

文章编号: 1007-3701(2011)01-0022-11

回顾与进展:斑岩铜矿理论研究及勘查技术

许荣科¹, 陕亮², 郑有业^{1,3}, 张雨莲⁴, 庞迎春⁵, 马国桃⁶, 曹亮⁵, 刘鑫扬¹

(1.中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074; 2.中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;
3.中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074; 4.西安地质矿产研究所, 西安 710054;
5.武汉地质矿产研究所, 武汉 430205; 6.成都地质矿产研究所, 成都 610082)

摘要:斑岩铜矿是最重要的铜矿床类型,对其成矿作用的认识及找矿方法的研究,对找矿实践具有重要指导意义。为此作者通过收集和整理有关文献,力图从拓展勘查人员找矿思路的角度,回顾和总结了斑岩铜矿研究在岩浆岩地球化学特征、成矿物质来源、流体演化及矿床金属组分、成矿构造背景及动力学、勘查理论及技术等方面的进展,以期有助于斑岩铜矿的勘查找矿及相关的研究工作。总结指出:斑岩铜矿主要与埃达克(质)岩相关,成矿物质来源于地幔,岩体酸碱度对铜矿床伴生金属组分具有控制作用,斑岩铜矿床的矿化是通过多阶段独立流体演化过程中铜质的逐步富集实现的;成矿主要发生在汇聚大陆边缘,但造山带和非造山环境也可形成斑岩铜矿,其形成主要与构造机制转换诱发的地幔熔融、地壳变形等一系列可能导致岩浆快速上升和侵位的有利条件有关,成矿系列、成矿系统等系统论研究思维的引入和地质、构造、遥感、航空物探、矿区地球化学等一系列新、老技术的综合运用,对成功找矿具有重要意义;但对于成矿构造环境的多样性、壳幔混合对成矿的影响、勘查技术的运用等方面也还存在一些需要解决的问题。

关键词:斑岩铜矿;岩浆活动;矿质来源;金属组分;构造背景;勘查方法;综述;展望
中图分类号: P618.41 **文献标识码:** A

铜是二十一世纪中国最缺乏的战略资源之一^[1]。斑岩铜矿作为世界上最重要的铜矿类型,其研究和开发已经历百年,其成矿理论及勘查方法一直是矿床学和找矿勘探研究的热点。姚春亮等(2007)^[2]、芮宗瑶等(2006)^[3]等都曾从不同的方面介绍了斑岩铜矿研究工作。但上述工作都偏重于理论研究,缺乏从勘查工作者的角度,对斑岩铜矿相关成矿理论和勘查技术的介绍和总结。为此本文通过收集和整理有关文献,力图对斑岩铜矿研究在岩浆岩地球化学特征、成矿物质来源、流体演化及矿床金属组分、成矿构造背景及地球动力学、勘查理论及技术等方面进展做简要介绍,以期有助于斑岩铜矿的勘查找矿及相关的研究工作。

1 斑岩铜矿的定义和特点

1948年 McKinstry H E^[4]在其《矿山地质学》一书中首次全面讨论了斑岩铜矿床,Lowell和Guibert(1970)^[5]提出了斑岩铜矿蚀变分带的“二长岩”模式(自岩体中心向外蚀变分带依次钾化带→石英-绢云母化带→泥化带→青盘岩化带),Hollister et al.(1974)^[6]提出了斑岩铜矿蚀变分带的“闪长岩”模式。按照目前较经典的理论,斑岩铜矿床是指与中、酸性斑岩体相关,并具有钾、氢蚀变矿物晕和铜、钼、银、铅、锌、硫地球化学晕的岩浆期后中-高温热液形成的细脉浸染状硫化物铜(钼)矿床^[7]。其具有规模大、品位低、埋藏浅且易开采、成矿斑岩属于浅成-超浅成(1~4 km)侵入岩、共生和伴生元素组合多等显著的特征。与斑岩铜矿相关的成矿流体包裹体具有高盐度(30%~40% NaCl_{eq}),主

收稿日期: 2010-03-16

基金项目: 中国地质调查局大调查项目(编号: 1212010531504)资助。
作者简介: 许荣科, (1968—), 男, 地质高级工程师, 主要从事区域地质调查及矿床学理论研究, E-mail: xurongke1968@126.com

成矿温度一般在400~600℃,第二阶段的成矿温度在200~400℃^[8]。

2 斑岩铜矿的岩浆岩地球化学特征

区分有矿和无矿斑岩体是矿床学家和矿床勘探者孜孜以求的目标。Ishihara (1977)^[9]最早意识到斑岩铜矿更容易形成于氧化型中酸性侵入岩中。含矿岩体高氧逸度特征的证据包括:含矿岩体全岩 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值高于无矿岩体^[10],原生包裹体中硬石膏子晶的出现^[11-12];Mason (1978)^[13]发现几内亚 Western Highlands 地区含矿斑岩体中的角闪石斑晶从核部到边部,Fe 含量平稳降低,而无矿斑岩体中的角闪石斑晶从核部到边部,Fe 含量则逐渐升高或先升高再降低;Imai (2002; 2004)^[14-15]的研究指示含矿中酸性岩体磷灰石的 SO_3 含量一般大于0.1%,而无矿中酸性岩体磷灰石的 SO_3 含量一般小于0.1%等。姚春亮等^[16]研究发现江西铜厂岩期磷灰石主要富S和Si,钾化期主要富Mn、Fe,主矿化期磷灰石与早期磷灰石主要差别在于前者具有高S、F和低Cl含量。故氧化还原条件对斑岩铜矿化的控制作用已得到了绝大多数矿床学家的认同^[17-21]。但利用岩石其它地球化学指标来区分含矿和非矿斑岩的努力却一直未有突破,直到埃达克岩被提出之后,这一问题才出现曙光。

Defant 和 Drummond (1990)^[22]提出板片熔融产生的埃达克岩(Adakite)的概念,它不是以常规的岩石学矿物组成和结构命名的岩石类型,而是一种基于地球化学划分出来的岩石类型,其定义为:尽管它具有岛弧火山岩富集大离子亲石元素(LILE,如Rb、K、Ba、Sr等),强烈亏损高场强元素(HFSE,如Nb、Ta、Zr、Hf、Ti等)的地球化学特征,但它同时具有不同于一般岛弧火山岩的特点,那就是 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ (很少低于这个值),通常 $\text{MgO} < 3\%$ (很少高于6%), $\text{Y} (\leq 18 \times 10^{-6})$ 和 $\text{HREE} (\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6})$ 含量甚低,但Sr含量甚高(很少低于 400×10^{-6}),并且 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值通常小于0.7040。随后一大批埃达克岩被识别出。Mungall (2002)^[20],Thiéblemont et al. (1997)^[23],Sajona 和 Lowenstern (1998)^[24],Oyarzún et al. (2001)^[25]等主要基于对智利一带的斑岩铜矿的统计,认识到环太平洋大部分世界著名的斑岩铜矿床和浅成低温热液金矿床

都与埃达克岩有关,指示最有潜力的含矿斑岩并非岛弧岩系,而是埃达克岩,表明埃达克岩与斑岩铜矿具有显著的亲合性。因此Defant et al. (2002)^[26]认为可将埃达克岩作为斑岩铜矿床的找矿标志。

在中国,通过一系列学者的努力,也识别出了一大批与斑岩铜矿和浅成低温热液金矿相关的埃达克岩^[27-30],如西藏玉龙、驱龙、冲江等^[30-31],江西德兴、安徽铜官山^[32]、湖北铜山口^[33]、新疆土屋、延东^[34-36]、山东玲珑^[37]、郭家岭^[38]等均被认为与埃达克岩有关。

然而随着研究的深入,人们发现埃达克岩除板片熔融成因者外,还有大量非板片成因者。如它们可以通过周期性补给的岩浆房内含角闪石玄武岩浆的低压结晶分异形成^[39],可以在下地壳条件下玄武岩浆高压结晶分异形成^[40],可因变质玄武岩分熔形成^[41],也可因镁铁质下地壳熔融形成^[27,42-44],这些多种成因模型也与实验岩石学研究、野外观察、微量元素模拟的结果相一致,并且得到放射性同位素资料的支持。Castillo (2006)^[45]倾向于将非板片成因,但符合埃达克岩定义的岩石称之为埃达克质岩。对于板片熔融形成的埃达克岩,国外认识最近也有重要转变,即从强调板片熔融形成原生的埃达克岩到认识到埃达克岩的形成有地幔橄榄岩直接或间接的参与^[45-46]。不同成因的埃达克岩可能具有不同的含矿性,尽管这一点目前研究还很不足,但就总体而言,与环太平洋带赋存于板片熔融产生的富钠质埃达克岩中的一些世界级巨型斑岩铜矿相比较,中国东部一系列下地壳熔融产生的富钾质埃达克质岩相关的晚中生代的铜金钼矿化、中国西藏各斑岩铜矿带主要与富钾质的埃达克质岩相关的铜矿化的规模,要小得多,部分反映了这一点。

尽管埃达克岩具有与斑岩铜矿的明显亲合性,但Kay 和 Mpodozis (2001)^[47]在安第斯 El Indio 地区的研究结果表明:即使在有利的远景区内,并非所有的埃达克岩都形成矿床,只有Sm/Yb在5~7之间的埃达克岩才形成铜矿,并认为熔体中的这一地球化学数值反映了残留固相组合中角闪石向石榴石大规模转变的这一时期形成的埃达克岩,其成矿主要是因为这一时期有大量的角闪石分解,使生成的熔体中富含挥发分和流体,从而有利于成矿物质的萃取和循环(前期角闪石分解的量少,故形成的岩浆中Sm/Yb比值一般在2.5~5之间;后期残留相以石榴石为主则形成的岩浆中Sm/Yb一般>7)。

3 成矿物质来源、流体演化及矿床金属组分

(1) 成矿物质主要来源于地幔

通过对斑岩铜矿与钙碱性侵入体空间关系、成矿早期流体包裹体及金属在岩浆活动过程中的稳定同位素研究,人们很早已确定斑岩铜矿成矿流体来自岩浆。Campos et al. (2002)^[48]在智利 Zaldívar 斑岩铜矿床石英熔体中发现不含硫的铜矿化,且铜的含量高出该区内不含矿的钙碱性岩浆岩一个数量级;Ulrich et al. (1999)^[49]发现印度尼西亚 Grasberg 斑岩铜矿和阿根廷的 Bajo de la Alumbrera 斑岩铜矿各矿床代表原始岩浆的高盐度流体包裹体(>55% NaCl_m)的 Cu/Au 比值与各自矿石的 Cu/Au 比值相近进一步证实了这一点。

斑岩铜矿含矿斑岩中的成矿物质来源一直存在争议,且认识在不断演进。Sillitoe (1972, 1976)^[50-51]提出斑岩铜矿的赋矿母岩系板块俯冲背景下洋壳熔融形成的岛弧钙碱性斑岩体,洋壳中高的 Cu、Au 背景值是斑岩型铜金矿床中金属的主要来源。之后人们认识到岛弧岩浆岩主要与交代地幔楔的部分熔融有关^[52-56],对斑岩铜矿源岩的认识,也相应由俯冲板块的部分熔融转变为由交代地幔楔的部分熔融有关^[52]。地幔是斑岩铜金矿床中 Cu-Au-Mo 等的主要金属物质来源的概念被提出,并被广泛接受^[18, 20, 57]。随着 20 世纪 90 年代埃达克(质)岩是斑岩铜矿的母岩被大量的研究所证实^[20, 23-28, 30],成矿物质主要来自洋壳板片的认识被复活。但随着近年来实验岩石学进展及对埃达克岩地球化学的深入研究,证实初始板片熔体仅构成埃达克岩中很小的一部分,大部分的埃达克岩是板块玄武质熔体与地幔橄榄岩相互平衡或者是被交代的地幔橄榄岩直接熔融的产物,受到不同程度的地幔橄榄岩影响的埃达克岩明显是大多数^[45]。它进一步证实了大部分斑岩铜矿成矿物质来源于地幔楔这一论点。Sillitoe (1997)^[18]对 Cu 和 Au 的起源方式进行了详细论述,他指出,俯冲洋壳所释放出的流体或熔融所产生的岩浆富含 Fe³⁺,当这些流体或岩浆与上地幔发生相互作用时,Fe³⁺会氧化地幔中富含 Cu 和 Au 的硫化物,硫化物分解后,Cu 和 Au 释放出来进入岩浆并与岩浆一起到达地壳浅部。

也有一些学者对此持不同意见,如有人认为 Mo 的来源与 Cu、Au 并不相同,地壳混染对斑岩铜矿中 Mo 的含量起决定作用^[58];有人根据太古宙很罕见的斑岩矿化保存于普通的钙碱性岩系中,而 TTG 岩系很少发生斑岩矿化,认为与埃达克(质)岩相关的斑岩铜矿化与板片熔体并不具有确定联系,来自幔源岩浆在地壳阶段的演化可能才是形成斑岩矿床的关键^[59]。当然,也有学者找到部分地区 Cu、Mo 及岩浆共同来自于下地壳的证据^[60]。

(2) 岩体酸碱度及侵位深度影响矿石金属组分

斑岩的基性程度和碱度、斑岩体的就位深度对斑岩体所形成的金属矿床类型具有控制作用。Kirkham et al. (1995)^[10]系统总结了含不同类型金属的斑岩型矿床的矿化斑岩体的岩石类型。其中,含钼斑岩铜矿的矿化岩体主要包括花岗岩、石英二长岩和石英二长闪长岩;含金斑岩铜矿的矿化岩体偏碱性;不伴生 Mo 和 Au 的斑岩铜矿岩体偏基性,岩石类型以花岗闪长岩-石英二长岩和石英二长闪长岩为主。Cook et al. (2005)^[61]、Sillitoe (1997)^[18]、Mueller (2000)^[62]、芮宗瑶等 (2006)^[3]强调偏碱性或高钾钙碱性岩浆形成的斑岩体富金,甚至可出现铅锌矿化组合。Kesler (1977)^[63]强调偏酸性的斑岩体易发生钼矿化。

岩浆侵位深度对斑岩铜矿伴生金属组分含量有显著的影响,即侵位较深(> 5 km)的岩体形成富 Mo 矿床,侵位较浅(< 5 km)的岩体形成富 Cu 和 Au 的矿床^[64-66]。Robb (2005)^[66]依据 Candela et al. (1986)^[64]的数字模拟结果对这一现象进行了解释,他认为岩浆侵位深度通过控制岩浆结晶过程来影响斑岩铜矿伴生金属的含量。岩浆侵位较深时,由于压力较大,挥发分的溶解度也大,在侵位之初不会发生沸腾作用,无独立的流体相形成,岩浆降温缓慢,结晶缓慢,矿物与岩浆之间的分离造成岩浆高度结晶分异。从而导致相容元素 Cu 和 Au 被贫化,和不相容元素 Mo 在岩浆结晶晚期的富集。因而,侵位较深的岩体形成富 Mo 而贫 Cu 和 Au 的矿床。岩浆在地壳浅部侵位,由于水和其他挥发分在岩浆中的溶解度降低,岩浆会发生沸腾,独立的流体相随而形成。由于独立的流体相形成时,Cu 和 Au 未被黑云母等铁镁质矿物消耗,这两种金属会大量进入流体;由于岩浆侵位较浅,岩浆冷却较快,导致岩浆侵位后快速结晶,其结果是岩浆演化程度

低,Mo不能有效富集,因而,侵位较浅的岩体形成贫Mo而富Cu和Au的矿床。与之相对应,形成于西南太平洋地区岛弧环境的斑岩铜矿相对富金,而形成于大陆弧环境的太平洋东岸的斑岩铜矿相对富Mo,甚至是富Sn(Bolivia)或W(加拿大New Brunswick)。

(3) 流体演化

正如芮宗瑶等(2006)^[3]指出: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。Taylor(1974)^[67]依据北美斑岩铜矿的稳定同位素数据提出了斑岩铜矿的流体演化模式:早期两种流体作用体系并存,内带为岩浆流体作用体系,发生钾化和铜矿化,外带为外来流体作用体系,发生青磐岩化;晚期以外来流体为主,两种流体混合,发生绢英岩化,改造早期矿化。之后的几十年,人们普遍接受这一模式^[68]。然而太平洋西岸许多斑岩铜矿的成矿流体特征与上述模式不同,绢英岩化期的成矿流体仍指示以岩浆流体为主,包裹体的盐度wt%(NaCl_{eq})超过50%,气相到液相的均一温度也很高(370~560℃),包裹体氢氧同位素特征指示仍以岩浆流体为主(Ulrich et al., 2001^[69]; Harris et al., 2002^[68], 2005^[70]; Calagari, 2003^[71]),如澳大利亚东部的Endeavour 26 North斑岩铜矿(Harris et al., 2002)^[68]。Khashgerel et al. (2006)^[72]研究了古亚洲洋蒙古Oyu Tolgoi斑岩铜矿床的绢英岩化蚀变矿物的氢氧同位素特征,也指示主要与岩浆水有关,但有少量大气水的加入。杜绮等(1988)^[73]研究了斑岩铜成矿中多期次热液蚀变对成矿的贡献,指出多宝山斑岩铜矿在黑云母化带内岩石含铜达 1000×10^{-6} ,绢英岩化和碳酸盐化带内岩石含铜 $4\ 000 \times 10^{-6} \sim 4\ 700 \times 10^{-6}$,指示从过渡岩浆阶段的黑云母化到热液阶段的绢英岩化和碳酸盐化都有铜的富集,即认为铜是在蚀变过程中逐渐富集起来的^[3, 73]。

4 斑岩铜矿形成的构造背景及动力学研究

经典的斑岩铜矿床主要形成于活动大陆边缘(岛弧或陆缘弧),环太平洋成矿带、特提斯斑岩铜

矿带、中亚-蒙古斑岩铜矿带构成了全球三大斑岩铜矿成矿带,其中环太平洋带是最为重要的斑岩铜成矿带,东太平洋中安第斯山脉、美国西部,西太平洋的Papua New Guinea, Irian Jaya等构成全球最重要的斑岩铜成矿省^[8]。

国外学者主要基于对环太平洋成矿带的研究,分析了斑岩铜矿成矿的构造背景、诱发成矿的动力学机制。Sillitoe(1993)^[74]认为斑岩铜矿可形成于伸展和挤压两种背景下,前者主要为西太平洋的一些矿床,后者如东太平洋的大量斑岩铜矿,并认为挤压背景更有利于形成铜矿床。Sillitoe(1998)^[75]注意到智利中部、北部,美国Irian南西部, Irian Jaya等地的大型斑岩铜矿成矿与地层增厚同步。他注意到南美在古新世-早始新世之间的挤压构造机制造成了秘鲁Cujaone和Toquepala巨型斑岩铜矿床的就位。而在伸展构造体制下的北智利只有小的斑岩铜矿床的形成(如Spence, Cerro Colorado, Mocha, Lomas Bayas等斑岩铜矿)。Camus(2002)^[76]补充和更正了上述认识,认为Sillitoe(1993)^[74]关于古新世矿床规模与构造体制之间的联系存在不正确之处,实际的伸展构造区应位于更偏南的纬度(南纬24~26°之间),在那儿只发现了一些浅成低温热液矿床。Sillitoe(1998)^[75]识别出了挤压机制下5种有利于斑岩铜矿成矿的因素:(1)挤压抑制了火山作用(可能这一体制防止了流体从岩体中逸出,但它应该形成于一个挤压阶段压力降低的时刻);(2)挤压机制下形成的岩浆房可能大于伸展机制;(3)爆发和挥发份的饱和有利于岩体分异从而形成大规模的流体;(4)挤压抑制了向上突起的浅部岩浆房的数量,使流体集中在一个单独的突起中,而不是一串岩浆房中;(5)快速的抬升和剥蚀造成的突然的减压促进了流体的抽取和运输。

越来越多的学者^[8, 18, 57, 77-78]认识到构造机制转变可能才是斑岩铜矿成矿的重要诱因,并从多方面进行过探讨。如Solomon(1980)^[57]认为西太平洋斑岩铜矿的形成与岛弧极性的反转有关;Richards et al.(2001)^[78]注意到成矿发生于较长时期挤压后的松弛时期,并与早期先存深大断裂在应力松弛期的活化张开有关;James和Sacks(1999)^[79], Kerrich et al.(2000)^[8], Murphy(2001)^[80], Cook et al.(2005)^[61]都注意到了板块的低角度俯冲对斑岩铜矿的成矿作用。尤其是Cook et al.(2005)^[61]对全球一些相对

较晚形成的斑岩系统进行了考察,指出全球最大的25个斑岩铜矿床中的7个,全球最富金的25个富金斑岩铜矿床中的13个与平板俯冲有关,即认为无震洋脊、海山链或大洋高原的低角度俯冲与斑岩铜矿的形成同步。Murphy (2001)^[80]指出北美西北部 Laramide 造山运动与平板俯冲有关,其证据为黄石古热点、北美 Arizona and Sonora 西北部的6个巨型斑岩铜钼矿床位于一个狭长的地带。James 和 Sacks(1999)^[79]指出秘鲁南部和智利北部 50 ~ 30 Ma 之间的斑岩铜矿床与平板俯冲有关。

对于平板俯冲的原理,最初认为无震洋脊、海山链、大洋高原具有相对海底平原更小的密度,因而在俯冲至地幔时较海底平原具有更大的浮力,使洋壳的俯冲角度变缓,从而导致了成矿。但对于平板俯冲过程中具体是哪些因素起作用,仍存在争议。如 Rosenbaum 等(2005)^[81]认为,洋壳俯冲角度由陡变缓并不能解释在洋壳高浮力块体俯冲开始的瞬间所出现的斑岩铜矿爆发式成矿。他们认为,洋壳高浮力块体俯冲所引发的地壳构造变形强度的变化才是斑岩铜矿大规模成矿的真正成因。Rosenbaum 等(2005)^[81]推测,在洋壳高浮力块体俯冲之前,洋壳俯冲角度稳定,岩浆活动发生在一个狭窄的带上,由于洋壳俯冲平稳,地壳变形微弱,富金属和挥发分的岩浆不能到达上地壳,而是在莫霍面附近发生积聚;洋壳高浮力块体开始俯冲以后,俯冲洋壳与上覆陆壳之间的相互拖曳作用增强,导致陆壳强烈变形,形成多级断裂,富金属和挥发份的岩浆沿这些断裂上侵,岩浆到达上地壳后,成矿流体析出并导致斑岩型矿化。而 Cook et al. (2005)^[61]认为:平板俯冲过程中,来自俯冲洋脊的挥发份对上地幔楔的交代、并可能伴随俯冲板片压力影区域沉积物变质导致的硫含量的增高,从而产生富氧的熔体使传输铜、金和硫的氧化物成为可能。地壳的增厚和脱水作用造成流体相的增加有利于斑岩铜矿的形成。与挤压构造机制相联系的基底断层快速抬升和剥蚀造成了斑岩铜矿床及浅成低温热液系统的就位。先期火山作用下形成的一些通道将有利于斑岩铜矿的形成,而俯冲区陆壳内的断层对于岩浆和流体的聚集具有重要的作用。并还认为矿床的矿化除与上述地质因素有关外,有效的矿化过程和成矿后的保存也是至关重要,巨型矿床的形成是上述多种要素叠加的结果。

太平洋东岸和太平洋西南地区的斑岩铜矿多数形成于造山作用过程中弧火山背景下,但在中国东南部和冈底斯地带存在一系列形成于非造山环境或陆内造山环境下的斑岩铜矿。如中国东部的一系列铜钼金矿床,被认为与中国东部华北和华南岩石圈减薄有关^[28, 82]。侯增谦等(2006)^[83]系统研究了青藏高原构造演化与成矿的关系,认为在主碰撞造山、晚碰撞和后碰撞阶段均可形成斑岩铜钼金矿化,如在主碰撞阶段的应力松弛期,经历 MASH (melting-assimilation-storage-homogenization) 过程的壳混源花岗岩伴有强烈的 Cu、Cu-Au、Cu-Mo 矿化,主要的有 45~41 Ma 分布在多吉扎-克鲁-冲木达铜金成矿带的克鲁、劣布、双步结热、浪达、陈坝、程巴、冲木达等矽卡岩型矿床;晚碰撞阶段与大规模走滑断裂系统有关的斑岩型 Cu-Mo(Au)成矿事件,形成 40~36 Ma 的玉龙斑岩铜矿带;后碰撞伸展环境形成以驱龙特大型斑岩铜矿为代表的冈底斯成矿带。

许多学者都注意到线状构造对斑岩铜矿的控矿作用。Kerrick et al. (2000)^[8]强调主要的构造事件——弧弧、弧陆、洋脊向弧下的俯冲导致区域构造应力场的异化,导致一系列穿切弧壳的深大断层的阶段性的伸展拉开,岩浆的快速上升侵位和相关的矿质在高位的有效释放和成矿。上新世-更新世菲律宾北部的 Luzon Central Cordillera 一带的斑岩铜矿、台湾北部的金瓜石矿床的形成,都与区域构造应力场变化导致断层的重新活动有关。Kerrick et al. (2000)^[8]将控制斑岩铜矿形成的构造分为三类:与弧平行的深大断裂,主要的实例有菲律宾的菲律宾断层、智利的 West Fissure-Domeyko 断层^[84];与弧斜切的转换断裂,主要的实例有巴布新几内亚的 Lagekamu 转换断层^[77];垂直穿切弧区的深大断裂,如安第斯^[85]。郑有业(2007)^[86]在对西藏冈底斯带斑岩铜矿区域控矿规律研究的基础上,指出:西藏冈底斯带的斑岩铜矿床的总体展布,受到东西向和北东向两组区域构造的联合控制,具有“东西成行、北东成列”的特征。

5 斑岩铜矿勘查理论及技术现状及进展

在斑岩铜矿的勘探方面,一般认为小斑岩体(多小于 1 km²)成矿,如中国的一系列斑岩体主要

为小岩株、岩蘑菇、岩墙等^[7],但也有一些较大的斑岩体形成特大型矿床的实例,如Oyu Tolgoi成矿岩体面积可达5 km²。翟裕生等(1991)^[87]基于地球物理、遥感等资料的综合,描述了长江中下游一带成矿斑岩体与岩基之间的关系,即成矿地带多具有多级环形构造,分别代表岩基、岩浆柱、岩浆房和蚀变矿化晕,多级环形构造中最低一级的环与矿化蚀变关系密切。Richards(2005)^[88]再一次讨论了这个问题,并建立了一个新的模型,这一模型与翟裕生(1991)^[87]模型中的基本思维是相似的,只是后者在该图上将蚀变分带的内容加了上去。

根据斑岩型矿床、矽卡岩型矿床与热液脉型矿床之间在时间和空间上的联系,来寻找未知矿床的思维在二十世纪八十年代的中国就已起步。芮宗瑶(1984)^[7]指出:矿体在斑岩体内部和斑岩体围岩中分配的比例与它的侵位深度不同有关,馬拉松多斑岩体推测侵位深度大约为0.5 km,几乎全部矿体产于斑岩体中;玉龙斑岩铜矿成矿斑岩代表中等侵位深度,推测大约为1.5 km,2/3矿体产于斑岩体中,1/3矿体产于围岩中;德兴矿田的铜厂和富家坞矿床成矿斑岩代表中深侵位,推测侵位深度大约为3 km,1/3矿体产于斑岩体内,2/3矿体产于围岩中。芮宗瑶等(1984)^[7]认为矿化在空间上具有明显的分带性:矿化结构由下而上为浸染状-细脉浸染状-大脉状;共生矿物组合由下而上为钾硅酸盐、硬石膏、石英-硫化物、绢云母、硫化物-绿泥石、碳酸盐、硫化物;成矿金属组合由下而上为Mo(Sn、Bi、W)-Cu(Au、Ag)-Pb、Zn(Ag)-Co、Ni、Mn。翟裕生等(1991)^[87]通过对长江中下游成矿带的研究,提出这一带Cu-Mo-Au成矿亚系列成矿模式,阐述了斑岩型、矽卡岩型等5种类型矿体呈现“多位一体”产出的特点。20世纪90年代以来,国外从成矿带构造环境和演化历史着眼,将浅成低温金银矿与斑岩型铜矿进行整体研究和总体勘查,在环太平洋成矿域,尤其是东南亚和安第斯山斑岩型铜矿、浅成低温金银矿的勘查取得了重大突破,新发现了一批世界级的铜金矿床,如菲律宾Lepanto-Far Southeast铜金矿,Cu金属量为3.6 Mt,Au金属量达550 t;印尼Carasberg-Ertsberg斑岩型金铜矿,Cu金属量达21.42 Mt,Au金属量达2 400 t。Hedenquist和Lowenstern(1994)^[89]在研究菲律宾碧瑶等铜金矿床的基础上,建立了其上金下铜的垂向分带是热液成

矿系统演化不同阶段的产物的成矿模式,从而建立了斑岩型铜矿与浅成低温热液型金矿之间的联系。在中国国内也发现了一些与之类似的矿床,如福建紫金山,由远离斑岩体达数千米的碧田低硫型浅成热液矿床-紫金山主矿体上部高硫型热液金矿化-深部斑岩铜矿化,构成一个整体。翟裕生等(1999)^[90]倡导的成矿系统理论,基于系统论研究思维,将控矿要素、成矿作用过程、形成的矿床系列和异常系列,以及成矿后变化保存等四方面基本内容作为一个整体加以研究。对于斑岩铜矿及相关的浅成低温热液矿床而言,保存条件非常关键,这可能是除古亚洲洋外,大多数斑岩铜矿赋存于中生代及之后的侵入体中的原因,当然极端条件下的例子也有,如保存于加拿大Abitib绿岩带中的斑岩矿床^[91]。

陈毓川等(2003)^[92]在成矿系列的基础上进一步提出区域成矿谱系——即特定区域内地质构造演化全过程中成矿系列的演化和分布规律。它实质上研究的仍是矿床在空间的时空分布和演化规律,只是以成矿系列为单位。其方法学为:以区域地壳演化历史为背景,以区内众多重要矿床成矿基本事实为基础,配合成岩成矿和相关地质事件年龄精测,通过对区域内成矿作用的深入分析、广泛对比、系统总结、全面归纳,以矿床成矿系列为基本单位建立时间坐标上的成矿作用历史演化序列,揭示其空间分布规律,最终达到发展矿床地质理论和指导勘查找矿两个目标。陈毓川等(1995,2003)^[92-93],王登红等(2002)^[94]建立了华北陆块北缘、桂北、阿尔泰等地的区域成矿谱系格架。国外学者在一些全球最重要的铜金成矿省开展了大量关于矿床区域时空分布规律的研究。如据芮宗瑶(2001)^[95]介绍:国外学者认为智利西部铜金矿带矿床受纳兹卡板块向南美板块俯冲和近南北向走滑断裂带双重构造因素控制。板块的汇聚作用引发走滑断裂系统长期活动,从190~6 Ma都有深源岩浆活动和金属矿床的形成。成矿分带性明显,从海向陆,可以依次划分内带、中带、外带,成矿时代越来越新,并由海向陆,成矿类型由铜金型-铜型-铜钼型-金银矿变化。内带:离现代海槽100~160 km,产有一系列浅成热液、斑岩-矽卡岩、脉状铜金矿床,时代为190~110 Ma;中带:距内带50 km,处于走滑断裂带分布区,是世界上最大的斑岩型铜矿带,成矿时代为59~31 Ma;外带:距中带50 km以上,发育一系列

斑岩型和浅成热液脉状 Au-Ag 矿床,成矿时代为 25~5 Ma。

基于地球化学和地球物理方法寻找斑岩铜矿已有大量成功的实例。以中小比例尺找矿而言,俄罗斯、澳大利亚及中国的多宝山等斑岩铜矿的找矿研究指示,航空放射性钾、铀、总道异常高值叠合区是重要的斑岩铜找矿远景区。另外对于中比例尺的靶区优选而言,多宝山等地的试验效果指示,航空物探综合站测量中多频道航电异常相配合是普查斑岩型铜(金)矿的有效物探方法之一。郑有业等^[6]从地球化学方面对冈底斯带的斑岩铜矿找矿进行了探索,确定 Cu-Mo-Ag 组合元素异常对冈底斯带的斑岩铜矿具有诊断作用,并通过地球化学数据处理,导致了西藏朱诺等大型斑岩铜矿的发现。激发极化法被国内外矿床勘查工作者广泛应用于斑岩铜矿找矿工作中,新疆地矿局在东天山地区寻找斑岩铜矿的过程中还建立了斑岩、孔雀石化和激电异常相结合的“三位一体”的找矿模式^[34]。自 20 世纪 80 年代后,井内瞬变电磁方法在寻找盲矿体方面发挥了重要作用。

遥感方法作为一种重要的工具,在斑岩铜矿找矿过程中正在发挥越来越重要的作用。张玉君等(2007)^[9]利用美国国家航天局 1999 年 12 月发射的对地观测系统卫星(Terra)携带的多光谱观测仪 ASTER 获得的多达 14 个波段的遥感数据,在矿床地质学和蚀变矿物光谱参数特征研究的基础上,提取了 Oyu Tolgoi 斑岩铜金矿床及其邻近地区羟基异常,显示蚀变和矿床矿化部位吻合较好。

成矿地质背景的研究和地质填图在区域和大比例尺成矿预测中都曾发挥过重要作用,如郑有业等^[6]最初是通过对比,确定冈底斯弧具有形成大型、特大型斑岩铜矿前景,从而坚持在这一带开展深入的地质工作,最终在冈底斯带取得了驱龙、朱诺等大型-特大型斑岩铜矿找矿的重大突破。

找矿过程中,勘查者经常处于信息不全和不对称的条件,如何在信息不对称的情况下,做出正确的勘查选择,是所有矿床勘查者最为关心的一件事。自 20 世纪 90 年代始,美国地调局以成矿地质背景、矿床找矿模式、品位-吨位模式为基础,发展出了一种新的三部式成矿预测方法。原地质矿产部于上世纪 90 年代编著的中国各省矿床发现史和施俊法等(2005)^[9]对全球重要金属矿床发现史的回溯,

均有可能为找矿决策过程提供一些有益的启示。

6 总结与展望

总之,近年来,国内外在斑岩铜矿成矿岩浆岩识别、矿质来源、成矿构造机制、找矿方法等方面取得了明显的突破,主要表现为:斑岩铜矿主要与埃达克(质)岩相关,成矿物质来源于地幔,岩体酸碱度对铜矿床伴生金属组分具有控制作用,斑岩铜矿床的矿化是通过多阶段独立流体演化过程中铜质的逐步富集实现的。成矿主要发生在汇聚大陆边缘,但造山带和非造山环境也可形成斑岩铜矿,其形成主要与构造机制转换诱发的地幔熔融、地壳变形等一系列可能导致岩浆快速上升和侵位的有利条件有关,成矿系列、成矿系统等系统论研究思维的引入和一系列包括地质、构造、遥感、航空物探、矿区地球化学等一系列新老技术的综合运用,对成功找矿具有重要意义。

尽管在斑岩铜矿成矿和找矿研究方面取得了很大的进展,但仍存在许多问题:(1)如全球斑岩铜矿产出的大地构造环境的多样性(如岛弧带、大陆边缘活动带、大陆内部造山带或深大断裂带附近等),用任何某一种成矿理论来解释,都存在局限性,其内在的原理还有待于进一步的揭示;(2)笔者最近在中亚造山带北山地带的研究工作中已发现多个斑岩铜矿成矿过程中存在壳幔物质混合,不同比例的壳幔物质混合与地壳厚度、成矿金属类型可能存在联系,但已有成矿理论对壳幔物质混合对斑岩铜矿成矿影响的研究还非常不够;(3)在国内外斑岩铜矿区勘查实践中,一般存在近一半的钻探白眼,反映大比例尺勘查过程中勘查技术、乃至成矿理论指导等方面还有许多需要完善和探索之处。上述存在的问题构成了今后斑岩铜矿成矿理论和找矿技术进一步研究的重要方向,上述问题的解决将促成斑岩铜矿成矿理论一次质的飞跃,对全球斑岩铜矿、尤其是国内斑岩铜矿的找矿具有重要意义。

参考文献:

- [1] 叶天竺.适应我国经济社会发展需要调整战略性矿产资源勘查部署[J].国土资源通讯,2005(4-5):53-56.
- [2] 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,2007a,26(2):221-229.

- [3] 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.
- [4] McKinstry H E, Mining Geology [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1948, 1-680.
- [5] Lowell J D and guilbert J M. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in Porphyry ore deposits [J]. Economic Geology, 1970, 65:373-408.
- [6] Hollister V F, Potter R R, Barker A L. Porphyry-type deposits of the Appalachian orogen [J]. Economic Geology, 1974, 69(5): 618-630.
- [7] 芮宗瑶,黄崇轲,齐国明.中国斑岩铜(钼)矿床[M].北京:地质出版社,1984.
- [8] Kerrich R, Goldfarb R, Groves D, et al. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. Science in China(series D), 2000, 43(supp):1-68.
- [9] Ishihara S. The magnetite series and ilmenite series granitic rocks [J]. Mining Geology, 1977, 27(2):293-305.
- [10] Kirkham R V, Sinclair W D. Porphyry copper, gold, molybdenum, tungsten, tin, silver. In: Eckstrand O R, Sinclair W D, Thorpe R I, ed. Geology of Canadian mineral deposit types [M]. Ottawa: Geological Survey of Canada, 1995, 421-446.
- [11] Audetat A, Pettker 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. Lithos, 2004, 72(3-4): 147-161.
- [12] Davidson P, Kamenetsky V, Cooke D R, et al. Magmatic precursors of hydrothermal fluids at the Rio Blanco Cu-Mo deposit, Chile: Links to silicate magmas and metal transport. Economic Geology, 2005, 100(5):963-978.
- [13] Mason D R. Compositional variation in ferromagnesian minerals from porphyry copper generating and barren intrusions of the Western Highlands, Papua New Guinea. Economic Geology, 1978,73(5):878-890.
- [14] Imai A. Metallogenesis of porphyry Cu deposit of the western Luzon arc, Philippines: K-Ar ages, SO₂ contents of microphenocrystic apatite and significance of intrusive rocks [J]. Resource Geology, 2002, 52(2):147-161.
- [15] Imai A. Variation of Cl and SO₂ contents of microphenocrystic apatite in intermediate to silicic igneous rocks of Cenozoic Japanese island arcs: Implication for porphyry Cu metallogenesis in the Western Pacific Island arcs [J]. Resource Geology, 2004, 54(3):357-372.
- [16] 姚春亮,陆建军,郭维民.江西省铜厂斑岩铜矿磷灰石世代和成分特征研究[J].矿物学报,2007b,27(1):31-40.
- [17] McInnes B I A, Cameron E M. Carbonated, alkaline hybridizing melts from a sub-arc environment: Mantle wedges samples from the Tabar-Lihir-Tanga-Feni arc, Papua New Guinea [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 122(1-2):125-141.
- [18] 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.
- [19] Ballard J R, Palin J M, Campbell I H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 144(3):347-364.
- [20] 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.
- [21] Richards J P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation [J]. Economic Geology, 2003, 98(8): 1515-1533.
- [22] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. Nature, 1990, 347:662-665.
- [23] Thieblemont D, Stein G, Lescuyer J-L. Epithermal and porphyry deposits: the adakitic connection [J]. Earth & Planetary Sciences, 1997, 329:243-250.
- [24] Sajona F G, Maury R C. Association of adakites with gold and copper mineralization in the Philippines [J]. Earth & Planetary Sciences, 1998, 326(1):27-34.
- [25] Oyarzun R, Marquez 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, 36:794-798.
- [26] Defant M J, Xu J F, Kepezhinskas P, et al. Adakites: some variations on a theme [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18:129-142.
- [27] 张旗,王焰,钱青,等.中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J].岩石学报,2001,17(2):236-244.
- [28] 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):195-204.
- [29] 王强,赵振华,许继锋,等.扬子地块东部燕山期埃达克质(adakite-like)岩与成矿[J].中国科学D辑,2002,32(增刊):127-136.
- [30] 侯增谦,高永丰,孟祥金,等.西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带:埃达克质斑岩成因与构造控制[J].岩石学报,2004,20(2):239-248.
- [31] 曲晓明,侯增谦,李佑国.冈底斯碰撞造山带中发现含矿埃达克岩[J].矿床地质,2002,21(增刊):215-218.
- [32] 张旗,王焰,刘洪涛,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.

- [33] Li J W, Zhao X F, Zhou M F, et al. Origin of the Tongshankou porphyry-skarn Cu-Mo deposit, eastern Yangtze Craton, eastern China: geochronological, geochemical, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints. *Mineralium Deposita*, 2008, 43(3):315–336.
- [34] 王福同, 庄道泽, 胡建卫, 等. 物探在新疆土屋地区铜矿找矿中的应用-兼谈斑岩铜矿“三位一体”的找矿模式[J]. 中国地质, 2001, 28(3):40–47.
- [35] 芮宗瑶, 王福同, 李恒海, 等. 新疆东天山斑岩铜矿带的新进展[J]. 中国地质, 2001, 10:11–16.
- [36] 张连昌, 秦克章, 英基丰, 等. 东天山土屋-延东斑岩铜矿带埃达克岩及其与成矿作用的关系[J]. 岩石学报, 2004, 20(2):259–268.
- [37] 张旗. 埃达克岩研究的回顾和前瞻[J]. 中国地质, 2008, 35(1):32–39.
- [38] 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 等. 胶东地区郭家岭花岗闪长岩的地球化学特征及成因[J]. 岩石学报, 2003, 19(4):692–700.
- [39] Castillo P R, Janney P E, Solidum R U. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134:33–51.
- [40] Macpherson C G, Dreher S T, Thirwall M F. Adakites without slab melting: high pressure processing of basaltic island arc magma, Mindanao, the Philippines [J]. *Earth and Planet Science Letters*, 2006, 243(3–4):581–593.
- [41] Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism [J]. *Tectonophysics*, 1993, 219(1–3):177–189.
- [42] Wang Q, Xu J F, Zhao Z H, et al. Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent [J]. *Geochemical Journal*, 2004, 18:417–434.
- [43] Wang Q, McDermott F, Xu J F, et al. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracontinental setting [J]. *Geology*, 2005, 33(6):465–468.
- [44] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling continental crust in the North China craton [J]. *Nature* 2004, 432:892–897.
- [45] Castillo P R. An overview of adakite petrogenesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51:257–268.
- [46] Yogodzinski G M, Kelemen P B. Slab melting in the Aleutians: implications of an ion probe study of clinopyroxene in Primitive adakite and basalt [J]. *Earth and planetary Science Letters*, 1998, 158:53–65.
- [47] Kay S M and Mpodozis C. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust [J]. *GSA Today*, 2001, 11(3):4–9.
- [48] Campos E, Touret J L R, Nikogosian I, et al. Overheated, Cu-bearing magmas in the Zaldívar porphyry-Cu deposit, northern Chile: geodynamic consequences [J]. *Tectonophysics*, 2002, 345(1–4):229–251.
- [49] 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.
- [50] Sillitoe R H. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits [J]. *Economic Geology*, 1972, 67(2):184–197.
- [51] Sillitoe R H. Andean mineralization: a model for the metallogeny of convergent plate boundaries [A]. In: Strong D F ed., *Metallogeny and Plate Tectonics* (2nd ed.). Geological Association of Canada special paper, 1976, 14:58–100.
- [52] Tatsumi Y, Hamilton D L, Nesbitt R W. Chemical characteristics of fluid phase from the subducted lithosphere: Evidence from high-pressure experiments and natural rocks [J]. *J. Volcano Geotherm. Res.*, 1986, 29:293–309.
- [53] Gill J B. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics* [M]. Berlin:Springer-Verlag, 1981, 358p.
- [54] Hawkesworth C J, Gallagher K, Hergt J M, et al. Mantle and slab contributions in arc magmas [J]. *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, 1993, 21:175–204.
- [55] Perfit M R, Gust D A, Bence A E, et al. Chemical characteristics of island arc basalts: Implications for mantle sources [J]. *Chemical Geology*, 1980, 30:227–256.
- [56] Woodhead J, Eggins S, Gamble J. High field strength and transition element systematics in island and back-arc basin basalts: Evidence for multi-phase extraction and a depleted mantle wedge [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 1993, 114:491–504.
- [57] Solomon M. Subduction, arc reversal and the origin of porphyry copper-gold deposits in island arcs [J]. *Geology*, 1990, 18:630–633.
- [58] Titley S R and Beane R E. Porphyry copper deposits: Part I Geology settings, petrology, and tectogenesis [J]. *Economic Geology*, 1981, 75th Anniversary Volume:214–269.
- [59] Richards J P and Kerrich R. Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis [J]. *Econ. Geol.*, 2007, 102(4):537–576.
- [60] Bouse R M, Ruiz J, Titley S R, et al. Lead isotope compositions of Late Cretaceous and Early Tertiary igneous rocks and sulfide minerals in Arizona: Implications for the sources of plutons and metals in porphyry copper deposits [J]. *Econ. Geol.*, 1999, 94(2):211–244.
- [61] Cooke D R, Hollings P, Walsh J L. Giant porphyry depos-

- its: Characteristics, distribution, and tectonic controls [J]. *Econ. Geol.*, 2005, 100(5):801–818.
- [62] Mueller D and Groves, D I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization [M]: Berlin: Springer, 3rd edition, 2000, 252p.
- [63] Kesler S E, Sutter J F, Issigonis M J, et al. Evolution of porphyry copper mineralization in an oceanic island arc, Panama: *Econ. Geol.* 1977, 72:1142–1153.
- [64] Candela P A and Holland H D. A mass transfer model for copper and molybdenum in magmatic hydrothermal systems: The origin of porphyry type ore deposits [J]. *Econ. Geol.*, 1986, 81(1):1–19.
- [65] Candela P A. A review of shallow, ore-related granites: Textures, volatiles, and ore metals [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(12):1619–1633.
- [66] Robb L. Introduction to ore-forming process [M]. Oxford: Blackwell. 2005, 1–166.
- [67] Taylor H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydro thermal alteration and ore deposition [J]. *Econ. Geol.*, 1974, 69(6):843–883.
- [68] Harris A C and 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.
- [69] Ulrich T, Gunther D, Heinrich C A. Evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajodela Alumbrera, Argentina [J]. *Econ. Geol.*, 2001, 96(8):1743–1774.
- [70] Harris A C, Golding S D and White N C. Bajodela Alumbrera copper-gold deposit: Stable isotope evidence for a porphyry-related hydrothermal system dominated by magmatic aqueous fluids [J]. *Econ. Geol.*, 2005, 100(5):863–886.
- [71] Calagari A A. Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic-phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21(7):767–780.
- [72] Khashgerel Bat-Erdene, Rye, Robert O, Hedenquist J W, et al. Geology and reconnaissance stable isotope study of the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au system, south Gobi, Mongolia [J]. *Economic Geology*, 2006, 101(3):503–522.
- [73] 杜琦, 赵玉民, 卢秉刚, 等. 多宝山斑岩铜矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 1988, 1–386.
- [74] Sillitoe R H. Gold-rich porphyry copper deposits: geological model and exploration implications [A]. *Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canada Special Paper 40*, 1993, 465–478.
- [75] Sillitoe R H. Major regional factors favoring large size, high hypogene grade, elevated gold content and supergene oxidation and enrichment of porphyry copper deposits [A]. In: Porter T M, ed. *Porphyry and hydrothermal copper and gold deposits: A Global Perspective*, 1998, 21–34.
- [76] Camus F. The Andean porphyry systems [A]. In: Cooke D R and Pongratz J ed., *Special Publication - Centre for Ore Deposit and Exploration Studies (CODES)*, Hobart Tasmania Australia (AUS): University of Tasmania, National Key Centre, 2002, 4:5–21.
- [77] Corbett G J, Leach T M. Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration and mineralization [M]. *Society of Economic Geologists, Special Publication*, 1998, 6:1–240.
- [78] Richards J P, Boyce A J and Pringle M S. Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization [J]. *Economic Geology*, 2001, 96 (2):271–305.
- [79] James D, and Sacks I S. Cenozoic formation of the central Andes: A geophysical perspective [A]. *Society of Economic Geologists Special Publication*, 1999, 7:1–25.
- [80] Murphy J B. Flat slab subduction in the geological record: Consideration of modern analogues [A]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 2001, 33(6):208.
- [81] Rosenbaum G, Giles D, Saxon M, et al. Subduction of the Nazca Ridge and the Inca Plateau: Insights into the formation of ore deposits in Peru [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 239(1–2):18–32.
- [82] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展 [J]. *地学前缘*, 2004, 11(1):45–55.
- [83] 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等. 青藏高原碰撞造山带: III后碰撞伸展成矿作用 [J]. *矿床地质*, 2006, 25(6):629–651.
- [84] Baker R C, Guilbert J M. Regional structural control of porphyry copper deposits in northern Chile [A]. *Abstracts with Programs of 1987 Annual Meeting and Exposition of Geological Society of America-19*, Geological Society of America, 1987, 578p.
- [85] Sillitoe, R. H., Tectonic segmentation of the Andes: implications for magmatism and metallogeny [J]. *Nature*, 1974, 250: 542.
- [86] 郑有业. 西藏冈底斯斑岩铜矿带成矿规律及勘查选区研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2007.
- [87] 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, 235p.
- [88] Richards J P. Cumulative factors in the generation of giant calc-alkaline porphyry Cu deposits [A]. In: Porter T M, ed. *Super porphyry copper and gold deposits: A global perspective*. Linden Park, South Australia: PGC Pub-

- lishing, 2005, v1:7-25.
- [89] Hedenquist J W, Lowenstern J B. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits [J]. *Nature*, 1994, 370(18): 519-527.
- [90] 翟裕生, 邓 军, 李晓波. 区域成矿学[M]. 北京: 地质出版社, 1999, 1-268.
- [91] Barley M E, Pickard A L, Hagemann S G, et al. Hydrothermal origin for the 2 billion year old Mount Tom Price giant iron ore deposit, Hamersley Basin, Western Australia [J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34: 784-789.
- [92] 陈毓川, 薛春纪, 王登红, 等. 华北陆块北缘区域矿床成矿谱系探讨[M]. 高校地质学报, 2003, 9(4): 520-535.
- [93] 陈毓川, 毛景文, 徐志刚, 等. 桂北地区矿床成矿斜列和成矿历史演化轨迹[M]. 桂林: 广西科技出版社, 1995, 1-433.
- [94] 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 阿尔泰山成矿省的成矿系列及成矿规律研究[M]. 北京: 原子能出版社, 1-493.
- [95] 张玉君, 杨建民, 姚佛军. 多光谱遥感技术预测矿产资源的潜能-以蒙古国欧玉陶勒盖铜金矿床为例. 地学前缘, 2007, 14(5): 63-70.
- [96] 施俊法, 姚华军, 李友枝, 等. 信息找矿战略及勘查百例[M]. 北京: 地质出版社, 2005, 1-337.

Review and Progress: Theory and Exploration Technology to Porphyry Copper Deposit

XU Rong-ke¹, SHAN Liang², ZHENG You-Ye^{1,3}, ZHANG Yu-lian⁴, PANG Ying-chun⁵,
MA Guo-tao⁶, CAO Liang⁵ and LIU Xin-yang¹

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Development Research Center of China Geology Survey, Beijing 100037, China; 3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China; 5. Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan 430205, China; 6. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, China)

Abstract: The metallogenic theory and prospecting methods of porphyry copper deposit is very useful for exploration this most important copper deposit type. This paper gathered recent literature of porphyry copper deposit in the aspect of geochemical characteristics of related magmatic rocks, origin of ore-forming material, evolution of mineralizing fluid, metal component of ore mineral, tectonic background and dynamics, prospecting theory and technology et al. to promoting the metallogenic theory research and exploration works. The porphyry copper deposits are intimately related to adakite (or adakite-like) rocks, the ore-forming elements of which are mainly come for the mantle, but the concomitant metal elements are determined by the alkalinity-acidity of the magmatic rocks. The porphyry copper deposit is formed by the stepwise enrichment of copper in the stages evolution of independent ore-forming fluid. Although the converging continental margin is the favorable tectonic environment for porphyry copper deposit, those deposits also can formed in the orogenic belts or anorogenic belts, where the magma formed by the mantle melting and crustal deformation which is induced by tectonic mechanism transition can uplift and emplace quickly to the upper crust. The use of theory of metallogenic series and metallogenic system, combined with a series of new or old prospecting skills, such as geology analysis, structure research, remote sensing, airborne geophysical prospecting, and geochemical exploration, et al., have important meaning for the successful ore prospecting. Some problems, such as the influence of variety of tectonic environment and magma mingling for mineralization, and applications of different prospecting methods, are desiderating thorough research in the future.

Keywords: porphyry copper deposit; magmatism; origin of ore-forming material; associated elements, tectonic background; Exploring methods; review; expectation