

# 矿床模拟几种作法的比较及实例

朱裕生

(中国地质科学院矿床地质研究所)

郭履和 杨本锦 张冬梅 彭富钰

(四川省地矿局攀西地质大队)

## 一、前言

矿床模拟法是根据已知矿床的各种地质特征、成矿条件及成因特征,建立矿床模型,使某种类型的矿床模式化、典型化,然后分析研究评价区的地质特征与模型的相似程度。如果一个地区的地质特征与矿床模型相似,则其矿床的分布也应是类似的<sup>[1]</sup>,据此就可以对资源量进行定量估计。

矿床模拟法为M.V.Hansen等<sup>[2]</sup>和R.Sinding-Larsen等<sup>[3]</sup>在1978年首先提出。一般的作法是应用特征分析总结成矿规律,筛选可能成矿岩体。应用体积法或蓬特卡洛抽样求资源量。1981年R.B.麦克卡门(McCammon)等来我国讲学介绍了特征分析的三种作法<sup>[4]</sup>。我们的工作证明特征分析实际有六种作法。另外R.B.麦克卡门还没有比较各种方法间实际应用的差异。近年来矿床模拟法的应用在我国逐渐增多,但对下列问题尚有不同认识:

1. 预测单元划分上是以点(如矿区、点、岩体等)为单元,还是以面(如方格)为单元,两者的预测结果有何区别和联系;

2. 特征分析的六种作法预测结果有何差异;

3. 特征分析所得成矿有利度与预测资源量间有何关系。

本文以四川攀西钒钛磁铁矿为例,对上述三个问题进行探索。工作中预测目标分别按以点为预测单元和以面为预测单元两种方案进行。点为单元依据岩体有关资料;面为单元者依据图件资料。

## 二、主要地质特征

攀西地区钒钛磁铁矿,前人作了大量研究工作。对成矿地质条件、矿床地质特征、矿石物质成分以及找矿标志等都作了系统总结<sup>①②</sup>。现根据前人资料及笔者的部分观察研究,总结各主要成矿控制因素对矿床形成的影响情况如表1。

## 三、特征分析六种作法比较

(一) 历史背景 1981年麦克卡门介绍的三种特征分析作法是:乘积矩阵平方和法、乘积矩阵主分量法、概率矩阵主分量法。我们从特征分析的数学意义出发认为在得到乘积、概率二个不同矩阵后,皆可用代数法和平方和法、主分量法来求取各变量之权系数。这就有六种方法,即从乘积矩阵出发有三种,从概率矩阵出发亦有三种。现对这六种方法的实际效果进行比较。

### (二) 准备工作

1. 模型岩体的确定:选择模型岩体的条件,一是代表性较强,二是工作程度相对较高,并考虑大、中、

① 周信国、唐兴信等,1981,攀枝花—西昌地区成矿规律与预测研究报告(内部资料)。

② 韩庆云等,1980,四川省攀西地区钒钛磁铁矿成矿远景区划说明书(内部资料)。

表1 攀西钒钛磁铁矿成矿控制因素情况表

成矿因素	对成矿有利条件	介于二者之间	对成矿不利条件
岩体分异特征	分异良好, 层状韵律层发育	分异一般, 略具层状构造	无分异, 未见层状构造
岩体所处构造位置	裂谷带内的剪切拉张地段	裂谷带内的挤压松散地段	裂谷带外
岩体的形态产状	盆状、岩床或单斜层状	形态产状不明	不规则状、脉状等
围岩特征	震旦系灰岩或震旦系与前震旦系不整合面间	海西早期以后的火成岩或火山岩	除前面所述时代以外的其他地层
岩体出露面积	大于6 km <sup>2</sup>	6—3km <sup>2</sup> 之间	小于3km <sup>2</sup>
岩体的时代	海西早期 (3.3—3.75 亿年)	岩体时代不明	海西早期 (3.3—3.75 亿年) 以外
矿化程度及矿床规模	矿化良好, 见有工业矿体且储量较大	有矿化, 未见工业矿体或储量较小	无矿化现象
岩体SiO <sub>2</sub> 平均含量(%)	<42.7	42.7—44.0	>44.0
岩体TiO <sub>2</sub> 平均含量(%)	>3.7	3.7—2.5	<2.5
岩体TFe平均含量(%)	>9.7	9.7—8.8	<8.8
岩体CaO平均含量(%)	>11.6	11.6—11.0	<11.0
岩体P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 平均含量(%)	>0.4	0.4—0.20	<0.20
岩体V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 平均含量(%)	>0.058	0.058—0.045	<0.045
岩体Mg/Fe比值 (原子数之比)	<1.20	1.20—1.55	>1.55
磁异常	强度大, 圈闭较好, 推断含矿	强度中等, 矿化情况不明	异常低或无异常
化探异常	反应较好, 推断含矿	反应不明显, 矿化情况不明	无异常

表2 模型岩体地质特征逻辑变量赋值表 (矩阵Z)

变量名称	地质特征							岩石化学成分							物探磁异常	化探异常	
	分异特征	构造位置	形态产状	围岩特征	出露面积	岩体年龄	矿化程度	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	TFe	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Mg/Fe			
红格	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
太河	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
秀水	1	1	1	0	-1	0	1	1	0	1	0	-1	1	0	1	1	1
湾子	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
潘家	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
安宁	1	1	1	0	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
白马	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
攀枝	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
中干	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
新街	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	-1	0	0	0
榜秀	0	1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1
巴硐	0	0	-1	-1	0	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	-1	1	0	0
黑谷	-1	1	-1	1	-1	1	0	-1	1	1	-1	0	1	1	1	1	1
务本	1	1	1	1	-1	1	0	-1	0	1	-1	1	-1	1	0	-1	0
草场	0	1	1	0	1	1	0	-1	-1	-1	1	-1	0	-1	1	0	0
田房	0	0	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	1	-1	0	-1	1	-1	-1



它是第  $i$  个变量与所有变量间依存关系的总度量。于是可将该向量长度视为变量对该类型矿床的典型性的

度量。故而求出每个变量长度与总向量长度之比值就是每个变量的相对权系数。即令  $STOT = \sum_{i=1}^{16} SSQ(i)$ ,

则每个变量的权系数为:

$$b_i = SSQ(i) / STOT \quad i = 1, 2, \dots, 16$$

3. 乘积矩阵主分量法: 若要同时考虑所有变量在矿床模型中的共存关系, 则需要使用乘积矩阵主分量分析法。它是用乘积矩阵的最大特征值  $\lambda_1$  所对应的特征向量  $A_1$  来表示该模型中各变量的典型共存关系。 $A_1$  的各元素  $a_1, a_2, \dots, a_{16}$  表示了各变量对该典型组合的贡献, 因此诸  $a$  可视为各类变量的权。

4. 概率矩阵代数、平方和、主分量法

(1) 求概率矩阵

首先从矩阵  $Z$  出发, 计算匹配矩阵  $T$  和  $K$ 。然后计算匹配概率阵  $P^{(1)}$ 。

(2) 以概率矩阵  $P$  为基础, 其代数法和、平方和法和主分量法的计算方法分别与乘积矩阵的三种作法相同。

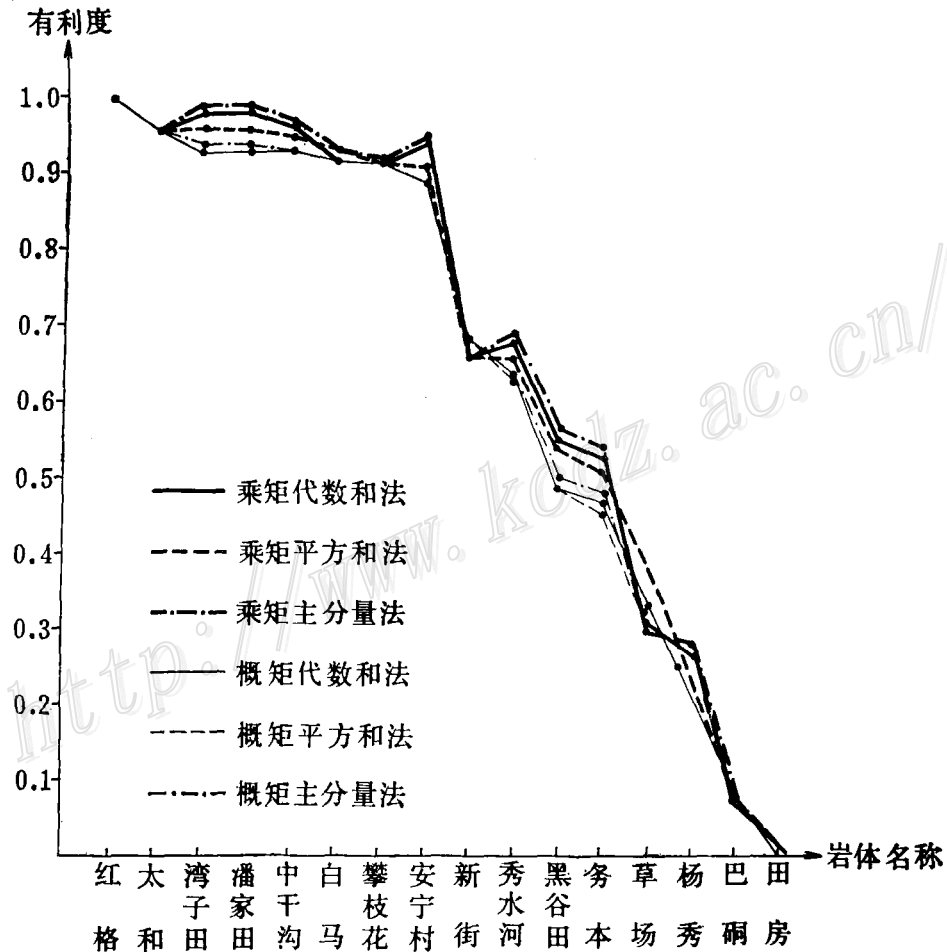


图 1 各种方法模型岩体成矿有利度对比图

Fig. 1. Comparison of metallogenetic advantageous degrees of various methods for model bodies of rock.

#### (四) 各方法效果比较

1. 权系数比较: 据计算结果得出从乘积矩阵出发的三种作法, 各变量的权系数大小及排队顺序比较接近, 从概率矩阵出发的三种作法各变量的权系数大小及其排队顺序亦比较接近。但两者之间则出入稍大。乘积矩阵三种方法认为岩体的 TFe 含量、形态产状和构造位置, 在成矿过程中起的作用相对较大; 而概率矩阵三种方法则认为岩体 SiO<sub>2</sub> 含量、矿化程度起的作用相对较大。从成矿地质条件来看, 上述五个变量均属必不可少的条件。因而不能简单得出那一种方法较好的结论。应进一步对各种方法的实际效果进行比较。

2. 成矿有利度比较: 首先将各种方法计算得来的各变量的权系数, 代进模型岩体原始逻辑变量赋值表。计算公式为:

$$F_i = \sum_{j=1}^{16} a_j x_{ij} \dots \dots A$$

式中  $F_i$  为第  $i$  个模型岩体的成矿有利度;  $a_j$  为第  $j$  个变量的权系数;  $x_{ij}$  为第  $i$  个模型岩体, 第  $j$  个变量的逻辑值。

其次, 将计算得到的各模型岩体的成矿有利度规格化处理后果列于表 3, 并作成成矿有利度对比曲线图 (图 1)。

从表 3 和图 1 可看出, 乘积矩阵代数和法与乘积矩阵主分量法所计算的各岩体的成矿有利度, 按其大小排队的顺序完全相同; 乘积矩阵平方和法与概率矩阵的三种方法, 其排队顺序完全相同。而且六种方法计算的各岩体成矿有利度的数值大小十分接近, 一般仅小数点后面第 2、3 位数字才有变化。说明六种方法的实际效果基本一致。上述不同作法的权系数差别在此亦得到弥补。因此, 在本区选用任何一种方法, 对基性超基性岩体进行特征分析判定都是可行的。

何种方法最佳呢? 把各方法所得的各模型岩体的成矿有利度同进行丰度法预测时所得该岩体的铁富集系数进行比较。若某一特征分析作法所得各岩体的成矿有利度与各自的铁富集系数之差 (绝对值) 的和最小, 则该方法为最佳。因为富集系数是岩体通过钻探求得的铁矿石储量与该岩体背景铁值之比。它是各种成矿因素的综合反映。比较结果, 概率矩阵平方和法最好, 故选用此法。

### 四、据岩体资料进行预测

(一) 在上述特征分析基础上进行 计算本区各基性超基性岩体与矿床模型的关联系数, 确定待测岩体。

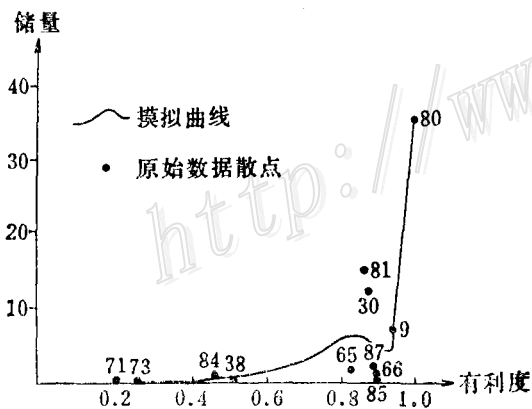


图 2 成矿有利度—储量散点及其模拟曲线

Fig. 2. Diagram of the metallogenic advantageous degree versus scattered points of reserves and the modelling curve.

1. 选取与模型岩体相同的地质变量进行三态逻辑变量转换 (各变量转换标准与模型岩体相同)。

2. 用概率矩阵平方和法所得各变量的权系数代入 A 式求出各岩体与矿床模型的关联系数。

3. 判定待测岩体: 比较模型岩体中已知有矿和无矿岩体的成矿有利度后发现, 有矿的岩体中有两个岩体 (杨秀、巴洞) 的成矿有利度为负值 (-0.1507 和 -0.3565), 其余均为正值; 无矿的岩体中有两个岩体 (黑谷田、草场) 的成矿有利度为正值 (0.2478 和 0.0123), 其余均为负值。故把成矿有利度的临界值定为 0, 则判漏和判错的概率相等。据此选出 22 个成矿有利度为正的成矿有利度的岩体, 作为待测岩体。

(二) 建立矿产资源量定量评价模型 前人多用体积法或蒙特卡罗模拟。我们认为特征分析所得成矿有利度既为成矿有利程度的量度, 则分析已知岩体的矿石储量与其成矿有利度之间的相关关系, 建立回归分

析模型,即可进行资源量预测。根据矿石储量与成矿有利度散点图(图2),可以看出两者之间的关系近于抛物线。但用不同参数的抛物线函数拟合试算效果皆不好。后改用多项式回归拟合提高了相关系数得到较好的效果。作法是首先试算选出与储量相关系数最高的项,以此为中点选取四项进行多项式回归分析。所得回归模型为:

$$y = 0.0632 + 2.7641x^2 + 74.0099x^{10} - 232.3448x^{18} + 191.2715x^{25}$$

式中 $y$ 为岩体预测资源量; $x$ 为岩体的成矿有利度。复相关系数为0.9157,检验临界值 $r_{0.05} = 0.763$ ,证明此方程可信。用此方程回代总储量与模型岩体已获总储量几乎相等,说明模拟精度较高。

从单个岩体回代值看相对误差,最小0.01,最大4.65,平均0.95。其中安宁村、潘家田、湾子田、中干沟四个矿区的预测资源量比已获储量高的幅度较大,其原因经野外再次实地调查和查阅已获资料发现,原计算储量的范围和深度都不够,还有扩大储量的可能。目前安宁村、潘家田正在进行详查。据最新资料<sup>①</sup>,控制储量已超过原获储量的一倍左右。若如此,则上述回归模型和模拟曲线将更好些。

## 五、据图件资料进行预测

工作过程与前述基本相同。不同点其一是在选取模型单元和建立矿床模型时引进了麦克卡门的最新研究成果<sup>②</sup>;其二是在建立资源量定量模型时,选用了蒙特卡罗抽样,利用概率连乘预测资源量。现简述于下:

(一) 单元划分 根据该区地质特征和矿床分布特点,以地理座标为基线,将该区1:20万钒钛磁铁矿地质矿产图划分为352个长方形单元,每个单元的长为12300米,宽为9200米,单元编号从左到右,自上而下编为1、2、3……352。

(二) 变量的确定及变量转换 在充分研究成矿地质条件的基础上根据钒钛磁铁矿V级区划1:20万地质矿产图、物探成果图、化探成果图、遥感等图件<sup>③</sup>,选取出露的地层、岩石、裂谷构造、断层、物探、化探、遥感等方面共20个变量来表征模型的特征。并根据对成矿有利为+,不利为-,介于二者之间或情况不明为0的原则将这些变量转换成三态逻辑变量(+、0、-)。

### (三) 确定模型单元, 建立成矿模型

1. 根据已知含矿单元建立原始成矿模型:在352个单元中,只有7个为已知有矿单元,据此建立原始成矿模型。用乘积矩阵平方和法对模型进行特征分析,计算出模型单元各变量的权系数。

2. 建立广义成矿模型:上述原始成矿模型是完全依赖于已知矿床建立的。在应用时,常因缺乏代表性而受到很大限制。作为模型还应包含其它与模型单元类似的单元。据R. B. 麦克卡门的意见<sup>④</sup>,类似单元可含矿床,也可不含矿床。

利用上述原始成矿模型各变量的权系数计算出352个单元的成矿有利度。从中挑选出等于或大于已知含矿单元中最小有利度者作广义成矿模型的模型单元(已知含矿单元277号的有利度仅-0.1778,大大低于其它有矿单元,在建立广义成矿模型时未予考虑)。据此,挑选出23个单元,加上6个已知含矿单元共29个,由这29个单元建成的模型叫广义成矿模型。

用乘积矩阵平方和法对广义成矿模型进行特征分析,计算出各变量的权系数及各单元的成矿有利度。

3. 建立最终成矿模型:检查广义成矿模型中是否含有与其它变量无关的独立变量的单元,如有则删除,删除后再建立的模型,称为最终成矿模型。

由于我们的广义成矿模型中没有含独立变量的单元,因此,上述广义成矿模型就是最终模型。

(四) 预测含矿单元 用最终成矿模型各变量的权系数,计算全区待测单元的成矿有利度。从中选出等于或大于最终成矿模型里已知含矿单元中最小成矿有利度者,加上模型中尚未发现矿床的单元,共25个为预测的可能成矿单元。

令成矿有利度最小的100号单元的有利度(-0.00526)为0值(成矿临界值),对全区352个单元的成矿有利度作正规化处理,将处理后的有利度作成等值线图(图3),图中0值区圈定的范围就是成矿有利区。

① 据刘玉书、宋如岗同志资料。

② 韩庆云、张树铭等编制。

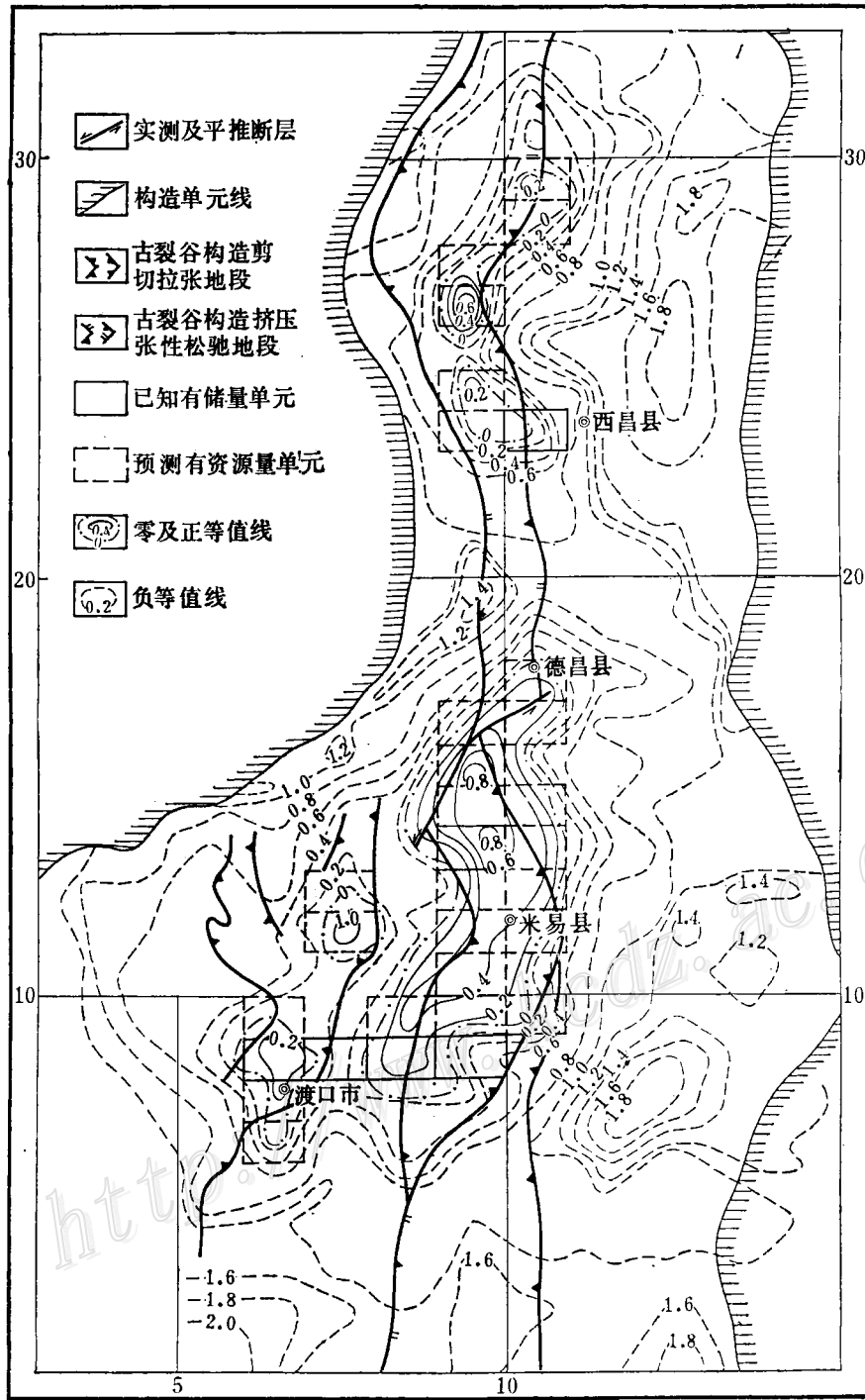


图 3 攀西地区钒钛磁铁矿成矿有利度等值线图

Fig. 3. Map showing isolines of metallogenetic advantageous degree of vanadium-titanium magnetite deposits in Panxi area.

(五) **建立资源量定量评价模型** 资源量定量评价模型很多,方法和思路亦不相同。这里选用蒙特卡罗模拟,利用概率连乘求不同概率情况下的资源量。据资源量统计分布模型修正法<sup>[1]</sup>对模型单元提供的钒钛磁铁矿储量的概率分布和预测区成矿有利度的概率分布进行蒙特卡罗抽样,可建立预测区的钒钛磁铁矿资源量的概率分布模型。据此可估计预测区的平均资源潜力和估计任意概率下的资源量。取概率为0.5的资源量为该区预测的资源总量。预测结果其资源总量比已获储量大3.06倍,比按岩体资料预测结果大1.36倍。证明攀西地区钒钛磁铁矿从地质条件看还大有远景,有一部分含矿岩体尚未发现。

## 六、结 语

矿床模拟法是以矿床产出的地质条件为基础,综合了地质、岩石化学、物探、化探、遥感等多方面资料,基础雄厚。

据图件资料进行的预测,算出了本区可能的资源量,并圈出32个成矿有利单元(其中有7个为已知含矿单元)。从图3可清楚看出,它们主要分布在攀西裂谷带的剪切拉张地段。从北到南可分为杨秀—杨湾远景区、太和远景区、白马—红格远景区、麻陇远景区、攀枝花远景区。其中以白马—红格远景区成矿有利度最高。这些结论与目前地质方面的认识相吻合。但它没有算出每一个单元的具体资源量,更没有落实到具体岩体,按现行规定应定为G级。其中有一部分资源可能因点小、分散、埋藏过深,凭目前的技术经济条件,尚难于发现、探明和提供工业利用。这种资源量可视为本区在目前工业指标下的最终远景而供长远规划参考。

据岩体资料进行的预测,确定出22个岩体,其中除10个岩体已知有矿化作过检查或初查外,其余12个岩体从地质条件分析已有成矿的可能,其分布与据图件资料预测圈定的远景区一致,可供进一步地质工作参考。两种作法的预测结果均证明,从成矿地质条件看攀西地区钒钛磁铁矿资源尚有较大的潜在远景。

在工作方法上矿床模拟法的思路较广,作法亦较多。我们的体会是:预测单元划分上,若以岩体为单元则是已知岩体的评价和资源总量预测,这样对岩体的了解较深入是其优点;以面为单元预测时除包含了已知岩体外,还包含了未发现岩体,是真正的该地区资源总量,所以按面的预测结果比按点的预测结果资源量大是可以理解的。特征分析的六种作法据我们实验对比,其实际效果相差不大,近于殊途同归,工作者可根据自己的实际情况选用。至于资源量预测模型前人多用体积法或蒙特卡罗模拟,这次我们试用了资源量与成矿有利度的多项式回归效果亦较好,这种方法不但可得到各单元的资源量数据,还可估计其置信水平。

本文在拟写过程中得到周信国、胡炎基等高级工程师的支持、帮助。郭建国、何辛同志协助进行大量工作。廖刚琴同志在百忙中帮助清绘插图。在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] 朱裕生 1985 矿产资源评价方法学导论,地质出版社
- [2] Hansen, M. V. and Botbol, J. M., 1978, Workshop on deposit modeling, Journal of the International Association for Mathematical Geology. Vol. 10, No. 5, pp. 519—531.
- [3] Sinding-Larsen, R. and Vokes, F. M., 1978, The use of deposit modeling in the assessment of potential resources as exemplified by caledonian stratabound sulfide deposits. Journal of the International Association for Mathematical Geology. Vol. 10, No. 5, pp. 565—579.
- [4] McCammon, R. B., and Joseph M. Botbol, 1983, Characteristic Analysis—1981; Final Program and a possible discovery. Journal of the International Association for Mathematical Geology. Vol. 15, no. 1, pp. 59—83.



## SOME ORE DEPOSIT MODELLING METHODS COMPARED

Zhu Yusheng

*(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences)*

Guo Luhe, Yang Benjin, Chang Dongmei and Peng Fuyu

*(Panxi Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources  
of Sichuan Province)*

### Abstract

The ore deposit modelling methods have got increasing utilization in China in recent years. They are characterized by relatively broad train of thought and somewhat different approaches. Taking the vanadium-bearing titanomagnetite deposits in Panxi area as an example, the present paper makes a comparison between several approaches of this method, with a view to investigating the following problems:

1. The question of whether we take a point (e. g., rock body) or an area (an unit in the squared network) as a cell in the division of prediction cells, and the difference as well as the relationship between these two kinds of divisions.

The authors hold the opinion that the adoption of a point (a rock body) as a cell actually means the appraisalment and resource prediction of a known point (a rock body), the advantage of which is that the rock body can be relatively thoroughly investigated and the prediction results serve as reference materials in further geologic work, while the adoption of an area (an unit in the squared network) as a cell means including not only known rock bodies but also discovered rock bodies, which is the real prediction of resource totality in the area but fails to calculate the actual resource totality of each unit, let alone that of each rock body. The results of this prediction can be regarded as the final prospect under the present industrial index for long term plan.

2. Concerning characteristic analysis, R. B. McCammon introduced three methods when he gave lectures in China, and the authors have added three other approaches. Comparison shows that these six means approximately have identical practical effects. Geologists can choose them according to actual situation.

3. As regards the quantitative appraisalment model, volumetric estimation and Monte Carlo model have been commonly used by previous workers. In our study, the multinomial regression model for resource totality and metallogenic advantageous degree (correlation degree) has been used tentatively which gives rather satisfactory result. With this method, one can obtain data for resource totality of each cell and can estimate the confidence level as well.