



# 基于 GIS 的证据权重法青海“三江”北段斑岩型钼铜矿产资源成矿预测

陈建平<sup>1,2</sup> 董庆吉<sup>1,2</sup> 郝金华<sup>1,2</sup> 李伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学 国土资源与高新技术研究中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学 北京市国土资源信息开发研究重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 基于 GIS 技术的地质矿产空间数据库综合分析了青海南部“三江”北段斑岩型钼铜矿床成矿条件, 建立了区域斑岩型钼铜矿床的资源预测模型, 并提取了相关成矿预测因子, 采用分级证据权重法对成矿预测因子进行了赋值, 圈定了区域有利成矿远景区, 对区域矿产资源潜力进行了定量预测。研究表明, 与斑岩型钼铜矿有关的矿床预测权重包括地层、岩浆岩、构造以及矿化异常等及其相关的定量化分析因子, 依据后验概率值将研究区划分两个成矿远景区: 纳日贡玛-东莫扎抓成矿远景区( I )、阿多-结多成矿远景区( II )。在两个成矿远景区内又可划分出 A 类铜钼矿有利靶区 5 处、B 类铜钼矿有利靶区 4 处、C 类铜钼矿有利靶区 4 处, 利用丰度模型法估算青海“三江”北段区域内铜资源量为 7 412 730 t, 钼资源量为 8 566 180 t。

**关键词:** 分级证据权重法; 资源潜力预测; 斑岩型钼铜矿; “三江”北段; 青海南部

中图分类号: P628<sup>+.4</sup>; P612

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)03-0519-11

## Metallogenic prognosis of porphyry molybdenum-copper resources in northern Sanjiang region of Qinghai Province based on weight-of-evidence method and GIS

CHEN Jian-ping<sup>1,2</sup>, DONG Qing-ji<sup>1,2</sup>, HAO Jin-hua<sup>1,2</sup> and LI Wei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of High and New Techniques Applied to Land Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Beijing Land Resources Information Development, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the geological and mineral geo-database, the authors analyzed the metallogenic conditions of porphyry molybdenum-copper deposits in northern Sanjiang region by means of GIS. A prognostic model for regional ore deposits was established, and the factors of mineral prediction were extracted and assigned values by Graded-WOE. The favorable prospecting areas were delineated, and the quantitative forecast of regional resources were finally realized. The research included several aspects, and the weighing of prediction included strata, magmatite, structure, mineralized anomalies and other related quantitative factors. Firstly, the geological and mineral geo-database based on the platform of Mapgis and Arcgis of northern Sanjiang region was established, which included regional geological data of the geological map, gravity, air magnetic force measurement, geochemistry, remote sensing and mineral data. This database constitutes the basis of regional mineral prediction. Secondly, the research probed into the metallogenic conditions of porphyry molybdenum-copper deposits in northern Sanjiang region by comprehensive handling of mineral information and analysis of the conditions of mineral

收稿日期: 2010-12-01; 修订日期: 2011-03-23

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BA01A08); 中国地质调查局地质调查资助项目(1212010630804)

作者简介: 陈建平(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 地球探测与信息技术专业, 主要从事矿产资源预测与评价研究, E-mail: 3s@

deposits and the ore-forming indicators. The research suggested first-level factors of mineral prediction which included strata, magmatite, structure and mineralized anomalies, 19 related factors and 24 relevant characteristic variables. The authors analyzed characteristic variables by Graded-WOE, and then converted them into the values of posterior probability of strata, structure, magmatite and mineralized anomalies. Two favorable areas, i. e., Narigongma-Dongmohazhua and Aduo-Jieduo, were delineated by the values of posterior probability. There are 5 target areas of Grade-A molybdenum-copper deposits, 4 target areas of Grade-B molybdenum-copper deposits and 4 target areas of Grade-C molybdenum-copper deposits. Using the bundance model, it is estimated that the quantity of copper in this region is 7 412 730 t and that of molybdenum is 8 566 180 t.

**Key words:** Graded-WOE; prediction of potential resources; porphyry molybdenum-copper deposit; northern Sanjiang region; southern Qinghai

西南“三江”巨型多金属成矿带地处印度大陆与亚洲大陆的巨型活动碰撞带内,经历了多期次大规模成矿作用并堆积了巨量规模的金属矿产资源,发育一系列大型、超大型的铜、金、铅锌等金属矿床。以玉龙斑岩铜矿床为代表的斑岩铜多金属成矿带为中国青藏高原3条最重要的斑岩铜矿带之一。近年来在青海南部“三江”成矿带北段,陆续发现了以纳日贡玛含矿斑岩体为中心的又一大型斑岩-矽卡岩型钼铜矿带,其中包括纳日贡玛、陆日格、打古贡卡、哼赛青等斑岩-矽卡岩型钼铜矿床,青海“三江”北段与玉龙矿带相连形成了一个近千公里的巨大的斑岩-矽卡岩型多金属矿集区,有望成为中国最大的和最重要的矿产资源基地(侯增谦等,2006;莫宣学等,2006;杨志明等,2008;陈建平等,2009;邓军等,2010)。

与西南“三江”中段地质、矿产工作程度及取得成果相比,青海“三江”北段由于受到自然地理及交通、经济、气候等条件的限制,地质及矿产勘查工作程度极低,区域内矿产资源潜力评价还处于空白。本文拟基于GIS技术,结合地质成矿作用的特点,对青海“三江”北段斑岩型钼铜矿成矿综合信息进行分析,综合研究地质成矿条件,尝试利用分级证据权法探讨控矿各要素的权重值并圈定成矿条件有利区,以对区域矿产资源潜力进行定量预测与评价,以期对今后的青海“三江”北段找矿工作有所帮助。

## 1 基于GIS技术的成矿条件分析

构造、岩浆岩和地层的三维空间分布规律和相互关系是控制区域成矿作用和矿床(点)产出状态的基本因素,是区域地质主要研究对象。区域成矿条件的研究即是通过地质、地球物理、地球化学、遥

感等数据处理与分析,从中提炼出构造、岩浆岩和地层与成矿的关系,进而结合地质调查的成果,来推断区域内有利于矿床产出的成矿条件组合。

通过收集研究区内的多元地质数据,包括区域地质图、重力、航磁、地球化学、遥感、矿产数据,对上述各个数据库的建立都转换存储在MapGIS中,建立青海“三江”北段地质矿产空间数据库,作为研究区成矿预测的数据基础(陈建平等,2005)。青海南部“三江”北段的地质、矿产、物探、化探及遥感数据库的建立为证据权法的应用提供了必备的数据基础,对青海“三江”北段地区各种成矿条件的分析为证据权法的应用提供了依据。

### 1.1 赋矿地层

成矿地层分析主要包括两方面的内容,一是从已知矿床(点)的赋存特征上提取有利的成矿、赋矿地层;二是从地层数据中提取地质异常,这种地质异常反映了一定地质体的空间分布特征。对于与中酸性侵入岩有关的斑岩型钼铜矿床而言,地层非必要条件,但从研究区内各个已知矿床(点)的赋存状态来看,某些地层有利于成矿。统计表明,区域内63%的矿床(点)落入到二叠纪尔笛考组,其他较为有利的地层还有二叠纪诺日巴日保组(31%)、杂多群碳酸盐岩组等。

从其空间分布上来看,二叠纪尔笛考组、二叠纪诺日巴日保组的分布与喜马拉雅期区域构造方向相一致。这种一致性可能是这两个地层是由于后期构造运动推覆与抬升使其出露,而这期构造运动也正是中酸性侵入岩侵位的主要时期。

### 1.2 控矿构造

研究区北西西向断裂最为发育,其次为北东东向和北北西向断裂。北西西向是区域内的主干构造发育方向,该构造主要为喜马拉雅期印度洋板块向

欧亚板块俯冲造成的,是区域中岩浆岩、热液运移的通道。统计表明,区域内与中酸性侵入岩有关的斑岩型铜钼矿床主要受北西西向断裂的控制,北北西和北东东向断裂对其也存在一定的控制作用。

深大的走滑断裂控制了中酸性侵入岩的侵位,因此区域内斑岩型铜钼矿床控矿断裂主要为深大走滑断裂,其容矿断裂为其次级断裂,这导致斑岩型铜钼矿床分布较为集中。矿点与断裂构造距离统计分析也表明,研究区内 90% 以上矿点距离断裂构造小于 2 km。经 GIS 空间分析得出,本区断裂构造 2 km 半径内存在矿床(点)的构造有:尔日能-叶夏日断裂、折莫-子群断裂、耶格-夹荣涌断裂、昂欠涌曲-格莫砍特断裂(羊曲河-囊谦断裂带和解曲断裂带)。

成矿预测研究中断裂构造信息的定量化分析主要包括:构造等密度、构造平均方位、构造中心对称度、断裂优益度、构造交点数等。经统计分析,青海“三江”北段斑岩型钼铜矿床已知矿床(点)多赋存于构造等密度次高值的区域、构造中心对称度高值区

域和多组线性构造交汇部位。因为这些变量能够从不同的角度反映区域线性构造的特征,与区域成矿存在直接或间接的关系,从中提取的致矿信息可作为成矿预测因子。

### 1.3 岩浆岩成矿

由于多期造山事件的影响,研究区内岩浆活动频繁,岩浆岩总体呈现北西向展布(图 1)。现已发现与成矿关系最为密切的为喜马拉雅期中酸性岩浆岩体,目前已发现的斑岩型钼铜矿床主要分布在纳日贡玛、陆日格、打古贡卡、哼赛青等处。大量的岩石学、岩石地球化学研究表明,青藏高原内与新生代矿化有关的斑岩主要为中酸性岩浆,岩性变化于花岗闪长岩-二长花岗岩-花岗岩,作为青海南部“三江”北段典型的 3 处斑岩型钼铜矿床,纳日贡玛、陆日格、打古贡卡的含矿斑岩主要为黑云母花岗斑岩、浅色细粒花岗斑岩。

岩体岩性多样性是反映岩体分异程度的一个定量指标(陈建平等 2005),一般来说岩体的分异程度越好,其释放出来的热液也就越多,其成矿的可能性

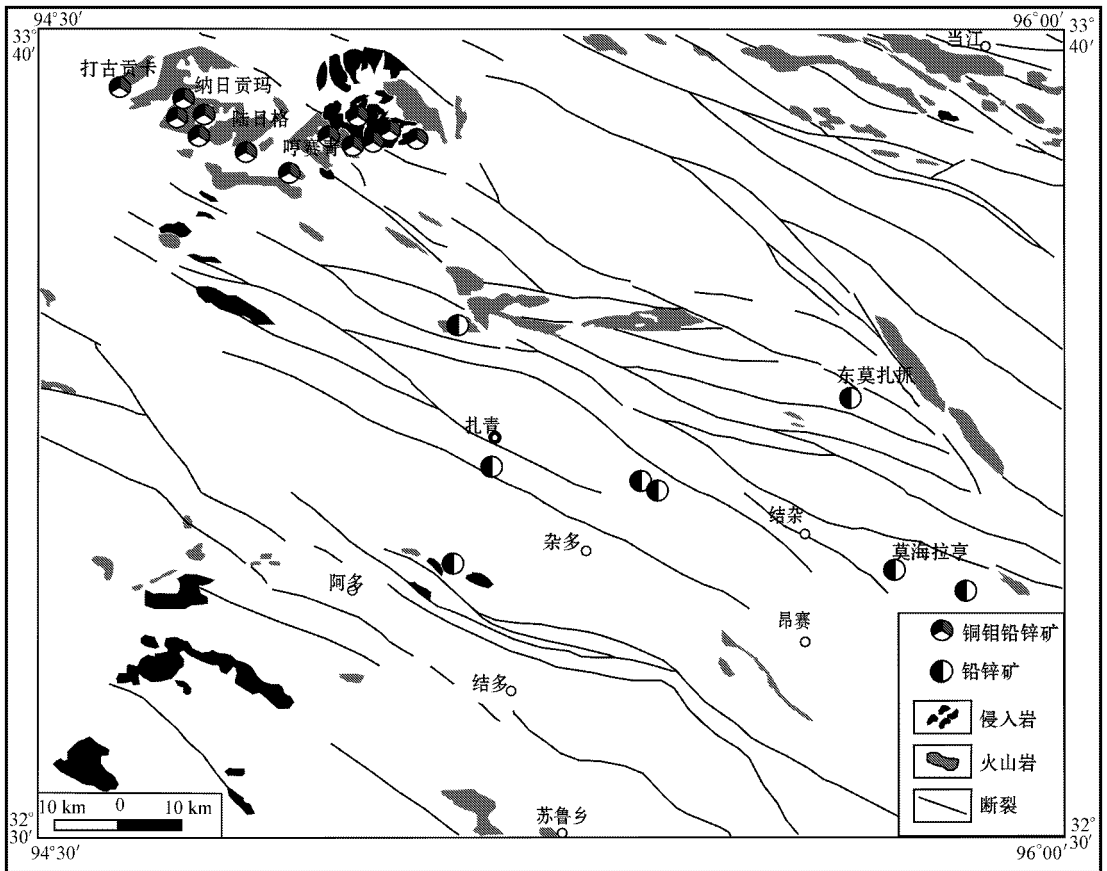


图 1 杂多构造岩浆岩带岩浆岩分布图

Fig. 1 Distribution of igneous rocks in Zadoi tectonic magmatic belt

也就越大,但矿体就位的地方一般为分异最高处的旁侧相对较稳定的地方。从岩浆岩体对矿点影响域分析结果来看,区域内斑岩型矿床(点)主要集中在距离岩体 1 km 范围内,达总矿点数的 87.5%,最远可以达到 3 km。从成矿类型来看,其主要为斑岩-矽卡岩型,其分布是紧密围绕在岩体的周围,极少量的热液型矿床则离岩体稍远一点。

#### 1.4 物、化探成矿信息

区域内铜、钼元素组合异常与已知的铜、钼矿床的对应关系非常好,总体呈北北西向串珠状展布,局部还有北西西向的带状分带,并与区域构造方向一致,同时铜、钼元素的高值区分布也一致。

研究区布格重力异常等值线总体呈北西向,与区域地层、岩浆岩、构造线展布方向一致。斑岩型矿床多数落在磁异常过渡带上,利用 GIS 空间分析功能统计表明研究区内与斑岩型铜钼铅锌矿床有关的浅源重力异常区间为 $(-513.97 \sim -513.95) \text{m/s}^2$ ,重力异常磁力异常区间为 $(-15 \sim -11) \text{nt}$ 。

#### 1.5 遥感成矿信息

利用 DEM 数据与 Landsat ETM+ 342 波段数据进行了三维叠加分析,提取了研究区内与铜钼矿化有关的蚀变:铁染(如褐铁矿化等)、羟基、泥化(如碳酸盐化、粘土化等)。与中酸性侵入岩有关斑岩型钼铜矿床,主要位于二级铁染蚀变区域内和二级羟基蚀变区域内,同时区域内斑岩型矿床发育有很强的绿泥石化、粘土化等蚀变。

## 2 基于证据权法的斑岩型铜钼矿床预测模型

### 2.1 证据权重法

证据权重法是加拿大数学地质学家 Agterberg 提出的一种地学统计方法,最初是基于二值图像的,它采用一种统计分析模式,通过对一些与矿产形成相关的地学信息的叠加复合分析来进行矿产远景区的预测。其中每一种地学信息都被视为成矿远景区预测的一个证据因子,而每一个证据因子对成矿预测的贡献是由这个因子的权重值来确定的(Agterberg, 1993, 1999)。

对于证据权,为了便于解释预测(证据)通常采用二态赋值形式。应用地质判断或统计方法能够将这种形式主观地转换成其他形式以确定临界值,其临界值能够最大限度地揭示二态赋值成果模式与数

据模型的空间组合关系。证据权法最终结果是以权的形式或以后验概率图的形式表达的组合同。证据权法的优点在于权的解释是相对直观的,并能够独立地确定,易于产生重现性(邓勇等, 2007)。

### 2.2 斑岩型铜钼矿床预测模型

在基于 GIS 技术的地质数据库的成矿信息综合处理的基础上,依据矿床成矿条件与找矿标志分析,对青海南部“三江”北段控制斑岩型成矿的致矿因素进行综合评定(朱裕生等, 1997),提出与斑岩型铜钼矿有关的矿床预测一级因素包括:地层条件、岩浆岩条件、构造条件以及矿化异常,总结的斑岩型铜钼矿床预测评价模型如表 1。

表 1 斑岩型铜钼矿床预测模型  
Table 1 Variations of estimated weights of porphyry copper-molybdenum deposit

控矿地质条件与矿致异常	成矿预测因子	特征变量
地层条件	成矿有利地层	二叠纪尔岔考组 二叠纪诺日巴桑日保组
	成矿有利岩性 岩性多样性 对称构造发育区	喜马拉雅期中酸性侵入岩 多样性高值区 构造中心对称度异常区
岩浆岩条件	地球化学推断岩体 地球物理推断岩体	推断中酸性侵入岩 重、磁-一阶导数推断岩体
	遥感推断岩体	遥感解译环形构造
构造条件	控岩控矿断裂 成矿有利方位断裂 构造发育部位	羊曲河-囊谦断裂带 北西西向断裂 等密度异常区
	有利成矿构造发育	优益度异常
	地球化学推断断裂构造 地球物理推断断裂构造	有利方位断裂 2 km 缓冲 有利方位断裂 2 km 缓冲
	遥感推断断裂	解译线性构造 2 km 缓冲
地球化学异常	单元素异常	Cu 异常 Mo 异常
	元素组合异常	Mo-Cu 组合异常 Mo-Cu 得分异常
地球物理异常	重力异常 航磁异常	重力梯度带 低磁梯度带
	遥感信息异常	羟基蚀变异常 铁染蚀变异常

## 3 基于证据权法的成矿条件权重分析

### 3.1 成矿地层条件权重分析

与斑岩型钼铜矿床有关的矿床,其成矿必要要素是中酸性侵入岩以及控制成岩、成矿的断裂构造,地层条件并非其成矿的必然条件,但就研究区而

言,该类型矿床有很大一部分赋存在一定的层位里,这可能是因为在成矿过程中地层提供了一部分成矿物质并提供了矿体沉淀空间。对斑岩型铜钼矿床有利的地层为二叠纪尕斯考组以及二叠纪诺日巴尕日保组,其权重计算结果见表 2。从表中可以看出尕斯考组的权重衬值要远大于诺日巴尕日保组,说明尕斯考组更有利于矿床的形成。图 2 为成矿地层条件证据权重等值线图,从图中可以看出,成矿地层条件的

高值区域主要集中于纳日贡玛地区,矿床(点)有很多落入了高值区,可以认为地层对成矿起到了促进作用。

表 2 地层各证据因子的正负权重值表

Table 2 Positive and negative weights of stratigraphic factors

序号	证据因子名称	正权重值	负权重值	C
1	二叠纪尕斯考组	2.994	-0.979	3.973
2	二叠纪诺日巴尕日保组	-0.359	0.044	-0.403

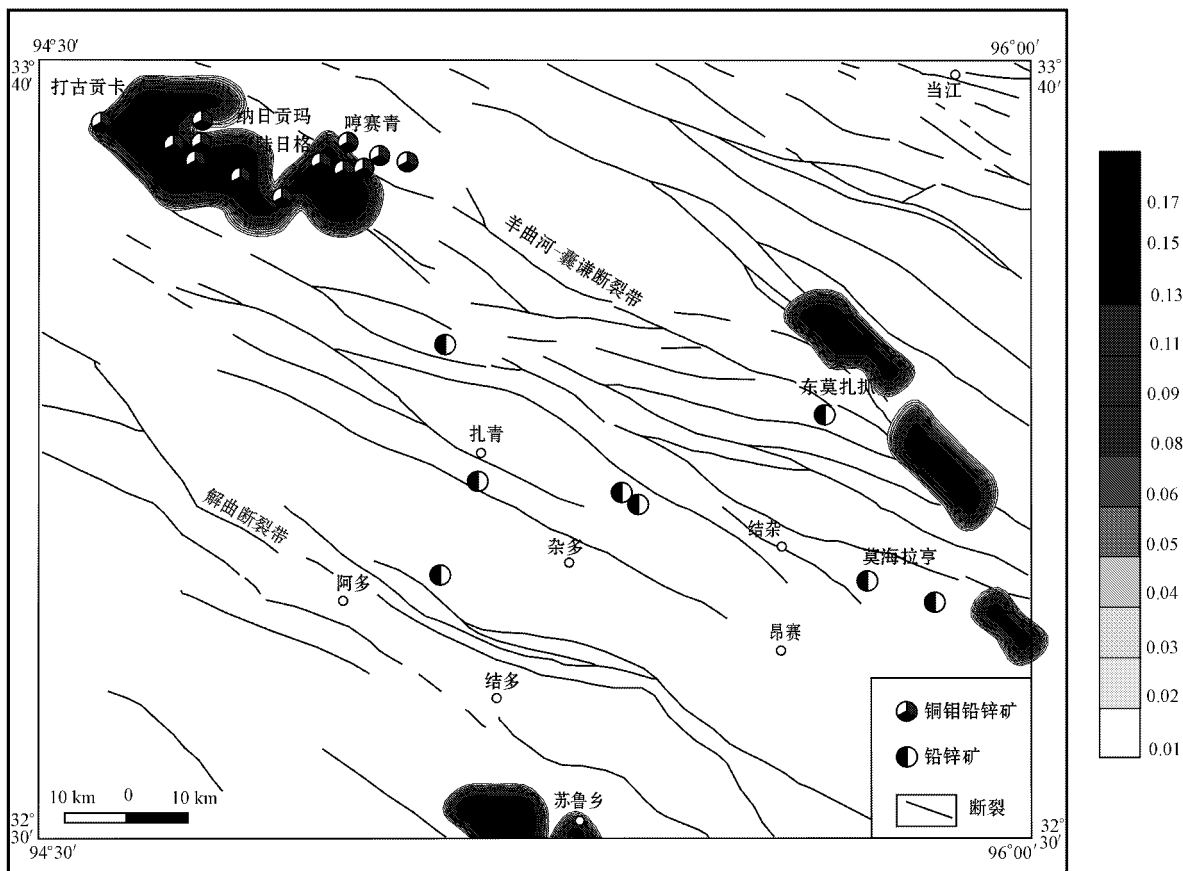


图 2 成矿地层条件证据权重等值线图

Fig. 2 Contour map of the stratigraphic factors weight

### 3.3 岩浆岩条件权重分析

与斑岩型钼铜矿有关的矿床,其成矿的必要要素是中酸性侵入岩体这一岩浆岩条件,因此成矿岩浆岩条件的分析就显得尤为重要。经过对成矿信息提取与分析,笔者得出了能够反映成矿岩浆岩条件特征的信息,包括喜马拉雅期中酸性侵入岩、岩体多样性、构造中心对称度异常、重磁一阶导数零值线推断岩体、重磁比推断岩体、地球化学推断中酸性侵入岩体、遥感环形构造等(表 1),各预测因子权重值见

表 3。从表中可以看出喜马拉雅期中酸性侵入岩的权重值最高达到了 3.962,说明了权重分析与成矿事实相符。图 3 为成矿岩浆岩条件证据权重等值线图,从图中可以看出,高值区出现在纳日贡玛地区,该地区是这类矿床的集中产出区,其他地方有弱的信息显示,可能存在着隐伏的岩体,是值得注意的地方。综合来看,成矿岩浆岩条件对于成矿预测有着重要的作用。

表3 岩浆岩证据因子的正负权重值  
Table 3 Positive and negative weights of igneous rock factors

序号	证据因子名称	正权重值	负权重值	C
1	喜马拉雅期中酸性侵入岩	3.650	-0.311	3.962
2	岩性多样性	1.716	-1.546	3.262
3	构造中心对称度异常区	1.050	-2.015	3.066
4	重磁一阶导数推断岩体	0.996	-1.989	2.985
5	重磁比推断岩体	1.174	-0.793	1.967
6	地球化学推断岩体	0.109	-0.010	0.120
7	遥感推断岩体	0.639	-0.332	0.970

### 3.4 成矿构造条件权重分析

成矿构造条件对于与中酸性侵入岩有关的矿床的形成也是至关重要,区域性的主干构造控制了成矿岩体的分布,其次级断裂则提供了矿体沉积的场所。经分析与成矿构造条件有关的信息,包括断裂优选度异常、地球化学推断断裂构造、控岩控矿断裂(主要为羊曲河-囊谦断裂带)及其次级断裂、构造等密度异常区、地球物理推断断裂构造、遥感推断断裂构造、北西向断裂等(表1)。各预测因子的权重值

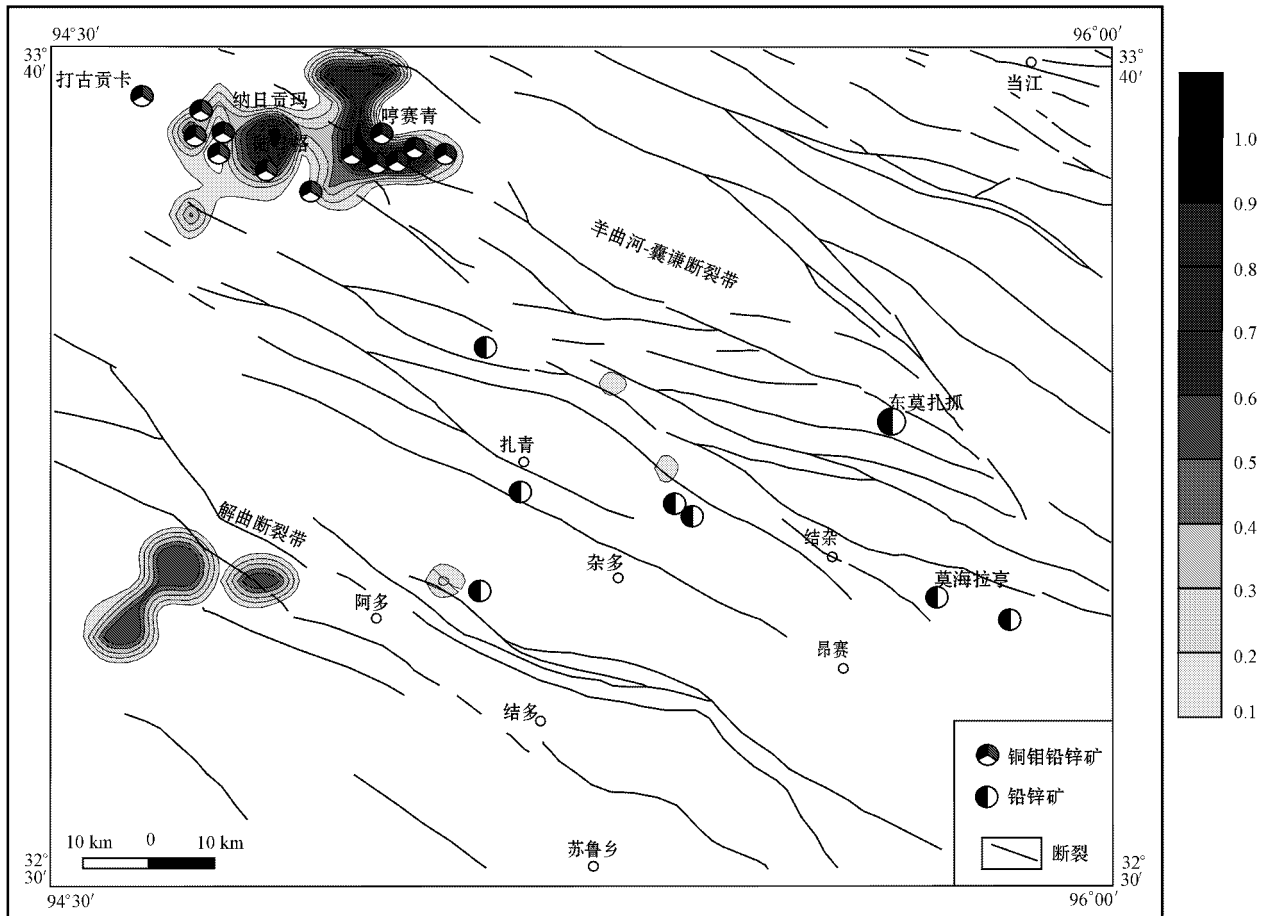


图3 成矿岩浆岩条件证据权重等值线

Fig. 3 Contour map of weight of igneous rocks

见表4,其中断裂优选度和地球化学推断断裂构造的权重值较大,分别达到了3.051和2.693。断裂优选度代表了成矿有利构造,在本区该类矿床均明显受控于羊曲河-囊谦断裂带,其成矿的空间展布与构造紧密相关,因此断裂优选度权重值很高。地球化学推断断裂权重高,是因为控制矿床产出的构造是岩浆活动的主要通道,其元素的富集、迁移变得较剧

烈,在地球化学场中有明显的显示。综合来看,成矿构造条件对于成矿预测有着重要的作用。图4为成矿构造条件证据权重等值线图,可以看出其等值线高值区就是沿着主干构造方向展布的,而且与羊曲河-囊谦断裂带相重合,因此该类型矿的找矿应主要沿羊曲河-囊谦断裂带构造带开展。

表 4 成矿构造条件各证据因子的正负权重值

Table 4 Positive and negative weights of tectonic factors

序号	证据因子名称	正权重值	负权重值	C
1	优越度异常	1.410	-1.640	3.051
2	地球化学推断断裂构造	0.723	-1.970	2.693
3	控岩控矿断裂	1.485	-0.509	1.994
4	构造发育部位	0.753	-0.784	1.537
5	地球物理推断断裂构造	0.247	-0.547	0.794
6	遥感推断断裂	-0.219	0.337	-0.557
7	北西向断裂构造	-0.061	0.236	-0.297

### 3.5 矿化异常权重分析

矿化异常是指由成矿作用而引起的成矿元素的富集异常以及地球物理异常等,它是成矿作用较为直接的反映。同时,矿化异常的范围要远远大于矿体的范围,因而在找矿中起到了更为重要的作用。经前述分析,发现了与斑岩型钼铜有关的矿床相关的矿化异常,主要包括:因子分析中的 Mo-Cu 得分异常、钼元素异常、铜元素异常、钼铜组合异常、航磁异常以及重力异常,其权重值见表 5,其中 Mo-Cu

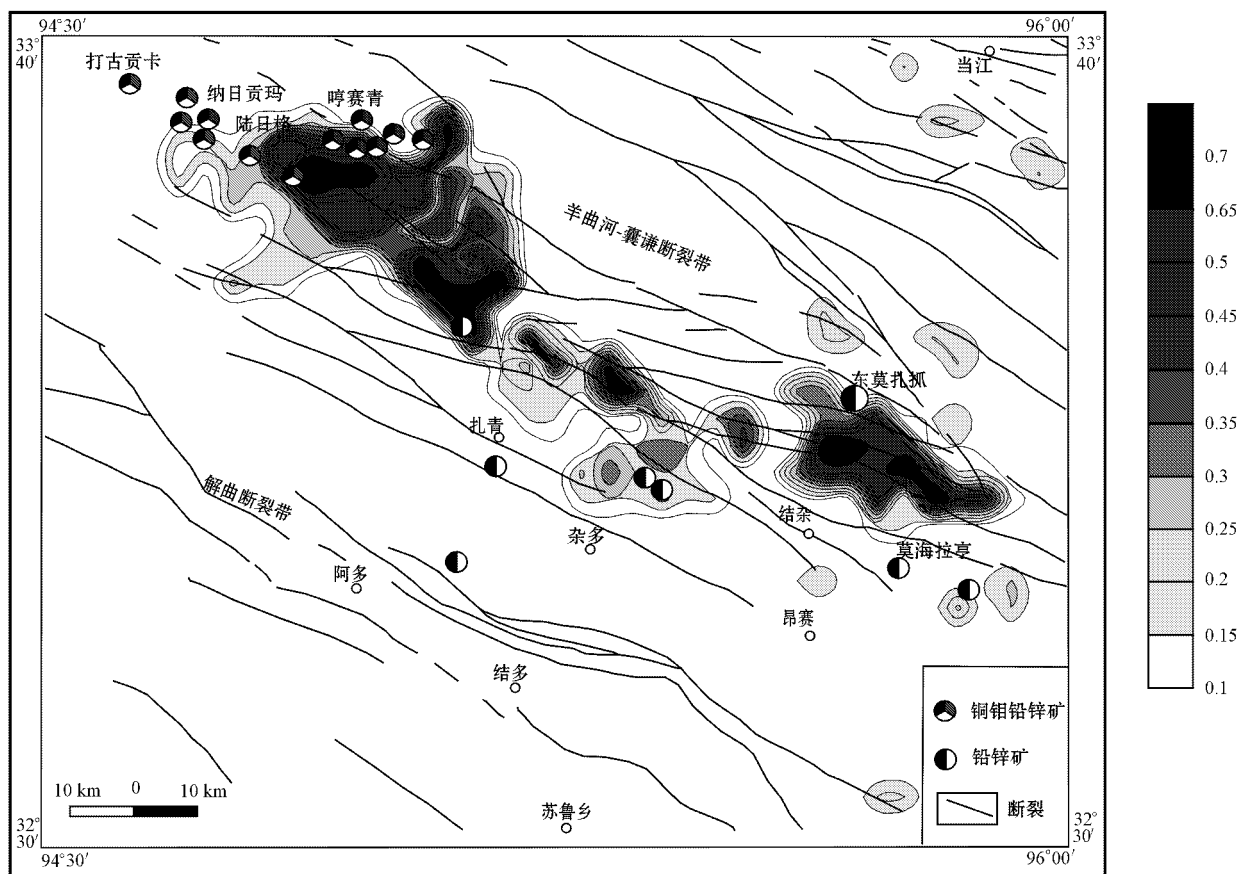


图 4 成矿构造条件证据权重等值线

Fig. 4 Contour map of weight of tectonics

表 5 矿化异常各证据因子的正负权重值

Table 5 Positive and negative weights of mineralization anomalies

序号	证据因子名称	正权重值	负权重值	C
1	Mo-Cu 得分异常	1.831	-32.278	34.109
2	Mo 异常	3.766	-1.282	6.049
3	Mo-Cu 组合异常	4.226	-0.780	6.006
4	Cu 异常	2.650	-1.247	3.897
5	航磁异常	1.142	-1.035	2.178
6	重力异常	0.406	-0.245	0.651

得分异常的权重值极高达到了 34.109,说明 Mo-Cu 得分异常所反映的信息,很可能就是本区该类型矿床产出的直接信息,因此给予 Mo-Cu 得分异常以高度重视。图 5 为矿化异常证据权重等值线图,其高值区与已知矿床有很好的对应关系,同时在结多地区出现了一个高值区,值得做进一步的工作。

### 3.6 综合权重分析

由以上各成矿条件及矿化异常证据权重分析,

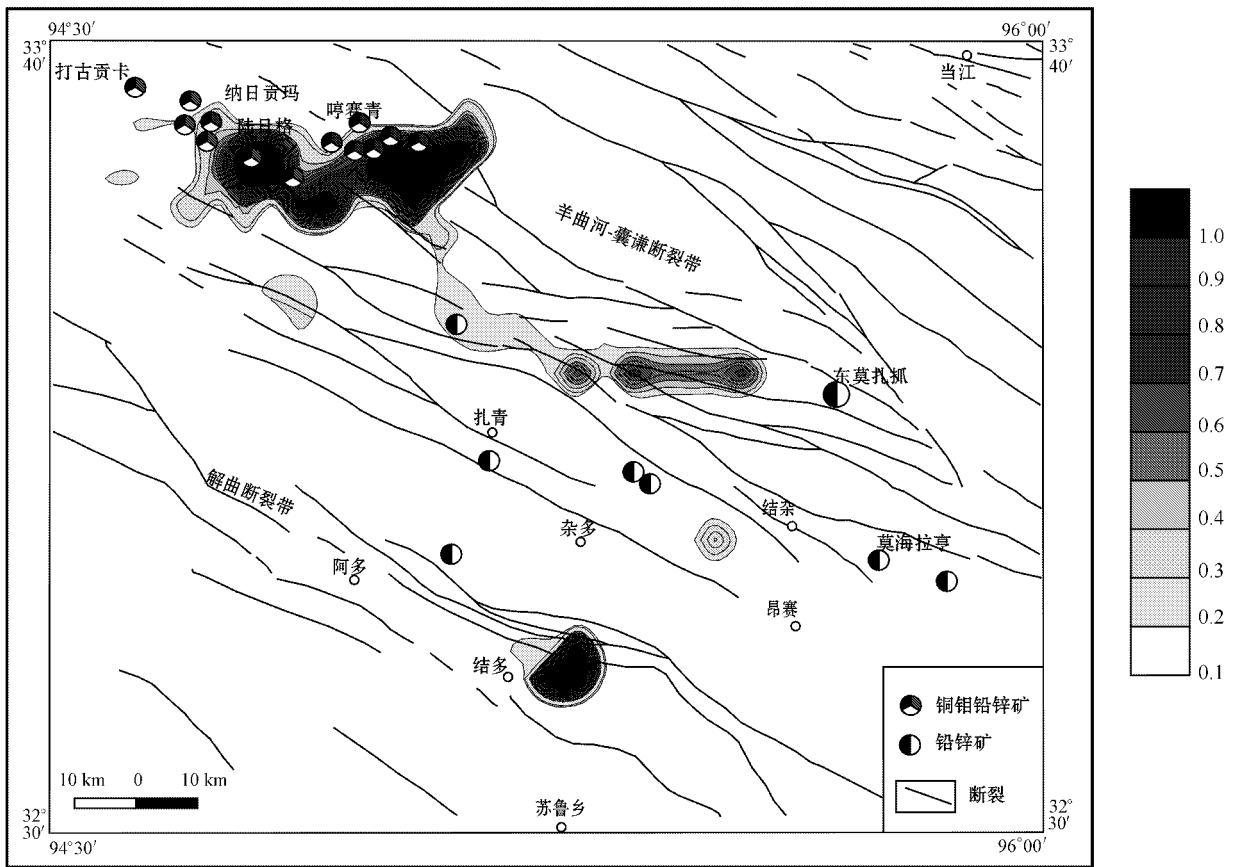


图5 矿化异常权重等值线图

Fig. 5 Contour map of weight of mineralization anomalies

得到了各成矿条件以及矿化异常发育的有利区域,在此基础上以各个成矿条件高权重区为一级证据因子,进一步计算成矿地质条件、构造条件、岩浆岩条件以及矿化异常条件的权重值。表6为各成矿条件的权重值,从表中可以看出,权重值是由矿化异常到岩浆岩条件到构造条件再到地层条件逐渐减小,这和该类型矿床成矿模式中的成矿条件的重要性是非常吻合的,因此可以认为采用两级证据权法计算后验概率是可行的。图6为各证据因子与斑岩型有关矿床的后验概率等值线图,可以看出高值区与已知的矿集区有很好的对应关系,另外一些较高值的区域分布在杂多、结多以及阿多附近,是寻找该类矿床的有利区,应进一步加强找矿工作,依据各预测因子的权重值确定这些靶区今后的工作方法,应以地球化学方法辅以地球物理的方法进行,要充分注意铜钼组合异常以及磁异常。

## 4 研究区矿产资源定量预测

### 4.1 远景区圈定

成矿远景区,是指成矿区中根据成矿地质背景、成矿条件和地质、地球物理、地球化学、遥感、矿产等资料综合分析并确定的找矿潜力相对较大、需要开展1:5万区域矿产调查及矿产预查普查等工作的地区。成矿远景区划分的目的是初步剔除找矿不利地段,为1:5万区域矿产调查提供选区方向。

表6 各证据因子的正负权重值

Table 6 Positive and negative weights of various kinds of evidence

序号	证据因子名称	正权重值	负权重值	C
1	地层条件有利区	1.324 419	-0.064 599	1.389 018
2	构造条件有利区	0.959 776	-0.187 039	1.446 815
3	岩浆岩条件有利区	2.216 017	-0.368 441	2.584 458
4	矿化异常有利区	2.489 171	-0.503 810	2.992 981



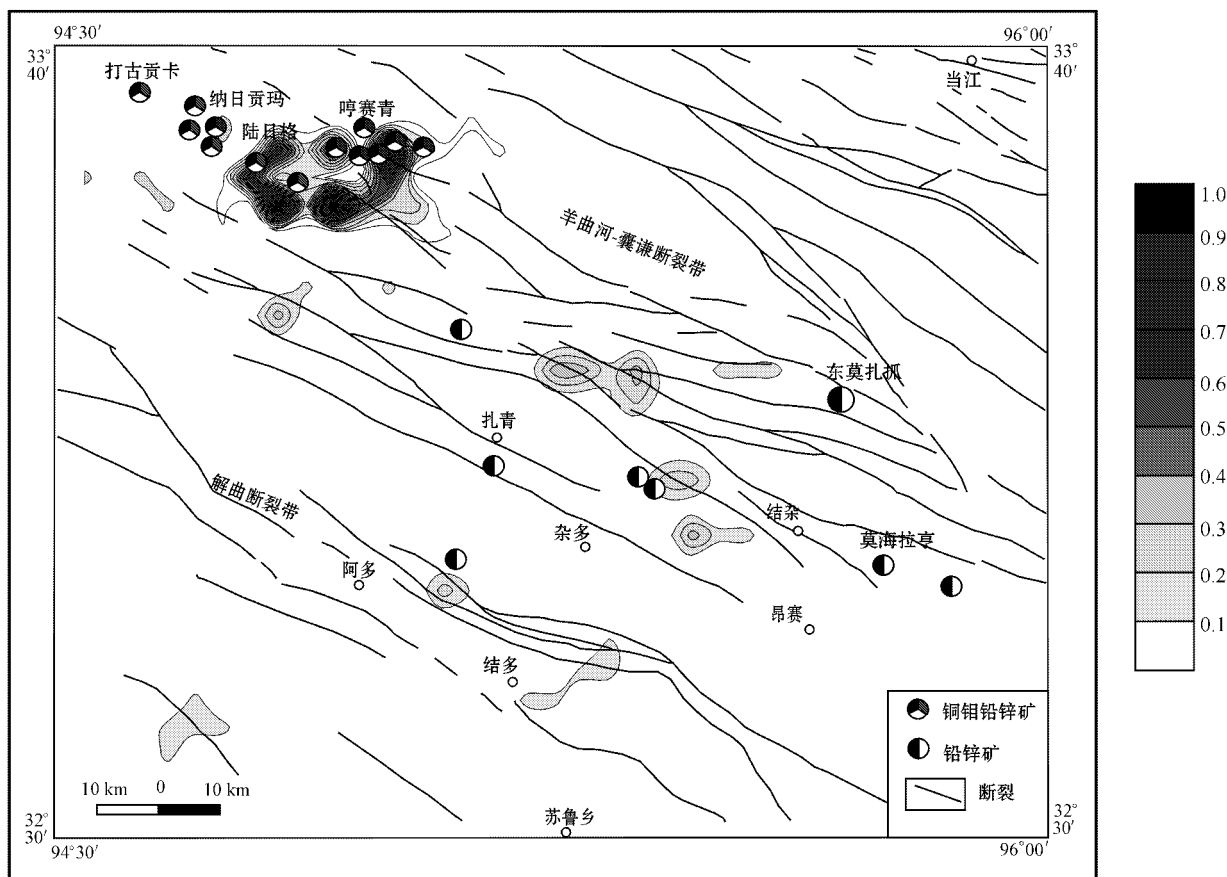


图 6 与斑岩型铜(钼)矿床成矿后验概率等值线

Fig. 6 Posterior probability map of porphyry copper-molybdenum deposit

以后验概率值代表的斑岩型成矿有利区,呈现出北西向展布,与区域构造方向一致,说明了矿床受区域断裂构造的控制,这与地质认识是相符的。从矿床后验概率等值线图,可以大致划分出两个成矿远景区:纳日贡玛-东莫扎抓铜钼铅锌成矿远景区(Ⅰ)、阿多-结多成矿远景区(Ⅱ)。在两个成矿远景区内可划分出 A 类铜钼矿有利靶区 5 处、B 类铜钼矿有利靶区 4 处、C 类铜钼矿有利靶区 4 处(图 7)。

纳日贡玛-东莫扎抓铜钼成矿远景区(Ⅰ),夹持在羊曲河-囊谦断裂带和解曲断裂带之间,从空间展布上来看主要受羊曲河-囊谦断裂带控制,区内现有的矿床大部分集中在这个成矿远景区内,如纳日贡玛铜钼矿床、陆日格铜钼矿床。阿多-结多成矿远景区(Ⅱ)沿着解曲断裂带展布,主要受控于解曲断裂带,该带已发现的矿床(点)较少,该远景区以往矿产勘查工作开展的很少,研究认为该远景区成果潜力较大,应是今后重点勘查区域。

#### 4.2 矿产资源潜力预测

根据对元素丰度与资源量存在关系的认识(王世称 2000),在进行某一地区资源估算时,可通过求出已知地区成矿元素的富集系数并外推到预测区的办法来预测资源,这就是丰度模型法。

富集系数的定义是:在地壳单位体积内某元素成矿部分占元素的比例。富集系数反映了元素在一定地质环境中富集成矿的能力。它的计算公式为:  $r = T / (ShGA \times 10^3 + T)$ , 其中  $S$  为模型区面积 ( $\text{km}^2$ ),  $h$  为模型区深度 ( $\text{km}$ ),  $G$  为含该元素的岩石比重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $A$  为模型区内该元素丰度 ( $\text{g}/\text{t}$ ),  $T$  为模型区矿床储量。

青海“三江”北段属于高寒地区,地质矿产工作较为落后,研究内已开展了普查勘探并提交储量的斑岩型矿床只有纳日贡玛。理论上元素富集系数应为全部模型区的分布概率值,本次研究限于资料水平,只能采用纳日贡玛来代表整个研究区的元素富

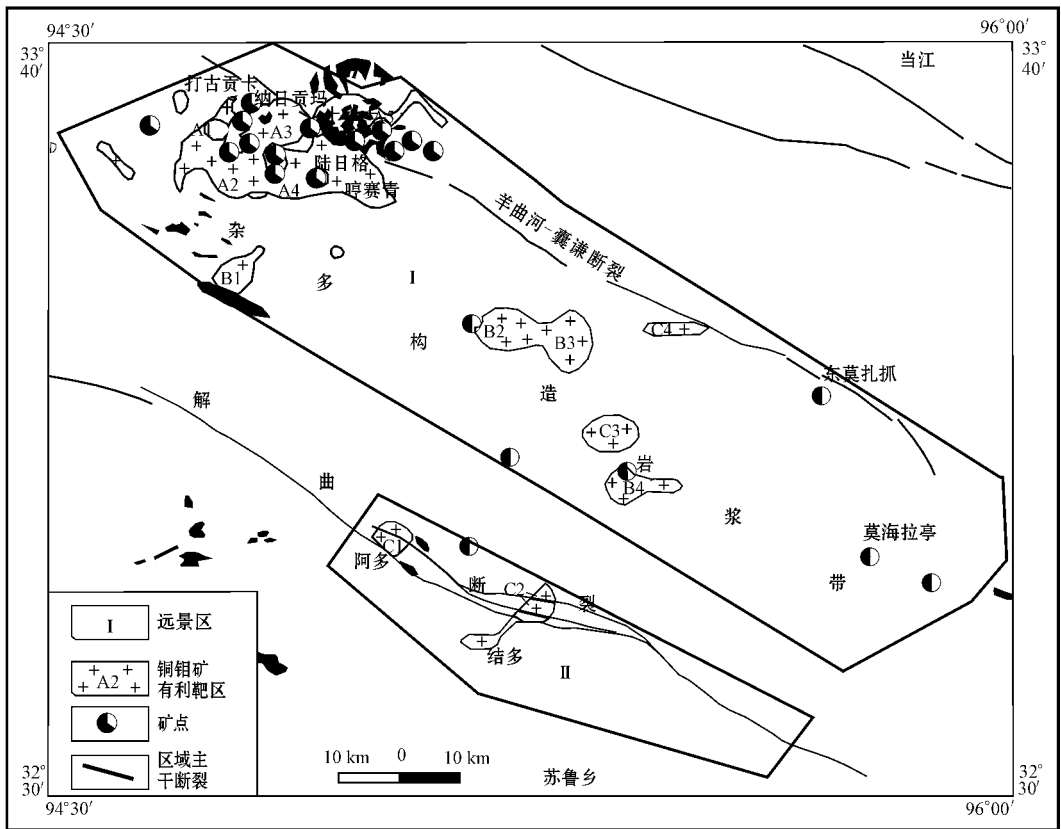


图 7 青海“三江”北段成矿远景区分布图

Fig. 7 Copper-molybdenum prognostic map of northern Sanjiang region

A—成矿条件优越且有成矿事实,找矿潜力大;B—成矿条件良好,有资料依据,具较好找矿前景;C—矿化及异常良好,但无资料依据,可查证异常

A—excellent conditions for mineralization, with known ore deposits and great ore potential; B—good conditions for mineralization, with available data and fairly good prospecting vista; C—good mineralization and anomalies, but without data and verifiable anomalies

集系数。据 2004 年普查勘探报告,纳日贡玛提交的铜金属量 261 600 t,钼金属量 666 700 t,模型区的深度选择为 0.3 km,模型区为一个单元格其面积为 16 km<sup>2</sup>,岩石密度约为 2~8 g/cm<sup>3</sup>。因此,采用上述公式求得研究区内 Cu 元素富集系数  $r = 0.000\ 071$ , Mo 元素富集系数  $r = 0.000\ 68$ 。

将上述公式进行变换,就得到了资源量计算公式:  $T = (rShGA \times 10^3) / (1 - r)$ 。在圈定的靶区内,估算铜资源量为 7 412 730 t,钼资源量为 8 566 180 t。

### 5 结论

(1) 利用基于 GIS 技术的地质矿产空间数据库,对区域成矿条件进行综合分析,提炼出构造、岩浆岩、地层、物化探异常与成矿的关系,进而结合地质调查的成果,来推断区域内有利于矿床产出的成

矿条件组合研究,提出区域控矿地质条件与矿致异常为地层、岩浆岩、构造、物化探异常及遥感信息异常。

(2) 依据后验概率值将研究区划分两个成矿远景区:纳日贡玛-东莫扎抓铜钼铅锌成矿远景区(I)、阿多-结多成矿远景区(II)。在两个成矿远景区内又可划分出 A 类铜钼矿有利靶区 5 处、B 类铜钼矿有利靶区 4 处、C 类铜钼矿有利靶区 4 处。

(3) 利用丰度模型法估算青海“三江”北段区域内铜资源量为 7 412 730 t,钼资源量为 8 566 180 t。

### References

Agterberg F P, Bonham-Carter G F, Cheng Q M, et al. 1993. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping[A]. Davis J C and Herzfeld U C. Computers in

- Geology: 25 Years of Progress [C]. New York: Oxford Univ. Press, 13~32.
- Agterberg F Q and Bonham C. 1999. Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration[J]. Proc 28<sup>th</sup> Intern Symp Computer Applications in the Mineral Industries, 483~490.
- Chen Jianping, Tang Juxing, Cong Yuan, *et al.* 2009. Geological Characteristics and Metallogenic Model in the Yulong Porphyry Copper Deposit, East Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 83(12): 1 887~1 900(in Chinese with English abstract).
- Cheng Jianping, Wang Gongwen, Hou Changbo, *et al.* 2005. Quantitative prediction and evaluation of mineral resources based on GIS in northern segment of Three River (Sangjng) Region, Southwest China[J]. Mineral Deposits, 24: 15~24(in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, *et al.* 2010. Superimposed orogenesis and metallogenesis in Sanjiang Tethys[J]. Mineral Deposits, 29: 37~42(in Chinese with English abstract).
- Deng Yong, Qiu Ruishan and Luo Xin. 2007. Minerogenetic prediction based on the weight-of-evidence approach: a case study of the prediction of tungsten and tin deposits in Guangdong, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(9): 1 228~1 234(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, *et al.* 2006. Metallogenesis in the collisional orogen of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. Geology in China, 33: 340~351(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue and Pan Guitang. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events[J]. Earth Science Frontiers, 13(6): 43~51 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shicheng. 2000. Mineral Prediction of Integrated Information Theory and Method[M]. Beijing: Science Publishing House (in Chinese).
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Yang Zhusen, *et al.* 2008. Genesis of porphyries and tectonic controls on the Narigongma porphyry Mo-Cu deposit, southern Qinghai[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(3): 489~502(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yusheng and Xiao Keyan. 1997. Metallogenic Prediction Methods [M]. Beijing: Geoscience Publishing House(in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈建平,唐菊兴,丛源,等. 2009. 藏东玉龙斑岩铜矿地质特征及成矿模型[J]. 地质学报, 83: 1 887~1 900.
- 陈建平,王功文,侯昌波,等. 2005. 基于GIS技术的西南三江北段矿产资源定量预测与评价[J]. 矿产地质, 24: 15~24.
- 邓军,侯增谦,莫宣学,等. 2010. 三江特提斯复合造山与成矿作用[J]. 矿床地质, 29: 37~42.
- 邓勇,邱瑞山,罗鑫. 2007. 基于证据权重法的成矿预测——以广东省钨锡矿的成矿预测为例[J]. 地质通报, 26: 1 228~1 234.
- 侯增谦,莫宣学,杨志明,等. 2006. 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: 340~351.
- 莫宣学,潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 13: 43~51.
- 王世称. 2000. 综合信息矿产预测理论与方法[M]. 北京: 科学出版社.
- 杨志明,侯增谦,杨竹森,等. 2008. 青海纳日贡玛斑岩钼(铜)矿床: 岩石成因构造控制[J]. 岩石学报, 24: 489~502.
- 朱裕生,肖克炎. 1997. 成矿预测方法[M]. 北京: 地质出版社.