缩环境[34],如美国的Bingham斑岩铜矿和阿根廷的Bajo de la Alumbrera斑岩铜矿。收缩环境的主要特征为地壳增厚,表面隆起,快速折返。但是,研究还表明,斑岩铜矿主要形成在板块汇聚的大背景下(造山带或活化带)的松弛(岛弧)阶段[35],如拉分盆地发育(pull-a-part basin)和伸展裂陷发育时期;或者形成于构造机制转换阶段[14,17,36,37],如挤压向伸展转换阶段[36],俯冲角度变化阶段[38]。只有在板块俯冲的大背景下,局部应力或构造机制的转换产生构造空间或压力差,岩浆才有足够的上侵空间和动力,促使岩浆上侵,形成斑岩铜矿。

此外,断裂和断裂交汇处也是斑岩铜矿形成的有利构造部位。斑岩铜矿成群或者呈线性分布表明,在深部有长期活动的岩浆,并进行间歇性的活动,导致了同一成矿带不同时期、不同地点斑岩铜矿的形成[3]。

4.2 斑岩体来源

对斑岩岩浆源区的研究,多数学者强调下地壳或地幔对岩浆成因的贡献即岩浆热液说(正岩浆模式),即斑岩铜矿的成矿物质和热液及相伴生的中酸性岩体均来自上地幔(或下地壳)。成矿物质和热液是中酸性岩浆在上侵及侵位后的结晶过程中,由于温度、压力等物理化学条件的改变而逐渐分离析出,并在适当的温度、压力条件下,在有利部位富集成矿(图2)。

Sillitoe等[20]和Sawkins[39]首先提出斑岩铜矿的板块构造成矿模式,即斑岩铜矿是地幔与地壳物质交换作用的产物,成矿母岩主要为洋壳在俯冲作用过程中由含水地幔等部分熔融形成的(图2)。Burnham等[40]认为活动大陆边缘的钙碱性系列岩浆—热液是斑岩铜矿的唯一物质来源。陈文明等[41~43]提出中酸性斑岩体是深源富碱的热流体交代或局部熔融上部地壳形成的。芮宗瑶等[7,44]在总结大量$^{87}Sr/^{86}Sr$、$\varepsilon Nd(t)$、$\varepsilon Sr(t)$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。芮宗瑶等与Sillitoe和Sawkins的观点一致,对Burnham

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

等及陈文明等的观点进行了质疑。埃达克岩仅代表斑岩铜矿形成的正岩浆阶段,从埃达克岩到斑岩铜矿的形成,还需经过过渡岩浆阶段,而过渡岩浆阶段对斑岩铜矿的形成具有重要意义,这个过渡岩浆阶段指独立流体的形成[44]。从而也对一些学者把埃达克岩当作斑岩铜矿的成矿母岩[45~49]的观点进行了质疑。

岛弧岩浆岩的唯一化学特征为富水(高挥发分)、富 S 和富集大阳离子亲石元素(高 LILE: Rb、K、Cs、Ba 和 Sr 等),富集如 Li、B、Pb、As 和 Sb 等元素,相对亏损高场强元素如 Ti、Nb 和 Ta 等[44]。大多数斑岩铜矿均产于火山岛弧岩浆岩,属于中酸性的钙—碱性系列或高钾钙—碱性系列,仅有少数斑岩铜矿床属于碱性系列,岩性以石英闪长岩为主,少数为花岗闪长岩、石英二长岩和正长岩[5]。除少数具有埃达克质亲和性的钙碱性系列岩浆为年轻大洋板块直接熔融的产物外[50~54],绝大多数的钙碱性系列岩浆都是大洋板块脱水释放流体交代楔形地幔部分熔融的产物。

根据众多学者的研究成果,笔者将斑岩铜矿的形成分为 4 个阶段。第一阶段: 由于大洋板块的低角度深度俯冲,温度升高,使洋壳脱水,与大洋板块接触部位的陆壳地幔岩石产生部分熔融,温度大概在 600 ~ 1 000 ℃之间,称之为"洋壳—地幔熔岩流"阶段,特征为富水、富成矿物质的熔体相。第二阶段: 随着洋壳—地幔熔岩流的上升,经过地幔岩石圈玄武质岩浆的底垫,温度骤升至 1 400 ℃左右,并经过长时间的 MASH(Melting-Assimilation-Storage-Homo-genization,即: 熔融—同化—存储—均一)过程,称之为"原始岩浆"阶段,并非所谓的"埃达克岩"。该阶段岩浆特征为富 H_2O、富 H^+、富成矿物质的高盐度硅酸盐熔体相。第一阶段和第二阶段是成矿物质 Cu 和 S 的主要聚集阶段,此时原始岩浆中富含大量的成矿物质 Cu 和 S。成矿物质何时进入岩浆? 如何进入? 有待进一步的研究。第三阶段: 由于温度骤升,促使气、液相分离,岩浆以底辟方式不断上侵,到达有利空间位置,并经过长时间的汇聚,富矿物质不断聚集,称之为"浅部富矿岩浆"阶段,特征为富 H_2O、富 S,富 H^+、富成矿物质高盐度硅酸盐气液相。在此阶段,随着岩浆的上侵,气液相物质逐渐从岩浆中分离出来。第四阶段: 随着温度、压力的降低,加之构造的发育,浅部富矿岩浆进一步上侵,位于上部和边缘的岩浆开始逐渐结晶,形成浅成侵入体即斑岩体,由于成矿流体与围岩发生一系列交代反应,磁铁矿大量结晶,逐渐形成不同的蚀变带,成矿物质离子活度积(在一定温度、压力条件下,难溶电解质离解的各离子活度(离子的有效浓度即溶液中离子表现出的具有反应能力的浓度)乘积称为活度积,通常用 Ksp 表示。当溶液中某物质的离子积达到和超过该物质的活度积时,该物质即析出,相反被溶解,这种溶解—沉淀关系称为活度积原理)。等于或超过 Ksp 值,成矿物质沉淀,称之为"岩浆结晶—成矿"阶段。成矿过程中,上述 4 个阶段以多期间歇性活动为特征,相互叠加。

总之,成矿岩浆为富 H_2O、富 S、富成矿物质的强氧化性岩浆[55],但是,在有关岩浆形成机制方面还存在很大的研究空间,如: 上述 4 个阶段在空间上是否是连续的? 成矿物质是否在第一阶段就已进入熔体? 后期是否有成矿物质的加入? 等等,还有许多问题有待进一步研究。地幔交代作用与成矿岩浆之间的关系、成矿物质何时进入流体等将是主要研究方向。

4.3　成矿物质来源

4.3.1　Cu 的来源

斑岩铜矿含矿斑岩中的成矿物质来源一直存在争议,且认识在不断发展。Sillitoe 等[20]认为大洋沉积物(1 层)、玄武岩(2 层)和辉长岩(3 层)构成斑岩铜矿的主要金属来源。不过国内外大量研究结果表明[56~58],斑岩铜矿床形成略晚于斑岩体形成时代,并在空间上主要分布于斑岩体内或其内外接触带中,表现出形成时代与空间上的一致性,说明其成矿物质与斑岩体相关。

在自然界岩浆体系中,火山气体和喷气孔升华物中广泛存在有 Cu 的硫化物、氯化物[59,60]。Roedder[59]通过大量矿石矿物和脉石矿物中流体包裹体研究发现,岩浆熔体在结晶分异过程中能分离出大量有利于 Cu、Mo 等金属迁移富集的 H_2O、Cl^- 和溶解性离子,如含 Na^+、K^+、Ca^{2+}、H^+ 等的高盐度流体相离子。Ilton 等[61]分析,斑岩体中 Cu 丰度明显高于克拉克值几倍至几十倍,矿化蚀变黑云母中 Cu 的含量也比未矿化斑岩体中黑云母 Cu 的含量高一个数量级。Campos 等[62]通过对智利 Zaldivar 斑岩铜矿床石英熔融体的研究发现,Cu 的含量高出区内不含矿的钙碱性系列岩浆岩一个数量级; Ulrich 等[63]对印度尼西亚 Grasberg 斑岩铜矿和阿根廷 Bajo de la Alumbrera 斑岩铜矿的研究发现,各矿床代表原始岩浆高盐度流体包裹体(> 55% $NaCl_{eq}$)的 Cu/Au 比值与各自矿石的 Cu/Au 比值相近。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

所有这些研究表明,我们已经确定斑岩铜矿成矿物质来自上侵岩浆,但是在其他阶段是否有成矿物质的加入? 如果有,如何进入岩浆流体相的? 值得做更多的研究。

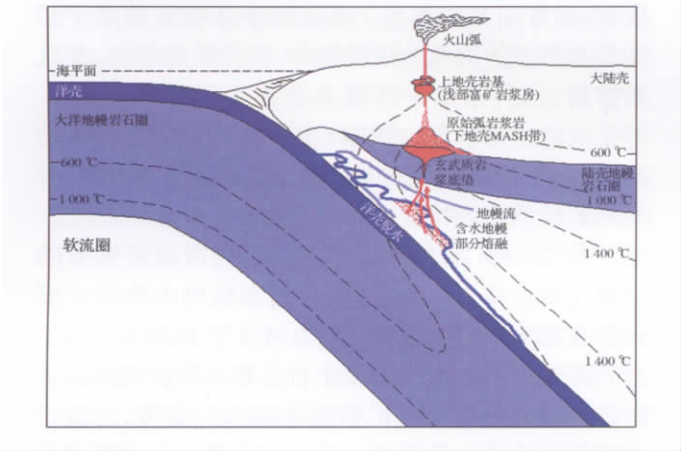


图 2 斑岩铜矿形成的深部过程(据 Richards[37,92] 修改)

Fig. 2 Deep process during the formation of porphyry copper system(Modified from Richards[37,92])

4.3.2 S 的来源

近些年来,很多学者逐渐认识到了 S 元素在斑岩铜矿成矿过程中的重要作用,纷纷进行了大量针对 S 同位素的研究。根据 Burnham 等[40] 计算,斑岩铜矿的岩浆岩 $\lg f(O_2)$ 为 -8 ~ -14,它们的矿石 $\lg f(O_2)$ 为 -11 ~ -24。高氧逸度时,初始岩浆流体中的 S 常以 S^{6+} 形式存在,而不是以 S^{2-} 形式存在,即初始岩浆流体应具有较高 SO_4^{2-}/H_2S 值。在氧化环境下 S 主要以 S^{6+} 形式存在,沉淀所需的还原性 S 从何而来? 孟祥金等[64] 通过对西藏驱龙含矿斑岩和矿石矿物的 S 和 Pb 同位素研究,推测驱龙铜矿乃至冈底斯矿带斑岩铜矿床 S 同位素主要来自上地幔或下地壳的深源岩浆,具有相对均一的 S 源,基本没有受到陆壳沉积物源 S 的混染。矿床中含矿斑岩与矿石矿物铅同位素组成十分相近,暗示它们具有相同的演化历史或起源,指明成矿物质直接来源于含矿斑岩岩浆。斑岩铜矿的围岩岩性复杂,有变质岩、沉积岩和火山岩,很难想象如此变化的围岩能够做为 S 同位素组成接近 0‰的硫化物 S 的来源[65],该观点从侧面证实了 S 来自于斑岩岩浆。此外,磁铁矿的结晶导致还原性的 S 产生也可能是原因之一[66];初生的埃达克质熔体与地幔橄榄岩/幔源熔体的相互作用,也可能是埃达克质熔体获取成矿金属和 S 的重要途径[67]。

有些学者认为与斑岩铜矿有关的岩浆中的 S 除来自地幔深处外,还有其他来源: 有些学者[68,69] 认为来自海水硫酸盐及海底岩石中的硫化物; 还有学者[70] 认为来自岩浆通道附近的蒸发岩层; 或者来自岩浆混合作用[71]。但是一些学者对现代火山作用的研究结果[72~74] 已经证明,当中酸性岩浆在岩浆房中冷却结晶时,如果有更高温度的玄武质岩浆的底垫(underplating) 混合,那么后者就可以向前者释放大量富含 S 的挥发分。

斑岩铜矿床成矿物质来源是一个复杂而又尚未完全解决的问题。S 来源于洋壳物质的可能性最大,但是镁铁质岩浆是否向长英质岩浆和热液流体提供 S 和亲 Cu 元素? S 的富集是否主要在 MASH 阶段? 这些未知的问题都仍然需要做大量的研究工作。

4.4 金属富集机制

上面已经提到,成矿物质 Cu 和 S 都来源于深部岩浆。岩浆—热液的转换过程其实也是岩浆的结晶历史过程。但是岩浆在上侵结晶形成斑岩体的同时,成矿金属等物质是怎么从岩浆中熔离出来形成富 Cu 的流体呢?

在板块俯冲过程中,如果没有大洋板块的脱水,则熔融岩浆的氧逸度会很低。在低氧逸度条件下,岩浆中 S 以 S^{2-} 离子形式存在,因 S^{2-} 离子在硅酸盐熔体中溶解度很低[75],结晶分异过程中,硫化物易析出。因 Cu 在硫化物相和硅酸盐熔体之间的分配系数很大($D_{Cu\,硫化物/硅酸盐熔体}=550\sim10\,000$)[76],早期随着岩浆结晶,硫化物也会随之结晶,从而不利于 Cu 的富集。Cu 在熔/流体系中趋向于在流体相中富集,流体中 Cl 浓度越大,Cu 的分配系数越大。洋壳在脱水过程中,伴随大量 Cl 进入流体相,成矿物质 Cu 也很容易进入流体相。俯冲过程中大洋板块的脱水作用对斑岩铜矿的形成是至关重要的。Cu 在岩浆中地球化学行为表明,含水氧化岩浆有利于 Cu 的富集,斑岩铜矿床多和氧化态岩浆岩紧密共生[29,77~81]。

在岩浆弧俯冲环境下,由于大洋板块的脱水作用,部分熔融的含水钙碱性系列岩浆具有巨大的成矿潜力[82,83],大量的 S、卤族元素、金属元素以及亲流体的大离子亲石元素,随着大洋板块的脱水过程被输送到地幔楔,同时还因水的大量加入,使楔形地幔熔融产生的岩浆具有较高的氧逸度[36]。在高氧逸度条件下,S 主要以 S^{6+} 的形式溶于熔融岩浆之中,且其溶解度较高[76],S 在岩浆中不易达到饱和。Cu 在流体与硅酸盐熔体之间的分配系数也较大

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

($D_{Cu流体/硅酸盐熔体}$ = 2 700 ~ 3 160) [84,85] ,流体中含 S 时,$D_{Cu流体/硅酸盐熔体}$值增大 2 ~ 5 倍[84]; Cu 也易进入低 Cl、低密度的气相中[85]。因此,岩浆在结晶过程中,导致优先向硫化物分配的 Cu、Au 等元素逐渐向硅酸盐熔浆中富集[86~89],当岩浆达到流体饱和时,岩浆结晶分异过程中,Cu 等成矿物质就会逐渐向热液流体富集。

岩浆中富含 Cu 是成矿的必要和前提条件,大洋板块的脱水作用是成矿的基础,氧化环境是 Cu 逐步富集的关键。富含 Cu 的岩浆中富含水,具有较高的氧逸度,处于氧化环境中[55],并且水在岩浆结晶过程中与各类卤化物一起从熔浆中分离出来并形成独立流体相; 且流体相中富含有成矿物质[90]。

4.5　岩浆的上升与侵位

针对岩浆在地壳中运移方式的争议持续了近 2 个世纪,并一直延续至今,不过多数研究者认为,岩浆以底辟方式侵位。含矿斑岩常沿大规模的裂隙、断裂带或线理带发育,特别是在走滑断裂系统的产状变化部位,说明岩浆沿构造发育阶段上升。在温度相对较低的中上地壳,斑岩体上升和侵位主要与走滑条件或者压缩环境有关[91],岩浆常以裂隙控制的岩墙扩展方式上升为主[36,92]。倾斜俯冲也容易产生走滑运动,使与俯冲带大角度相交的先存断层在压缩背景下产生局部伸展变形,从而为成矿岩浆的侵位提供空间[93]。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[94]。Vigneresse[95,96] 认为压实和剪切作用是长英质熔体产生相分离作用的主要因素,也是岩浆上升侵位的主要动力。最近的研究表明[97],斑岩铜矿矿带形成的驱动力是深部含水岩浆房驱动的扩散作用,而非大范围流体压力的驱动。

在岩浆侵位过程中,很多学者特别强调 MASH 带的意义。MASH 带(图 2) 系指俯冲洋壳由于脱水在其接合部位引发部分熔融,在其上升时遇到过渡地壳(上地幔岩石圈) 的玄武岩底垫时,使上升岩浆汇集成原始岛弧岩浆岩。

MASH 过程[37,98,99] 可表述为: 幔源岩浆导致地壳部分熔融,进而 2 种岩浆相互混杂,然后其混合物被装载到某一空间因混合作用和化学扩散而均一化。一方面,一个 MASH 过程可能有新的物质与能量注入,导致非均一化或者混杂,从而启动新的均一化过程; 另一方面,底侵岩浆因混杂作用而丧失热量,新能量的注入将使其熔融,并有新生陆壳成分的加入[100]。总之,MASH 过程是一个由非平衡到平衡再到非平衡最后到平衡的连续重复的变化过程,每一次 MASH 过程都会有新物质的注入,直至其能量足以穿透障碍(地层厚度、节理、构造压力等) 上侵。对于斑岩铜矿来说,MASH 过程中形成的热源和物源就是其形成的“巨大储备仓库”,它是成矿流体上侵的动力学基础,它的存在可以源源不断地将成矿物质运移到有利位置。随着研究的深入,一些学者也对 MASH 过程进行了补充和修改,如 MSAE 过程(Melting-Segregation-Ascent-Emplacement,即: 部分熔融—分凝—上升—侵位) [101] 和 M-SAE 过程[102]。但它们具有共同点: 都强调物理变化过程,强调平衡状态之间的转化过程,强调幔源岩浆的重要性。

这种岩浆岩有特殊地质意义[44]: ①具有较高的 $f(O_2)$,使亲 Cu 元素不进入硅酸盐晶格,而留存于挥发相中,最后转移至热液中; ②上升岩浆与玄武岩底垫交换物质,从而使原始岛弧岩浆富集亲 Cu 元素和挥发分等。

随着温度的降低,岩浆在上侵过程中开始结晶,岩浆结晶出的矿物主要是硅酸盐及氧化物,一些不能进入结晶相中的元素在熔体中会不断富集。岩浆的相分离作用是导致分散于岩浆熔体中的成矿元素富集而形成工业矿体的有效机制。

4.6　成矿物质的运移和沉淀

上面已经提到,成矿物质具有同源性,均源于深部岩浆,且在岩浆上侵过程中由于玄武质岩浆底垫,岩浆—热液的转换即在 MASH 带过程发生熔离和成矿物质的富集,并以底辟方式上升,在有利空间位置形成浅部富矿岩浆房,随着离地表距离的缩短,岩浆继续沿构造薄弱部位上升,但是这些岩浆热液是如何运移并沉淀成矿的呢?

4.6.1　成矿物质的运移

大量地球化学研究表明,巨量成矿物质多以络合物的形式进行迁移,斑岩铜矿中的成矿元素也不例外。由于有大洋板块脱水作用,大量含有卤素元素的海水进入流体,可以肯定,成矿物质是以氯络合物的形式进行运移和搬运。

在起初阶段,Cu 迁移的主要载体被认为是液相流体[103]。Candela 等[58] 通过 Cu、Mo 在高硅酸盐熔体和富盐类热液流体中的分配实验研究得到,Cu 明显富集于富 Cl^- 的液态流体相中; 从岩浆中初始出溶的流体性质与压力(即岩浆侵位的深度) 密切相关[103],流体盐度随压力增加而增大[104],而 Cu 的

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

溶解度又随着流体盐度的增加而显著增大[105]。在岩浆—热液转换阶段,矿化流体中的 NaCl 和 KCl 是饱和的,处于 $Na-Cl-H_2O$ 体系的两相沸腾面上,此时,Cu 与 Cl 等元素结合形成稳定的络合物,并和其他挥发分一起分离出来进入流体相[58]。同时大量的水也进入流体相,同铜络合物一起进行迁移[90]。

但是随着研究的深入,很多学者开始重视气相对成矿物质的迁移作用。随着流体上升,压力减小,流体会发生气液相的分离[106]。卤水中含有丰富的 Na、K 和 Fe 的氯化物[107~110],盐度质量百分比很高(35%~70% NaCl),气相物质含有酸性挥发分,包括 SO_2、H_2S、CO_2、HCl 和 HF[111,112]。流体包裹体的微量分析和实验研究表明,在相分离阶段,不同的元素会向不同的相分馏。在大多数情况下,气、液分馏后,气相会富集大量可观的 Cu、Au、Ag 和 S,还有 As、Sb、Te 和 B;高盐度液相会富集 Fe、Zn、Pb、Mn,还可能含有 Mo[113~124]。流体包裹体和实验研究表明,气相中的挥发分 S($H_2S \pm SO_2$)也可以作为 Cu 和 Au 的运移载体[116,117,121,124,125]。Lowenstern 等[126]通过流体包裹体研究发现,Cu 的硫化物富集在熔融包裹体含 CO_2、Cl^- 的气相部分,高过共存熔体数十倍,最高可达 170×10^{-6},尤其当流体中富 S 时,Cu、Au 等金属明显向低密度的气相富集[121,122]。看来,气相对金属的迁移作用是绝对不可忽视的[114,127,128]。

大多数矿床的形成是由大范围低密度气相和高盐度卤水流体相共同作用的结果[129],流体包裹体的研究也证明了这一观点[130]。但是成矿物质在相分离阶段是如何分配的?哪一种迁移载体起主要作用?仍然需要做进一步的深入研究。

4.6.2 成矿物质的沉淀

在斑岩体中,金属矿物大部分是以硫化物的形式存在的,但是在斑岩体结晶的初期,S 主要是氧化态,在成矿阶段却有大量还原态硫的金属硫化物沉淀析出,S 以 S^{2-} 离子的形式存在。这是什么原因?S 是在什么时刻发生了氧化还原反应?

Liang 等[81]经过多年的研究给出了合理的答案,即在斑岩体结晶的早期阶段,磁铁矿结晶是导致氧化态的 S^{6+} 被还原为 S^{2-} 离子而大量存在的主要原因。首先,酸性的岩浆热液流体交代早期结晶析出的富亚铁矿物(FeO),使岩浆系统中的氧化态硫还原成还原态硫($12FeO + H_2SO_4 = 4Fe_3O_4 + H_2S$),增加了 S^{2-} 离子含量;其次,在钾化阶段,因 [$8KFe_3AlSi_3O_{10}(OH)_2 + 2H_2SO_4 = 8KAlSi_3O_8 + 8Fe_3O_4 + 8H_2O + 2H_2S$],导致磁铁矿析出,使成矿系统中氧化态硫还原成为还原态硫,这也是在钾化阶段浸染状磁铁矿和钾长石紧密共生的原因;此外,岩浆热液系统中的 Fe 在高压条件下以气相形态迁移[131],氧化亚铁被氧化形成磁铁矿($12FeCl_2 + 12H_2O + H_2SO_4 = 4Fe_3O_4 + 24HCl + H_2S$),也使岩浆中的氧化态硫被还原成为还原态硫。这样,流体中就会聚集大量的 S^{2-} 离子,从而有利于大量硫化物的析出。

随着岩浆液态分离作用的进行,熔体相、结晶相、流体相、气相的分离和快速循环,富矿流体相和气相物质逐渐被运移到岩浆房的顶部[132]。稳定的络合物随同流体发生迁移。在成矿流体处于超临界状态、沸腾状态下大部分 Cu 仍以 $[CuCl_3]^{2-}$ 或 $[CuCl_4]^{3-}$ 等络合物形式存在于热液流体或气体中[90]。岩浆房上部聚集着富含金属成矿元素和挥发性组分,而下部是较少含挥发性组分的硅酸盐熔体。随着气、液的上升,压力的下降,溶解度随之下降,挥发分 HCl 等与围岩发生蚀变作用形成石英、绢云母化蚀变带。此时铜、氯络合物的不稳定性随之增大,pH 值增大,更进一步使铜、氯络合物离解。同时,Cu 又是亲 S 元素,随着温度、压力的降低,铜硫化物的活度积 ≥ Ksp 值[127];pH 值变化又使 H_2S 的电离常数增大并转化为 HS^-、S^{2-} 等形式。当富含 Cu 的气、液相流体运移至岩浆顶部,温度降至 450 ℃以下,铜、氯络合物大量离解,成矿热液中各成矿元素离子活度积 ≥ Ksp 值,Cu 将以各种硫化物组合形式发生沉淀、成矿。

近些年来研究均强调斑岩成矿流体是连续多阶段岩浆共同演化的结果,并且有大气降水的掺入。杜琦[133]分析了多宝山斑岩铜矿在黑云母化带内岩石含 Cu 达 $1\,000\times10^{-6}$,绢英岩化和碳酸盐化带内岩石含 Cu 为 $(4\,000\sim4\,700)\times10^{-6}$,说明 Cu 的沉淀成矿贯穿过渡岩浆阶段的黑云母化和热液阶段的绢英岩化和碳酸盐化的整个过程,认为 Cu 是在蚀变过程中逐渐富集起来的。Patrick 等[10]对美国 Bingham 斑岩铜矿石英脉的研究也充分证明了这一点。尽管斑岩铜矿的形成是多期叠加的结果[10,11],但是并不是每一期都能形成 Cu 的富集,随着时间的推移,底部岩浆房中的成矿物质可能已经被萃取完毕。

4.7 蚀变带的形成

斑岩铜矿各蚀变带的形成,与岩浆的上侵、成矿物质的沉淀是同步的。斑岩铜矿钾化带的形成深度可达 9 km,由单一相组成,盐度质量百分比较低(2%~10% NaCl)[134~136]。大量对美国 Bingham 斑

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

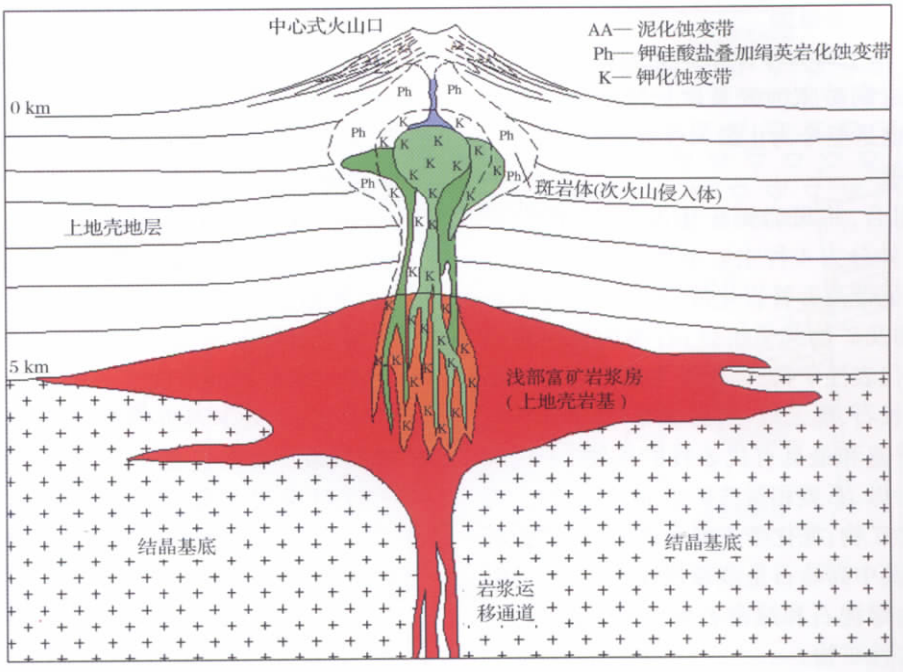


图 3　斑岩铜矿浅部成矿系统剖面示意图(据 Richards[37,92] 修改)

Fig. 3　Schematic cross section through a porphyry copper system(Modified from Richards[37,92])

岩铜矿 QMP(Quartz Monzonite Porphyry)中高品位矿体下部(>500 m)石英脉的流体包裹体研究同样也表明,其为单一相,富含 CO_2,低盐度的岩浆流体[137~140]。随着 EDM(Early Dark Micaceous)的形成,单一相的岩浆流体上升,在相分离之前形成石英脉的数量非常稀少[138]。气、液相分离的部位大约在 QMP-LP(Quartz Monzonite Porphyry-Latite Porphyry)区域高品位矿体的下部 500 m 左右,温度在 550~500 ℃之间[138~140]。随着温度、压力等物理化学条件的变化,流体会产生扩散作用,液相的盐卤水和气相物质继续在上升过程中冷却,并且向围岩释放热量,酸性挥发分不断与围岩发生交代作用,同时消耗少量 H^+ 等离子,逐渐形成各种不同的石英和相关的钾化带[10](图 3)。由于斑岩体结晶温度较高,成矿物质不会大量沉淀成矿,而是随着流体一起向外围扩散,只有少许成矿物质随着岩浆的结晶同步成矿,这或许是斑岩铜矿中心矿化呈浸染状的原因。

随着气液相物质的上升,由于气相压力的降低,低压气相不可能继续上升达到古沉积面[141,142],它会形成酸性的冷凝水,从而产生贫瘠的泥质蚀变带。当岩浆进一步凝固,整个系统逐渐冷却,直到 400 ℃以下,岩石开始发生脆性断裂[129]。在这个阶段,静岩压力逐渐向静水压力过渡,侵蚀作用(或其他机制)逐渐使流体穿过古沉积面。流体包裹体的研究表明,在石英脉形成期间,静岩压力逐渐向静水压力过渡,温度降到 425 ℃左右[137]。大量对美国 Bingham 斑岩铜矿的的研究表明,在静水压力条件下,温度从 425 ℃降到 350 ℃时,在钾长石稳定区域形成了各种类型的石英脉和对应的 Cu-Au 矿化[10,137~140]。在温度更低的条件下,并有地下水参与,绢云母±绿泥石—绢云母蚀变带也逐渐形成[143~145](图 3)。

5　斑岩铜矿模型

早在 20 世纪 60~80 年代,人们就对斑岩铜矿进行了大范围勘探工作,比 20 世纪 80 年代的淘金热还要早。20 世纪 60~70 年代,基于板块构造理论和矿床学,斑岩铜矿的研究实现了一次大的飞跃。最早的斑岩铜矿经典模型的是 Lowell 等[8] 建立的蚀变分带模型。1972 年,Sillitoe[29] 提出了斑岩铜矿的成矿模式模型,非常有效地指导了太平洋西岸的斑岩铜矿的找矿勘查。比如:蚀变模型的建立促使 Kalamazoo[146] 和 La Escondita[147] 斑岩铜矿的发现;通过对火山通道中矿化段的识别和研究发现了 Lepanto FSE 斑岩铜矿[148]。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

5.1 经典的蚀变分带模型

Lowell 等[8]基于对太平洋东岸美国斑岩铜矿的研究，建立了斑岩铜矿床蚀变及矿化特征的一般性框架(图4)，这也是至今为止最为经典的模型。

5.1.1 蚀变分带

依据矿物组合，将斑岩铜矿床蚀变(硅酸盐矿物蚀变)从内向外分为4种主要类型，即石英内核、钾化带、千枚岩化带及青磐岩化带，且各蚀变带均具有其特定的矿物及矿物共生组合：石英内核主要以石英、钾长石为代表性矿物；钾化带主要由含钾硅酸盐所组成，如钾长石、黑云母、绢云母等，其中钾长石或黑云母是最普遍和最具有代表性的矿物；千枚岩化带主要由绢云母、石英和黄铁矿组成，其中绢云母是该带的代表性矿物；泥化带主要由高岭石、蒙脱石和绿泥石组成，其中高岭石是该带代表性矿物；青磐岩化带则主要由绿泥石和绿帘石所组成，绿泥石和绿帘石是其代表性矿物。

5.1.2 矿化分带

硫化物在壳状蚀变带中的分带从内向外主要有低品位核、主矿带、黄铁矿带及贫黄铁矿壳4种类型，各带矿物组合特征如下：低品位核在钾化带内，品位比矿带更低；主矿带位于钾化带外围与似千枚岩化带接触部位，矿物组合有黄铁矿—黄铜矿—磁铁矿；黄铁矿带位于似千枚岩化带内的矿带边缘，矿物组合有黄铁矿—黄铜矿；贫黄铁矿壳位于青磐岩化带。

矿物在各带的赋存状态由内带向外带为：浸染—浸染+微细脉—浸染+细脉—细脉状。

5.2 斑岩铜矿系统模型

Sillitoe 等[3,20]基于对太平洋西南岛弧环境的48座斑岩铜矿的研究提出了斑岩铜矿系统模型，该模型铜矿化带与 Lowell 等[8]的模型框架非常相似(图4)。该模型主要特征如下：泥化蚀变岩帽位于斑岩体的顶部至地表；火山筒角砾岩侵入体位于斑岩体的边缘，与青磐岩化带接触；斑岩内矿化侵入体位于斑岩体内部，为后期携带有用矿物的岩浆热液侵入产物。该模型提出 SCC 组合蚀变带，即主要为绢云母、粘土、绿泥石组合，该组合替代了大部分似千枚岩化带，是从钾化带到泥化带的过渡带。Sillitoe 和 Gappe 斑岩铜矿模型中，在 SCC 区低温粘土和高温绢云母的形成表明了在不同环境条件下蚀变的多相多阶段叠加，但是忽略了斑岩铜矿是多相叠加的动态系统。

5.3 多阶段叠加模型

Corbett 等[149]基于对西南太平洋快速隆升形成的活动斑岩系统的研究和观察(如菲律宾 Dizon，St. Thomas，Atlas 和 FSE 斑岩铜矿，印尼的 Grasberg 和 Batu Hijau 斑岩铜矿，巴布亚新几内亚的 Ok Tedi 斑岩铜矿等)提出该模型(图5)。该模型提出在斑岩铜矿的演化过程中，存在2个主要演化序列，即进序列(prograde sequence)和退变质作用(retrograde sequence)。进序列主要包括以流体相为主的上行系统、以气相为主的上行系统及矿物的沉淀；退变质作用主要为叠加系统，包括似千枚岩化带、泥化带加以及高硫化物矿脉的形成。

40年来，众学者也曾建立了不同的斑岩铜矿成矿模型，最经典的还是正岩浆成因模式模型。许多学者针对斑岩型矿床开展了大量细致的研究工作[15,145~150]，但并没有对其做太大改动，只是针对细节做了些许修补[3,157]。

6 结 语

(1) 斑岩铜矿主要产于岩浆弧环境(包括弧后)，包括岛弧环境(太平洋西岸成矿域)和陆缘弧环境(太平洋东岸成矿域)，以及在大洋板块消亡之后的碰撞带上(特提斯成矿域和中亚成矿域(古亚洲洋成矿域))(实际为岩浆弧环境的演化)。

(2) 斑岩铜矿的形成与板块深俯冲有直接关系，常形成于构造机制转换阶段。断裂或者断裂的交汇处常是斑岩铜矿形成的有利部位。

(3) 斑岩体和成矿物质 Cu 和 S 均来源于深部，与洋壳的脱水过程、MASH 过程密切相关。斑岩铜矿的形成是多期多阶段岩浆—流体转换叠加的结果，经过“洋壳—地幔熔岩流”、“原始弧岩浆”、“浅部富矿岩浆”和“岩浆结晶—成矿”4个一系列阶段。后期岩浆—热液的转化是否有成矿物质进入？如果有，何时进入？这些阶段的转化经历的时间长短？各阶段的时空关系如何？是否存在岩浆房？岩浆—热液上升的动力学机制是什么？都值得进一步研究。

(4) 成矿流体为富 H_2O、高温、高压、高盐度、强氧化性、高氧逸度的富矿气液相流体，这些特点在岩浆—热液分离的过程中更有利于成矿物质向气液相流体富集，并以氯络合物的形式运移。气相流体对成矿物质的运移不可忽视。但是岩浆—热液分离的过程中成矿物质是如何进入流体的？成矿物质在气相、液相之间的分配关系如何？这些斑岩铜矿的精细过程也值得进一步研究。

(5) 随着流体的上侵，温度、压力的降低是成矿

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

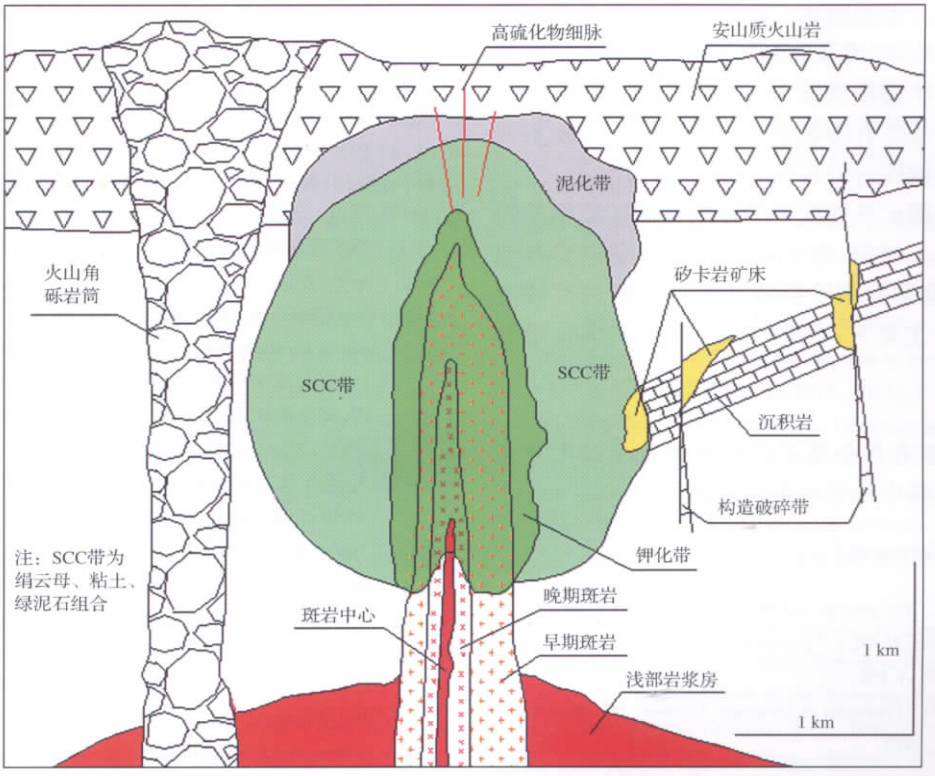


图 4　斑岩铜矿系统模型(据 Sillitoe 等[3,20]修改)

Fig. 4　System model of Porphyry Copper Deposit (Modified from Sillitoe *et al*[3,20])

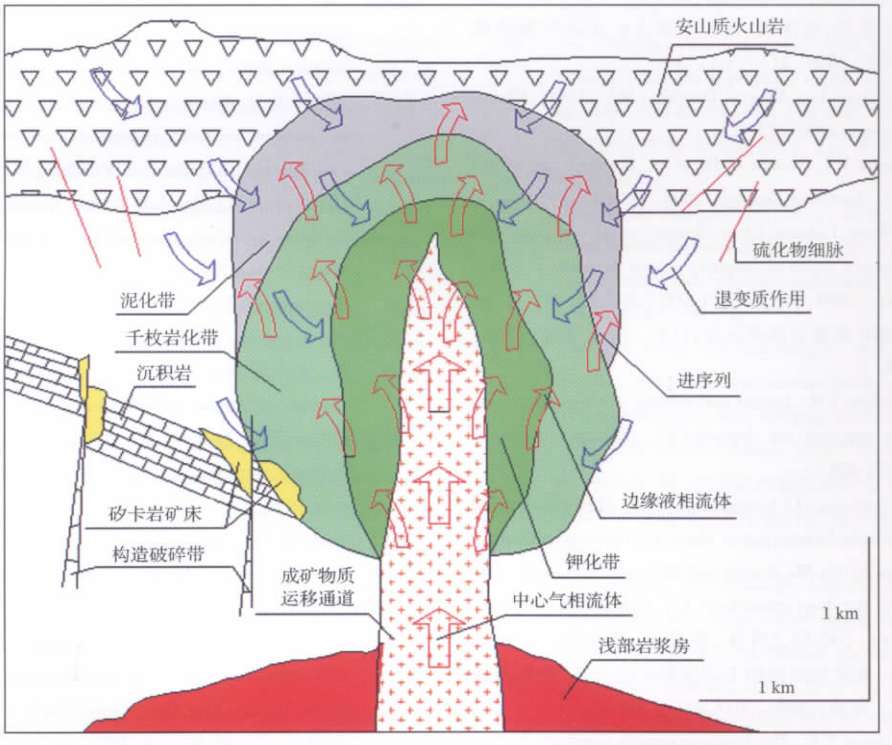


图 5　斑岩铜矿多阶段叠加模型(据 Corbett 等[149]修改)

Fig. 5　Model of polyphasal overprinting events of porphyry copper deposit (Modified from Corbett *et al*[149])

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

物质沉淀的主要影响因素。磁铁矿的结晶为成矿流体提供了大量的 S^{2-} 离子，也是导致成矿物质沉淀的主要因素。成矿物质沉淀与温度、压力的量化关系是什么？是不是还有影响成矿物质沉淀的其他重要因素？也是值得探讨的科学问题。

(6) 斑岩铜矿各蚀变带的形成与成矿流体的特征有直接关系。目前，斑岩铜矿成矿模型主要有经典模型、系统模型和多阶段叠加模型。普遍性蚀变分带从内向外主要为：石英内核、钾化带、SCC 带和泥化带。

致谢：感谢有色金属矿产地质调查中心毛启贵博士在成文过程中给予的帮助和建议。

参考文献(References)：

[1] Ransome F L. The geology and Ore Deposits of the Bisbee Quadrangle, Arizona [M/OL] // United States: Goverment Printing Office, 1904, 21: 1-168.

[2] Emmons W H. Principles of Economic Geology [M]. New York: McGraw-Hill, 1918.

[3] Sillitoe R H. Porphyry copper systems: An invited paper [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 3-41.

[4] Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhao Shengmin. New advances of porphyry copper deposits [J]. *Neimenggu Geology*, 2000, 2(1): 1-11. [聂凤军，江思宏，赵省民. 斑岩型铜金矿床研究新进展 [J]. 内蒙古地质，2000，2(1)：1-11.]

[5] Misra K C. Understanding Mineral Deposits [M]. USA: Kluwer Academic Publishers, 2000: 353-413.

[6] Singer D A, Berger V I, Menzie W D, *et al*. Porphyry copper deposit density [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(3): 491-514.

[7] Rui Zongyao, Zhang Lisheng, Chen Zhenyu, *et al*. Approach on source rock or source region of porphyry copper deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(2): 229-238. [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.]

[8] Lowell J D, Guilbert J M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits [J]. *Economic Geology*, 1970, 65(4): 373-408.

[9] Xiao Bo, Qin Kezhang, Li Guangming, *et al*. Distributions and characters of Zhibula-Langmujiaguo skarn Cu deposits environing the Qulong porphyry Cu-Mo deposit and their implications for ore-search towards to the deep subsurface [J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(1): 43-53. [肖波，秦克章，李光明，等. 冈底斯驱龙斑岩铜—钼矿区外围矽卡岩型铜矿的分布、特征及深部找矿意义 [J]. 地质与勘探，2011，47(1)：43-53.]

[10] Patrick B R, Marco T E. The bingham canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit. I. sequence of intrusions, vein formation, and sulfide deposition [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 43-68.

[11] Vry V H, Wilkinson J J, Seguel J, *et al*. Multistage intrusion, brecciation, and veining at El teniente, chile: Evolution of a nested porphyry system [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 119-153.

[12] Xu Rongke, Shan Liang, Zheng Youye, *et al*. Review and progress: Theory and exploration technology to porphyry copper deposit [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2011, 27(1): 22-32. [许荣科，陕亮，郑有业，等. 回顾与进展：斑岩铜矿理论研究及勘查技术 [J]. 华南地质与矿产，2011，27(1)：22-32.]

[13] Yao Chunliang, Lu Jianjun, Guo Weimin, *et al*. The latest advances in researches on porphyry copper deposits [J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26(2): 221-229. [姚春亮，陆建军，郭维民，等. 斑岩铜矿若干问题的最新研究进展 [J]. 矿床地质，2007，26(2)：221-229.]

[14] Kerrich R, Goldfarb R, Groves D, *et al*. The geodynamics of world-class gold deposits: Characteristics, space-time distributions, and origins [J]. *Reviews in Economic Geology*, 2000, 13: 501-551.

[15] Sillitoe R H, Perello J. Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery [J]. *Anniversary Volume in Economic Geology*, 2005, 100: 845-890.

[16] Hedenquist J W, Arriba A J, Reynolds T J. Evolution of anintrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines [J]. *Economic Geology*, 1998, 93(4): 373-404.

[17] Cooke D R, Hollings P, Walshe J L. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, distribution and tectonic controls [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(5): 801-818.

[18] Sillitoe R H. Geotectonic setting of western Pacific gold deposits in basement tectonics, characterisation and comparison of Ancient and Mesozoic Continental Margins [M] // Bartholomew M J, Hyndman D W, Mogok D W, eds. Basement Tectonics 8: Characterization and Comparison of Ancient and Mesozoic R Continental Margins. The Netherlands: Academic Publishers, 1992: 665-678.

[19] Bainbridge A L, Corbett G J, Leach T M. The Nena high sulphidation system, Frieda River Copper, PNG [C]. Geology Exploration and Mining Conference Lae PNG. June 1994, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1994.

[20] Sillitoe R H, Gappe I M. Philippine Porphyry Copper Deposits: Geologic Settings and Characteristics [R]. CCOP Technical Report, 1984.

[21] Shatwell D. Epithermal gold mineralization and Late Cenozoic magmatism in the Melanesian outer arc [J]. *AIMM Proceedings Pacrim Conference*, 1987: 393-398.

[22] Lindley D. Early Cainozoic stratigraphy and structure of the Gazelle Peninsular, east New Britain: An example of eitxtension tectonics in the New Britain arc-trench complex [J]. *Australian Journal of Earth Science*, 1988, 35(2): 231-244.

[23] Tu Guangchi. The development of the mineral deposit prospecting and research work in the past twenty years: A brief review [J]. *Mineral Deposits*, 2001, 20(1): 1-9. [涂光炽. 过去20年矿床

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

事业发展的概略回顾[J]. 矿床地质, 2001,20(1): 1-9.]

[24] Zhang Qi, Qin Kezhang, Wang Yuanlong, *et al*. Study on Adakite Broadened to challenge the Cu and Au exploration in China [J]. *Acta Petrologica Sinica*,2004, 20(2): 195-205. [张旗, 秦克章, 王元龙, 等. 加强埃达克岩研究,开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 195-205.]

[25] Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Chen Yanjing, *et al*. Discussion on the relationship between Chinese porphyry copper deposits and adakitic rocks [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 199-210. [冷成彪, 张兴春, 陈衍景, 等. 中国斑岩铜矿与埃达克(质)岩关系探讨[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 199-210.]

[26] Zhang L C, Xiao W J, Qin K Z, *et al*. The adakite connection of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, eastern Tianshan, NW China: Trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41(2): 188-200.

[27] Li J X, Qin K Z, Li G M, *et al*. Magmatic-hydrothermal evolution of the Cretaceous Duolong gold-rich porphyry copper deposit in the Bangongco metallogenic belt, Tibet: Evidence from U-Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(6): 525-536.

[28] Qin K Z, Sun S, Li J L, *et al*. Paleozoic epithermal Au and porphyry Cu deposits in north Xinjiang, China: Epochs, features, tectonic linkage and exploration significance [J]. *Resource Geology*, 2002, 52(4): 291-300.

[29] Sillitoe R H. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits [J]. *Economic Geology*,1972, 67(2): 184-197.

[30] 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(3): 373-388.

[31] Von Huene R, Scholl D W. Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*,1991, 29: 279-316.

[32] Kay S M, Godoy E, Kurtz A. Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes [J]. *Geological Society of America Bulletin*,2005, 117: 67-88.

[33] 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.

[34] Tosdal R M, Richards J P. Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu ± Mo ± Au deposits [J]. *Reviews in Economic Geology*,2001, 14: 157-181.

[35] Rui Zongyao, Hou Zengqian, Li Guangming, *et al*. Subduction, collision, deep fracture, adakite and porphyry copper deposits [J]. *Geology and Prospecting*,2006, 42(1): 1-6. [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.]

[36] Solomon M. Subduction, arc reversal, and the origin of porphyry copper-gold deposits in island arcs [J]. *Geology*,1990, 18(7): 630-633.

[37] Richards J P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation [J]. *Economic Geology*,2003, 98(8): 1 515-1 533.

[38] James D E, Sacks I S. Cenozoic formation of the Central Andes: A geophysical perspective [C] // Skinner B J ed. Geology and Ore Deposits of the Central Andes. Specical Publication No. 7, Society of Economic Geology, 1999, 7: 1-25.

[39] Sawkins F J. Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics [J]. *Journal of Geology*,1972, 80(4): 377-397.

[40] Burnham C W, Ohmoto H. Late-stage processes of felsic magmatism [J]. *Mining Geology*,1980, 8(Special Issue): 1-11.

[41] Chen Wenming. The relationship between the formation of the Cu-Mo deposits and evolution in China [J]. *Geoscience*,1993, 15: 19-30. [陈文明. 中国 Cu-Mo 床形成与演化关系[J]. 现代地质, 1993, 15: 19-30.]

[42] Chen Wenming, Zhang Chengxin, Li Shuping,*et al*. Polygenetic mineralization of the Early Proterozoic Tong Kuangyru meta-porphyry copper deposit in the Zhongtiao Mountains, Shanxi province [J]. *Acta Geologica Sinica*,1998,(2): 154-168. [陈文明, 张承信,李树屏,等. 中条山铜矿峪早元古代变斑岩铜矿复合成矿作用[J]. 地质学报, 1998,(2): 154-168.]

[43] Chen Wenming. The origins of porphyry copper deposits [J]. *Geoscience*, 2002, 1: 1-8. [陈文明. 论斑岩铜矿的成因[J]. 现代地质, 2002, 1: 1-8.]

[44] Rui Zongyao, Zhang Hongtao, Chen Renyi, *et al*. An approach to some problems of porphyry copper deposits [J]. *Mineral Deposits*,2006, 25(4): 491-500. [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.]

[45] Oyargun R, Maryuey A, Lillo J, *et al*. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in northern Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism [J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36(8): 794-798.

[46] Zhang Qi, Wang Yan, Liu Hongtao, *et al*. On the space-time distribution and geodynamic environments of adakites in China annex: Controversies over differing opinions for adakites in China [J]. *Earth Science Frontiers*,2003, 10(4): 385-400. [张旗, 王焰, 刘红涛, 等. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景附: 国内关于埃达克岩的争论[J]. 地学前缘, 2003, 10(4): 385-400.]

[47] Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Gao Yongfeng, *et al*. Adakite, a possible host rock for porphyry copper deposits: Case studies of porphyry copper belts in Tibeten plateau and in northern Chile [J]. *Mineral Deposits*, 2003, 22(1): 1-12. [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母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例[J]. 矿床地质, 2003, 22(1): 1-12.]

[48] Hou Zengqian, Meng Xiangjin, Qu Xiaoming, *et al*. Copper ore potential of adakitic instrusives in Gangdese porphyry copper

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

belt: Contrains from rock phase and deep melting process [J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(2): 108-120. [侯增谦,孟祥金,曲晓明,等. 西藏冈底斯斑岩铜矿带埃达克质斑岩含矿性: 源岩相变及深部过程约束 [J]. 矿床地质, 2005, 24(2): 108-120.]

[49] Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Liang Huaying, *et al*. Petrogenetic series and ore-bearing porphyries of the Yulong copper ore belt in eastern Tibet [J]. *Geochimica*, 1998, 27(3): 236-243. [张玉泉,谢应雯,梁华英,等. 藏东玉龙铜矿含矿斑岩及成岩系列 [J]. 地球化学, 1998, 27(3): 236-243.]

[50] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347: 662-665.

[51] Sajona F G, Maury R C, Bellon H, *et al*. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines [J]. *Geology*, 1993, 21(11): 1 007-1 010.

[52] Peacock S M, Rusher T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 121: 224-227.

[53] Martin H. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids [J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 411-429.

[54] Yogodzinski G M, Lees J M, Churikova T G, *et al*. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges [J]. *Nature*, 2001, 409: 500-504.

[55] Xiao Bo, Qin Kezhang, Li Guangming, *et al*. S-rich, Highly-Oxidized Ore-bearing Magma in the Qulong Giant Porphyry-Type Cu-Mo Deposit in Southern Tibet—Evidence from Magmatogenic Anhydrite [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(12): 1 860-1 869. [肖波, 秦克章, 李光明, 等. 西藏驱龙巨型斑岩 Cu-Mo 矿床的富 S、高氧化性含矿岩浆——来自岩浆成因硬石膏的证据 [J]. 地质学报, 2009, 83(12): 1 860-1 869.]

[56] Titley S R, Beane R E. Porphyry copper deposits [J]. *Economic Geology*, 1973, 68(6): 799-815.

[57] Titley S R ed. Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits of Southwestern North America [M]. Tueson: University Arizona Press, 1982.

[58] Candela P A, Holland H D. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal fluid system: The origin of porphyry-type ore deposits [J]. *Economic Geology*, 1986, 81(1): 1-19.

[59] Roedder E. Fluid inclusion evidence for immiscibility in magmatic differentiation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Atca*, 1992, 156: 3-20.

[60] Lowenstern J B. Dissolved volatile concentrations in an ore-forming magma [J]. *Geology*, 1994, 22(10): 893-896.

[61] Ilton E S, Veblen D R. Copper inclusion in sheet-silicates from porphyry Copper deposits [J]. *Nature*, 1988, 334: 516-518.

[62] Campos E, Touret J L R, Nikogosian I, *et al*. Over heated, Cu-bearing magmas in the Zaldivar porphyry-Cu deposit, northern Chile: geodynamic consequences [J]. *Tectonophysics*, 2002, 345(1/4): 229-251.

[63] Ulrich T, Guenther D, Heinrich C A. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits [J]. *Nature*, 1999, 399: 676-679.

[64] Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Li Zhenqing. Sulfur and lead isotope compositions of the Qulong Porphyry Copper Deposit, Tibet: Implications for the sources of plutons and metals in the deposit [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(2): 554-560. [孟祥金,侯增谦,李振清. 西藏驱龙斑岩铜矿 S、Pb 同位素组成: 对含矿斑岩与成矿物质来源的指示 [J]. 地质学报, 2006, 80(4): 554-560.]

[65] Hattori K, Keith J D. Cont ribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: Evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA [J]. *Mineralium Deposits*, 2001, 36: 799-806.

[66] Li Jinxiang, Qin Kezhang, Li Guangming. Basic characteristics of gold-rich porphyry copper deposits and their ore sources and evolving processes of high oxidation magma and ore-forming fluid [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 678-688. [李金祥, 秦克章, 李光明. 富金斑岩型铜矿床的基本特征、成矿物质来源与成矿高氧化岩浆—流体演化 [J]. 岩石学报, 2006, 22(3): 678-688.]

[67] Hou Zengqian. Porphyry Cu-Mo-Au deposits: Some new insights and advances [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 95-98. [侯增谦. 斑岩 Cu-Mo-Au 矿床: 新认识与新进展 [J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 131-144.]

[68] Sasaki A, Ishihara S. Sulfur isotopic composition of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Japan [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 68: 107-115.

[69] Ishihara S, Sasaki A. Sulfur isotopic ratios of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids of the sierra Nevada batholith—A reeconnaissance study [J]. *Geology*, 1989, 17(9): 788-791.

[70] Rye R O, Luhr J F, Wasserman M D. Sulfur and oxygen isotopic systematics of the 1982 eruptions of El Chichon volcano, Chiapas, Mexioco [J]. *Journal of Vocanology and Geothermal Research*, 1984, 23(1): 109-123.

[71] Arancibia O N, Clark A H. Early magnetite-amphibole-plagioclase alteration-mineralization in the island copper porphyry copper-gold-molybdenum deposit, British Columbia [J]. *Economic Geology*, 1996, 91(2): 402-438.

[72] Hattori K H. High-sulfur magma, a product of fluid discharge from underlying mafic magma: Evidence from Mount Pinatubo, Philippines [J]. *Geology*, 1993, 21(12): 1 083-1 086.

[73] Sigurdsson H. Pre-eruption compositional grasients and mixing of andesite and dacite magma erupted from Nevado del Ruiz Vilcano, Colombia in 1985 [J]. *Journal of Vocanology and Geothermal Research*, 1990, 41(1): 127-151.

[74] Pallister J S. A basalt trigger for the 1991 eruptions of Pinatubo volcano? [J]. *Nature*, 1992, 356: 426-428.

[75] Carroll M R, Rutherford M J. Sulfide and sulfate saturation in hydrous silicate melts [C] // Proceedings of the 15th Lunar and Planetary Science Conference(part2), 1985, 90: 601-612.

[76] Gaetani G A, Grove L T. Partitioning of moderately siderophile elements among olivine, silicatemelt, and sulfidemelt: Constraints

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

on core formation in the Earth and Mars [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 1 829-1 842.

[77] Mungall J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits [J]. *Geology*, 2002, 30(10): 915-918.

[78] Audetat A, Pettke T, Dolejs D. Magmatic anhydrite and calcite in the ore-forming quartz-monzodiorite magma at Santa Rita, New Mexico(USA): Genetic constraints on porphyry-Cu mineralization [J]. *Lithos*, 2004, 72(3): 147-161.

[79] Sun W D, Arculus R J, Kamenetsky V S, *et al*. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization [J]. *Nature*, 2004, 431: 975-978.

[80] Liang H Y, Campbell I H, Allen C, *et al*. Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet [J]. *Mineralium Deposita*, 2006, 41(2): 152-159.

[81] Liang H Y, Sun W D, Su W C, *et al*. Porphyry copper-gold mineralization promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration [J]. *Economic Geology*, 2009, 104(4): 587-596.

[82] Davidson J P. Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism [J]. *Geophysical Monograph*, 1996, 96: 251-262.

[83] de Hoog J C M, Mason P R D, van Bergen M J. Sulfur and chalcophile elements in subduction zones: Constraints from a laser ablation ICP-MS study of melt inclusions from Galunggung Volcano, Indonesia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(18): 3 147-3 164.

[84] Simon A C, Pettke T, Candela P A, *et al*. Copper partitioning in a melt-vapor-brine-magnetite-pyrrhotite assemblage [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(22): 5 583-5 600.

[85] Zajacz Z, Halter W, Pettke T. Determination of fluid/melt partition coefficients by LA-ICP-MS analys is of co-existing fluid and silicate melt inclusions: Controls on element partitioning [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(8): 2 169-2 197.

[86] Hamlyn P R, Keays R R, Cameron W E, *et al*. Precious metals in magnesian low-Ti lavas: Implicationsfor metallogenesis and sulfur saturation in primary magmas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(8): 1 797-1 811.

[87] Bornhorst T J, Rose W I. Partitioning of gold in young calc-alkaline volcanic rocks form Guatemala [J]. *Journal of Geology*, 1986, 94(3): 412-418.

[88] Richards J P, McCulloch M T, Chappell B W, *et al*. Sources of metals in the Porgera gold deposit, Papua New Guinea: Evidence from alteration, isotope, and noble metal geochemistry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(2): 565-580.

[89] Richards J P. Alkalic-type epithermal gold deposits: A review [J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 1995, 23: 367-400.

[90] Jin Zhangdong, Li Fuchun. New progress of copper migration and precipitation mechanism during porphyry ore-forming process [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1998, 64(2): 73-78. [金章东,李福春. 斑岩型铜矿床成矿过程中铜的迁移与沉淀机制研究新进展 [J]. 矿产与地质, 1998, 64(2): 73-78.]

[91] 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(6): 1 151-1 165.

[92] Richards J P. Cumulative factors in the generation of giant calc-alkaline porphyry Cu deposits [C] // Porter T M ed. Super Porphyry Copper & Gold Deposits PGC Publishing, 2005, 1: 7-25.

[93] Hill K C, Kendrick R D, Crowhurstand P V, *et al*. Copper-gold mineralization in New Guinea: Tectonics, lineaments, thermochronology and structure [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2002, 49(3): 737-752.

[94] Hou Zengqian, Pan Xiaofei, Yang Zhiming, *et al*. Porphyry Cu-(Mo-Au) deposits no related to oceanic-slab subduction: Examples from Chinese porphyry deposits in continental settings [J]. *Geoscience*, 2007, 21: 332-351. [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.]

[95] Vigneresse J L. Should felsic magmas be considered as tectonic objects, just like faults or folds? [J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21(8): 1 125-1 130.

[96] 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.

[97] Gillian G, Christoph A, Heinrich, *et al*. The Bingham Canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit. II. Vein geometry and ore shell formation by Pressure-Driven rock extension [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 69-90.

[98] Hildreth W. Quaternary Magmatism in the Cascades: Geological Perspectives [M/OL]. USGS Professional Paper, 2007, 1 744. http: // purl. access. gpo. gor/690/LPS97/05.

[99] Hildreth W, Moorbath S. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of central Chile [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 98(4): 455-489.

[100] Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, Guo Shaofeng, *et al*. Metallogenic systems on the transmagmatic fluid theory [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(12): 2 669-2 678. [罗照华,卢欣祥,郭少丰,等. 透岩浆流体成矿体系 [J]. 岩石学报, 2008, 24(12): 2 669-2 678.]

[101] Petford N, Clemens J D, Vigneresse J L. Application of information theory to the formation of granitic rocks [C] // Bouchez J L, Hutton D, Stephens W E, eds. Granite: From Melt Segregation to Emplacement Fabrics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997: 3-10.

[102] Vigneresse J L. Granitic batholiths: From pervasive and continuous melting in the lower crust to discontinuous and spaced plutonism in the upper crust [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 2008, 97(4): 311-324.

[103] Cline J, Bodnar R J. Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(B5): 8 113-8 126.

[104] Kilinc I A, Burnham C W. Partioning of chloride between a sili-

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

cate melt and coexisting aqueous phase from 2 to 8 kilobars [J]. *Economic Geology*, 1972, 67(2): 231-235.

[105] Candela P A, Holland H D. The partitioning of copper and molybdenum between silicate melts and aqueous fluids [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(2): 373-380.

[106] Hedenquist J W, Lowenstern J B. The role of magmas in the formation of hydrothermal of deposits [J]. *Nature*, 1994, 370: 519-527.

[107] Roedder E. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana, and Climax, Colorado [J]. *Economic Geology*, 1971, 66(1): 98-118.

[108] Nash J T. Fluid Inclusion Petrology Data from Porphyry Copper Deposits and Application to Exploration [M/OL]. Washington: U. S. Geology Survey, 1976, 907-D: 16.

[109] Eastoe C J. A fluid inclusion study of the Panguna porphyry copper deposit, Bougainville, Papua New Guinea [J]. *Economic Geology*, 1978, 73(5): 721-748.

[110] Bodnar R J. Fluid-inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits [J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 1995, 23(1): 139-152.

[111] Giggenbach W F. Magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundaries [J]. *Economic Geology*, 1992, 87(8): 1 927-1 944.

[112] Giggenbach W F. The origin and evolution of fluids in magmatic-hydrothermal systems [C] // Barnes H L ed. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. John Wiley and Sons, Inc., 1997: 739-796.

[113] Heinrich C A, Gunther D, Audetat A, *et al*. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions [J]. *Geology*, 1999, 27(9): 755-758.

[114] Heinrich C A. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study [J]. *Mineralium Deposita*, 2005, 39(8): 864-889.

[115] Pokrovski G S, Roux J, Harrichoury J C. Fluid density control on vapor-liquid partitioning of metals in hydrothermal systems [J]. *Geology*, 2005, 33(8): 657-660.

[116] Pokrovski G S, Borisova A Y, Harrichoury J C. The effect of sulfur on vapour-liquid fractionation of metals in hydrothermal systems [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266: 345-362.

[117] Pokrovski G S, Tagirov B R, Schott J, *et al*. A new view on gold speciation in sulfur-bearing hydrothermal fluids from in situ X-ray absorption spectroscopy and quantum-chemical modeling [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(18): 5 406-5 427.

[118] Williams-Jones A E, Heinrich C A. Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(7): 1 287-1 312.

[119] Simon A C, Pettke T, Candela P A, *et al*. The partitioning behavior of As and Au in S-free and S-bearing magmatic assemblages [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(7): 1 764-1 782.

[120] Audetat A, Pettke T, Heinrich C A, *et al*. The composition of magmatic-hydrothermal fluids in barren and mineralized intrusions [J]. *Economic Geology*, 2008, 103(5): 877-908.

[121] Nagaseki H, Hayashi K. Experimental study of the behavior of copper and zinc in a boiling hydrothermal system [J]. *Geology*, 2008, 36(1): 27-30.

[122] Wilkinson J J, Wilkinson C C, Vry V H, *et al*. Ore fluid chemistry in super-giant porphyry copper deposits [M] // Pacrim Congress, Gold Coast, Queensland, Extended Abstracts: Melbourne. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2008: 295-299.

[123] Pudack C, Halter W E, Heinrich C A, *et al*. Evolution of magmatic vapor to gold-rich epithermal liquid: The porphyry to epithermal transition at Nevados de Famatina, northwest Argentina [J]. *Economic Geology*, 2009, 104(4): 449-477.

[124] Seo J H, Guillong M, Heinrich C A. The role of sulfur in the formation of magmatic-hydrothermal copper-gold deposits [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 282(1/4): 323-328.

[125] Zajacz Z, Halter W. Copper transport by high temperature, sulfur-rich magmatic vapor: Evidence from silicate melt and vapor inclusions in a basaltic andesite from the Villarica volcano(Chile) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 282(1/4): 115-121.

[126] Lowenstern J B, Mahood G A, Rivers M L, *et al*. Evidence for extreme partitioning of Copper into a magmatic vapor phase [J]. *Science*, 1991, 252(5 011): 1 405-1 409.

[127] Williams-Jones A E, Migdisov A A, Archibald S M, *et al*. Vapor-transport of ore metals [C] // Hellmann R, Wood S A, eds. Water-rock Interaction: A Tribute to David A Crerar. The Geochemical Society, Special Publication, 2002: 279-305.

[128] Yang Zhiming, Hou Zengqian. Porphyry Cu deposits in collisional orogen setting: A preliminary genetic model [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(5): 515-538. [杨志明,侯增谦. 初论碰撞造山环境斑岩铜矿成矿模型 [J]. 矿床地质, 2009, 28(5): 515-538.]

[129] Fournier R O. Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment [J]. *Economic Geology*, 1999, 94(8): 1 193-1 211.

[130] Roedder E. Fluid Inclusions: Reviews in Mineralogy [M]. USA: Mineralogical Society of America, 1984, 12: 644.

[131] Simon A C, Pettke T, Candela P A, *et al*. Magnetite solubility and iron transport in magmatic-hydrothermal environments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(23): 4 905-4 914.

[132] Shinohara H, kazahaya K, Lowenstern J B. Volatile transport in a convecting magma column: Implications for porphyry Mo mineralization [J]. *Geology*, 1995, 23(12): 1 091-1 094.

[133] Du Qi. Geology of Duobaoshan Porphyry Copper Deposit [M]. Beijing: Geology Publishing House, 1988: 386. [杜琦. 多宝山斑岩铜矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 1988: 386.]

[134] Rusk B G, Reed M H, Dilles J H, *et al*. Compositions of mag-

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

matic hydrothermal fluids determined by LA-ICP-MS of fluid inclusions from the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, MT [J]. *Chemical Geology*, 2004, 210(1/4): 173-199.

[135] Rusk B G, Reed M H, Dilles J H. Fluid inclusion evidence for magmatic-hydrothermal fluid evolution in the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana [J]. *Economic Geology*, 2008, 103(2): 307-334.

[136] Rusk B G, Miller B J, Reed M H. Fluid inclusion evidence forthe formation of Main Stage polymetallic base-metal veins, Butte, Montana, USA [J]. *Arizona Geological Society Digest*, 2008, 22: 573-581.

[137] Redmond P B. Magmatic-hydrothermal Fluids and Copper-gold ore Formation at Bingham Canyon [D]. Utha: Stanford University, 2002: 228.

[138] 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.

[139] Landtwing M R, Pettke T, Halter W E, *et al*. Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic-hydrothermal fluids: The Bingham porphyry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235(1/2): 229-243.

[140] Landtwing M R, Furrer C, Redmond P B, *et al*. The Bingham Canyon porphyry Cu-Mo-Au deposit. III. Zoned copper-gold ore deposition by magmatic vapor expansion [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(1): 91-118.

[141] Hedenquist J W. The ascent of magmatic fluids: Discharge versus mineralization [J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 1995, 23: 263-289.

[142] Hedenquist J W, Simmons S F, Giggenbach W F, *et al*. White Island, New Zealand, volcanic-hydrothermal system represents the geochemical environment of high-sulfidation Cu and Au ore deposition [J]. *Geology*, 1993, 21(8): 731-734.

[143] Hedenquist J W, Richards J P. The influence of geochemical techniques on the development of genetic models for porphyry copper deposits [J]. *Reviews in Economic Geology*, 1998, 93: 235-256.

[144] Heinrich C A, Driesner T, Stefansson A, *et al*. Magmatic vapor contraction and the transport of gold from the porphyry environment to epithermal ore deposits [J]. *Geology*, 2004, 32(9): 761-764.

[145] Khashgerel B, Rye R O, Kavalieris I, *et al*. The sericitic to advanced argillic transition: Stable isotope and mineralogical characteristics from the Hugo Dummett porphyry Cu-Au deposit, Oyu Tolgoi district, Mongolia [J]. *Economic Geology*, 2009, 104(8): 1 087-1 110.

[146] Lowell D J. How Kalamazoo was Found in Case Histories of Mineral Discoveries, Vol 3, Porphyry Copper, Molybdenum, and Gold Deposits, Volcanogenic Deposits and Deposits in Layered Rock [Z]. Society Mining Metallurgy and Exploration, Colorado V Hollister Editor, 1991: 33.

[147] Lowell D J. The discovery of the La Escondida Orebody [M] // Hutchinson R V, Grauch R I, eds. Historical Perspectives of Genetic Concepts and Case Histories of Famous Discoveries. Economic Geology, 1991, Monograph 8: 286-288.

[148] Sillitoe R H, Gappe I M. Philippine Porphyry Copper Deposits: Geologic Settings and Characteristics [R]. CCOP Technical Report, 1984.

[149] Corbett G J, Leach T M. Southwest Pacific Rim Gold-copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization [M]. Littletion: Society of Economic Geologists Special Publication, 1998, 6: 240.

[150] Eastoe C J. Sulfur isotope data and the nature of the hydrothermal systems at the Panguna and Frieda porphyry copper deposits, Papua New Guinea [J]. *Economic Geology*, 1983, 78(2): 201-213.

[151] Dilles J H. Petrology of the Yerington Batholith, Nevada: Evidence for evolution of porphyry copper ore fluids [J]. *Economic Geology*, 1987, 82(7): 1 750-1 789.

[152] 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*, 1992, 87(8): 1 963-2 001.

[153] Ulrich T, Heinrich C A. Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu-Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina [J]. *Economic Geology*, 2001, 96(8): 1 719-1 742.

[154] Ulrich T, Gunther D, Heinrich C A. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina [J]. *Economic Geology*, 2001, 96(8): 1 743-1 774.

[155] Proffett J M. Geology of the Bajo de la Alumbrera porphyry copper-gold deposit, Argentina [J]. *Economic Geology*, 2003, 98(8): 1 535-1 574.

[156] Li Dapeng, Chen Yuelong, Jin Ye. Numerical simulation in subduction zone study [J]. *Adcances in Earth Science*, 2010, 25(10): 1 082-1 090. [李大鹏, 陈岳龙, 靳野. 板块俯冲带研究中的数值实验 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(10): 1 082-1 090.]

[157] Harris A C, Golding S D. New evidence of magmatic-fluid-related phyllic alteration: Implications for the genesis of porphyry Cu deposits [J]. *Geology*, 2002, 30(4): 335-338.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Review on Porphyry Copper Deposit

Zhang Yunguo, Zhou Chaoxian

(1. *China Geological Survey of Non-ferrous Metal Resources, Beijing* 100012, *China*;
2. *Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing* 100012, *China*)

Abstract: Porphyry copper deposit as the largest source of Cu is one of the most important deposits in the world. Porphyry Copper Deposit not only occured in Circum-Pacific ore-forming region, but also occured in Tethys ore-forming region and Middle-Asian (Paleo-Asian Oceanic) ore-forming region. The mineralization materials derived from the deep. Porphyry forms through four stages: "Oceanic Crust-Mantle Lava Flow", "Original Magma", "Shallow Ore Magma", "Crystallization of Magma-Minerali-zation". In the stage of "Original Magma", much metallogenic materials and energy gather through the process of "MASH". Ore-forming fluids are high-grade fliuds of gas-liquid phase, which are of fluid-rich, high temperature, high pressure, high salinity, strong oxidizing, high oxygen fugacity. The characteristics of ore-forming fluids are favorable for metallogenic materials to gather from magmas to fluids in the process of magma-hydrothermal separation. The copper is transported and migrated in form of Cl-complexes. With the ascent of ore-forming fluids, lowering of temperature and pressure is the main factors resulting in copper precipitation. The crystallization of magnetite resulting from lowering temperature and pressure provides much of S^{2-} and plays an important role in the formation of porphyry copper ore. From the inner to the outside, the alteration zones, in general, are composed of quartz zone, potassic zone, SCC zone and argillic zone. The proposed genesis models which are commonly accepted, up to now, include the classical model, the system model and the model of polyphasal overprinting events.

Key words: Porphyry copper deposit; Geological characteristic; Alteration zone; Source; Precipitation; Genesis; Model.

IODP 344、345 航次开始召集船上科学家

由 IODP 美国执行机构(IODP-USIO)负责的 IODP344 和 345 航次目前开始向各成员国召集船上科学家。

IODP 344(哥斯达黎加地震起源)航次预计在 2012 年 10～12 月在东太平洋执行,该航次是 IODP 334 航次的后续。航次基于 IODP 537 号建议书,航次的科学目标包括:①俯冲带沉积物和基岩的岩性、构造和物理性质特征;②俯冲带的剥蚀速率和上部板块的沉降历史;③上部板块中流体和岩石的相互作用及地球化学过程等。

IODP 345 航次预计在 2012 年 12 至 2013 年 2 月实施,钻探区域位于东太平洋赫斯深部裂谷海域。航次基于 IODP 551 号建议书,航次的主要科学目标包括:①快速扩张洋脊的洋壳结构;②软流圈、岩石圈和水圈之间的热和能量流传输的特征。上述航次更详细信息请访问:http://iodp.tamu.edu/scienceops。

以上 2 个航次的执行时间可能随钻探船的时间安排而调整。中国 IODP 鼓励中国科学家积极申请参加航次并提供相关经费资助,有意申请者请在以下截止日期前提交个人英文简历、航次后研究计划和航次申请表(可在中国 IODP 网站下载:http://www.iodp-china.org)。

联 系 人:拓守廷,电话:021-65982198,Email:iodp_china@tongji.edu.cn

截止日期:IODP 344 2012 年 1 月 31 日

IODP 345 2012 年 2 月 15 日

中国 IODP 办公室

2011 年 10 月 21 日

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net