

doi:10.3799/dqkx.2011.025

# 斑岩型矿床——非传统矿产资源研究的重要对象

张寿庭, 赵鹏大

中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

**摘要:** 多年来, 斑岩型矿床在传统意义上被认为是铜和钼的主要来源。然而, 斑岩型矿床成岩成矿地质条件复杂, 矿化类型丰富, 尤其是对一些大型—超大型斑岩矿床, 均为多元素综合性的巨型矿床, 除传统意义上的铜、钼等矿产外, 非传统矿产的成矿—找矿潜力巨大, 包括: 金、银、锡、钨、铋、铅、锌、铼、铀、钽、硫、硒、碲、铂族元素、磁铁矿等, 金红石和稀有金属如钽、铌等也值得关注。开展斑岩型矿床成岩成矿地质背景、矿床地质特征与非传统矿产矿化富集分布规律研究, 总结斑岩型矿床非传统矿产资源潜力预测评价标志, 指导找矿预测与资源潜力评价, 具有重要的理论价值和现实意义。

**关键词:** 斑岩型矿床; 矿床地质; 非传统矿产; 资源潜力评价。

**中图分类号:** P588.1

**文章编号:** 1000-2383(2011)02-0247-08

**收稿日期:** 2010-10-25

## Porphyry Ore Deposits: Important Study Subjects of Nontraditional Mineral Resources

ZHANG Shou-ting, ZHAO Peng-da

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** For many years, porphyry ore deposits have been regarded as the primary sources of the Cu and Mo in a traditional way. However, the geologic conditions of the diagenesis and metallogenesis of the porphyry ore deposits are complex with various mineralization types. Some of the large-superlarge deposits are multielemental and comprehensive. In addition to the Cu, Mo porphyry ore deposits, the metallogenesis and prospecting on nontraditional resources have great potential, including Au, Ag, Sn, W, Bi, Pb, Zn, Re, U, Co, S, Se, Te, PGE, magnetite, etc; rutile and rare metals, such as Ta, Nb are also worth paying attention to. It is of important theoretical value and practical significance to study the diagenesis and metallogenesis of geological background, geological characteristics, mineralization of distribution and the enrichment of a nontraditional view on the porphyry ore deposits; it is meaningful to summarize the indicator of prognosis and assessment on the nontraditional mineral resources, and to guide the prospecting and resource potential assessment on the porphyry ore deposits.

**Key words:** porphyry ore deposit; ore deposit geology; nontraditional mineral resources; resource potential assessment.

非传统矿产资源 (nontraditional mineral resources) 是指受目前经济、技术以及环境因素的限制, 尚难发现和尚难工业利用的矿产资源, 以及尚未被看作矿产和尚未发现其用途的潜在矿产资源。非传统矿产资源是一个动态的概念, 随着技术、经济、环境、市场及需求的变化, 非传统矿产资源可以转化为传统矿产资源 (赵鹏大, 2003)。

以斑岩铜矿为例, 在 1917 年报道当时钻探出来的铜品位达 1.2% 的斑岩铜矿原生带矿石时, 因矿石品位太低不能开发利用而被称为“胚胎矿”。这一昔日的非传统矿产, 已成今日最重要的铜矿工业

类型。

多年来, 斑岩型矿床在传统意义上被认为是铜和钼的主要来源, 这两种金属的世界产量和储量分别接近 60% (铜) 和 95% (钼)。近 20 余年来, 随着人们认识程度和矿产开发利用水平的进步, 大家已经开始意识到其他的金属矿产作为斑岩型矿床的主要成分或者重要的伴生成分富集出现。Sillitoe (1983) 曾研究认为: 在斑岩型矿床中, 相信存在一些被认为能进一步开采的潜在的“非传统金属矿产”, 并着重强调金、锡、钨、银、铅、锌和其他次要的伴生物的开采潜力。

**基金项目:** 国家“十二·五”科技支撑计划项目 (No. 2010BAE00281-6)。

**作者简介:** 张寿庭 (1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事固体矿产勘查评价等方面教研工作, E-mail: zst@cugb.edu.cn

事实上,近些年来斑岩型矿床的矿产类型已经发生很大的变化,从以往熟知的斑岩型铜矿、斑岩型钼矿,到后来的斑岩型锡矿、钨矿、金矿、铅锌(银)矿等。

## 1 斑岩型矿床地质特征概述

斑岩型矿床是指在时间上、空间上和成因上与钙碱性的浅成或超浅成相的中酸性斑岩体有关的细脉浸染型矿床的通称,目前主要包括斑岩型铜矿、斑岩型钼矿、斑岩型锡矿、斑岩型钨矿、斑岩型金矿、斑岩型铅锌(银)矿等(郑明华等,1993)。

多年来,国内外学者对斑岩型矿床的成岩成矿理论与找矿实践都给予高度重视,并在各个领域都取得了丰硕的研究成果。近年来斑岩型矿床的成岩成矿理论研究也是大型—超大型矿床研究的重点与热点,现将其主要成果认识概述如下。

### 1.1 斑岩型矿床成岩成矿的地质构造背景和成岩成矿物质来源复杂多样

众所周知,斑岩型矿床主要产于大洋板片俯冲产生的岛弧和陆缘弧环境。其中,岛弧环境的斑岩型矿床在环西太平洋地区广泛分布,如印尼的 Batu Hijau 铜矿和菲律宾的 Lepanto-FSE 铜—金矿等矿床(Meldrum *et al.*, 1994; Jr *et al.*, 1995);陆缘弧环境的斑岩型矿床,典型代表如美国西部的 Bingham 铜矿、智利的 Chuquicamata 铜矿、印度尼西亚的 Grasberg 铜—金矿、巴布亚新几内亚的 Ok Tedi 铜—金矿等矿床(Clark, 1990; Rush and Seegers, 1990; Tooker, 1990; Macdonald and Arnold, 1994; Babcock *et al.*, 1995)。

近年来,Hou *et al.* (2003)、侯增谦(2004)研究强调,除了岛弧和陆缘弧是斑岩型矿床产出的重要环境外,大陆碰撞造山带也具有产出斑岩型矿床的巨大潜力,我国西藏玉龙斑岩铜矿带和冈底斯斑岩铜矿带即为典型代表。据此,按矿床产出的构造环境,可以分为弧造山型斑岩矿床和碰撞造山型斑岩矿床;其中,弧造山型含矿斑岩主要为钙碱性和高钾钙碱性,而碰撞造山型含矿斑岩则主要为高钾钙碱性和橄榄安粗质(shoshonitic)。

已有众多研究成果(Titey and Beane, 1981; 芮宗瑶等,1984; 杜琦等,1988; 郑明华等,1993; 张玉泉等,1998; 曲晓明等,2001; Richard *et al.*, 2001; Halter *et al.*, 2002; 夏斌等,2002; Li *et al.*, 2006)证实:关于斑岩型矿床的物质成分、组成特征和来源,

主要与上地幔物质有关,含矿斑岩具有来源深而就位浅的特征;但当从上地幔上升的含矿岩浆及其派生热液进入大陆地壳以后,从陆壳硅铝层中汲取部分甚至是大量的成岩成矿物质,不但是事实而且也是十分重要甚至是必要的。

李文昌等(2010)研究“三江”地区斑岩型矿床认为:铜多金属矿化的斑岩型矿床既可以形成于岛弧造山的挤压环境下,也可以形成于陆块边缘的引张环境中,但含矿斑岩均来自深源岩浆,而最后的流体成矿又发生在地壳的浅部层位,这“一深一浅”的作用决定了成矿流体与金属矿质具有多源性的特征。

由于成岩成矿地质构造背景、产出部位、形成过程的差异以及受地壳物质影响程度的不同,决定了斑岩体岩石学、矿物学、地球化学以及矿化类型特征等方面的差异变化。

### 1.2 斑岩型矿床在时间、空间的分布具有明显的规律性

在时间分布上,目前已知世界斑岩型矿床绝大多数形成于中生代—新生代,其次为古生代,少部分形成于前寒武纪。据统计,中—新生代的超大型斑岩型铜矿床占整个地质历史时期斑岩铜矿的 90% 以上(夏斌等,2002)。

在空间分布上,已知世界斑岩型矿床主要分布在东太平洋成矿带、西太平洋成矿带、特提斯—喜马拉雅成矿带、蒙古—鄂霍次克成矿带(古亚洲成矿带)等四大成矿带,在四大成矿带中,有 3 个带经过或延伸到我国境内。

不同时代的斑岩型矿床分布于不同地区,中—新生代斑岩型铜矿主要分布于环太平洋成矿带和特提斯—喜马拉雅成矿带;古生代的矿床主要分布于古亚洲成矿带,以及北美西部阿帕拉契亚造山带、澳大利亚的塔姆奥尔特—亚罗勒岩带等;前寒武纪斑岩铜矿主要分布于古老大陆边缘,如我国中条山铜厂峪斑岩铜矿、加拿大 Abitibi 绿岩带中的斑岩铜矿、澳大利亚太古代普利巴尔地块中的斑岩铜矿(夏斌等,2002)。

此外,斑岩型矿床,具有明显的矿化蚀变分带特征与规律,如:1968 年 J. D. 洛厄尔总结的“典型斑岩铜矿矿化分带”模式,1973 年 R. H. 西里托提出的“理想的斑岩铜矿地质特征”模式,以及近些年来我国学者陆续研究总结的一些主要的典型斑岩型矿床的矿化蚀变分带模式等,都揭示了斑岩型矿床具有明显的矿化分带现象与规律,对找矿实践也具有重要的指导作用。

### 1.3 斑岩型矿床多为规模巨大的多元素综合性矿床

斑岩型矿床通常具有如下特点:(1)矿床常成群、成带分布,规模巨大;(2)矿床埋藏深度一般较浅,适于大规模机械化露天开采;(3)矿石品位较低,但矿化分布较均匀;(4)矿石工艺性能较稳定,可选性较好;(5)多元素共伴生成分复杂,可供综合利用,除主要矿产 Cu、Mo、W、Sn、Au、Pb、Zn 外,常见的还富含 Ag、Re、Co、S、Se、Te 等金属-非金属元素,以及其他贵金属和稀有金属等矿产,资源潜力与综合开发利用价值大。

## 2 斑岩型矿床非传统矿产资源潜力浅析

如上所述,斑岩型矿床往往是多元素综合性矿床,除传统意义上斑岩型 Cu 和 Mo 矿产外,一些“非传统矿产”也具有极大的资源潜力。

在国外,例如:美国的 Morenci、Chino、Inspiration、Bingham Canyon,墨西哥的 Cananea,厄瓜多尔的 Chaucha,智利的 El Salvador,菲律宾的 Lepanto、San Antonio、Atlas、Dizon 等,这些斑岩型 Cu (Mo)矿床中,以往尽管人们常把 Au、Ag 等矿产视为其伴生物,但实际上,这些传统意义上的斑岩型 Cu(Mo)矿床,产出 Au 的资源规模均达大型乃至特大型。另外,一些贵金属、稀有金属等也常具有可观的开发利用前景。

在我国,类似的情况也很普遍,现将我国部分代表性斑岩型矿床概况列述如下:

(1)江西德兴斑岩型 Cu 矿:矿田内的 3 个矿床(铜厂、朱砂红、富家坞)均是规模巨大的综合性矿床,各矿床的矿物成分十分复杂,其金属矿物多达 50 多种,矿石中有益组分以 Cu 为主,并有 Mo 矿伴生,其次还有 S、Au、Ag、Re、Se、Te、Ir、Pd、Co、Ti

等;其中,伴生 Au 的储量达到特大型规模,S、Mo、Re 的储量均为大型。以铜厂铜矿为例,Cu 储量 524.41 万 t,品位 0.454%;Mo 储量 120 450 t,品位 0.0114%;Au 储量 18.98 t,品位 0.18 g/t;Ag 储量 1 238 t,品位 1.17 g/t;另外,辉钼矿中含 Re 高达 1 419 g/t,原矿含铂族元素总量为 0.012 3 g/t,铜硫混合精矿含铂族元素为 0.069 1 g/t,钼精矿含铂族元素为 1.23 g/t;均可以综合利用(黄崇轲等,2001)。

(2)内蒙古乌奴格吐山斑岩型 Cu-Mo 矿:矿石中主要工业元素为 Cu 和 Mo,伴生有益组分为 Ag、Au、Re 等,还有 Pb、Zn、Co、Ni、Pt、Pd、As、Ti、Mg、Bi、Se、Sb、Sn、Te 等。其中,Cu 的储量 223.2 万 t,Mo 的储量 25.8 万 t,Ag 的储量 175 吨,Re 的储量可达 99 吨(黄崇轲等,2001)。

(3)黑龙江多宝山斑岩型 Cu 矿:除 Cu 和 Mo 已构成工业矿体外,Ag、Au、Se、Re 和 Pt 族(Os、Pd、Ir、Ru 等)均已达到伴生元素的工业指标。其中,Cu 的储量 237.26 万 t,品位 0.45%;Mo 的储量 8.13 万 t,品位 0.016%;Au 的储量 75.9 吨,品位 0.144 g/t(黄崇轲等,2001)。富含 Os 等 Pt 族元素是一大特色,其中辉钼矿中<sup>187</sup>Os 的含量比陕西金堆城钼矿床辉钼矿高 100 倍以上,Re 的含量也高出数十倍(表 1)。赵一鸣和张德全(1997)曾研究认为多宝山、铜山矿床辉钼矿中 Re、Os 稀有元素的富集,有可能提供一个新的矿床类型。就多宝山矿区预测<sup>187</sup>Os 的大致储量就可达 513.24 kg,潜在经济价值达 256.6 亿美元,比 Cu 矿自身的经济价值高得多。

(4)西藏玉龙斑岩型 Cu 矿:矿床矿石类型和矿物种类均较复杂,已发现矿物 70 余种。其中金属矿物 40 余种,非金属矿物 36 种。矿石中有益组分以 Cu 为主,伴生有益组分 Mo、Au、Ag、Co、W、Bi、Pb、

表 1 多宝山等斑岩型矿床中辉钼矿的 Re、Os 含量

Table 1 Re,Os contents in the porphyry deposits of Duobaoshan etc.

矿床	样号	样重(mg)	Re( $\mu\text{g/g}$ )	<sup>187</sup> Re( $\mu\text{g/g}$ )	<sup>187</sup> Os(ng/g)	资料来源
多宝山铜矿	Du-9	9	567±19	355±12	3 044±47	赵一鸣等(1997)
	Du-20	13.8	537.9±25	336.74±1.59	2 824±26	
	D865	18.6	303.2±1.5	189.81±0.95	1 586.6±7.1	
铜山铜矿	832~860	9	822±21	515±13	4 288±50	
	832~2	11.3	497±6	311±4	2 434±67	
乌奴格吐山铜矿	W-48	12.46	50.9±0.4	31.9±0.3	81±9	
	J82-1	85	12.9±0.4	8.1±0.3	17.2±0.7	
	J82-9	150	19.7±0.5	12.3±0.3	26.4±0.4	
金堆城钼矿	J82-0	498~512	15.8±0.5	9.9±0.3	22.6±0.4	

Zn、Pt、Re、Se、Te、S 等;前 8 种的储量可达大型规模(黄崇轲等,2001).另据资料,1981 年西藏地质局批准的该矿床 Cu 金属量 662 万 t,可利用 Cu 金属储量 650 万 t,品位 0.94%;另外,Mo 储量 15 万 t、Fe 矿石储量 8 696 万 t、硫铁矿 178 万 t;其他伴生矿产远景储量: Au28 t, Ag3 181 t, W5.98 万 t, Bi8.17 t, Co2.2 万 t, Zn7.23 万 t, Pt 族金属 3.4 t (王登红等,2005).

综上所述,斑岩型矿床成岩成矿地质条件复杂,矿化类型丰富,尤其是对一些大型—超大型斑岩矿床,均为多元素综合性的巨型矿床,除传统意义上的铜、钼等矿产之外,非传统矿产的成矿—找矿潜力巨大,开展斑岩型矿床成岩成矿地质背景、矿床地质特征与矿化富集分布规律研究,总结斑岩型矿床非传统矿产资源潜力预测评价标志,指导找矿预测与资源潜力评价,具有重要的理论价值和现实意义.

### 3 斑岩型矿床非传统矿产资源潜力评价若干问题探讨

#### 3.1 构造地质背景与斑岩型矿床矿化类型特征关系密切

尽管斑岩型矿床在矿化特征等方面存在某些共性与相似性,但是由于成岩成矿地质构造背景的不同,也决定了斑岩体岩石学、矿物学、地球化学以及矿化类型特征等方面的差异变化.例如:斑岩型钼矿在矿化特征、围岩蚀变等诸多方面都与斑岩型铜矿十分相似,但是在大洋岛弧区,不但没有发现独立的斑岩钼矿,而且斑岩铜矿中钼的含量也很低,一般无工业价值.

从全球分布来看,以铜占优势、钼呈伴生组分的斑岩型矿床,主要分布于科迪勒拉型大陆边缘,具有厚大硅铝层地壳发育的造山带或火山弧,以及大陆内部板块碰撞带,如我国的江西德兴铜矿.而独立的斑岩型钼矿,几乎都分布于环太平洋成矿带的外带,这些地区都有古老(前寒武纪)或较老(古生代)的褶皱基底发育.可以认为,没有古老的或较老的褶皱基底或硅铝质地壳分布的地带,几乎不可能形成独立的斑岩型钼矿.类似的,还有斑岩型锡矿和斑岩型钨矿(郑明华等,1993).

夏斌等(2002)曾对太平洋东西两岸斑岩型矿床成矿特征进行过对比分析,其中,太平洋东岸的斑岩型矿床形成于古陆基底之上,具有较厚的大陆地壳,

矿床以斑岩型铜矿或铜—钼矿为主;西太平洋岛弧地区的矿床则形成于过渡地壳或洋壳之上,地壳厚度较薄,矿床以斑岩型铜—钼矿为主,且常与浅成低温热液金矿伴生.

事实上,即便是在同一成矿区带中,产在不同构造层中的斑岩型矿床,其矿化类型组合、矿石品位以及共伴生的成矿元素也不相同.以我国东秦岭的金堆城—南泥湖燕山期斑岩型钼矿带为例:产于太古代基底中的雷门沟斑岩钼矿,以富金和钼品位低为特点,金的品位一般可达 5 g/t 以上,构成工业矿体;产在中元古熊耳群的金堆城钼矿,钼的品位增高;而产在新元古栾川群中的南泥湖钼矿,不但钼的品位更富,而且伴生丰富的钨、铅、锌、银、硫、镓、铼、铁等.

#### 3.2 岩浆岩的成矿专属性与成矿多样性特征

顾名思义,通称为斑岩型矿床固然有它们的共性和相似性,主要表现在时间上、空间上与成因上都与钙碱性的浅成或超浅成相的中酸性斑岩体有关.然而,对斑岩体而言,能否成矿以及成什么矿,斑岩体自身乃是关键因素:斑岩型矿床的成矿作用则与成岩作用以及岩浆的成生演化密切相关,不同类型斑岩体的成矿专属性、成矿多样性及其差异变化规律研究,对指导找矿预测以及资源潜力评价都具有重要的现实意义.

以滇西北喜山期富碱斑岩为例,随着岩体类型的变化,其主导性矿化类型也就有明显的差异(表 2).岩石化学分析资料表明:研究区域含矿富碱斑岩的  $\text{SiO}_2$  含量 52.50%~73.97%,主要集中于 65%~70%,以中酸性—酸性岩为主;总碱量( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ )4.73%~14.60%,一般均  $>8\%$ ;  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值 0.50~10.37,普遍  $>1$ ;里特曼指数( $\delta$ )0.82~16.50,一般为 2~6;属富碱富钾岩系.

对滇西北地区 Au、Ag、Cu、Mo、Pb、Zn 矿产与其相关喜山期富碱斑岩岩石化学组成特征( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  及  $\delta$ )的对应分析(图 1)表明:(1)研究区 Au-Ag-Cu-Mo-Pb-Zn 矿产相关斑岩体的岩石  $\text{SiO}_2$  含量,主要集中于 65%~70%;少量为 60%~65%和  $>70\%$ (70%~75%).(2)岩石里特曼指数( $\delta$ )的差异变化,较清楚地揭示了区内存在两类矿产系列组合特征的差异变化规律. $\delta$  在 2~4 区间,以 Cu-Au-Mo 组合为特征,伴生有 Pb-Zn-Ag 矿产; $\delta$  在 4~6 区间,则以 Pb-Zn-Ag-Au 组合为特征,伴生有部分 Cu-Mo 矿产.

(3)岩石总碱量( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ )与上述特征相

表 2 滇西北喜山期富碱斑岩成矿专属性与成矿多样性特征

Table 2 The metallogenic relation and mineralizing diversity of alkali rich porphyry in Xishan period in Northwest of Yunnan Province, China

系列	亚系列	矿床类型	矿产组合	典例
喜山期富碱斑岩成矿系列	花岗斑岩类成矿亚系列	斑岩型、矽卡岩—角岩型、热液(脉)型	主要: Cu-Mo-(Au) 次要: Pb-Zn-Ag	马厂箐矿区
	二长斑岩类成矿亚系列	斑岩型、矽卡岩—角岩型、热液(脉)型	主要: Cu-Au-(Mo) 次要: Pb-Zn-Ag	西范坪—罗卜地矿区
	正长斑岩类成矿亚系列	斑岩型、矽卡岩—角岩型、热液(脉)型	主要: Pb-Zn-Ag-Au 次要: Cu-Mo-W-Fe	北衙矿区、姚安矿区
	富钾煌斑岩类成矿亚系列	热液型	主要: Au	老王寨矿区、姚安矿区
	碱性杂岩成矿亚系列	岩浆型、热液型	主要: 霞石正长岩—磷灰石—稀土—Au	卓潘矿区

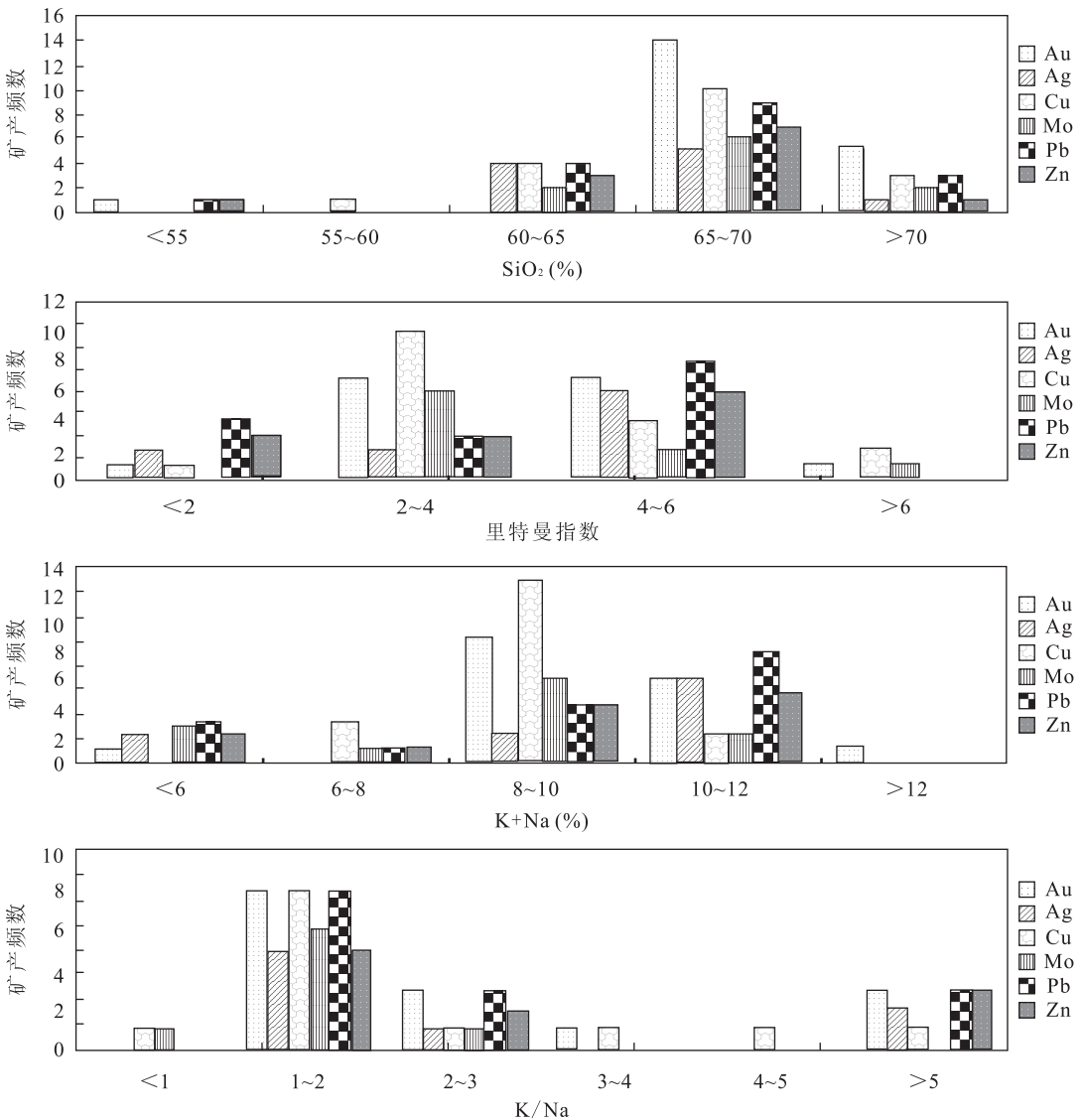


图 1 滇西北喜山期富碱斑岩岩石化学组成及主要矿化类型分布特征

Fig. 1 The lithogeochemical composition and main mineralization contribution of alkali rich porphyry in Xishan period in Northwest of Yunnan Province, China

似,  $K_2O+Na_2O$  含量在  $8\% \sim 10\%$ , 以 Cu-Au-Mo 组合为主; 而碱度增高,  $K_2O+Na_2O$  在  $10\% \sim 12\%$  区间, 以 Pb-Zn-Ag-Au 组合为重要. (4)  $K_2O/Na_2O$  比值在 1~2 区间, 是 Au、Ag、Cu、Mo、Pb、Zn 矿产集中发育区; 比值 2~3 和  $>5$  则对 Pb-Zn-Ag 系列相对有利; 贫 K 和过于富 K 斑岩体, 均非 Cu-Mo 矿化的有利条件.

据此, 可以进一步根据斑岩体的岩石类型以及岩石化学组成等标志特征, 指导含矿斑岩体主要矿化类型、矿产组合以及共伴生矿产资源潜力开展预测分析和综合评价.

### 3.3 斑岩型矿床中非传统矿产的富集机理与分布规律

多年来, 人们对斑岩型铜钼多金属矿床的矿化分带规律进行过深入系统的研究. 通常表现为(矿床内→外): Cu、Mo→Au、Ag、Pt 族元素→Pb、Zn、Ag 的空间分带; 方铅矿和闪锌矿的出现往往预示斑岩型 Cu、Mo 矿体边界的标志.

李文昌等(2010)根据对斑岩型 Cu(Mo、Au)多金属矿床成矿元素、伴生元素、指示元素分带等方面的综合研究, 认为西南三江地区斑岩型矿床的成矿元素以 Cu、Mo 或 Cu、Au 为主, 伴生元素为 Au(Mo)、Ag、Pb、Zn、W、Sn、Bi、V、Ti、Zr、Hg、Sb、As、Co、Ni 等; 指示元素为 Mo、Re、Pt、Zr、Ti 等. 斑岩型矿床中元素组合的分布规律为(岩体中心→岩体中上部→接触带→外接触带): Mo(Cu、Re)→Cu(Mo、Re)→Cu、Au、Ag(Fe、S、Mo)→Pb、Zn(Au、Ag、Cu、Mn、Sb、Hg、As); 元素的垂向分带序列由下而上为: Mo(Re)→Cu→Fe→Bi、W→S→Cu→Au、Ag→Pb、Zn, 其中, Sb、Hg、As、Pb、Zn 为矿上晕, Cu、Mo、Au、Ag、(Pb、Zn) 为矿体晕, Mo、Re、Pt、Zr、Ti 为矿下晕. 围岩的脉状矿体中往往含金较高.

斑岩型矿床的矿化分带规律研究, 为不同类型成矿元素矿化富集部位和找矿方向预测评价提供了重要指导. 此外, 针对斑岩型矿床中非传统矿产资源潜力预测评价, 积极探索矿化组分的共伴生规律、矿化元素的赋存状态与富集机理, 具有重要的理论和现实意义.

现将部分矿产的发育特征浅析如下:

(1) 金、银: 金和银通常呈类质同象或机械混入于黄铜矿和黄铁矿中, 如西藏马拉松多铜矿, 黄铜矿含金  $1.33 \times 10^{-6}$ 、含银  $42.0 \times 10^{-6}$ , 黄铁矿含金  $0.64 \times 10^{-6}$ 、含银  $15.75 \times 10^{-6}$ ; 江西德兴铜厂铜矿伴生金 80% 以自然金形式存在, 其次以银金矿、碲

金银矿和碲金矿形式存在; 伴生银主要以碲银矿、碲金银矿、自然银和硫银铀矿形式存在(黄崇轲等, 2001). Sillitoe(1983)指出: 在许多富金的斑岩型铜矿床中, 丰富的磁铁矿预示了较高的  $f_{O_2}/f_{S_2}$  值, 它和系统中较高的初始金含量一起产生了富金的核心区域, 但在  $f_{O_2}/f_{S_2}$  值较低的情况下, 金趋向于在更为常见的分带序列的外部位置, 如智利的 Andacollo 矿床. 在斑岩体系中银—铅—锌这 3 个通常相互关联的金属分布, 它们集中在斑岩型铜钼矿床的周围或浅部, 部分银在黄铜矿和自然矿物(银金矿)的固溶体中, 也有些可能出现在黝铜矿、砷黝铜矿的固溶体或方铅矿中, 银与铅锌的共伴生关系无疑是值得重视的.

(2) 铷: 铷是常与钼伴生的元素, 已有不少研究成果表明, 在一些斑岩型铜钼矿床的辉钼矿中铷代替钼而富集产出, 例如: 英国哥伦比亚 Island、哈萨克斯坦 Kounrad、美国内华达州 Ely、犹他州 Bingham 和智利 El Salvador 等, 辉钼矿含钼可达  $1500 \times 10^{-6}$  (Sillitoe, 1983); 我国江西德兴铜厂矿床辉钼矿含铷高达  $1419 \times 10^{-6}$  (黄崇轲等, 2001).

(3) 铀: Armstrong(1974)提出可能出现斑岩型铀矿床的情形. 斑岩体一般包括了大量的亲石元素铀, 如报道: 科罗拉多的 Climax 和 Henderson 矿床, 玻利维亚 Llallaguh 矿床等; 包括一些典型的斑岩铜钼矿床, 如菲律宾的 Larap 等都通常富含铀元素; 有可能从未氧化的斑岩型矿石中获取具有商业价值的铀 (Desborough and Sharp, 1978; Desborough and Mihalik, 1980; Sillitoe, 1983). 另据报道, 在几个斑岩铜钼矿床中用氧化浸出法能提取出少量铀, 包括犹他州 Bingham、亚利桑那州 Twin Buttes、秘鲁 Toro Mocho 以及智利的 Chuquicamata 铜矿床. 对亚利桑那州 Copper Cities 斑岩铜矿床的研究显示, 铀作为变铜铀云母(metatorbernite)和羟磷铝铅矿(plumbogummite)存在于淋滤帽中,  $U_3O_8$  平均值为  $0.005\% \sim 0.006\%$ .

(4) 硒、碲: 在斑岩型矿床中, 硫、硒、碲等主要赋存于黄铜矿和黄铁矿等硫化物中, 如西藏玉龙铜矿、云南金平长安冲铜钼矿等; 硒的独立矿物较少见, 例如在江西德兴铜厂铜矿, 硒在辉钼矿内最富集( $94 \times 10^{-6}$ ), 其次是黄铜矿、砷黝铜矿和黄铁矿; 但碲的独立矿物较为常见, 如: 铜厂铜矿已知碲的独立矿物有碲银矿、碲金银矿、碲金矿、辉碲铀矿、碲镍矿和碲钡矿(黄崇轲等, 2001; 王登红等, 2005).

(5) 稀有金属: 在 Climax 型斑岩钼矿床中通常

富含钽、铌、铈、钐和轻稀土元素。这些元素在 Henderson 和 Climax 矿床中,以钽铁金红石(ilmenorutile)、易解石(aeschynite)、铌铁矿(columbite)、独居石(monazite)和硅酸钽矿(thorite)等伴生矿物的形式出现,这些稀有元素被认为主要是岩浆来源(Desbomugh and Sharp, 1978; Desborough and Mihalik, 1980)。

(6) 铂族元素:目前对斑岩矿床中 Pt 族元素的赋存状态了解不足,尚待深入研究。如黑龙江多宝山铜矿 Pt 族元素(Os、Pd、Ir、Ru 等)均已达到伴生元素的工业指标,其中辉钼矿富含 Os 是一大特点,其辉钼矿中<sup>187</sup>Os 的含量几乎比陕西金堆城钼矿床辉钼矿高 100 倍以上(表 1);德兴铜厂铜原矿含铂族元素总量为 0.012 3 g/t,铜硫混合精矿含铂族元素为 0.069 1 g/t,钼精矿含铂族元素为 1.23 g/t。在自然界 Pt 族元素多呈自然金属产出,但它们具有亲铁和亲硫的双重性,因此还可以形成硫化物或碲化物,如硫银钼矿、辉碲钼矿、碲钼矿等。

## 4 问题与展望

多年来,人们对传统意义上斑岩型铜钼多金属矿的成矿理论与找矿实践,取得了丰硕的研究成果;然而对斑岩型矿床非传统矿产资源的富集机理、分布规律以及资源潜力预测评价研究等方面,缺乏更多的系统探索,未能予以专门关注和高度重视。因此,以现代成岩成矿理论为指导,以野外地质矿产调查和高精测试分析技术为手段,以大型—超大型斑岩矿床为主要研究对象,从成岩成矿背景—控岩控矿条件—岩石学与岩矿地球化学特征分析入手,系统研究斑岩型矿床的时空演化特征与分布规律;探讨岩浆岩演化与斑岩型矿床成矿的内在联系;重点揭示具有非传统矿产资源潜力斑岩型矿床的岩石学、矿物学、岩矿地球化学等方面的宏观—微观标志特征,建立斑岩型矿床非传统矿产资源潜力评价标志,对指导找矿预测与非传统矿产资源潜力评价具有重要的理论价值和现实意义。亟待深化研究的主要内容包括:(1)不同地质构造背景下斑岩型矿床的成矿专属性与成矿多样性分析;(2)斑岩型矿床成岩成矿地质条件与非传统矿产矿化类型特征对比研究;(3)斑岩型矿床非传统矿产资源潜力评价的岩石学、矿物学、岩矿地球化学标志特征;(4)斑岩型矿床中非传统矿产的富集机理与分布规律;(5)斑岩型矿床非传统矿产资源潜力预测评价方法实践。

## References

- Armstrong, F. C., 1974. Uranium resources of the future—porphyry uranium deposits, formation of uranium ore deposits. *International Atomic Energy Agency, Vienna*, 625—634.
- Babcock, R. C., Ballantyne, G. H., Phillips, C. H., 1995. Summary of the geology of the Bingham district, Utah. In: Pierce, F. W., Bolm, J. G., eds., *Porphyry copper deposits of the American Cordillera. Arizona Geological Society Digest*, 20:316—335.
- Clark, G. H., 1990. Panguna copper-gold deposit. In: Hughes, F. E., ed., *Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea. Australian Institute of Mining and Metallurgy, Australian*, 1807—1816.
- Desborough, G. A., Mihalik, P., 1980. Accessory minerals in the igneous host of molybdenum ore, Henderson Mine, Colorado. *US Geological Survey, Open-File Report*, 80—661.
- Desbomugh, G. A., Sharp, W. N., 1978. Tantalum, uranium, and scandium in heavy accessory oxides, Climax molybdenum mine, Climax, Colorado. *Economic Geology*, 73 (8):1749—1751. doi:10.2113/gsecongeo.73.8.1749
- Du, Q., Zhao, Y. M., Lu, B. G., et al., 1988. Porphyry Cu (Mo) deposits in Duobaoshan. Geological Publishing House, Beijing, 225—247 (in Chinese).
- Halter, W., E., Pettke, T., Heinrich, C. A., 2002. The origin of Cu/Au ratios in porphyry-type ore deposits. *Science*, 296(5574):1844—1846. doi:10.1126/science.1070139
- Hou, Z. Q., 2004. Porphyry Cu-Mo-Au deposits: some new insights and advances. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 131—144 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Ma, H. W., Za, W. K., et al., 2003. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: product of large-scale strike-slip faulting in eastern Tibet. *Economic Geology*, 98:125—145.
- Huang, C. K., Bai, Y., Zhu, Y. S., et al., 2001. Copper deposits in China (Rudin). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Huang, D. H., Wu, C. Y., Du, A. D., et al., 1994. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in East Qinling and their significance. *Mineral Deposits*, 12(3): 221—230 (in Chinese with English abstract).
- Jr, A. A., Hedenquist, J. W., Itaya, T., et al., 1995. Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu-Au deposits over 300 ka in northern Luzon, Philippines. *Geology*, 23(4): 337—340. doi: 10.1130/0091-7613(1995)023<0337:CFOAPA>? 2.3. CO;2

- Li, J. X., Qin, K. Z., Li, G. M., 2006. Basic characteristics of gold-rich porphyry copper deposits and their ore sources and evolving processes of high oxidation magma and ore-forming fluid. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 678—688.
- Li, W. C., Pan, G. T., Hou, Z. Q., et al., 2010. Metallogenic theory and prospecting technology in the polyarc-basin series of “Three-River” region in Southwest China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Macdonald, G. D., Arnold, L. C., 1994. Geological and geochemical zoning of the Grasberg igneous complex, Irian Jaya, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50(1—3): 143—178. doi: 10.1016/0375—6742(94)90023—X
- Meldrum, S. J., Aquino, R. S., Gonzales, R. I., et al., 1994. The Batu Hijau porphyry copper-gold deposit, Sumbawa Island, Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 50(1—3): 203—220. doi: 10.1016/0375—6742(94)90025—6
- Qu, X. M., Hou, Z. Q., Huang, W., 2001. Is Gangdese porphyry copper belt the second “Yulong” copper belt? *Mineral Deposits*, 20(4): 355—366 (in Chinese with English abstract).
- Richard, J. P., Boyce, A. J., Pringle, M. S., 2001. Geologic evolution of the Escondia area, northern Chile: a model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. *Economic Geology*, 96(2): 271—305. doi: 10.2113/gsecongeo.96.2.271
- Rui, Z. Y., Huang, C. K., Qi, G. M., et al., 1984. Porphyry Cu (Mo) deposits in China. Geological Publishing House, Beijing, 242—272 (in Chinese).
- Rush, P. M., Seegers, H. J., 1990. Ok Tedi copper-gold deposits. In: Hughes, F. E., ed., *Geology of the mineral deposits of Australia and Papua New Guinea*. Australian Institute of Mining and Metallurgy, Australian, 1747—1754.
- Sillitoe, R. H., 1983. Unconventional metals in porphyry deposits. In: Shanks, W. C., III, ed., *Society of mining engineers. Am. Inst. of Mining, Metallurg. & Petrol. Eng.*, New York, 207—221.
- Titey, S. R., Beane, R. E., 1981. Porphyry copper deposits, Part I: Geologic settings, petrology, and tectogenesis. *Economic Geology*, 75: 214—235.
- Tooker, E. W., 1990. Gold in the Bingham district, Utah, U. S. *Geological Survey Bulletin*, 1857 E: 1—16.
- Wang, D. H., Chen, Y. C., Xu, Y., et al., 2005. Cenozoic mineralization in China (Rudin). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Xia, B., Chen, G. W., Wang, H., 2003. Analysis of tectonic settings of global superlarge porphyry copper deposits. *Science in China (Series D)*, 46(Suppl.): 110—122.
- Zhang, Y. Q., Xie, Y. W., Qiu, H. N., et al., 1998. Shoshonitic series: Sr, Nd, and Pb isotopic compositions of ore bearing porphyry for Yulong copper ore belt in the eastern Xizang (Tibet). *Chinese Journal of Geology*, 33(3): 359—366 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., 2003. An introduction to nontraditional mineral resources. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, Y. M., Zhang, D. Q., 1997. Metallogeny and evaluation of copper-polymetallic deposits in the Dahinggan Mountains and its adjacent regions. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zheng, M. H., et al., 1993. Principle of ore geology. Press of Chengdu University of Science and Technology, Chengdu (in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 杜琦, 赵玉明, 卢秉刚, 等, 1988. 多宝山斑岩铜矿床. 北京: 地质出版社, 225—247.
- 侯增谦, 2004. 斑岩 Cu-Mo-Au 矿床: 新认识与新进展. 地学前缘, 11(1): 131—144.
- 黄崇轲, 白冶, 朱裕生, 等, 2001. 中国铜矿床(上册). 北京: 地质出版社.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 等, 1994. 东秦岭地区钼矿床的铷—锶同位素年龄及其意义. 矿床地质, 13(3): 221—230.
- 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等, 2010. 西南“三江”多岛弧盆—碰撞造山成矿理论与勘查技术. 北京: 地质出版社.
- 曲晓明, 侯增谦, 黄卫, 2001. 冈底斯斑岩铜矿(化)带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带. 矿床地质, 20(4): 355—366.
- 芮宗瑶, 黄崇轲, 齐国明, 等, 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京: 地质出版社, 242—272.
- 王登红, 陈毓川, 徐钰, 等, 2005. 中国新生代成矿作用(上). 北京: 地质出版社.
- 夏斌, 陈根文, 王核, 2002. 全球超大型斑岩铜矿床形成的构造背景分析. 中国科学(D辑), 32(增刊): 87—95.
- 张玉泉, 谢应雯, 邱华宁, 等, 1998. 钾玄岩系列: 藏东玉龙铜矿带含矿斑岩 Sr、Nd、Pb 同位素组成. 地质科学, 33(3): 359—366.
- 赵鹏大, 2003. 非传统矿产资源概论. 北京: 地质出版社.
- 赵一鸣, 张德全, 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价. 北京: 地震出版社.
- 郑明华, 等编著, 1993. 矿床地质原理. 成都: 成都科技大学出版社.