

文章编号 10258-7106 (2009) 06-0803-12

西藏冈底斯多金属成矿带斑岩铜矿定位 预测与资源潜力评价*

余宏全¹, 李光明², 董英君¹, 潘桂棠², 李进文¹, 张德全¹, 丰成友¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037 ;

2 中国地质调查局成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082)

摘 要 自 1999 年开展地质大调查以来, 冈底斯成矿带斑岩铜矿研究取得了重大进展。本文在全面收集冈底斯成矿带地质、矿产和物化探资料基础上, 建立了本区 GIS 平台上的资源预测评价系统。采用数理统计分析, 确定了冈底斯成矿带斑岩铜矿定位预测的定量化标志 35 个, 认为对斑岩铜矿预测影响比较重要的地质变量(因素权重 > 0.2) 为花岗岩体(不限时代)、Cu、Mo、W、Au、Ag、Bi 化探异常、Cu-Mo、Cu-Mo-Au、Cu-Au-Ag 组合化探异常、矿床规模、重力场中低负异常场等。在此基础上, 开展了工作区斑岩铜矿的定位预测, 圈定了斑岩铜矿成矿远景区 33 处, 计算结果与实际矿产分布和地质理论分析相吻合。采用面金属量法对冈底斯成矿带斑岩铜矿的资源潜力进行了估算, 结果表明, 冈底斯地区仍具有良好的斑岩铜矿找矿远景, 1 000 m 以浅的潜在铜资源量可达 1 亿吨以上。其中, 驱龙-甲马-拉抗俄、松多雄、白容-冲江、松多握、吉如、达布、汤不拉、龙卡朗、崩不弄金矿、洞嘎、雄村、麦热-仁钦则、蒙哑啊东北、吹败子、岗达、沙让-亚贵拉、青龙-龙马拉、冲木达、洛麦南、拉屋找矿潜力较大。

关键词 地质学 冈底斯成矿带 斑岩铜矿 资源量预测 GIS 矿床统计预测

中图分类号 P618.41

文献标志码 A

Regional metallogenic prognosis and mineral reserves estimation for porphyry copper deposits in Gangdese polymetallic ore belt, Tibet

SHE HongQuan¹, LI GuangMing², DONG YingJun¹, PAN GuiTang², LI JinWen¹,
ZHANG DeQuan¹ and FENG ChengYou¹

(1 MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Chengdu Institute of Geology and Mineral resources, China Geological Survey, Chengdu 610082, Sichuan, China)

Abstract

The search for porphyry copper deposits in the Gangdese metallogenic belt has made great advance since the beginning of the geological survey project. Based on a complete acquisition of geological, ore deposit, geophysical and geochemical data, the authors established a mineral resources evaluation system based on GIS technology. 35 geological factors for the prognosis of porphyry copper deposits were determined by means of mathematic statistics. The most important geological factors for porphyry copper prognosis include granite, Cu, Mo, W, Au, Ag, Bi geochemical anomalies, composite Cu-Mo, Cu-Mo-Au, Cu-Au-Ag geochemical anomalies, size of the discovered ore deposit and middle-low negative gravity anomalies. According to the calculation of the MRAS sys-

* 本文得到“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAB01A10) 和国家 973 基础研究计划(2002CB412609) 的联合资助

第一作者简介 余宏全, 男, 1965 年生, 研究员, 主要从事地质找矿和矿床学研究。Email : hongquanshe@sohu.com

收稿日期 2009-08-25 ; 改回日期 2009-09-20。李德先编辑。

tem, 33 target areas for porphyry copper deposits were delineated in the Gangdese metallogenic belt. The result of the statistical method is in accordance well with the geological deduction. The copper reserves were estimated by the areal productivity method, which shows that there still exists a great potential of porphyry copper deposits in Gangdese and that the predicated copper reserves are over 100 million tons. The potential target areas for porphyry copper deposits include Qulong-Jiama-Lankange, Songduoxiong, Bairong-Chongjiang, Songduowo, Jiru, Dabu, Tangbula, Youkalang, Pengbunong, Dongga, Xiongchun, Maire-Renqingze, Mengyaa, Cuibaizi, Gangda, Sharang-Yaguila, Winglong-Nongmala, Chongmuda, Luomainan and Lawo.

Key words: geology, Gangdese metallogenic belt, porphyry copper deposit, mineral resources estimation, Geographic information system, ore deposit statistics

冈底斯成矿带是中国现阶段地质找矿勘查工作的重点成矿区带之一,铜矿是冈底斯多金属成矿带内最重要的矿种,目前已控制铜矿资源量接近1500万吨,该成矿带有望成为中国最重要的铜矿生产和资源储备基地。从矿床类型来看,斑岩型铜矿是该地区最重要的矿床类型,其铜资源量约占已控制资源总量的90%,因此,该成矿带又被称为冈底斯斑岩铜矿带。研究表明,该地区仍具有良好的斑岩型铜矿找矿远景(芮宗瑶等,2006;曲晓明等,2001;王全海等,2002;潘桂棠等,2008^①),为进一步查明其找矿前景,部署找矿勘查工作,需要对其资源潜力进行评价。本文在充分收集工作区地质物化探资料基础上,探讨采用GIS平台基础上的数理统计和面金属量法对本区斑岩铜矿的成矿潜力进行评估,为勘查工作部署提供参考。

1 成矿地质背景

冈底斯铜铅锌多金属成矿带地处西藏腹地拉萨地体南缘的冈底斯造山带中。拉萨地体南北缘分别以印度河-雅鲁藏布江缝合带和斑公湖-怒江缝合带为界。白垩纪末期以来,印度板块向北与亚洲板块的汇聚碰撞导致拉萨地体内部强烈的南北向缩短(Murphy et al., 1997),在其南缘形成了冈底斯构造岩浆岩带,并伴有强烈的多金属成矿作用,形成了一条独特的、主要与碰撞造山作用有关的冈底斯多金属成矿带(侯增谦等,2006a)。

该成矿带已发现矿床主要有铜、铁、铅、锌、金、银、锑、铬、锂、钛铁矿、铈和盐类矿产,其中铜、铅、锌、铬矿是工作区最重要的内生金属矿产。该成矿

带是1999年开展地质调查工作以来,获得重大突破的重要成矿带之一。近年来找矿成果显著,新发现了驱龙(斑岩型)、白容(斑岩型)、厅宫(斑岩型)、朱诺(斑岩型)、雄村(斑岩型)、南木林(斑岩型)、吹败子(斑岩型)、蒙哑啊(矽卡岩型)、亚贵拉(斑岩型+矽卡岩型)、洞嘎普(热液型)、龙卡朗(矽卡岩型)等十多处具有大型-超大型规模或远景的矿床(潘桂棠等,2008^①);甲马铜铅锌多金属矿床经过补充勘探,铜资源量(333+334)从1999年的52万吨,增加至200万吨以上(唐菊兴,2008年个人通讯),储量获得成倍增长。区内已发现矿床类型主要有斑岩型、矽卡岩型和热液型,其次有热泉型、岩浆型等,以斑岩型铜矿和矽卡岩型铅锌多金属矿为主要类型。从成矿时代来看,主要有形成于主碰撞期的矽卡岩铜铅锌金矿和后碰撞期的斑岩型(+矽卡岩型)铜铅金铅锌多金属矿(侯增谦等,2006a, 2006b, 2006c)。

本次进行资源潜力预测工作区的范围为东经87°00′~96°00′,北纬29°00′~31°00′,实际有效面积约19.4万km²,大致包括地质构造上的冈底斯构造岩浆岩带、念青唐古拉带和班戈-腾冲构造岩浆岩带的西藏部分(图1)。

2 资料整理和定位预测方法

2.1 GIS多元信息数据库

对工作区铜矿的资源潜力进行评价,首先需要确立成矿远景区的范围。本次工作对成矿远景区的确定采用地质理论与计算机技术相结合的办法,对工作区的地质、物化探、矿产资料进行数字化处理,建立GIS多元信息系统,采用定量综合预测模型方

① 潘桂棠,李光明,余宏全,等. 2008. 印度-亚洲主碰撞带资源潜力与成矿预测. 成都地质矿产研究所和中国地质科学院矿产资源研究所.

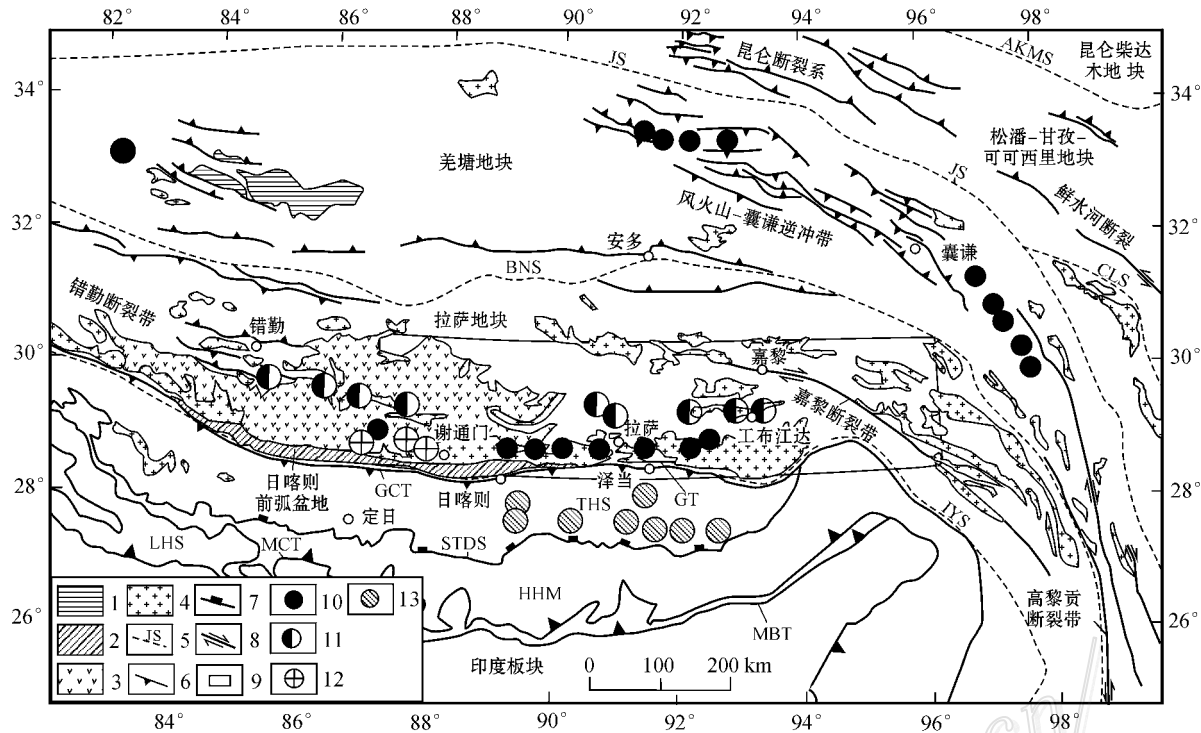


图 1 青藏高原大地构造简图和预测评价范围(据潘桂棠等^①简化)

1—蓝闪片岩杂岩；2—弧前盆地沉积；3—第三纪火山岩；4—花岗岩；5—主要构造缝合带及构造单元分区界限；6—逆冲断裂带；7—拆离断层；8—走滑断裂带；9—图 2 所示预测评价区范围；10—主要斑岩铜矿床；11—铅锌矿床；12—金矿床；13—金锑矿。主要构造缝合带：AKMS—阿尼玛卿-昆仑-木孜塔格缝合带；JS—金沙江缝合带；CLS—理塘缝合带；BNS—班公-怒江缝合带；IYS—印度河-雅鲁藏布江缝合带；主要断裂带：GCT—大反向逆冲断裂系；GT—冈底斯逆冲断裂系；STDS—藏南拆离系；MCT—主中央逆冲断裂；MBT—主边界逆冲断裂；构造单元：THS—北喜马拉雅；HHM—高喜马拉雅；LHS—低喜马拉雅

Fig. 1 Geotectonic sketch map of Qinghai-Tibet plateau showing limits of prognosis and evaluation(modified after Pan et al., 2004)
1—Glauconophane schist complex; 2—Fore-arc basin sediments; 3—Tertiary volcanic rock; 4—Granite; 5—Suture zone; 6—Thrust fault belt; 7—Detachment fault; 8—Strike-slip fault; 9—Study area shown in Fig. 2; 10—Major porphyry copper ore deposit; 11—Lead-zinc deposit; 12—Gold deposit; 13—Gold-antimony deposit. Suture zones: AKMS-Animaqing-Kunlun-Muzhitage suture zone; JS-Jinshajiang suture zone; CLS-Litang suture zone; BNS-Bangong-Nujiang suture zone; IYS-Indian River-Yarlung Zangbo River suture zone; GCT—Great conversion thrust fault; GT—Gangdese thrust fault; STDS—South Tibet detachment system; MCT—Major central thrust fault; MBT—Major boundary thrust fault; THS—Tethys Himalaya; HHM—High Himalaya; LHS—Low Himalaya

法进行确定。其基本原理是通过研究已知矿床,建立区域矿产资源评价的地质模型,然后进行量化处理,即以已知控制模型区为基础,研究和设置预测标志组合,通过定量计算给出各标志因素的权重,进而开展定位预测和资源量评价,包括变量设置与选择、单元划分、模型选择、定位与资源量预测等一系列工作步骤,具体方法参见相关文献(肖克炎等, 2000 刘治国等, 2002 王世称, 2002)。本次预测使用的是建立在 MAPGIS 平台上的 MRAS 矿产资源

综合评价系统(肖克炎等 2000 2003)。
为开展区域定位预测,在收集冈底斯地质、物化探、矿产资料基础上,进行数字化处理,建立了工作区 1:50 万多元信息数据库系统,该数据库主要由图形空间信息数据库和地质体要素非空间信息数据库两部分组成,内容涵盖了地质(构造、岩浆岩、地层、变质岩)、矿产(主要矿床、矿点及矿化点)、物探(磁法、重力)、化探(Cu、Pb、Zn、Ag、Au、As、Sb、Bi、W、Mo、Cd、Sn、Bi 单元素异常)地理等多种地学信息,

① 潘桂棠,李光明,余宏全,等. 2008. 印度-亚洲主碰撞带资源潜力与成矿预测. 成都地质矿产研究所和中国地质科学院矿产资源研究所.

是一个比较全面、系统的 GIS 技术平台下进行多元信息成矿预测的基础信息数据库,该数据库构成了本次成矿预测和资源潜力研究的数据平台系统。数据的处理方法按照《国家标准数字化地质图图层及属性文件格式》(DZ/T0197-1997)进行。

2.2 预测网格单元划分

本区已发现的具规模矿床比较少,而且主要集中于冈底斯带南部,能用于预测统计的已知矿床模型也较少,因此采用等面积单元划分法(赵鹏大等,1994)。成矿预测采用 1:50 万比例尺图上的 $14\text{ mm} \times 14\text{ mm} = 196\text{ mm}^2$ 作为基本单元大小,将研究区划分为 $124 \times 32 = 3968$ 个网格单元,每个网格单元相当于实际面积为 49 km^2 ,共 19.3 万 km^2 ,单个预测单元面积大致与单个探矿权面积或中小规模化探异常区面积相当。

2.3 预测方法与数学模型

本次预测工作中采用的数学方法为特征分析统计预测模型。该方法是一种简单实用的多元统计方法,适合于资料较少地区和小比例尺成矿定位预测,通过对研究区已知含矿单元的研究,查明地质变量之间的内在联系并确定其找矿意义,从而建立特定类型矿床的定量模式。预测时将预测对象的地质特征与模型对比,用其相似程度表示预测对象的成矿可能性,据此圈定出有利成矿的各级远景区。

预测的基本公式为: $y_i = \sum_{i=1}^n b_i x_i$ (公式 1)

式中, y 为预测单元关联度或成矿有利度; x_i 为特征标志(变量),即控矿地质因素和找矿标志,包括地质、地球化学、地球物理、遥感等变量提供的矿化信息; b_i 为各特征标志(变量)的权系数, n 为参与计算地质变量总数。该模型的实质是一组特征标志的加权线性组合,建立模型的关键是求解变量(x_i)的权系数(b_i)。公式应用的方法原理见文献(赵鹏大等,1994)。

3 斑岩型铜钼矿床区域预测找矿模型和预测变量

3.1 斑岩型铜钼矿床区域预测找矿模型

根据本区斑岩型矿床成矿特点、预测目标和最新研究成果(王全海等,2002;芮宗瑶等,2006;侯增

谦等,2006a;2006b;2006c;余宏全等,2005;潘桂棠等,2008^①),确定斑岩型铜钼矿床的区域预测找矿模型如下,并以此模型设置矿产资源综合评价系统的主要预测变量。

(1)矿床位于冈底斯火山岩浆带南部;

(2)冈底斯火山岩浆带含矿岩体主要为中新世花岗质小岩体,岩性有花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩及对应的斑岩,岩石化学和微量元素地球化学显示含矿斑岩具有埃达克质岩浆岩特征;

(3)冈底斯斑岩铜矿床形成于印度-亚洲大陆碰撞后的后碰撞伸展时期,矿床分布总体上受东西向构造控制,但与中新世南北向裂谷构造密切相关。矿床常常分布于东西向构造带与南北向裂谷系交汇部位,具有东西成带、南北成行的分布特点。东西向构造带和南北向构造交汇部位是斑岩铜矿床的有利成矿位置,遥感影像上表现为东西向和南北向线性构造发育;

(4)斑岩铜矿床的含矿围岩主要有新生代花岗岩、火山碎屑岩、砂页岩、凝灰岩、凝灰质砂页岩、灰岩、碳酸盐岩等。围岩往往具有绢英岩化、硅化、黄铁矿化、青磐岩化等面状蚀变,蚀变分布范围较大,显示了研究区有广泛且强烈的热液活动;

(5)斑岩铜矿成矿远景区一般有良好的已知矿化线索,有斑岩铜矿分布,或有热液型、矽卡岩型铜(钼)金矿分布;

(6)斑岩铜矿成矿远景区一般具有良好的以 Cu-Mo-Au 组合为主的化探异常,异常强度较高,往往套合有 Pb-Zn-Ag 异常,或在外围伴有 Pb-Zn-Ag-As-Sb 组合异常,异常分布范围较大,元素异常套合较好,且具有较好的浓度分带,浓集中心清楚;

(7)在区域磁异常图上,斑岩铜矿一般处于磁异常正负场陡变带位置,变化率较高,磁异常值在 $+100 \sim -200\text{ nT}$ 之间;

(8)在重力异常图上,斑岩铜矿一般位于重力场中低负异常场中,处于重力异常梯度带变化较大的位置,重力场异常值在 $-460 \sim -550\text{ mG}$ 之间。

3.2 矿床模型点

根据预测区斑岩型矿床的分布和矿床规模特点,选取驱龙、雄村、白容、厅宫、冲江、拉抗俄、帮浦、

① 潘桂棠,李光明,余宏全,等. 2008. 印度-亚洲主碰撞带资源潜力与成矿预测. 成都地质矿产研究所和中国地质科学院矿产资源研究所.

吹败子、吉如、江翁松多、汤不拉、沙让、达布、朱诺作为模型矿床点,进行矿产资源综合评价预测计算。

3.3 综合预测变量

根据斑岩型矿床的区域找矿预测模型和 GIS 数据库综合信息资料,确定本区斑岩型矿床的综合预测变量共 40 多个,经过实际计算后,确定对斑岩铜

矿预测有确定影响的变量共 35 个,变量及其权重如表 1 其中,对斑岩铜矿预测较重要的变量为表 1 中前 28 个(因素权重>0.1)。从表 1 可以看出,对斑岩铜矿预测影响最大的变量(因素权重>0.2)为花岗岩体(不限时代)、Cu、Mo、W、Au、Ag、Bi 化探异常、Cu-Mo、Au-Ag、Cu-Mo-Au、Cu-Au-Ag 组合化探

表 1 西藏冈底斯成矿带斑岩型铜(钼)矿床综合预测变量表
Table 1 Geological factors for predication of the Gangdese copper porphyry deposits , Tibet

编号	预测变量	变量描述	因素权重	地质解释
1	Cu-Mo 组合化探异常	$Cu>30\times10^{-6}+Mo>1.6\times10^{-6}$	0.236372	斑岩铜矿常见的铜钼矿化组合
2	处于重力场中低负异常场位置	-460~-550 mG	0.236372	斑岩铜矿与酸性花岗质岩浆活动有关
3	Mo 化探异常	$Mo>1.6\times10^{-6}$	0.230730	斑岩铜矿伴生钼矿及高温热液作用
4	W 化探异常	$W>4\times10^{-6}$	0.230730	高温热液作用伴生元素
5	其他时代花岗岩体	存在	0.225712	有利成矿围岩
6	砂页岩、火山碎屑岩、灰岩、碳酸盐岩	存在	0.221626	有利成矿围岩
7	Au-Ag 组合化探异常	$Au>2.0\times10^{-6}+Ag>100\times10^{-6}$	0.219962	
8	Cu-Mo-Au-Ag 组合化探异常	$Cu>30\times10^{-6}+Mo>1.6\times10^{-6}+Au>2.0\times10^{-9}+Ag>100\times10^{-6}$	0.219962	
9	Cu-Au 组合化探异常	$Cu>30\times10^{-6}+Au>2.0\times10^{-9}$	0.219962	
10	Cu 化探异常	$Cu>30\times10^{-6}$	0.209812	斑岩铜矿形成的主要铜钼金矿化和伴生铅锌银组合,中低温阶段热液活动常见元素组合,重要的成矿指示元素及其组合
11	Au 化探异常	$Au>2.0\times10^{-9}$	0.202868	
12	Ag 化探异常	$Ag>100\times10^{-9}$	0.202180	
13	Bi 化探异常	$Bi>0.8\times10^{-6}$	0.202180	
14	Cu-Mo-Au-Pb-Zn 组合化探异常	$Cu>30\times10^{-6}+Mo>1.6\times10^{-6}+Au>2.0\times10^{-9}+Pb>35\times10^{-6}+Zn>93\times10^{-6}$	0.189128	
15	矿床规模	有小型以上规模矿床存在	0.189575	代表直接矿化信息和矿化规模
16	已知斑岩型铜(钼)矿床点	存在	0.182974	代表直接的矿化信息
17	Mo-Ag 组合化探异常	$Mo>1.6\times10^{-6}+Ag>100\times10^{-6}$	0.187379	代表斑岩铜矿形成高温阶段低值异常 Mo 与 Ag 异常组合,说明剥蚀程度低
18	Cu 化探高值异常	$Cu>60\times10^{-6}$	0.176965	直接指示铜矿化强度
19	处于磁异常正负场变化位置	+100~-200 nT	0.168871	
20	Cd 化探异常	$Cd>300\times10^{-6}$	0.164951	斑岩铜矿形成时磁铁矿阶段,形成磁异常与中温热液阶段伴生的元素异常
21	Zn 化探异常	$Zn>93\times10^{-6}$	0.148290	
22	Pb 化探异常	$Pb>35\times10^{-6}$	0.164012	
23	地质复杂程度	>70	0.150367	代表地质构造岩浆作用活动强度,强度高利于成矿
24	处于磁异常陡变带位置	变化率 0.3-1.0	0.122824	斑岩铜矿高温阶段伴有磁铁矿形成引起
25	Mo 化探高值异常	$Mo>6.4\times10^{-6}$	0.119676	代表高温热液活动,过高则剥蚀程度较深
26	As 化探异常	$As>30\times10^{-6}$	0.115187	斑岩铜矿的外围和顶部伴生元素异常,晚阶段热液活动
27	已知其他类型铜、钼、金矿床点	存在	0.113599	其他与斑岩铜矿有关的矿化信息
28	东西向断裂	存在	0.109443	区域性的控岩、控矿断裂
29	处于重力异常梯度带位置	变化率 0.15~0.20	0.097124	与中酸性岩浆活动中心有关
30	Sb 化探异常	$Sb>2.0\times10^{-6}$	0.082338	
31	Ag 化探高值异常	$Ag>400\times10^{-9}$	0.062512	斑岩铜矿的外围和顶部伴生元素异常,晚阶段热液活动,含量高说明距成矿中心远
32	Au 化探高值异常	$Au>8\times10^{-9}$	0.035923	
33	W 化探高值异常	$W>16\times10^{-6}$	0.061781	代表高温热液活动,过高则剥蚀程度较深
34	Sn 化探异常	$Sn>5\times10^{-6}$	0.048609	代表高温热液活动,过高则剥蚀程度较深
35	中新世花岗岩(N)	存在	0.016512	岩体过大,不利于成矿

异常、已知矿床规模、重力场中低负异常场($-460 \sim -550$ mG)等;其次(因素权重在 $0.15 \sim 0.2$ 之间)为地质复杂程度、已知斑岩铜矿床点、Pb、Zn、Cd 化探异常、Cu 化探异常高值,磁异常正负场变化区域等。从地质成因分析,Mo、W、Bi 化探异常因素权重高,这与斑岩铜矿主要与中酸性岩浆活动有关,高中温热液活动强度是一致的,Mo、W、Bi 为高温元素,往往形成斑岩铜矿的伴生元素;而 Mo、W、Bi 高值区的权重值相对较低,尤其是 W 异常高值因素权重迅速降低至 0.06,说明剥蚀程度较高,不利于斑岩铜矿找矿,与地质分析一致。暗示了在斑岩铜矿找矿中,应该注意 W、Mo、Bi 的成矿指示作用,具有较低的外带异常有利于成矿,高值异常不利于成矿。Cu-Mo、Au-Ag、Cu-Mo-Au、Cu-Au-Ag 化探组合异常权重值高与斑岩铜矿常伴生有 Au、Ag、Mo 矿一致。Pb、Zn、Cd 异常权重值中等与斑岩铜矿外围常有矽卡岩型和热液型铅锌多金属矿或矿化及元素的相关性有关。磁异常正负场变化区域权重值较高与含矿热液系统为高氧化流体体系、含矿斑岩一般含一定量磁铁矿有关,成矿斑岩体相对于围岩多数有一定低正磁异常。

比较反常的现象是,冈底斯斑岩铜矿床多数与中新世酸性花岗岩有关,但其因素权重却较低,仅 0.0165,而其他时代花岗岩权重值却很高,达到 0.226,其原因可能是与成矿斑岩体一般很小(小于 1 km^2)有关,1:50 万小比例尺地质图上不能标示出来,而标示出来的中新世花岗岩体则规模较大,剥蚀深,不利于形成斑岩铜矿,导致计算时中新世花岗岩的权重值很低。而其他时代花岗岩体往往是含矿斑岩体的侵入围岩,在有后期岩体侵入时易于破碎、蚀

变,是斑岩铜矿主要含矿围岩,因此,其因素权重值较高,反映的主要为围岩因素,而非控矿斑岩体。

4 斑岩铜矿成矿远景区的确定

根据研究区各主要矿床类型的找矿模型及其预测变量的计算结果,采用中国地质科学院矿产资源研究所开发的 MRAS 资源评价系统,对冈底斯成矿带斑岩型铜矿床进行了区域成矿定位预测,运用特征分析计算成矿有利度,并根据预测成果与地质实际情况进行了对比研究,调整预测变量或找矿模型,优化预测结果,总体上计算成果与实际地质情况和矿床分布非常吻合。图 2 为斑岩型铜矿的成矿有利度色块图,从该图可以看出,几乎所有已发现的大中型铜矿床(如驱龙、厅官、白容、达布、吹坝子、洞嘎、雄村)均与成矿有利度 >0.8 的区域重合;成矿有利度 >0.6 (~ 0.9) 以上区域主要沿冈底斯岩浆岩带南部分布,其展布方向和空间分布特征与冈底斯已发现斑岩铜矿带的分布完全一致;其次在墨竹工卡-林周盆地出现大面积成矿有利度 >0.6 以上区域,显示该地区是潜在的斑岩铜矿成矿有利区域,该地区是已知热液型和矽卡岩铜铅锌多金属矿床的主要发育地区。2007 年在亚贵拉地区发现了具有大型远景的斑岩型钼矿,显示该地区是寻找斑岩型-矽卡岩型-热液型铜钼铅锌多金属矿床的有利区域,说明区域成矿定量预测结果是比较可靠的。矽卡岩矿床的多元信息预测结果与斑岩型矿床类似,多数与斑岩型矿床点重合。由于矽卡岩型矿床不是本区铜矿床的最主要类型,故本文未列出相应的结果。

据不完全统计,截止到 2007 年底,冈底斯成矿

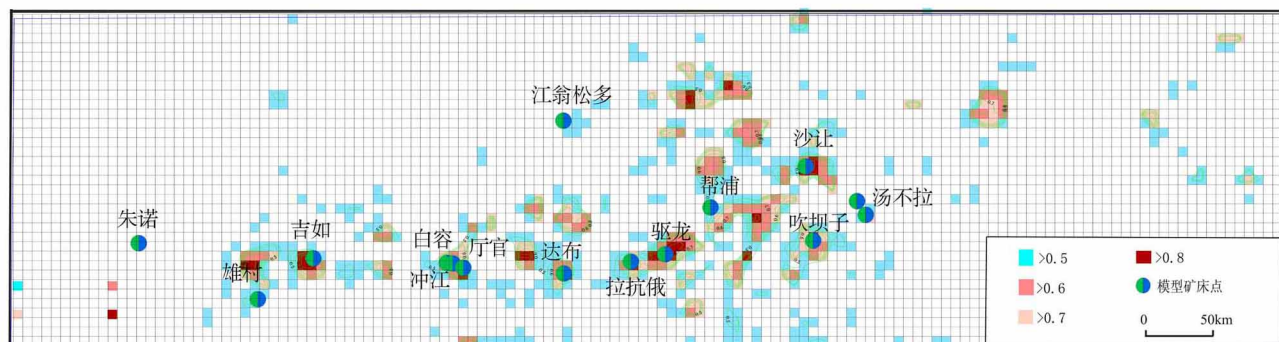


图 2 冈底斯成矿带斑岩铜矿成矿有利度色块图

Fig. 2 Metallogenetic probability color block map for Gangdese copper porphyry deposits, Tibet

带已控制铜资源量,以斑岩型铜矿占绝大多数,约占全部资源量的 90%(潘桂棠等,2008^①),其余则为矽卡岩型铜多金属矿床,其他类型矿床中铜主要为伴生元素,资源量很小。据此,利用斑岩型铜矿确定的远景区进行铜资源潜力预测可以很好地代表冈底斯成矿带全区的铜资源潜力。

成矿远景区的范围主要参照成矿有利度 >0.6 以上区域(按照等值线范围)确定,部分地区根据地质和矿化情况进行调整,将少部分地质矿化情况很好、成矿有利度 >0.5 的区域纳入。共圈定斑岩型铜矿远景区 33 处(位置参见图 3),其中 31 处位于冈底斯和念青唐古拉带,为本次资源潜力预测的重点区域,2 处位于班戈-腾冲构造岩浆岩带。

5 铜铅锌资源潜力预测方法

5.1 预测方法

目前,比较成熟的资源量估计方法主要为基于矿床模型和地球化学数据 2 大类型,前者如德尔菲法,后者如丰度估计法。研究区虽然发现矿床(点)很多,但经过地质勘探工作的矿床却非常少,已知的

储量数据可靠程度较低,限制了矿床模型方法的使用。鉴于本项目工作区已有较完整的地球化学数据资料,因此采用地球化学方法进行资源量预测^②。

近年来,基于地球化学资料进行成矿资源潜力评价方法做了大量工作,主要方法有地球化学块体法(谢学锦等,2002;刘大文,2002)、丰度估计法(Celenk et al., 1978),以及在此基础上进行新的研究和改进的方法,如王学求(2003)提出的“成矿可利用金属”的概念等方法。地球化学块体法主要适用于低密度地球化学数据条件下,估计大规模地质块体(小比例尺)总体资源潜力,不是针对单个小的预测区资源量估计方法;与丰度估计法类似的有面金属量法(索洛沃夫,1957),两者的原理均是利用次生晕和分散流资料对矿体进行定量评价;以晕的扩散模式为依据,在使用分析结果并结合地质资料圈定次生分散晕的条件下,研究某一水平截面(或平行于斜坡的截面)上所含的成矿元素的金属量与同一水平上的矿体中的金属量之间的对应关系,并籍此进行资源估算。本文主要采用面金属量法对研究区铜铅锌矿的资源潜力进行评价,方法和原理参见文献(丁建华等,2007)。

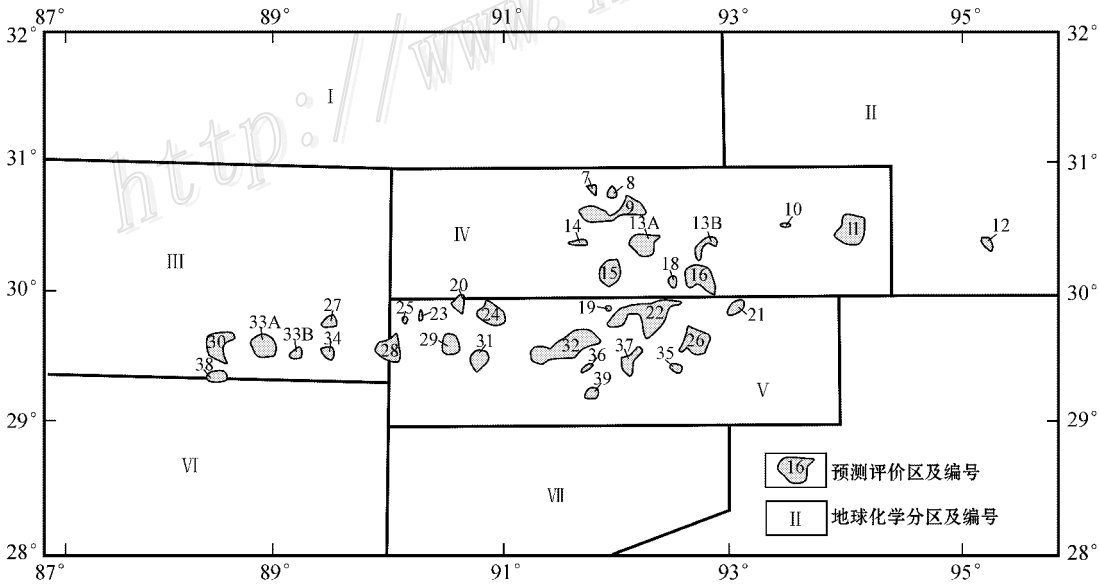


图 3 西藏冈底斯成矿带斑岩铜矿远景区分布(地球化学分区名称参见表 2,远景区名称预测资源量参见表 3)

Fig. 3 Predicated target areas for Gangdese copper porphyry deposits, Tibet

① 潘桂棠,李光明,余宏全,等. 2008. 印度-亚洲主碰撞带资源潜力与成矿预测. 成都地质矿产研究所和中国地质科学院矿产资源研究所.
② 中国地质科学院. 1982. 矿产资源评价的理论和实践.

面金属量法是根据美国地质学家^①的研究成果提出的,他首先提出地壳元素的丰度与矿产资源存在近乎直线关系,1978 年 Celenk 等提出了一套丰度估算的经验公式:

$$Q_H = \alpha \times \frac{P}{40 \times K} \times H \quad (\text{公式 2})$$

其中 $P = \Delta S (\sum_{x=1}^n C_x - n C_\phi)$ (公式 3)

式中 Q_H 为分散流取样介质计算的预测金属储量或资源量(吨); $\alpha < 1$ 为呈非工业品位金属量可能份额的校正系数或表外矿在总量中所占的比例系数,本次计算按照 $\alpha = 0.5$; K 为次生富集系数; ΔS 为预测区面积; C_x 为采样点的实际成矿元素含量; C_ϕ 为地区性地球化学异常下限; H 为预测深度(m); P 为面金属量($m^2 \cdot \%$); $1/40$ 为在岩石密度为 2.5 t/m^3 得到的换算常数。

5.2 冈底斯地球化学分区及异常下限的确定

由于待评价区范围近 20 万 km^2 , 面积很大, 除冈底斯成矿带外, 还包括念青唐古拉和喜马拉雅等几个重要的地质构造单元, 而且地球化学测量比例尺也不一致, 加之区域上元素地球化学分布的不均匀性, 因此需要对研究区进行地球化学分区, 分别确定地球化学背景值和异常下限。为比较准确的反映各地区地球化学背景值特点, 对冈底斯及邻近区域的地球化学背景值和异常下限均进行了计算。根据工作区地质构造分区特点、地球化学分区特征和水系沉积物测量比例尺的不同, 将其分为班戈-申扎

(I) 比如-工青(II) 日喀则-谢通门(III) 当雄-嘉黎(IV) 拉萨-墨竹工卡(V) 拉轨岗日-康马(VI) 措美-隆子(VII) 等 7 个地球化学区(图 4)。各区的主要成矿元素地球化学背景值采用在迭代剔除 3 倍方差以外的离群数据后, 再进行统计分析, 得到各区的均值和均方差, 以均值加 2 倍方差作为各地球化学分区主要成矿元素的地球化学异常下限值(见表 2)。计算结果表明, 雅鲁藏布江缝合带以南的喜马拉雅地区各主要成矿元素的地球化学背景值和异常下限显著高于冈底斯成矿带和南羌塘地区。

5.3 其他预测相关参数的确定

利用面金属量法进行资源量预测时, 需要确定公式 2 和公式 3 的相关参数。系数 α 与非工业品位金属量可能份额, 按照一般规律取值为 0.5。

次生富集系数 K 值为水系沉积物或土壤中成矿元素含量与岩石含量的比值, 对资源量预测的影响较大, 代表成矿元素从岩石演变成成为土壤或水系沉积物过程中富集($K > 1$)或贫化($K < 1$)的程度, K 值大小受气候、地形地貌、剥蚀程度、元素地球化学行为等多种因素影响, 一般情况下 K 值在 0.5~2.0 之间, 容易在氧化带富集或被有机物吸附的元素 K 值常常大于 1, 如 U; 易于分散的元素 K 值小于 1, 如 K_2O 、 Na_2O (王世称 2002)。本次工作未能收集到全区岩石的成矿元素平均含量值, 不能直接确定元素的次生富集系数, 根据墨竹工卡、谢通门幅水系沉积物测量结果, 计算次生富集系数为 0.95~1.02 之

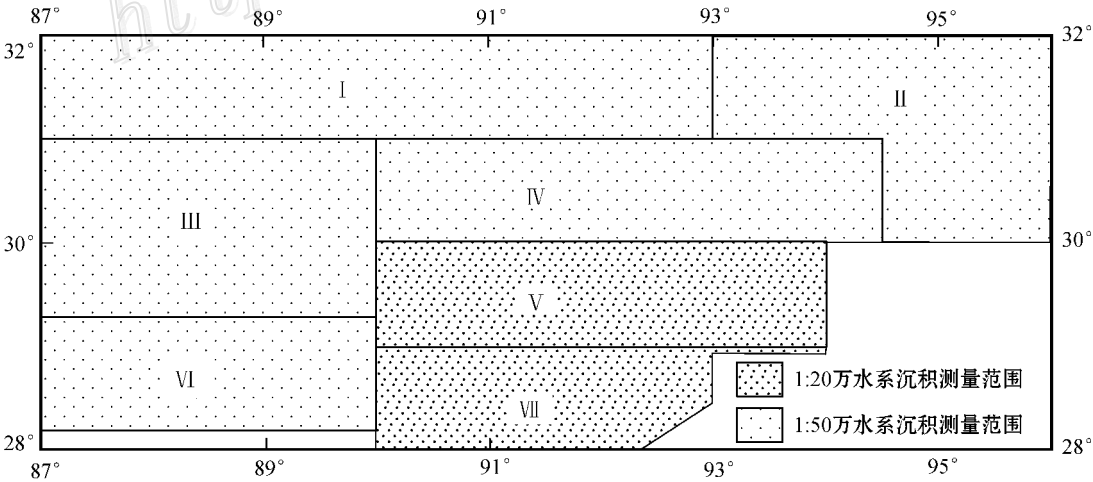


图 4 冈底斯成矿带及邻区地球化学分区示意图

Fig. 4 Geochemical subareas in the Gangdese metallogenic belt

① 中国地质科学院. 1982. 矿产资源评价的理论和实践.

表 2 冈底斯成矿带及邻区各地球化学分区名称和主要成矿元素背景值和异常下限

Table 2 Geochemical subareas and background values and thresholds of copper and other elements in each subarea within the Gangdese metallogenic belt and neighboring areas

分区名称	构造位置	比例尺	Cu/10 ⁻⁶			Pb/10 ⁻⁶		
			均值	方差	异常下限	均值	方差	异常下限
班戈-申扎(Ⅰ)	班戈-腾冲西段	1:50 万	4.8	11.8	25	17.0	6.2	30
比如-工青(Ⅱ)	班戈-腾冲中北段	1:50 万	20.5	7.0	35	28.0	7.5	45
日喀则-谢通门(Ⅲ)	冈底斯带西段	1:50 万	12.9	6.3	32	26.9	10.7	50
当雄-嘉黎(Ⅳ)	念青唐古拉	1:50 万	13.6	6.5	28	29.7	10.0	50
拉萨-墨竹工卡(Ⅴ)	冈底斯中段	1:20 万	22.6	9.7	40	23.9	6.5	40
拉轨岗日-康马(Ⅵ)	喜马拉雅	1:50 万	27.1	17.1	60	24.5	5.8	40
措美-隆子(Ⅶ)	喜马拉雅	1:20 万	28.4	9.4	48	27.6	7.9	4

分区名称	构造位置	比例尺	Zn/10 ⁻⁶			Ag/10 ⁻⁹		
			均值	方差	异常下限	均值	方差	异常下限
班戈-申扎(Ⅰ)	班戈-腾冲西段	1:50 万	43.0	14.7	75	60	16	92
比如-工青(Ⅱ)	班戈-腾冲中北段	1:50 万	80.5	24.6	130	64	22	110
日喀则-谢通门(Ⅲ)	冈底斯带西段	1:50 万	63.5	18.7	100	81	34	150
当雄-嘉黎(Ⅳ)	念青唐古拉	1:50 万	68.1	26.6	125	75	31	140
拉萨-墨竹工卡(Ⅴ)	冈底斯中段	1:20 万	69.5	18.2	110	71	28	130
拉轨岗日-康马(Ⅵ)	喜马拉雅	1:50 万	67.2	25.5	120	50	17	85
措美-隆子(Ⅶ)	喜马拉雅	1:20 万	87.3	20.6	130	79	29	140

间,取值为 1.0。为进一步对比,本次研究还计算了“三江”地区和大兴安岭地区水系沉积物中铜铅锌的 K 值。冈底斯和念青唐古拉地区,其气候条件和地形地貌、成矿地质背景与“三江”北段类似;“三江”地区水系沉积物铜的次生富集系数为 1.01(徐善法等 2007),与大兴安岭地区水系沉积物中铜铅锌的 K 值(0.89~1.01)非常接近。3 个地区的气候条件和地形地貌特征虽然有差异,但 K 值却非常相近,可见,铜在水系沉积物中的 K 值差异并不大。

远景区中成矿元素含量根据预测区所圈定区域的实际含量值的加权平均值计算。由于部分采样点出现异常高值,对预测结果有较大影响,因此必须对异常高值进行处理,处理原则是利用全区成矿元素的平均含量加上 8 倍标准方差,作为异常高值的下限,对于高于异常高值下限的样品值全部以异常高值下限替代,按替代后的含量计算远景区的成矿元素含量加权平均值。按全区成矿元素的平均含量加上 8 倍标准方差确定研究区 Cu 异常高值下限为 465×10^{-6} 。

6 资源量预测结果和讨论

6.1 资源量预测结果

在对研究区斑岩铜矿进行区域远景区和资源量

预测相关参数进行确定后,以面金属量法为基础,采用中国地质科学院矿产资源研究所开发的 MRAS 资源评价系统对研究区斑岩铜矿的资源量进行了综合计算,计算结果见表 3。计算过程中取 $\alpha = 0.5$,次生富集系数 K 值铜为 1.0,预测深度为 1 000 m。评价区面积根据图 2 给出的远景区位置确定,由 MAPGIS 系统直接读出,然后根据比例尺换算为实际面积,预测区的地球化学平均值低于所在分区的地球化学异常下限值,则预测资源量为零。此外,当待评价远景区范围内没有地球化学数据时,也会引起预测资源量为零,预测资源量为零的评价区在表 3 中未予以列出。33 处斑岩型铜矿远景区中,有 26 处得出预测资源量。

从表 3 铜资源量预测结果看,研究区潜在铜资源远景合计 13 617.80 万吨,找矿前景巨大。预测资源量全部分布在冈底斯带和念青唐古拉带,与已知地质矿产分布情况吻合。其中,冈底斯带西段(地球化学Ⅲ区)合计为 1 998.81 万吨,矿床类型以斑岩型为主,冈底斯东段(地球化学Ⅴ区)合计为 9 524.75 万吨,矿床类型以斑岩型为主,其次为矽卡岩型,念青唐古拉(地球化学Ⅳ区)合计为 2 094.24 万吨,矿床类型主要为矽卡岩型,其次为斑岩型。以单个远景区看,预测资源量比较大的区域(>100 万吨)有驱龙-甲马-拉抗俄、松多雄、白容-冲江、松多握、吉如、

高,吻合程度越好,说明资源量估计结果是较为可靠的。由此推测,部分预测资源量与已控制资源量有较大差异的斑岩型铜矿远景区仍有很大的找矿前景,如崩布弄金矿、汤不拉、松多雄、吹败子、松多握、达布等远景区。

从以上分析可以看出,在全面收集研究区地质、矿产、物化探资料基础上,建立基于 GIS 技术的多元信息数据库,以成矿理论为指导,建立矿床模型、构建合理的地质预测变量,采用数理统计方法,可以对大量的地质数据进行空间处理,最大限度的利用已有的地质物化探信息,开展找矿预测和资源潜力预测研究,处理结果与地质理论推断和实际矿产分布吻合很好,结果比较可靠,可以为区域找矿工作部署提供参考。

6.2 其他需要说明的问题

(1) 地球化学数据范围的控制

本次资源量预测时采用的地球化学数据为分散流测量数据,属次生晕,而非原生晕数据。一般情况下,水系沉积物异常的范围远大于原生晕的范围,可能会引起远景区范围非正常扩大,影响资源量预测结果。本次预测过程中注意到了这一问题,在确定远景区范围时主要依据多元信息定位预测成果确定,该成果综合考虑了地、物、化、遥等多个方面的控矿因素,对预测评价范围作出了较好地限定,主要远景区范围仅限于成矿有利度 >0.6 的范围,其面积小于分散流异常面积,不会造成评价区范围非正常放大。另一方面,选择部分分散流异常的数据与成矿有利度 >0.6 范围,所包括数据分别按照丰度估计法进行资源量计算,其结果差异不大,误差在 10% 以内,有时按照单个分散流异常数据计算的资源量甚至小于按照成矿有利度 >0.6 范围内计算的结果。这是因为,随着预测区范围的扩大,地球化学异常外带的低含量数据会被带入计算,从而降低预测区的地球化学平均值,造成资源量计算结果相差不大,甚至降低。

(2) 斑岩铜矿资源量预测的代表性

对冈底斯成矿带铜矿资源量的估计,主要依据斑岩型铜矿模型及其远景区范围确定,一方面是因为斑岩型铜矿是研究区最重要的铜矿床类型,其资源量占区内已控制资源量的绝大部分;其次,尽管矽卡岩型铜矿床也是研究区重要的铜矿床类型,但由于其通常与斑岩铜矿相伴生,区域成矿定位预测计算结果也表明矽卡岩型矿床有利度高值区域常与斑

岩型矿床的高值区域重复,斑岩型矿床有利远景区域一般已包含了大部分矽卡岩型矿床的有利区域。再则,面金属量法主要依据地球化学数据,该方法不考虑矿床类型。因此,对研究区铜矿床资源前景的评价主要依据斑岩型铜矿床远景区范围确定,而不再计算矽卡岩型铜矿的成矿远景。

References

- Celenk O, Clark A L, de Vletter D R, Garrett R G and van Staaldvinen C. 1978. Workshop on abundance estimation[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 10(5): 473-480.
- Ding J H, Xiao K Y, Liu R, Xue S R and Cheng X. 2007. Application of areal productivity to quantification of regional resources: A case study of east Tianshan Mountains[J]. Mineral Deposits, 26(2): 230-236 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Yang Z S, Xu W Y, Mo X X, Ding L, Gao Y F, Dong F L, Li G M, Qu X M, Li G M, Zhao Z D, Jiang S H, Meng X J, Li Z Q, Qin K Z and Yang Z M. 2006a. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: I. Mineralization in main collisional orogenic setting[J]. Mineral Deposits, 25(4): 337-358 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Pan G T, Wang A J, Mo X X, Tian S H, Sun X M, Ding L, Wang E Q, Gao Y F, Xie Y L, Zeng P S, Qin K Z, Xu J F, Qu X M, Yang Z M, Yang Z S, Fei H C, Meng X J and Li Z Q. 2006b. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: II. Mineralization in late-collisional transformation setting[J]. Mineral Deposits, 25(5): 521-543 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Qu X M, Yang Z S, Meng X J, Li Z Q, Yang Z M, Zheng M P, Zheng Y Y, Nie F J, Gao Y F, Jiang S H and Li G M. 2006c. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. Mineral Deposits, 25(6): 629-651 (in Chinese with English abstract).
- Liu D W. 2002. Development and significance of geochemical blocks[J]. Geochimica, 31(6): 539-547 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z G, Chi S D and Zhou S P. 2002. The main steps of applying GIS to ore predicting[J]. Geology and Exploration Bulletin, 17(2): 140-144 (in Chinese with English abstract).
- Murphy M A, Yin A and Harrison T M. 1997. Significant crustal shortening in south-central Tibet prior to the Indo-Asian collision[J]. Geology, 25: 719-722.
- Qu X M, Hou Z Q and Huang W. 2001. Is Gangdese porphyry copper belt the second "Yulong" copper belt[J]? Mineral Deposits, 20(46): 355-366 (in Chinese with English abstract).
- Rui Z Y, Hou Z Q, Li G M, Liu B, Zhang L S and Wang L S. 2006. The metallogenic model of the copper porphyry deposits in Gangdese[J]. Geology Review, 52(4): 459-466 (in Chinese with English abstract).
- She H Q, Feng C Y, Zhang D Q, Pan G T and Li G M. 2005. Charac-

- teristics and metallogenetic perspective of the Skarn Copper-Lead-Zinc polymetallic deposits in central eastern gangdese[J]. Mineral Deposits, 24(5):508-520 (in Chinese with English abstract).
- Solovov A L. 1957. Theory and practice foundation of metallometric survey[M]. Beijing: China Industry Press. 46-121 (in Chinese).
- Wang Q H, Wang B S, Li J G, Yao P, Li Z, Zhou Z Y, Cheng L J and Liu H F. 2002. Basic features and ore prospect evaluation of the Gangdese island arc, Tibet and its copper polymetallic ore belt[J]. Geological Bulletin of China, 21(1):35-40 (in Chinese with English abstract).
- Wang S C. 2002. The theory and method for composite information mineral resources prospect[M]. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Wang X Q. 2003. A geochemical quantitative assessment model and approach for large ore deposit[J]. Earth Science Frontiers, 10(1):257-261 (in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Wang Y Y, Xue Q W, Zhang S T and Huang W B. 2003. Assessment system of copper deposit digital model of China[J]. Mineral Deposits, 22(4):425-429 (in Chinese with English abstract).
- Xiao K Y, Zhang X H, Wang S L, et al. 2000. The GIS evaluation system for mineral resources[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- Xie X J, Liu D W and Xiang Y C. 2002. Geochemical blocks—Development of concept and methodology[J]. Geology in China, 29(3):225-233 (in Chinese with English abstract).
- Xu S F, Yuan Z L and Chen J P. 2007. Geochemical characteristics of the northern part of Sanjiang region[J]. Geophysics and Geochemistry, 31(2):99-105 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P D, Hu W L and Li Z J. 1994. Statistics prospect on ore deposit[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 丁建华, 肖克炎, 刘锐, 薛顺荣, 程勳. 2007. 区域资源定量评价中面金属量法的应用——以东天山为例[J]. 矿床地质, 26(2):230-236.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 莫宣学, 丁林, 高永丰, 董方浏, 李光明, 曲晓明, 李光明, 赵志丹, 江思宏, 孟祥金, 李振清, 秦克章, 杨志明. 2006a. 青藏高原碰撞造山带:I-主碰撞造山成矿作用[J]. 矿床地质, 25(4):337-358.
- 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006b. 青藏高原碰撞造山带:II-晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 25(5):521-543.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 孟祥金, 李振清, 杨志明, 郑绵平, 郑有业, 聂凤军, 高永丰, 江思宏, 李光明. 2006c. 青藏高原碰撞造山带:III-后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 25(6):629-651.
- 刘大文. 2002. 地球化学块体的概念及其研究意义[J]. 地球化学, 31(6):539-547.
- 刘治国, 池顺都, 周顺平. 2002. 成矿预测中应用 GIS 的主要步骤[J]. 地质找矿论丛, 17(2):140-144.
- 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[J]. 矿床地质, 20(4):355-366.
- 芮宗瑶, 侯增谦, 李光明, 刘波, 张立生, 王龙生. 2006. 冈底斯斑岩铜矿成矿模式[J]. 地质论评, 52(4):459-466.
- 余宏全, 丰成友, 张德全, 潘桂棠, 李光明. 2005. 冈底斯中东段砂卡岩铜铅锌多金属矿床特征及成矿远景分析[J]. 矿床地质, 24(5):508-520.
- 索洛夫沃 A L. 1957. 金属量测量的理论和实践基础[M]. 北京:中国工业出版社. 46-121.
- 王全海, 王保生, 李金高, 姚鹏, 李志, 周祖翼, 程力军, 刘鸿飞. 2002. 西藏冈底斯岛弧及其铜多金属矿带的基本特征与远景评价[J]. 地质通报, 21(1):35-40.
- 王世称. 2002. 综合信息矿产预测理论与方法[M]. 北京:科学出版社.
- 王学求. 2003. 大型矿床地球化学定量评价模型和方法[J]. 地学前缘, 10(1):257-261.
- 肖克炎, 张晓华, 王四龙, 等. 2000. 矿产资源 GIS 评价系统[M]. 北京:地质出版社.
- 肖克炎, 王勇毅, 薛群威, 张寿庭, 黄文斌. 2003. 中国铜矿数字矿床模型评价系统的开发[J]. 矿床地质, 22(4):425-429.
- 谢学锦, 刘大文, 向运川. 2002. “地球化学块体”——概念和方法学的发展[J]. 中国地质, 29(3):225-233.
- 徐善法, 袁志亮, 陈建平. 2007. 三江北段地球化学特征研究[J]. 物探与化探, 31(2):99-105.
- 赵鹏大, 胡旺亮, 李紫金. 1994. 矿床统计预测[M]. 北京:地质出版社.