

基于GIS的冈底斯东段铜多金属矿多元信息成矿预测与潜力评价

黄照强¹, 黄树峰², 付勇², 赵珍梅¹, 程明华¹

(1. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 100025; 2. 中国冶金地质总局第二地质勘查院, 福建莆田 351111)

[摘 要] 本文通过对西藏冈底斯成矿带东段约 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 区域的地质、物探、化探、遥感资料的收集和分析, 在区域地质条件和成矿规律研究的基础上, 建立了该研究区斑岩型铜矿床的成矿模型, 确定了成矿预测变量。并且, 利用基于GIS的MRAS系统采用特征分析法进行成矿远景区预测, 然后在此基础上利用数量化理论I方法进行资源潜力评价。结果显示, 圈定的成矿预测区域包含有大部分已知大中型铜矿, 并与该区域地质理论分析相吻合。资源潜力估算的结果表明, 冈底斯东段仍具有良好的斑岩型铜矿找矿潜力。

[关键词] GIS 多元信息 成矿预测 冈底斯东段 资源量预测 铜多金属

[中图分类号] P624.6 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2011)01-0113-08

Huang Zhao-qiang, Huang Shu-feng, Fu Yong, Zhao Zhen-mei, Cheng Ming-hua. Mineralization prediction and potential evaluation based on GIS and multi-source information for copper polymetallic deposits in the eastern Gangdise belt, Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(1): 0113-0120.

1 引言

矿产勘查过程从十九世纪到现在, 经历了“找矿人”勘探、传统找矿、理论勘查及目前的以高新技术为代表的科学找矿阶段, 矿产资源预测与评价实质上贯穿了矿产勘查的全过程。随着社会与经济的持续性发展, 对固体矿产资源的需求持续增长, 矿产资源开发日益加剧, 地表露头矿和浅层易找矿越来越少, 矿产勘查已进入了找隐伏矿和深部矿阶段, 找矿工作的难度也越来越大, 成本投入也越来越高。这使得传统的找矿方法很难在找矿上有所突破, 单一信息预测找矿也难于奏效, 因此需要利用多元信息综合分析成矿预测, 以判断矿床的存在, 以便尽可能少的投入取得最大的找矿效果。成矿预测是在基本理论指导下, 根据一定的成矿地质理论、成矿地质环境、成矿条件、控矿因素和找矿标志对还没有而将来可能或应当发现的矿床做出推断、解释和评价, 提出潜在矿床发现的途径, 从而导致矿床的发现和潜在资源量的评价(朱裕生等, 1997)。成矿预测以综

合地质研究为基础, 以矿床模型或地质异常为依据, 以成矿地质场、地球物理场、地球化学场、生物场及遥感影像场的有用数据为背景, 以数学模型、经济技术环境评价模型为工具, 以地质分析、计算机科学研究和模拟为手段, 以发现成矿远景区为目标, 以验证其可靠性、发现矿床并做出评价为最后结果(赵鹏大等, 2003)。成矿预测一直是矿产勘查研究的热点, 始终贯穿矿产勘查的整个过程, 并且在长期的成矿预测研究中形成了一系列的理论和方法, 比如“三部式”资源评价法(Singer, 1993)、地质异常预测理论(赵鹏大, 1999)、“三联式”成矿预测理论(赵鹏大, 2002)、综合信息成矿预测理论(王世称等, 1989)、“三步式”评价方法(肖克炎等, 2006)、特征分析法(Richard *et al.*, 1981)、证据权法(Bonham-Carter *et al.*, 1989)和信息量计算法等。随着定量方法和信息技术的发展与广泛应用, 成矿预测是地质科学领域应用定量方法和信息技术较早领域之一, 近几年, 矿产资源预测进入了一个信息更加综合、技术飞快更新的新时期(肖克炎等, 2006)。成矿预测

[收稿日期] 2010-11-15; [修订日期] 2010-12-16; [责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 中国冶金地质总局科研项目“西藏冈底斯东段铜多金属资源评价与新方法技术研究”资助。

[第一作者] 黄照强(1973年-), 男, 2005年毕业于南京大学获博士学位, 高级工程师, 主要从事地理信息系统和遥感地质找矿及矿产资源评价研究。E-mail: huangzhaoqiang@cmgb.cn。

的主要任务是：(1) 成矿远景预测,即研究区是否有工业价值的矿床存在;(2) 经济价值预测,即如果存在,其规模大小如何;(3) 找矿方向预测,即下一步最佳找矿方向的建议。成矿预测被认为是“在不确定条件下制定最优决策”的工作,也就是在各种可能的决策和所对应的可能结果中,或称“决策谱”中选择一种最佳结果,由于其不确定性,所以是寻求正面结果概率最大、负面结果概率最小的双概率表征(赵鹏大,2007)。国内外学者已经在成矿预测方面进行了许多研究和应用,取得了一些成果(Cheng *et al.*, 1999; Scot *et al.*, 2001; Agterberg *et al.*, 2002; 成秋明等,2007; 肖克炎等,2009; 陈郑辉等,2009; 李光明等,2009; 余宏全等,2009)。

西藏冈底斯成矿带是我国西部地区“十二五”期间要加强调查评价的重点成矿区带之一(李光明等,2009),该带已发现了甲马、驱龙、厅宫、努日等一批铜多金属矿床。本文作者所在的研究团队在冈底斯东段开展了地质调查工作,运用新的思路进行成矿定位预测,快速缩小找矿靶区,指导矿产勘查工作。本文基于地理信息系统(Geographical Information System, GIS)和成矿理论方法,在对冈底斯东段成矿带地质背景和成矿规律进行研究的基础上,利用基于GIS的Mineral Resource Assessment System(MRAS系统)(肖克炎等,2000)对冈底斯东段成矿带铜多金属矿进行成矿预测和潜力评价。

2 研究区成矿背景分析

西藏冈底斯成矿带一般指位于南侧的印度河-雅鲁藏布缝合带与北部的班公湖-怒江缝合带之间的近东西向的狭长地域,长约2500km,南北宽150~300km,面积达 $45\times 10^4\text{km}^2$ 的巨型构造-岩浆带(潘桂棠等,2006),是我国西部的重要成矿区带之一。西藏冈底斯东段通常指西藏冈底斯成矿带仁布以东的尼木至工布江达一带,本文所称的“冈底斯东段”特指西藏冈底斯成矿带仁布以东的尼木至曲松一带(见图1)。研究区地理坐标:东经 $90^{\circ}00' \sim 92^{\circ}15'$,北纬 $29^{\circ}00' \sim 29^{\circ}51'$,总面积约 $2\times 10^4\text{km}^2$ 。

西藏冈底斯成矿带自晚古生代以来经历了特提斯多岛弧盆系统演化到亚洲-印度大陆碰撞与青藏高原隆升的多阶段复杂的构造演化过程,可大致划分出石炭纪-三叠纪活动大陆边缘、侏罗纪-早白垩世特提斯多岛-弧盆系统、白垩纪末-始新世亚洲-印度大陆碰撞造山和中新世以来后碰撞伸展等多个构造演化阶段(侯增谦等,2006a; 侯增谦等,2006b; 侯增谦等,2006c; 李光明等,2009)。在新特提斯洋往东北斜向俯冲-闭合期间($68 \sim 66\text{Ma}$),由于雅鲁藏布江走滑断裂的左旋剪切作用,冈底斯东段由东往西先后形成了NEE向朗县基底剥离断层、泽当层间剥离断层,并在后续回弹活动中形成与NEE向上层剥离断层有关的达孜-甲马

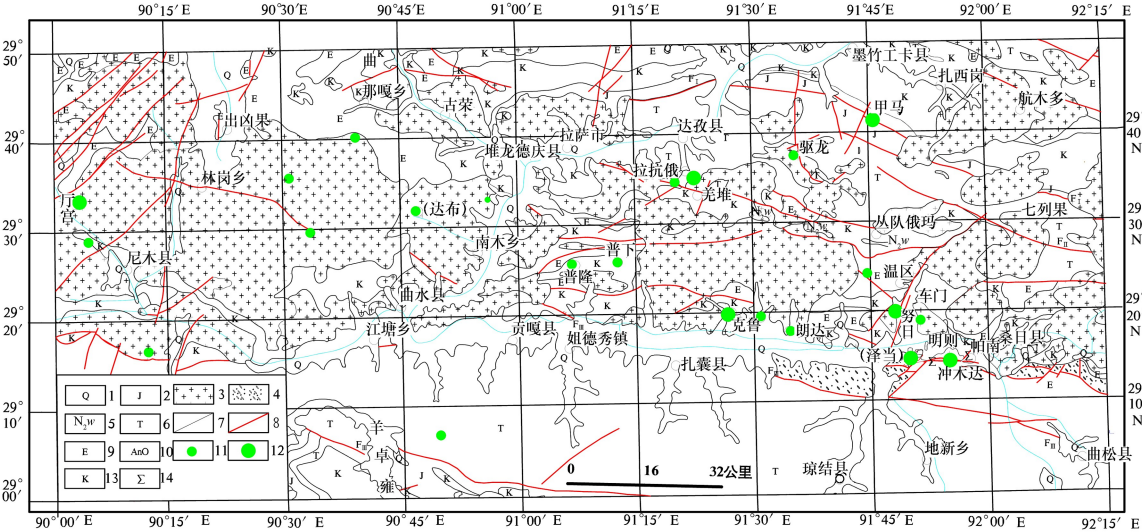


图1 西藏冈底斯东段成矿带地质矿产简图

Fig. 1 Sketch map showing geology and mineral resources in the eastern Gangdise metallogenic belt, Tibet

1-第四系;2-侏罗系;3-花岗岩;4-罗布莎群;5-邬郁群;6-三叠系;7-地质界线;8-断层;9-古近系;10-松多岩群;11-小型矿床;12-大中型矿床;13-白垩系;14-超基性岩

1-Quaternary;2-Jurassic;3-granite;4-Luobusha Formation;5-Wuyu Formation;6-Triassic;7-geological boundary;8-fault;9-Paleogene;10-Songduoyan Formation;11-small deposit;12-large and medium deposit;13-Cretaceous;14-ultrabasic

“类双峰”玄武-流纹质潜火山岩脉带(53~42Ma, 侯增谦, 2006e), 三者共同组成了雅鲁藏布江走滑断裂的拉分型转换构造。缘于新特提斯大洋板片的向北俯冲消减, 雅鲁藏布江缝合带、日喀则弧前盆地和冈底斯弧花岗岩基自南而北依次展布完好保留, 并且由于65Ma以来的印度-亚洲大陆碰撞, 冈底斯带南缘的雅鲁藏布江缝合带分别被南倾的大反向逆冲断裂系和北倾的冈底斯逆冲断裂系改造, 并导致上盘冈底斯弧花岗岩基大面积剥露, 大规模的壳源花岗岩和壳/幔混源花岗岩沿冈底斯弧相伴侵位, 形成巨型规模中生代安第斯型冈底斯弧之上的冈底斯碰撞期火山-岩浆带, 并伴有强烈的多金属成矿作用, 形成一条独特的主要与碰撞造山作业有关的冈底斯多金属成矿带(侯增谦等, 2006a)。

冈底斯东段区域地层由老至新递次出现: ① 前奥陶系松多岩群(AnO, 黑云角闪斜长变粒岩, 石榴十字二云片岩), 呈变质核杂岩形式通过基底剥离断层与上三叠统修康群(T_3x)接触; ② 三叠系为一套浅变质细碎屑岩, 往往出露在区域性NW向复背斜核部; ③ 侏罗-白垩系, 主要出露有北带多底沟组(J_3d)及林布宗组(K_1l)和叶巴组($J_{2-3}y$)、中带门中组($K_{1-2}m$)、南带比马组(K_1b)等含矿地层, 其中, 多底沟组主要由结晶灰岩、大理岩组成; 林布宗组为一套浅变质的潮坪相细碎屑岩沉积; 叶巴组主要由中酸性火山岩、火山碎屑岩组成, 夹少量沉积岩夹层; 比马组(K_1b)主要由细晶(粉晶)灰岩(大理岩)、板岩及片理化玄武质安山岩、英安岩、细砂岩、变质片状安山质凝灰岩组成, 夹有石英角岩、透辉石-石榴石层砂卡岩; 门中组($K_{1-2}m$)主要由灰岩、钙质砂岩、钙质砂质板岩等组成, 夹有(硅灰石)石榴石层砂卡岩(闫学义等, 2010b)。

区域岩浆岩形成有: 沿雅鲁藏布江断裂带分布总体倾向南的朗达-帕南蛇绿岩和总体上呈NEE向带状(或火山口呈串珠状)分布的努日-日岗安山质火山岩角砾(熔)岩带、拉萨-桑日呈北西向带状分布于普隆、温区一线的中酸性火山岩和总体上近东西向的侵入岩带、拉抗俄-驱龙“双峰式”碱性玄武质-流纹质次火山岩带、克鲁-程巴钾长花岗岩带。区域上大多数与成矿关系密切的产生一系列的斑岩、相关的小岩体及火山岩, 往往侵位在NW向含矿地层层间构造带与NEE向走滑断裂带的交汇部位, 属钾玄岩系列或高钾钙碱性系列, 多形成在中新世(22~12Ma)(郑有业等, 2002)。

该区的成矿主要有形成于主碰撞期(65~41Ma)的砂卡岩型铜铅锌金矿和后碰撞期(25~

0Ma)的斑岩型(+砂卡岩型或层砂卡岩型)铜钼金铅锌多金属矿(侯增谦等, 2006a; 侯增谦等, 2006b; 侯增谦等, 2006d; 闫学义等, 2010a)。斑岩型矿床的矿体形成受控于走滑推闭型转换断裂构造, 层砂卡岩型矿床的矿体形成受控于走滑拉分型转换断裂构造(闫学义等, 2010a)。冈底斯成矿带北部在晚侏罗世以前受班公湖怒江洋向南俯冲及其后的碰撞, 成矿带南部在中新生代发生新特提斯洋向北俯冲及其后的碰撞等构造岩浆事件, 因此, 成矿带北部矿床的形成主要受班公湖怒江洋向南俯冲及其后碰撞事件的控制, 南部的矿床则受控于新特提斯洋壳向北俯冲及其后的碰撞构造事件(梁华英等, 2008)。冈底斯东段陆缘火山-岩浆弧盆系属于冈底斯-念青唐古拉板片的次级构造单元, 是东特提斯构造域自中生代以来具有独特演化历程的一个多岛弧碰撞造山带(郑有业等, 2002)。区域铜矿主要有砂卡岩型和斑岩型两种, 属于砂卡岩型的有甲马铜钼多金属矿、克鲁铜金矿、努日铜钼矿、冲木达铜金矿、陈坝铜金矿, 属于斑岩型的有厅官铜矿、白容铜矿、冲江铜(钼)矿和驱龙铜(钼)矿。

1:250万航磁化极 ΔT_z 异常表明: 近东西(NW)向雅鲁藏布江走滑断裂带及其NEE向拉分型转换构造带显示强磁异常带, 强度100~300nT, 局部高达700nT, 其间夹-100nT的负异常条带, 主要体呈东西走向, 其中, 正异常对应于近东西向超基性岩带(或含铬铁矿岩体)和NEE向旦师庭组中(偏基性)性火山角砾岩带, 负磁异常则对应上白垩统(日喀则群)复理石分布区, 显示 $K_2 \sim E_{1-2}$ 时期走滑拉分型转换构造对深源地体分布(引起区域地球物理异常)的控制作用。Cu、Mo、Au、Pb、Zn异常集中分布于雅江缝合带以北拉分型转换构造带。

3 研究方法

本文主要采用基于GIS平台的多元信息数据库, 在基于GIS的MRAS软件上开展成矿预测研究, 采用的数据库包括地质、物探、化探、遥感和矿产地等, 比例尺为1:20万。预测过程为: 1) 空间定位预测, 通过地质背景和成矿规律分析、提取与成矿有关的变量因素, 利用软件的空间叠置分析功能, 提取预测变量、开展变量在预测单元的空间分布和统计状况, 对变量进行二值化处理, 使用特征分析法进行预测单元的成矿概率分析和靶区预测, 并将得到的成果结合地质变量特征进行分析, 得到具有成矿潜力的预测单元; 2) 潜力预测, 在基于空间定位预测的基础上, 使用相同的变量因素, 利用数量化理论I

(赵鹏大,2004) 进行定量预测,得到预测单元资源量。矿产资源潜力预测评价技术流程如图 2 所示。

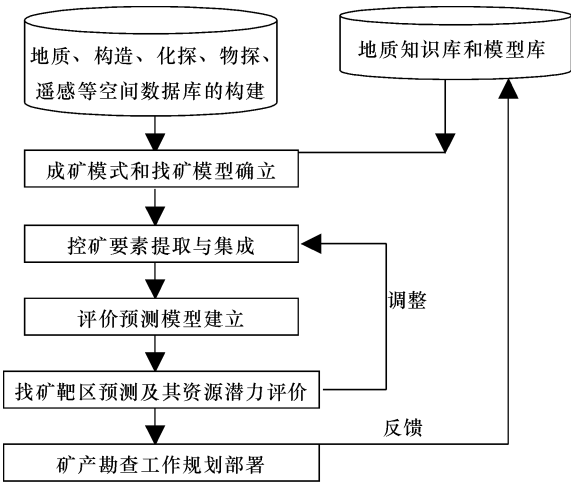


图 2 矿产资源评价技术流程

Fig. 2 Evaluation technology flow of mineral resources

3.1 特征分析法

特征分析是一种多元统计分析方法,在矿产资源靶区预测中,常采用它来圈定预测远景区,它是类比法的一种量化方法,通过研究模型单元的控矿变量特征,查明变量之间的内在联系,确定各个地质变量的成矿和找矿意义,建立起某种类型矿产资源的成矿有力度类比模型。然后将模型应用到预测区,将预测单元与模型单元的各种特征进行类比,用它们的相似程度表示预测单元的成矿有利性。并据此圈定出有利成矿的远景区。该方法能充分利用各种资料,充分发挥地质人员的经验和学识,因而得到了广泛的应用(赵鹏大,2004)。

特征分析方法选择的变量是与成矿有关或对找矿有意义的变量。它的取值采用二种形式:二态取值或三态取值。二态取值是指变量只有两种状态,用数字表示为 1 或 0,当变量对成矿或找矿有利取值为 1,否则取值为 0;三态取值是指变量有三种不同状态,用数字表示为 -1,0,1,当变量对成矿有利时赋值为 1,不利时赋值为 -1,其它情况赋值为 0。变量的取值只具有不同状态的含义,而无数值度量的含义,如果变量是定量变量,它的变化是某个连续的数值区间,这时应先将变量离散化,使之具有离散的取值形式,这时才能应用到模型中。

特征分析所选择的模型单元应具有一定的代表性,应是性质相同的同母体样品。

设有 m 个变量 $x_j(j=1,2,\cdots,m)$, n 个模型单元,第 j 个变量在第 i 个单元上的取值为 $x_{ij}(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m)$,原始数据矩阵为

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \tag{1}$$

要解决的问题是,对每个变量赋予适当的数值 $a_j(j=1,2,\cdots,m)$,称之为变量权,它反映了变量 j 的重要性。同时对每个单元相应赋予适当的数值 $y_i(i=1,2,\cdots,n)$,称之为单元联系度,它反映单元与一组模型单元的联系程度,一般认为,预测单元与模型单元联系程度越高,成矿有利度也越大,这样可以通过单元联系度对单元的成矿有利程度作出评价。

有线性关系:

$$y = Xa \tag{2}$$

特征分析变量权可以用矢量长度法来确定,其思想基础是变量与其它变量的关联性越强,变量就越重要。用变量之间的匹配数作为变量之间关联性的度量指标,即可确定变量两两之间的关联性大小。求得变量权后,即可用特征分析模型计算统计单元联系度,再对比模型单元与预测单元的单元联系度相对大小,进而确定预测单元的成矿有利程度。

3.2 数量化理论 I

数量化理论作为数据分析的有利方法是一种多元统计方法,主要是研究与定量变量(或称间隔尺度变量)有关的问题,通过给定性变量以相应的数值描述,进而进行有关的统计分析(具体内容参见赵鹏大,2004)。

4 成矿预测和潜力评价分析

4.1 斑岩型铜多金属矿区域预测模型

冈底斯成矿带斑岩型铜矿是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,同时尽管矽卡岩型铜矿床也是重要的类型,但由于其通常与斑岩铜矿伴生,区域成矿定位预测结果也表明两者的成矿有利度高值区域重叠,斑岩型成矿有利远景区一般已包含了大部分矽卡岩型矿床有利区域,因此对研究区的资源评价将主要依据斑岩型铜矿床范围来确定(余宏全等,2009)。因此本研究也将主要依据斑岩型铜矿床来进行冈底斯东段研究区资源评价。矿产资源评价中使用的数据具有多源、多类和结构复杂的特点。本研究区采用的是 1:20 万的地质综合图含矿地层数据、赋矿岩浆岩数据、控矿构造数据、化探异常数据、重力异常数据、遥感铁染与羟基异常数据、遥感环形构造数据。

由于不同的矿产有不同的生成环境,有不同的控矿因素,有其特殊的源-导-容构造,因此需要对研究

区成矿地质背景及构造、附矿地层、含矿岩体进行综合分析。根据对研究区成矿地质背景和地物化遥等资料的综合分析,建立研究区斑岩型铜多金属矿区域成矿预测模型,根据预测模型确定研究区斑岩型铜矿床的主要控矿要素有:(1) 地层控矿因素分析:研究区内大部分矿床(点)分布在侏罗-白垩系的多底沟组(J_3d)、林布宗组(K_1l)、叶巴组($J_{2-3}y$)、门中组($K_{1-2}m$)、比马组(K_1b)等含矿地层。(2) 构造控矿因素分析:不同规模、不同级别的断裂构造控制了研究区成岩和成矿过程。级别较高的深大断裂常常为地球深部物质到达地表提供通道,而级别较低的次级断裂则常常成为热液活动和矿质沉淀的空间,由此可见,断裂构造始终是一个非常重要的控矿因素。研究区内处于近东西向雅江断裂带北侧北西西与北东东(北北东)向断裂构造复合带,该带既是导矿构造又是容矿构造。利用 ETM 遥感数据提取了北西西和北东东向的线性构造以及环形构造。(3) 岩浆控矿因素:区内岩浆活动频繁,岩浆岩分布广泛,主体为燕山晚期-喜山期的中酸性岩浆侵入体,主要有中粒黑云角闪石英二长闪长岩(勒屋岩体)、中粒黑云角闪花岗闪长岩(车门岩体)、细粒黑云花岗闪长岩(娘古处岩体)和粗中粒斑状黑云角闪二长花岗岩(陈坝复式岩体)、中粗粒巨斑黑云角闪二长花岗岩(旦师庭岩体)、中粒钾长花岗岩(多坡单岩体)等。其中车门花岗闪长岩、陈坝复式岩体中的含铜钾长花岗岩等,与铜、钼等斑岩型矿床成矿作用关系密切。火山岩以中性-中酸性火山熔岩及火山碎屑岩为主,除喷溢相英安岩、安山岩外,还有爆发相的集块岩、火山角砾岩、凝灰岩,具有岩浆弧活动大陆边缘火山岩的特征,可能为区内铜多金属矿床的形成提供了物质基础。(4) 地球化学信息:是矿床(矿点)在岩体或者水系沉淀物中的直接反映,其控制着矿床(矿点)的分布和量级,但由于矿化元素之间往往具有不同程度的相关性,单元素及多相关元素的综合分析更能体现赋矿性。本次研究利用铜、钨、钼、锌、金等元素区域化探数据。(5) 重力异常:显示在研究区内已知大中型铜矿床多位于重力异常区间-500 至-470mG。(6) 磁力异常:显示研究区已知大中型铜矿床多位于磁力异常-200 至 100nT 区间内。(7) 遥感信息:斑岩型铜矿在蚀变分带特征水平方向上,由岩体中心向外依次为黄铁绢英岩化+粘土化带→黄铁绢英岩化+粘土化+青磐岩化带→青磐岩化带;岩体垂直自上而下为黄铁绢英化+粘土化带→黄铁绢英岩化+钾化+硬石膏化+石膏化带→钾化+硬石膏+硅化带。用 ETM 遥感影像提取出 1:20 万遥感蚀变信息铁染、羟基异常。

4.2 成矿远景区预测

根据冈底斯成矿带东段目前的数据状况,在建立该研究区斑岩型铜矿床的区域预测模型和评价指标体系的基础上,采用网格单元划分 2 万多 km^2 预测区域,确定本次预测网格大小为 $6km \times 6km$,共有 646 个单元。采用基于 GIS 的 MRAS 资源评价系统对冈底斯成矿带东段斑岩型铜矿床进行区域成矿定位预测,根据主要成矿因素,建立了评价指标预测变量 20 个,以及相应的标志权系数,见表 1。运用特征分析法计算成矿有利度,并根据预测结果与实际地质情况进行对比研究,并调整预测变量或找矿模型,优化预测结果。图 3 是斑岩型铜矿成矿有利度色块图,从图中可以看出,大部分已发现的大中型铜矿床均位于成矿有利度大于 0.6 的区域内,说明本次预测结果的可信度较高。图中其它成矿有利区块尚未发现大中型矿床,将为进一步的找矿部署和开展提出了方向,同时划分了几个找矿远景区。

表 1 6km×6km 网格单元变量标志权系数
Table 1 Weight coefficients of variables
in 6km×6km grid cells

序号	变量名称	标志权系数
1	侏罗-白垩系地层信息	0.177286
2	北西西与北东东(北北东)向构造信息	0.241055
3	断裂构造交汇处信息	0.109676
4	燕山晚期-喜山期的中酸性岩浆岩信息	0.299957
5	铜化探异常存在	0.243158
6	铜化探异常面积和	0.278752
7	金化探异常存在	0.288752
8	金化探异常面积和	0.208236
9	钼化探异常存在	0.241356
10	钼化探异常面积和	0.241356
11	铅化探异常存在	0.164662
12	铅化探异常面积和	0.18241
13	锌化探异常存在	0.13683
14	锌化探异常面积和	0.157434
15	重力异常	0.252071
16	磁力异常	0.35845
17	磁力异常起始值(低值)	0.122622
18	遥感环形构造	0.241758
19	遥感铁染异常	0.208003
20	遥感羟基异常	0.12536

4.3 资源潜力评价

在区域远景区预测的基础上,采用数量化理论 I 方法使用 MRAS 系统进行资源量综合计算,对成矿有利度大于 0.6 的区域进行找矿远景区划分,几个找矿远景区的资源量预测结果如表 2 所示。从表 2 铜矿床资源量预测结果看,研究区潜在铜资源量远景约有 7999.95 万吨,找矿前景巨大。现有矿产

Hou Zeng-qian, Yang Zhu-sen, Xu Wen-yi, Mo Xuan-xue, Ding Lin, Gao Yong-feng, Dong Fang-liu, Li Guang-ming, Qu Xiao-ming, Zhao Zhi-dan, Jiang Si-hong, Meng Xiang-jin, Li Zhen-qing, Qin Ke-zhang, Yang Zhi-min. 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 Zeng-qian, Qu Xiao-ming, Yang Zhu-sen, Meng Xiang-jin, Li Zhen-qing, Yang Zhi-ming, Zheng Mian-ping, Zheng You-ye, Nie Feng-jun, Gao Yong-feng, Jiang Si-hong, Li Guang-ming. 2006b. 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)

Hou Zeng-Qian, Mo Xuan-Xue, Yang Zhi-Ming. 2006c. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau; tectonic setting, tempospatial distribution and ore deposit types[J]. Chinese Geology, 33 (2) : 348-359 (in Chinese with English abstract)

Hou ZQ, Pan GT, Wang AJ, Mo XX, Tian SH, Sun XM, Ding L, Wang EQ, Gao YF, Xie YL, Zeng PS, Qin KZ, Xu JF, Qu XM, Yang ZM, Yang ZS, Fei HC, Meng XJ, Li ZQ. 2006d. 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 Zeng-qian, Mo Xuan-xue, Gao Yong-feng, Yang Zhi-ming, Dong Guo-chen, Ding Lin. 2006e. Early processes and tectonic model for the Indian-Asian continental collision-evidence from the Cenozoic Gangdese igneous rocks in Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 80 (9) : 1233-1248 (in Chinese with English abstract)

Li Guang-ming, Rui Zong-yao. 2004. Diagenetic and mineralization ages for the porphyry copper deposit in the Gangdise metallogenic belt, Xizang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 28 (2) : 165-170 (in Chinese with English abstract)

Li Guang-ming, She Hong-guan, Zhang Li, Liu Bo, Dong Yin-jun. 2009. Based on mineral resource assessment system (MRAS) for the metallogenic prognosis in Gangdese metallogenic belt, Tibet[J]. Geology and Exploration, 45 (6) : 645-654 (in Chinese with English abstract)

Liang Hua-ying, Yu Heng-xiang, Mo Ji-hai, Zeng Ti, Hu Guang-qian. 2008. Study on the metallogenesis and resource perspective of the Gangdise ore deposit belt in Tibet[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 27 (3) : 289-293 (in Chinese with English abstract)

Pan Gui-tang, Mo Xuan-xue, Hou Zeng-qian, Zhu Di-cheng, Wang Li-quan, Li Guang-ming, Zhao Zhi-dan, Geng Quan-ru, Liao Zhong-li. 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 22 (3) : 521-533 (in Chinese with English abstract)

Richard B. McCammon, Joseph M. Botbol, Richard Sinding-Larsen, Roger W. Bowen. 1983. Characteristic Analysis-1981; Final Program and a Possible Discovery[J]. Mathematical Geology, 15 (1) : 59-84

Scott, M. , R. Dimitrakopoulos. 2001. Quantitative analysis of mineral resources for strategic planning: Implications for Australian Geological surveys[J]. Natural Resources Research, 10 (3) : 159-177

She Hong-guan, Li Guang-ming, Dong Ying-jun, Pan Gui-tang, Li Jin-wen, Zhang De-quan, Feng Cheng-you. 2009. Regional metallogenic prognosis and mineral reserves estimation for porphyry copper deposits in Gangdese polymetallic ore belt, Tibet[J]. Mineral Deposits, 28 (6) : 803-814 (in Chinese with English abstract)

Singer D. A. . 1993. Basic concepts in three part quantitative assessments of undiscovered mineral resources[J]. Nonrenewable Resources, 2 (2) : 69-81

Xiao Ke-yan, Ding Jian-hua, Liu Rui. 2006. The discussion of three-part form of non-fuel mineral resource assessment[J]. Geological Review, 52 (6) : 793-798 (in Chinese with English abstract)

Xiao Ke-yan, Ding Jian-hua, Lou De-bo. 2009. Quantitative assessment of porphyry copper in eastern Tianshan[J]. Geology and Exploration, 45 (6) : 637-644 (in Chinese with English abstract)

Xiao Ke-yan, Wang Yong-yi, Chen Zheng-hui, Xue Qun-wei, Huang Wen-bin, Zhu Yu-sheng, Yang Yong-hua, Zhang Shou-ting, Yang Yi-heng, Zhang Xiao-hua, Liu Rui. 2006. New techniques and models of mineral resources assessment in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-275 (in Chinese)

Xiao Ke-yan, Zhang Xiao-hua, Wang Si-long. 2000. GIS assessment system for Mineral resource[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-142 (in Chinese)

Yan Xue-yi, Huang Shu-feng, Du An-dao. 2010a. Re-Os Ages of large Tungsten, copper and molybdenum deposit in the zetang orefield, Gangdise and marginal strike-slip transforming metallogenesis[J]. Acta Geologica Sinica, 84 (3) : 398-406 (in Chinese with English abstract)

Yan Xue-yi, Huang Shu-feng. 2010b. Discovery of large zedang tungsten - copper-molybdenum orefield, eastern gangdese arc, and new understanding on strike-slip type epicontinental mineralization[J]. Geological Review, 56 (1) : 9-20 (in Chinese with English abstract)

Zhao Peng-da. 2004. Quantitative Geoscience: methods and its applications[M]. Beijing: Higher Education Press: 1-464 (in Chinese)

Zhao Peng-da. 2007. Quantitative mineral prediction and deep mineral exploration[J]. Earth Science Frontiers, 14 (5) : 001-010 (in Chinese with English abstract)

Zhao Peng-da, Chen Jian-ping, Zhang Shou-ting. 2003. The new development of “three components” quantitative mineral prediction[J]. Earth Science Frontiers, 10 (2) : 455-463 (in Chinese with English abstract)

Zhao Peng-da. 1999. Geology anomaly and forecasting on mineral forming [A]. Chen yu-chuan, Theory and methods of present mine and resource exploration assessment[M]. Beijing: Seismological Press: 98-106 (in Chinese)

Zhao Peng-da. 2002. “Three-component” quantitative resource prediction and assessments: theory and practice of digital mineral prospecting[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 27 (5) : 482-489 (in Chinese with English abstract)

Zheng You-ye, Wang Bao-sheng, Fan Zi-hui, Zhang Hua-ping. 2002. Analysis of tectonic evolution in the eastern section of the gangdise mountains, Tibet and the metallogenic potentialities of copper gold poly metal[J]. Geological Science And Technology Information, 21 (2) : 55-60 (in Chinese with English abstract)

Zhu Yu-sheng, Li Chun-jie. 1997. Metallogenesis geological setting analysis[M]. Beijing: Geologic Publishing House: 1-143 (in Chinese)

[附中文参考文献]

陈郑辉,陈毓川,王登红. 2009. 矿产资源潜力评价示范研究[M]. 北京:地质出版社:1-195

成秋明,陈志军, Ali Khaled. 2007. 模糊证据权方法在镇沅(老王寨) 地区金矿资源评价中的应用[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 32(2): 175-184

侯增谦,莫宣学,高永丰,杨志明,董国臣,丁 林. 2006e. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型-来自西藏冈底斯新生代火成岩证据[J]. 地质学报, 80(9): 1233-1248

侯增谦,莫宣学,杨志明. 2006c. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景,时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 33(2): 348-359

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. 2006d. 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,郑邦平,郑有业,聂凤军,高永丰,江思宏,李光明. 2006b. 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

侯增谦,杨竹森,徐文艺,莫宣学,丁 林,高永丰,董方洙,李光明,曲晓明,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

李光明,芮宗瑶. 2004. 西藏冈底斯成矿带斑岩铜矿的成岩成矿年龄[J]. 大地构造与成矿学, 28(2): 165-170

李光明,余宏全,张 丽,刘 波,董英君. 2009. 西藏冈底斯铜多金属成矿带基于 MRAS 资源评价系统的成矿预测[J]. 地质与勘探, 45(6): 645-654

梁华英,喻亨祥,莫济海,曾 提,胡光黔. 2008. 西藏冈底斯矿带成矿作用及远景分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(3): 289-293

潘桂棠,莫宣学,侯增谦,朱弟成,王立全,李光明,赵志丹,耿全如,廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521-533

余宏全,李光明,董英君,潘桂棠,李进文,张德全,丰成友. 2009. 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[J]. 矿床地质, 28(6): 803-814

肖克炎,丁建华,刘 锐. 2006. 美国“ 三步式” 固体矿产资源潜力评价方法评述[J]. 地质论评, 52(6): 793-798

肖克炎,丁建华,姜德波. 2009. 东天山斑岩铜矿资源潜力评价[J]. 地质与勘探, 45(6): 637-644

肖克炎,王勇毅,陈郑辉,薛群威,黄文斌,朱裕生,杨永华,张寿庭,杨毅恒,张晓华,刘锐. 2006. 中国矿产资源评价新技术与评价新模型[M]. 北京:地质出版社:1-275

肖克炎,张晓华,王四龙. 2000. 矿产资源 GIS 评价系统[M]. 北京:地质出版社:1-142

闫学义,黄树峰,杜安道. 2010a. 冈底斯泽当大型钨铜钼矿 Re-Os 年龄及陆缘走滑转换成矿作用[J]. 地质学报, 84(3): 398-406

闫学义,黄树峰. 2010b. 冈底斯东段泽当大型钨铜钼矿新发现及走滑型陆缘成矿新认识[J]. 地质论评, 56(1): 9-20

赵鹏大,陈建平,张寿庭. 2003. “ 三联式” 成矿预测新进展[J]. 地学前缘, 10(2): 455-463

赵鹏大. 2002. “ 三联式” 资源定量预测与评价-数字找矿理论与实践探讨[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 27(5): 482-489

赵鹏大. 2007. 成矿定量预测与深部找矿[J]. 地学前缘, 14(5): 001-010

赵鹏大. 2004. 定量地学方法及应用[M]. 北京:高等教育出版社:1: 464

赵鹏大. 1999. 地质异常与成矿预测[A]. 陈毓川. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法[M]. 北京:地震出版社: 98-106

郑有业,王保生,樊子瑋,张华平. 2002. 西藏冈底斯东段构造演化及铜金多金属成矿潜力分析[J]. 地质科技情报, 21(2): 55-60

朱裕生,李纯杰. 1997. 成矿地质背景分析[M]. 北京:地质出版社:1-143

Mineralization Prediction and Potential Evaluation Based on GIS and Multi-Source Information for Copper Polymetallic Deposits in the Eastern Gangdise Belt, Tibet

HUANG Zhao-qiang¹, HUANG Shu-feng², FU Yong², ZHAO Zhen-mei¹, CHENG Ming-hua¹

(1. Institute of Mineral Resources, China Metallurgic Geology Bureau, Beijing 100025;

2. The Second Geological Exploration Institute, China Metallurgic Geology Bureau, Putian, Fujian 351111)

Abstract: Based on a complete collection and analysis of geological, ore deposits, remote sensing data, and geophysical and geochemical data of eastern Gangdise in Tibet about 200,000km², we investigated the geologic conditions and metallogenic rules and established a porphyry copper deposit metallogenic model for this area. And then the indexes of metallogenic prognosis are summarized. Using the characteristic analysis method of mineral resource assessment system(MRAS) based on the geographic information system (GIS), the metallogenic prospect has been predicted for porphyry copper polymetallic deposits. Following that, the copper reserves were estimated by the quantification theory type I method. The result of metallogenic prognosis shows that the delimited area of metallogenic prognosis includes mostly known large and medium-sized copper deposits and is in accordance well with the geological analysis. The result of copper reserves estimated shows that there still exists a great potential of porphyry copper deposits in the eastern section of Gangdise.

Key words: Geographic Information System, multi-source information, metallogenic prognosis, eastern section of Gandise, resource prediction, copper polymetallic