

基于5P成矿预测与定量评价的系统 勘查理论与实践

孙华山¹, 赵鹏大¹, 张寿庭², 夏庆霖¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学研究生院, 北京 100083

摘要: 随着地球系统科学的提出,人们越来越多地从系统的角度来理解和解决地学及其相关的问题,系统勘查正是这种背景下的产物。系统勘查是对矿产勘查过程中涉及到的种类繁多的控矿因素和找矿标志综合考虑、合理选择、有序排列的过程;同时,构建系统勘查数学模型以满足矿产勘查信息化发展的需要。5P成矿预测体系是对这一要求的良好体现。本文在充分分析了以往矿产勘查定量评价模型的基础上,指出了以往成矿预测与定量评价中对上级控矿因素的作用缺乏必要的考虑,这有悖于系统勘查的完整性准则。事实上,上级控矿因素不仅对下级控矿因素具有作用,而且还会通过下级控矿因素对下级勘查目标具有作用或影响。针对这一问题,本文对上级控矿因素对下级勘查目标的影响问题进行了探讨,并给出了上级影响权重的计算公式。在此基础上,对以往成矿有利度函数进行了改进,并以滇西北三江南段与喜山期富碱斑岩有关矿产勘查为例,构建了一个基于5P成矿预测体系的系统勘查数学模型。利用本文提出的方法,对铜—钼—金找矿有利地段进行了定量预测。结果表明,所圈定的预测靶区与已知的铜钼金矿化地段有较高的符合程度,从而证明了本文提出方法的可行性。

关键词: 矿产系统勘查;5P成矿预测与定量评价;系统勘查数学模型;Cu—Mo—Au找矿有利地段;云南。

中图分类号: P62

文章编号: 1000—2383(2005)02—0199—07

收稿日期: 2004—09—16

Theory and Practice of Systematic Mineral Exploration Based on 5P Metallogenic Prognosis and Quantitative Assessment

SUN Hua-shan¹, ZHAO Peng-da¹, ZHANG Shou-ting², XIA Qing-lin¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Graduate School, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Research on earth system science has led to the production of computer-based, mathematical systematic exploration. Systematic mineral exploration is a process in which various ore-controlling factors and ore-finding signs are extensively considered, reasonably selected and arranged in order. In addition, the establishment of a mathematical model for systematic exploration meets the need of information development. The 5P metallogenic prognosis system is a better embodiment of systematic exploration. It divides mineral exploration into five different stages, with each obtaining different explored areas. 5P includes: stage 1, probable ore-forming area; stage 2, permissible ore-finding area; stage 3, preferable ore-finding area; stage 4, potential mineral resources; and stage 5, prospective ore body area. Different areas can be delineated through different mathematical models. Based on a full analysis of the previous mathematical models for mineral exploration, this paper points out that the impact of superior ore-controlling factors on subordinate ones is ignored. Thus, the links between the superior and the subordinate are cut off and this violates an integral principle of systematic exploration. In fact, superior ore-controlling factors not only influence the subordinate ones, but also exert influence on the subordinate exploration objects. A formula is presented herein for calculating the weight of the superior over the subordinate, which improves the ore-forming

基金项目: 国土资源大调查项目(No. 200110200009); 中国地质大学资源学院优秀青年教师基金。

作者简介: 孙华山(1969—), 男, 讲师, 博士, 从事矿产普查与勘探教学与科研工作。E-mail: zhj_shs@163.com

favorability function for delineating different ore-finding areas. A case in Himalayan granitoid rich-alkali porphyry in southern Sanjiang region, northwest Yunnan Province, provides an example for the construction of a systematic exploration model based on the 5P metallogenic prognosis system. A quantitative assessment on the Cu-Mo-Au preferable ore-finding area (the third "P") is conducted. The results show that the consistency between delineating areas and Cu-Mo-Au forming sections is relatively high, indicating the feasibility of the method suggested.

Key words: systematic mineral exploration; 5P metallogenic prognosis and quantitative assessment; mathematical model for systematic exploration; Cu-Mo-Au preferable ore-finding area; Yunnan.

众所周知,矿床的形成既受背景控矿因素的制约又受局部控矿因素的影响,因此,控矿因素具有等级之分,从大尺度到小尺度控矿因素的有序排列构成了一个完整的控矿系统(ore-controlling system),矿产勘查过程就是对控矿系统中控矿因素有序排列的求解过程。回顾以往矿产勘查过程,常常人为地将矿产勘查划分为普查、详查和勘探 3 个阶段,每个阶段根据勘查目标的不同寻找不同的预测组合标志。尽管从普查到勘探是一个循序渐进的过程,但是,不同勘查阶段之间不同等级控矿因素之间的联系常被人地混淆或割断。例如,成矿带控矿因素要么不作为矿区(或亚带)的控矿因素加以考虑,要么与矿区(或亚带)的控矿因素放在一个层面上加以考虑;成矿带、矿区(或亚带)的控矿因素要么不作为矿田或矿床一级的控矿因素加以考虑,要么与控制矿田或矿床的因素一起加以考虑等等。笔者认为:如果不考虑上级层次控矿因素对下级层次控矿因素的影响就割断了系统内部控矿因素相互之间的联系,尤其是不同层次控矿因素相互之间的联系;反之,如果将不同层次(或等级)的控矿因素放在同一个层次上进行组合又显然忽略了控矿因素的等级差异,也有悖于客观世界的本来面目。因此,运用系统科学的思想采用系统勘查的手段是解决上述问题的关键。

1 基于 5P 成矿预测与定量评价理论的系统勘查

1.1 5P 系统勘查思路

5P 成矿预测与定量评价理论是赵鹏大教授等近几年来(赵鹏大等 1996,1998)提出的一种矿产资源定量评价理论和方法。即矿产资源定量评价工作由 5 个不同阶段构成,每一个阶段都以获得不同的目标为目的。其中,第一阶段的目标是成矿可能地段(probable ore-forming area)的确定;第二阶段的目标是找矿可行地段(permissive ore-finding area)的

确定;第三阶段的目标是找矿有利地段(preferable ore-finding area)的确定;第四阶段的目标是矿资源体潜在地段(potential mineral resources area)的确定;第五阶段的目标是矿体远景地段(perspective ore body area)的确定。而获得这些目标的前提是查明控制它们的不同控矿因素或标志组合。基于 5P 理论的系统勘查思路在于:在考虑同一层次控矿因素相互关系与权重的基础上,考虑上级层次控矿因素对下级层次控矿因素的影响,从而实现上级层次控矿因素对下级层次成矿对象的控制,其影响程度可以用权重来表达。也就是说预测单元成矿有利度等于本层次控矿因素与上级层次控矿因素联合作用的函数,其数学表达式如下:

$$f = (a_1 + a_1')x_1 + (a_2 + a_2')x_2 + \cdots + (a_i + a_i')x_i + \cdots + (a_m + a_m')x_m. \quad (1)$$

其中, f 为成矿有利度, a_i 为预测单元内 x_i 因素或标志控矿作用的权重, a_i' 为上级层次控矿因素通过对预测单元内 x_i 因素或标志的影响获得的对下级层次成矿对象控矿作用的影响,并可通过权重来表达(以下简称上级权重)。

1.2 上级层次控矿因素控矿作用的定量表达——上级权重(superior weight)

由(1)式可见,某一层级(或等级)预测单元成矿有利度受该层次控矿因素(层内)与上级层次控矿因素(层间)双重影响,其影响程度可由权重表达。层内控矿因素权重的确定可以仿照以往成矿有利度确定的方法(赵鹏大和陈永清,1999)实现。本文重点探讨上级权重的确定方法。

确定上级控矿因素对下级控矿因素影响的程度可以仿照信息量法(赵鹏大等,1983)进行,即上级层次控矿因素对下级层次控矿因素的作用,可以通过上级层次控矿因素提供给下级层次控矿因素的信息量来表达。

$$I_{A_j \rightarrow B} = \lg[P(B | A_j)/P(B)]. \quad (2)$$

其中, $I_{A_j \rightarrow B}$ 为 A 标志 j 状态下提供的事件 B 发生的

信息量. $P(B|A_j)$ 为 A 标志 j 状态存在条件下, 事件 B 实现的概率. $P(B)$ 为事件 B 发生的概率.

具体运算时, 总体概率可以用样本频率来估计:

$$I_{A_j \rightarrow B} = \lg[(N_j | N)/(S_j | S)]. \quad (3)$$

N_j 为具有标志状态 A_j (指上级层次控矿因素的 j 状态) 并含有下级层次控矿因素的单元数, N 为研究区含有下级层次控矿因素的单元总数, S_j 为具有标志状态 A_j 的单元数, S 为研究区单元总数.

由上式可见, 如果 $I_{A_j \rightarrow B} = 0$, 表明上级层次控矿因素对下级层次控矿因素没有任何影响; 如 $I_{A_j \rightarrow B} > 0$, 说明上级层次控矿因素对下级层次控矿因素有影响, 而且值越大, 影响越大; 如 $I_{A_j \rightarrow B} < 0$, 说明上级层次控矿因素对下级层次控矿因素有负面影响, 不利于下级层次控矿因素的出现.

如果上级层次控矿因素对下级层次控矿因素存在影响, 那么这种影响不仅会体现在对下级层次控矿因素的控制作用上, 而且还应当体现在对下级层次成矿对象的影响上. 但这种影响不应当超过下级层次控矿因素对本层次成矿对象的影响. 在这种准则下, 本文将上级权重计算方法确定如下:

(1) 如果 $I_{A_j \rightarrow B} = 1$, 说明上级层次控矿因素对下级层次控矿因素有完全影响, 上级层次控矿因素对下级层次成矿对象有完全控制, 那么:

$$W_{\pm} = w_{\pm} \times w_{\mp} > 0. \quad (4)$$

W_{\pm} 表示上级权重, 且大于 0, w_{\pm} 表示上级层次控矿因素的权重 (即上级层次控矿因素在上一个层次中的权重), w_{\mp} 表示下级层次控矿因素的权重 (指当前层次控矿因素的权重).

(2) 如果 $I_{A_j \rightarrow B} = 0$, 说明上级层次控矿因素对下级层次控矿因素没有任何影响, 上级层次控矿因素对下级层次成矿对象也就没有任何作用, 那么:

$$W_{\pm} = 0. \quad (5)$$

(3) 如果 $0 < I_{A_j \rightarrow B} < 1$, 说明上级层次控矿因素对下级层次控矿因素有部分影响, 上级层次控矿因素对下级层次成矿对象有部分作用, 那么:

$$W_{\pm} = w_{\pm} \times I_{A_j \rightarrow B} \times w_{\mp} > 0. \quad (6)$$

(4) 如果 $I_{A_j \rightarrow B} < 0$, 说明上级层次控矿因素对下级层次控矿因素有负影响, 上级层次控矿因素出现对下级层次成矿对象出现不利, 那么:

$$W_{\pm} = w_{\pm} \times I_{A_j \rightarrow B} \times w_{\mp} < 0. \quad (7)$$

这时 W_{\pm} 为小于 0 的值.

至此, 可以将基于 5P 的系统勘查步骤概括如下: (1) 根据 5P 预测理论, 划分并确定不同等级预

测目标的控矿因素; (2) 利用特征分析法、信息量法、证据加权法等确定各层次控矿因素的权重; (3) 利用信息量法确定上级权重 W_{\pm} (1P 除外); (4) 对各层次控矿因素权重重新作调整, 调整后权重为:

$$W_{\text{调}}^i = (W_{\text{前}}^i + W_{\pm}^i) / \sum_{j=1}^n (W_{\text{前}}^j + W_{\pm}^j). \quad (8)$$

$W_{\text{调}}^i$ 为层次内第 i 个控矿因素调整后的权重, $W_{\text{前}}^i$ 为层次内第 i 个控矿因素调整前的权重, W_{\pm}^i 为上级层次控矿因素对下级层次第 i 个控矿因素的影响权重, \sum 为层次内各种控矿因素权重以及上级控矿因素影响权重的总和. (8) 式的目的是保证经过调整后的全部控矿因素权重之和等于 1. 各控矿因素重新调整后的权重, 相当于公式 (1) 中的 $(a_m + a_m')$. (5) 根据调整后的控矿因素权重, 利用公式 (1) 计算预测单元的成矿有利度. (6) 确定合理阈值, 选择有利成矿单元或成矿远景区.

2 以滇西北三江南段喜山期富碱斑岩矿产系统勘查为例

2.1 5P 地段控矿因素分析

本文仅以 5P 地段的前 3P 地段分析为例 (孙华山, 2004).

根据 5P 成矿预测与定量评价理论, 首先对研究区内的控矿因素和标志进行了层次划分, 其中, 将喜山期富碱斑岩成矿可能地段 (1P) 的控制因素厘定为深大断裂带、隐伏深大断裂带和幔隆幔拗过渡带 3 种因素, 这 3 种因素是研究区内幔源和壳幔混源的富碱斑岩侵入的控制因素, 也只有富碱斑岩的侵入才能够有富碱斑岩相关矿产的形成, 因此, 它们应当成为喜山期富碱斑岩成矿可能地段的控制因素; 在成矿可能地段确定的基础上, 根据研究区矿产分布与喜山期富碱斑岩、不同方向断裂、断裂交叉、线环交叉关系密切, 而与地层控制因素关系不甚明显的特点, 将喜山期富碱斑岩找矿可行地段 (2P) 的控制因素厘定为 SN 向断裂、NE 向断裂、NW 向断裂、断裂交叉点、遥感蚀变环和喜山期富碱斑岩 6 种因素. 相对于 1P 的控制因素深大断裂、壳—幔结构而言, 2P 的控制因素反映的是地壳浅层的构造和地质体特征, 也是我们所要找寻目标的可能产出部位; 在找矿可行地段确定的基础上, 选择本次研究工作的重点宁蒗—永胜—华坪地区作为进一步示范研究

的解剖区。根据喜山期相关矿产的成因类型、工业意义将研究区优势矿产类型确定为 Cu—Mo—Au、Pb—Zn—Ag—Au 和沉积—改造型重晶石。根据 3 类矿产具体产出环境、成矿时代、岩浆岩成矿专属性又将其划分为 3 个成矿亚系列,即喜山早期与花岗斑岩—二长斑岩—煌斑岩有关的铜、钼、金成矿亚系列,喜山晚期与正长斑岩—二长斑岩—粗面岩有关的铅、锌、银、金成矿亚系列,喜山期富碱斑岩改造与震旦系灯影组有关的沉积—改造型重晶石成矿亚系列。在典型矿床地质特征、成矿环境分析的基础上分别将上述 3 种类型矿床的控矿因素厘定为:(1)喜山早期与花岗斑岩—二长斑岩—煌斑岩有关的铜、钼、金成矿亚系列控矿因素:构造、花岗斑岩、二长斑岩、煌斑岩、有利于 Cu—Mo—Au 矿产形成的 SiO₂ 区间、有利于 Cu—Mo—Au 矿产形成的里特曼指数(δ)区间、有利岩性组合、矿化蚀变、Cu—Mo—Au 组合化探异常等 9 种控矿因素;(2)喜山晚期与正长斑岩—二长斑岩—粗面岩有关的铅、锌、银、金成矿亚系列控矿因素:正长斑岩、二长斑岩、有利于 Pb—Zn—Ag—Au 矿产形成的 SiO₂ 区间、有利于 Pb—Zn—Ag—Au 矿产形成的里特曼指数(δ)区间、有利岩性组合、矿化蚀变、Pb—Zn—Ag—Au 化探组合异常等 7 种控矿因素;(3)喜山期富碱斑岩改造与震旦纪灯影组有关的沉积—改造型重晶石成矿亚系列控矿因素:

构造、喜山期富碱斑岩侵入体、矿化蚀变、含 Ba

沉积建造、Ba、P 组合化探异常等 5 种控矿因素。

上述控矿因素是 2P 控矿因素的进一步分解或下级层次的控制因素。如构造是指控制矿田或矿床的局部构造,有时控制它们的构造就是控制 2P 构造的局部地段;岩浆岩岩石类型和岩石化学特征是岩浆岩成矿专属性的具体控制,而矿化蚀变和组合化探异常是找矿的信息标志。综上,上述因素是研究区找矿有利地段(3P)的控矿因素。

2.2 系统勘查模型及成矿有利地段的定量圈定

2.2.1 系统勘查模型 在控矿因素分析的基础上,本文将滇西北三江南段与喜山期富碱斑岩有关的 Cu—Mo—Au、Pb—Zn—Ag—Au、沉积—改造型重晶石 3 类矿产成矿有利地段(3P)系统勘查模型构建如图 1 所示。模型由 3 个层次构成,代表了 5P 成矿预测与定量评价的前 3 个阶段。每一个层次又由不同的控矿因素组合而成。每一个层次对应着不同的勘查阶段和各自的勘查目标。各层次勘查目标受层内控矿因素和上级控矿因素联合作用。第一层次的勘查目标除外,第二层次的勘查目标除受第二层次控矿因素影响外,还受第一层次控矿因素的影响;第三层次的勘查目标除受第三层次控矿因素影响外,还同时受一、二 2 个上级层次控矿因素的影响。层次间的连线代表了上级控矿因素对下级控矿因素有控制作用,并且这种作用是单向的。即只能是上级对下级有控制作用,反之则不然。

2.2.2 成矿有利地段的定量圈定

因篇幅所限,本

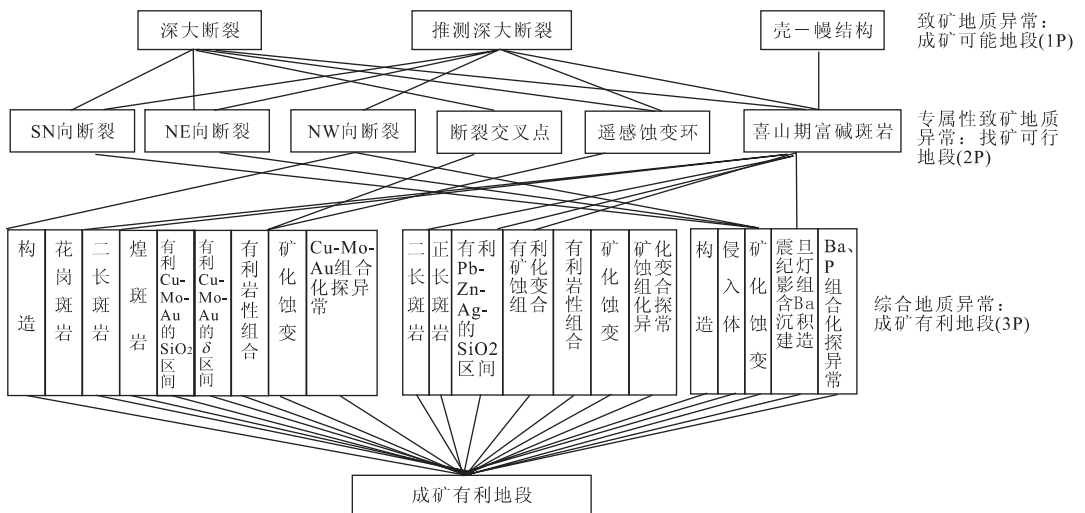


图 1 滇西北三江南段喜山期富碱斑岩 Cu—Mo—Au、Pb—Zn—Ag 和重晶石矿产找矿有利地段(3P)系统勘查模型

Fig. 1 Mineral system exploration model of preferable ore-finding area (3P) Cu—Mo—Au, Pb—Zn—Ag and barite mineral resources

文仅对 Cu—Mo—Au 矿产成矿有利地段的定量圈定做详细说明。Pb—Zn—Ag—Au、沉积—改造型重晶石 2 类矿产成矿有利地段定量圈定过程与其雷同,不作赘述。圈定成矿有利地段(3P)时,不仅要考虑相应层次内部控矿因素的影响而且还应当考虑 1P、2P2 个上级层次控矿因素的作用,尽管它们的作用没有 3P 层次控矿因素影响大,但是,从系统勘查的角度看,它们的作用又不能忽略,它是系统勘查完整性准则(岑博雄等,1991)的具体体现。

(1)成矿可能地段圈定。在 1 : 100 万比例尺的地质图基础上,添加了根据重、磁资料和遥感影像推测的深大断裂及地壳深部构造信息,作为预测底图。进而将研究区划分为 184 个规则网格单元,地质变量数据采集均采用二态赋值,然后运用特征分析乘积阵主分量法确定出地质异常单元成矿有利度表达式:

$$f = 0.9789X_1 + 0.0703X_2 + 0.192X_3 \quad (9)$$

其中, f 为成矿有利度, X_1 为深大断裂, X_2 为推测深大断裂, X_3 为深部构造(即幔隆幔拗过渡带)。

根据式(9)计算出研究区所有单元的成矿有利度,并以 0.3 为阈值圈定致矿地质异常,圈定出该区与喜山期富碱斑岩有关的成矿可能地段。

(2)找矿可行地段圈定。以 1 : 50 万的地质矿产图作为底图,叠置遥感解译蚀变环,并将研究区划分为 660 个规则网格单元,选择 SN 向断层、NE 向断层、NW 向断层、断层交叉点、遥感蚀变环和喜山期富碱斑岩作为定量标度该区致矿专属地质异常的 6 个变量。各单元地质变量数据采集均采用二态赋值。按式(2)分别计算出各个变量的信息量(表 1)。

根据以上系统勘查的思路,2P 圈定的过程中,要考虑上一级控矿因素对下一级控矿因素的影响,以及通过下一级控矿因素对成矿对象产生的作用。表 2 是根据信息量法确定的 1P 3 个控矿因素对 2P 控矿因素产生的影响。从式(9)中清晰可见,1P 诸因素中深大断裂对成矿可能地段的影响最大,因此仅考虑深大断裂对 2P 各控矿因素的影响。表 3 给出了上级权重,表 4 是 2P 层次控矿因素调整后的权重。在此基础上,根据式(1)重新计算了各单元成矿有利度,根据成矿有利度以 0.4 为阈值圈定出滇西北地区与喜山期富碱斑岩相关矿产的找矿可行地段。

(3)Cu—Mo—Au 矿产找矿有利地段圈定。在 1 : 20 万的尺度上,将预测区划分为 165 个规则网格单元,选择 X_1 —构造, X_2 —花岗斑岩, X_3 —二长斑岩, X_4 —煌斑岩, X_5 —对 Cu—Mo—Au 成矿有利

表 1 2P 控矿因素提供的找矿可行地段信息量

Table 1 Ore-finding information of 2P ore-controlling elements

变量	SN 向 断裂	NE 向 断裂	NW 向 断裂	断层 交叉点	遥感 蚀变环	喜山期 富碱斑岩
信息量	0.086 1	0.230 4	0.126 9	0.269 7	0.046 4	0.522 1

表 2 1P 控矿因素对 2P 控矿因素影响信息量

Table 2 Impact information of 1P to 2P of ore-controlling elements

控矿因素	深大断裂	推测深大断裂	壳—幔结构
SN 向断裂	0.277 965	0	0
NW 向断裂	0.200 451	0	0
NE 向断裂	0.096 910	0	0
断裂交叉点	0.239 760	0	0
遥感蚀变环	0.151 158	0	0
喜山期富碱斑岩	0.589 095	0	0

表 3 2P 控矿因素的上级权重

Table 3 Superior weight of 2P ore-controlling elements

因素	深大 断裂	推测深 大断裂	壳—幔 结构	上级 综合权重
SN 向断裂	0.023 4	0	0	0.023 4
NW 向断裂	0.045 2	0	0	0.045 2
NE 向断裂	0.012 0	0	0	0.012 0
断裂交叉点	0.063 3	0	0	0.063 3
遥感蚀变环	0.006 9	0	0	0.006 9
喜山期富碱斑岩	0.301 1	0	0	0.301 1

注:上级权重计算公式见第一节说明;综合权重即各上一级控矿因素上级权重之和。

表 4 2P 控矿因素调整后权重

Table 4 Adjusted weight of 2P ore-controlling elements

变量	SN 向 断裂	NE 向 断裂	NW 向 断裂	断层 交叉点	遥感 蚀变环	喜山期 富碱斑岩
权重	0.063 2	0.159 0	0.080 1	0.192 1	0.030 7	0.474 9

注:调整权重按式(8)得到。

的 SiO₂ 含量区间, X_6 —对 Cu—Mo—Au 成矿有利的岩体里特曼指数区间, X_7 —有利岩性组合, X_8 —矿化蚀变, X_9 —Cu、Mo、Au 组合化探异常。根据特征分析乘积阵主分量法计算出地质异常成矿有利度(f)的表达式为:

$$f = 0.4754X_1 + 0.0346X_2 + 0.2649X_3 + 0.1268X_4 + 0.3356X_5 + 0.3222X_6 + 0.4764X_7 + 0.4236X_8 + 0.2522X_9 \quad (10)$$

在得到本层次控矿因素作用的权重以后,接下来需要计算上级层次控矿因素对本层次控矿因素的影响以及上级权重。调整后的 2P 控矿因素权重包

含有 1P 和 2P2 个层次控矿因素的联合作用强度。从调整后的权值可见: SN 向断裂、NE 向断裂、NW 向断裂、断裂交叉点、遥感环和喜山期斑岩 6 个控矿因素,它们各自的权重分别为 0.063 2,0.159,0.080 1,0.192 1,0.030 7,0.474 9,由此可见,在上述 6 个因素中以 NE 向断裂、断裂交叉点和喜山期斑岩 3 个控矿因素对预测目标作用的强度最大,其和为 0.826,也就是说,这 3 个控矿因素占据了 82.6% 的控矿作用,而另外不足 18% 的控矿作用被另 3 个控矿因素占有,且较为分散。因此,在考虑对下级控矿因素影响时,仅考虑以上 3 个因素的作用,对其他因素忽略不计。表 5 为以上 3 个 2P 控矿因素对 3P 层次控矿因素影响的信息量计算表。

在此基础上,根据式(4)~(7)计算上级权重(表 6),根据式(8)计算 3P 层次 Cu—Mo—Au 控矿因素调整后权重(表 7)。根据式(1)可求出所有预测单元的地质异常成矿有利度值,并以 0.65 为阈值,则可定量圈定宁蒗—永胜地区 Cu—Mo—Au 找矿有利地段(图 2)。

2.2.3 预测靶区评价 图 2 圈定 Cu—Au—(Mo) 找矿有利地段(靶区)3 处,位于近 SN 向包都—波罗弧形大断裂带东侧,靶区内均有喜山期斑岩体发育,其中: I 号靶区规模(分布面积)大,正是研究区北段西范坪—罗卜地喜山期富碱斑岩群分布区,已知产有西范坪大中型斑岩型 Cu—Au—(Mo) 矿床、罗卜地斑岩型 Cu 矿点、余家村中型破碎带蚀变岩型 Au 矿床、西厂沟热液脉型 Cu 矿点和树劳河小型 Cu 矿、铜厂河小型 Cu 矿(热液脉型)等,该区 Cu、Au 矿化类型多样,成矿—找矿潜力大。II 号靶区,在树扎一带多处发育有 Cu 矿(化)点,矿化类型以热液脉型为主,呈石英—绿帘石—铜矿脉沿二叠系玄武岩系断裂裂隙带充填发育,目前该区仅见喜山期煌斑岩脉产出,是否存在隐伏斑岩体及斑岩型 Cu—Au 矿化有待进一步研究。III 号预测区位于他尔布子一带,区内喜山期花岗斑岩、花岗闪长斑岩呈小岩株、岩脉状发育,目前岩体未见明显矿化,但斑岩群岩体蚀变强烈,围岩蚀变以硅化、黄铁矿化、角岩化为主,岩体含矿性及深部找矿潜力值得进一步研究。

3 存在的问题

基于 5P 成矿预测与定量评价理论的系统勘查指导思想是系统分析,也就是在系统地分析不同

表 5 2P 控矿因素对 3PCu—Mo—Au 控矿因素影响信息量
Table 5 Effect information of 2P to 3P ore-controlling elements

控矿因素	NE 向断裂	断裂交叉点	喜山期富碱斑岩
构造	0.123 1	0.198 7	0.168 8
花岗斑岩	0.263 2	0.485 1	0.125 0*
二长斑岩	0.457 8	0.077 6	0.319 4*
煌斑岩	0.439 3	0	0.083 3*
SiO ₂ 区间	0	0	0.458 3*
有利 δ 值	0	0	0.319 4*
有利岩性组合	0	0	0.654 5*
矿化蚀变	0.802 5	0.626	0.692 3*
组合化探异常	0.464 2	0.510	0.529 4*

* 为控矿因素所占 3P 层次内全部喜山期富碱斑岩的百分比。

表 6 3P 控矿因素的上级权重

Table 6 Superior weight of 3P ore-controlling elements

控矿因素	NE 向断裂	断裂交叉点	喜山期富碱斑岩	上级综合权重
构造	0.009 4	0.018 1	0.038 1	0.065 6
花岗斑岩	0.001 4	0.003 2	0.002 1	0.006 7
二长斑岩	0.019 3	0.003 9	0.040 1	0.063 3
煌斑岩	0.008 9	0	0.005 0	0.013 9
SiO ₂ 区间	0	0	0.073 0	0.073
有利 δ 值	0	0	0.048 9	0.048 9
有利岩性组合	0	0	0.148 0	0.148
矿化蚀变	0.055 5	0.050 9	0.139 1	0.245 5
组合化探异常	0.018 6	0.024 7	0.063 4	0.106 7

层次成矿控制因素和找矿标志的基础上,根据预测目标构建不同层次控矿因素和标志联合作用的控矿系统结构模型。研究层次内部和层次之间控矿因素的结构关系和相互影响程度(权重),构建一种既符合随机分布原理,又能够反映客观实体构成要素相互联系的控矿系统结构模型(ore-controlling system structural model)。因此,确定系统要素结构关系和相互之间的联系程度是构建控矿系统结构模型的关键。通过以上理论及实践的检验,我们看到上述目标在一定程度上得到了实现,并且预测所得结论大部分已通过野外工作得到了证实,预测效果良好。但是,在实际操作过程中,发现在模型构建过程中,对控矿系统组成要素的结构关系研究还不够。本文构建的控矿系统结构模型仍然是人为和经验的产物。毫无疑问,在构建模型的过程中,人对客观实体的认识程度是十分重要的。但是,同样不可否认,过多的人为参与,也会使模型预测结果因人而异,使决策模型失去客观性。因此,在强调主观参与的同时,应当加强客观化方法的引入,使得控矿系统结构模

表 7 3P 控矿因素调整后权重

Table 7 Adjusted weight of 3P ore-controlling elements

变量	构造	花岗斑岩	二长斑岩	煌斑岩	SiO ₂ 区间	有利 δ 值	岩性组合	矿化蚀变	组合化探异常
权重	0.155	0.011 8	0.094	0.040	0.117 3	0.106 6	0.179 28	0.191 9	0.103 1

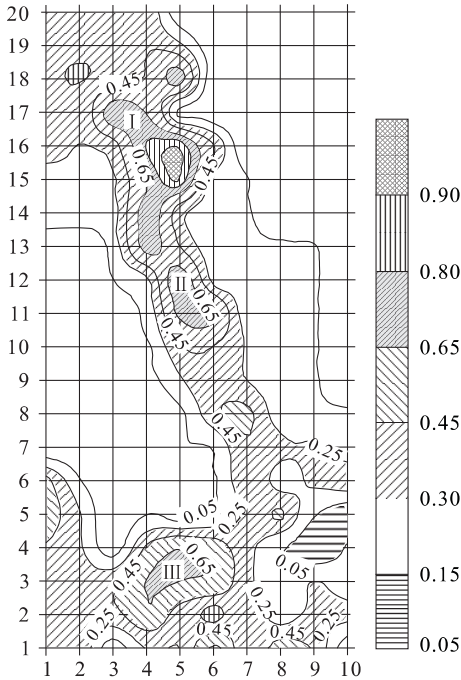


图 2 Cu—Mo—Au 找矿有利地段成矿有利度等值线

Fig. 2 Favorable degree of ore-forming of preferable ore-finding area of Cu-Mo-Au

型构建的过程更加科学. 在解决系统要素结构关系时,一种被称为“系统结构模型(system structural model)”的分析方法(汪树玉和刘国华,2002;孙华山等,2004)值得借鉴.

References

Cen, B. X., Xiong, P. F., Wang, D. Y., 1991. Theory and method of mineral system exploration. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 16(4): 411—417 (in Chinese with English abstract).
 Sun, H. S., 2004. Analysis of diversity of mineralization and quantitative resources assessments to regional advantage mineral resources—Case of alkali-rich porphyry in xi-shan period in the northwest of Yunnan Province (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan, China (in Chinese with English abstract).
 Sun, H. S., Zhao, P. D., Zhang, S. T., et al., 2004. Application of system structural model for mineral resources

prospecting. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 1—6 (in Chinese with English abstract).
 Wang, S. Y., Liu, G. H., 2002. System analysis. Publishing House of Zhejiang University, Hangzhou (in Chinese).
 Zhao, P. D., Chi, S. D., Chen, Y. Q., 1996. A thorough investigation of geo-anomaly: A basis of metallogenic prognosis. *Geological Journal of China Universities*, 2(4): 361—373 (in Chinese with English abstract).
 Zhao, P. D., Chen, Y. Q., 1998. The main way of geo-anomaly location of ore body. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(2): 111—114 (in Chinese with English abstract).
 Zhao, P. D., Chen, Y. Q., 1999. Geological anomaly unit-based delineation and assessment of preferable gold ore-finding area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(5): 443—448 (in Chinese with English abstract).
 Zhao, P. D., Hu, W. L., Li, Z. J., 1983. Statistic prediction of mineral deposit. Beijing: Geological Publishing House, Beijing, 52—53 (in Chinese).

附中文参考文献

岑博雄,熊鹏飞,王定域,1991. 矿产系统勘查的理论及其方法. *地球科学——中国地质大学学报*, 16(4): 411—417.
 孙华山,2004. 成矿多样性分析与区域优势矿产资源定量评价——以滇西北喜山期富碱斑岩相关矿产研究为例(博士论文). 武汉:中国地质大学.
 孙华山,赵鹏大,张寿庭,等,2004. 系统结构模型在矿产勘查中的应用. *地学前缘*, 11(1): 305—310.
 汪树玉,刘国华,2002. 系统分析. 杭州:浙江大学出版社.
 赵鹏大,陈永清,1998. 地质异常矿体定位的基本途径. *地球科学——中国地质大学学报*, 23(2): 111—114.
 赵鹏大,陈永清,1999. 基于地质异常单元金矿找矿有利地段圈定与评价. *地球科学——中国地质大学学报*, 24(5): 443—448.
 赵鹏大,池顺都,陈永清,1996. 查明地质异常:成矿预测的基础. *高校地质学报*, 2(4): 361—373.
 赵鹏大,胡旺亮,李紫金,1983. 矿床统计预测. 北京:地质出版社,52—53.