

主观概率法在沿江地区铜矿资源总量 预测评价中的应用

谢英奎 段中会 王文杰

(安徽省地质科学研究所)

一、前言

主观概率法是矿产资源总量预测的一个重要方法,是一种以地质工作的经验和知识代替客观地质数据进行矿产资源定量评价的方法。该方法是哈里斯于1973年首次提出,⁽¹⁾并用来对墨西哥北索诺拉地区的潜藏金属作了评价。早在1959年,我国以程裕淇总工程师为首召集了一批地质专家,对全国铁矿资源总量作出过估计,美国则于1976年对全国石油资源作了估算。

主观概率法是由多名具有丰富实践经验的地质专家对预测地区的矿产资源量作出估计,专家们必须以概率形式提供预测区内可能出现的矿床数、矿床规模及品位等参数,同时指出可能发现矿床的位置(即划分出成矿远景区),并阐明划分远景区的地质依据。运用蒙特卡洛方法和转换系数综合各专家的估计,从而得出预测地区的矿产资源量。

为探索该方法的实用效果,我们选择了安徽长江沿岸地区作为预测区,对该区铜矿资源总量及其空间分布进行了预测。根据方法的要求,聘请了十位地质专家。预测结果表明本区可能仍有一定数量的潜在铜矿床,预测储量的空间分布与区域成矿地质特征是相当吻合的。通过这次预测及对方法的研究,证实该方法对拥有大量的有丰富实践经验的地质专家的我国是适用的。

二、主观概率法实施步骤

(一) 确定预测区的范围及矿种

长江沿岸地区有良好的地层、构造和岩浆岩等成矿地质条件,是省内已知铜矿床的主要分布区,也是我国著名的长江中下游铜铁成矿带的重要组成部分,目前仍被公认为是寻找铜矿床的主要有利地区。为此,我们选择了沿江地区作为铜矿资源总量预测地区(图1)。

(二) 意见征询表格式的制定

根据预测地区内已知铜矿床的分布情况、矿床规模及品位的分布统计特征,结合所选用预测底图的比例尺,设计发现矿床数、矿床规模及品位的意见征询表的格式,以及远景带地质特征表的格式(表1)。

(三) 专家的选择及培训

该方法完全立足于专家的见解,因此对专家的选择及培训至关重要。专家必须具备以下条件:①具有较丰富的理论知识和实践经验;②对预测地区的地质矿产状况有较详细的了解;

③具有将主客观因素有机地结合起来进行客观预测的能力。据上述条件,选择专家时还应适当考虑到不同学派和不同学术观点的专家。

对参加预测的地质专家们应先进行专题培训,使他们掌握与预测有关的数学知识,以便在预测时能正确地以概率形式回答意见征询表中提出的问题。

(四) 专家填写四表一图

专家们在包括预测区的地质底图上,各自任意划分出一系列各种级别的成矿远景带,远景带的位置、数目、形状、大小和级别完全由各专家根据自己对该区地质构造和成矿特征的了解自行决定。根据成矿条件的好坏及发现铜矿床可能性的大小,将远景带划分为I、II、III级。每位专家对自己所划分的

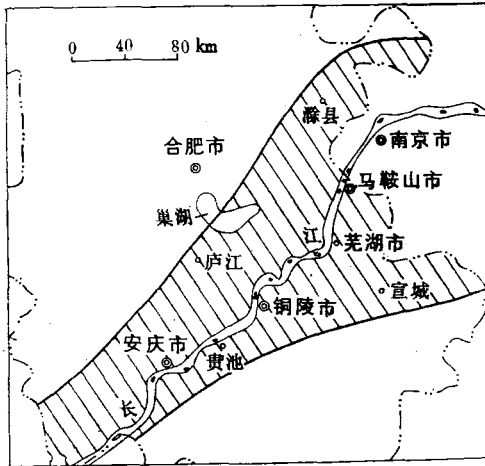


图1 安徽省沿江地区铜矿资源预测区示意图
Fig. 1. Map showing area along the Yangtze River in Anhui Province for copper potential prediction.

的每一个远景带用概率形式填写意见征询表(表1①、②、③),并将划分远景带的地质依据填入表1④。

从表中所填实例可看到,第1号专家所划第2远景带给定发现矿床的概率,概率分布的累积曲线见图2。据此计算出不同矿床数出现的概率为:

$$P(N=0)=0.05 \quad P(N=1)=0.35$$

$$P(N=2)=0.4 \quad P(N=3)=0.2$$

从表1(2)中可看到矿床数为1时矿床规模出现的概率,其累积概率分布曲线见图3。据此计算出不同矿床规模出现的概率为:

$$P(0.5 \times 10^6 \leq t < 10^6) = 0.05 \quad P(10^6 < t < 5 \times 10^6) = 0.25$$

$$P(5 \times 10^6 \leq t < 10 \times 10^6) = 0.5 \quad P(10 \times 10^6 \leq t < 25 \times 10^6) = 0.2$$

从表1(3)中可看到矿床的矿石品位出现的概率,其累积曲线见图4。据此计算出矿床的矿石不同品级出现的概率为:

$$P(0.2 \leq C < 0.6) = 0.1 \quad P(0.6 \leq C < 1.0) = 0.5$$

$$P(1.0 \leq C < 1.5) = 0.35 \quad P(1.5 \leq C < 2.5) = 0.05$$

(五) 划分预测单元

由于各专家所划远景带位置上的差异,在计算时必须建立一个公共预测区参照系统,利用这个系统可把某一专家所划的不同远景带转换到公共单元中,并进一步把各专家的转换结果综合成单元的资源量参数统计分布,该公共单元即是矿产预测的基本单元。为此,我们在1/50万地质底图上,按2cm×2cm方格网将整个预测区统一划分成365个预测单元(图5),每个单元代表的面积为100km²。

表 1 安徽沿江地区铜矿资源总量预测意见征询表

第1号专家

第2远景带

级别 I

发现矿床的概率

①

矿床数	≥1	≥2	≥3	≥4	≥5	≥6	≥7	≥8	≥9	≥10
概 率	95	60	20	0						

矿床规模出现的概率

②

矿床数	矿石量(Mt)	≥0.5	≥1	≥5	≥10	≥25	≥50	≥100	≥200
	1	100	95	70	20	0			
	2	100	95	70	35	0			
	3	100	95	60	30	0			
	⋮								

矿床品位出现的概率

③

品位 (%)	≥0.2	≥0.6	≥1.0	≥1.5	≥2.5	≥5.0
概 率	100	90	40	5	0	

远景带地质特征表

④

远景带	矿床类型	构造条件	岩浆岩	围岩	蚀变	矿床分布情况	矿(化)点分布情况	物探异常	化探异常	其 它

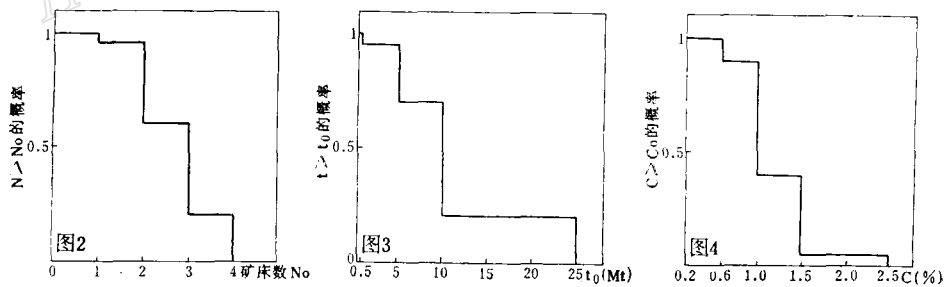


图 2. 矿床数概率分布的累积曲线

Fig. 2. Cumulative probability distribution curve of number of ore deposits.

图 3 矿床数N=1条件下吨级的累积概率分布曲线

Fig. 3. Cumulative probability distribution curve of tonnage when N (number of ore deposits) = 1.

图 4 矿石品级的累积概率分布曲线

Fig. 4. Cumulative probability distribution curve of ore grade.

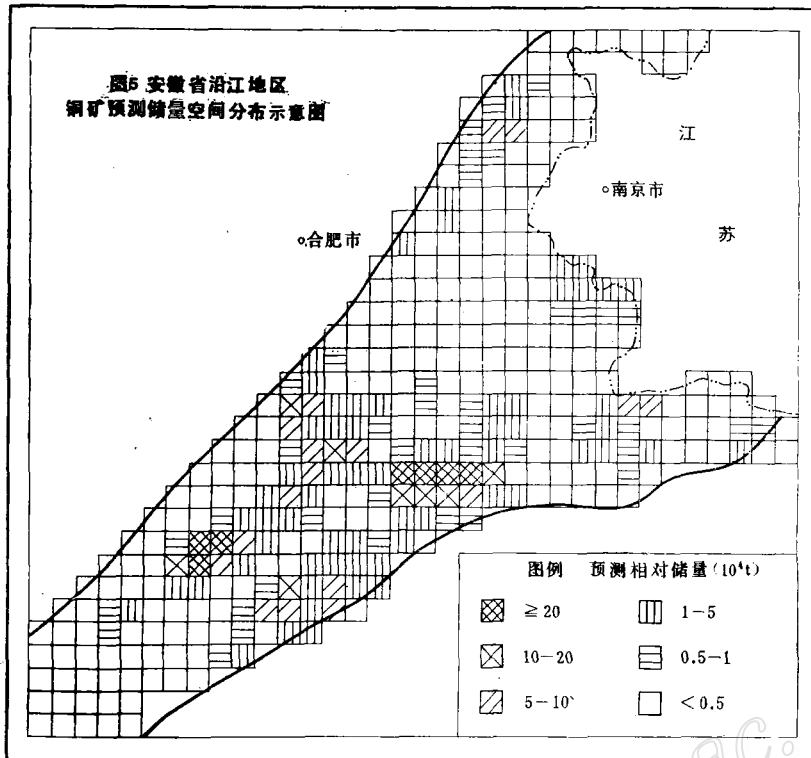


Fig. 5. Schematic map showing spatial distribution of predicted copper ore reserves in areas along the Yangtze River in Anhui Province.

(六) 数据处理

数据处理的目的是将各位专家提供的不同远景带的资源量参数经验分布转换成基本预测单元的参数分布, 据此计算单元内的矿床数、矿床规模和品位, 以及资源量。

为了实现上述的计算, 必须先计算转换系数, 转换系数即系远景带在它所涉及的基本单元内的面积与远景带面积之比, 其假设前提是, 资源量在远景带内是均匀分布的。远景带内的资源量将按照转换系数的大小转入到它所涉及的基本单元中去。

设 i 为专家编号, j 为基本单元号, k 为远景带号, 应计算出转换系数向量 A_{ij}

$$A_{ij} = (a_{ij0}, a_{ij1}, \dots, a_{ijk}, \dots, a_{ijm_{ij}})$$

式中 m_{ij} 为 j 单元内出现的第 i 个专家所划的远景带个数。

$$a_{ij0} = \frac{S_{ij0}}{S_{i0}}, \quad a_{ijk} = \frac{S_{ijk}}{S_{ik}} \quad \begin{cases} i=1, \dots, g \\ j=1, \dots, p \\ k=1, \dots, m_{ij} \end{cases}$$

式中: S_{ij0} 为第 i 个专家第 j 个单元未包含在远景带内的面积; S_{i0} 为第 i 个专家全区未包含在远景带内的面积; S_{ik} 为第 i 个专家所划第 k 个远景带的面积; S_{ijk} 为第 i 个专家所划第 k 个远景带分布在第 j 个单元内的面积。

利用转换系数, 我们就可以把第 i 个专家在远景带中填写的矿产资源量参数抽样值转换成单元内的相应参数值。

三、蒙特卡洛方法及应用

蒙特卡洛 (Monte Carlo)^[1]方法是用统计模拟、随机抽样等手段,求解实际问题数值近似解的一种概率统计方法,故又称统计模拟法。方法的基本思想是:欲获得某实际问题的数值解,先构造一概率模型,使得要求的数值近似解,正好重合于该概率模型的某数字特征,而这个数字特征又可通过统计方法求出其估计值,这个估值即可作为该问题的数值近似解。

矿产资源量的大小受着各种复杂地质条件的控制,一般来说,资源量是服从某一分布的变量。为了求得预测区各预测单元的矿产资源量,我们可以利用专家构造的远景带资源量参数的概率模型,应用随机抽样的方法抽取资源量参数的样本值,通过转换系数将抽样值转换成单元内的相应样本值,从而建立单元内矿床数、矿床规模、矿床品位的概率分布,据此求出它们的期望值,再根据资源量与各参数之间的关系,求得预测单元及整个预测区的资源量。

单元内资源量参数的计算及建立总概率分布的步骤如下:

1. 建立单元*i*发现矿床的总概率分布

对第*j*个专家,单元*j*涉及*m_{ij}*个远景带,利用转换系数,可以将远景带中抽样所获得的矿床数转换成单元内的矿床数。设第*i*个专家所划第*k*个远景带的矿床数分布的蒙特卡洛抽样值为*N_{ik}^{*}*,则该专家在第*j*个单元中相应矿床数值为:

$$N_{ij} = \sum_{k=0}^{m_{ij}} a_{ijk} \cdot N_{ik}^* \quad \left[\begin{array}{l} i = 1, \dots, g \\ j = 1, \dots, p \end{array} \right]$$

对单元*j*涉及的所有远景带或空白区均进行*m*次抽样,经转换可得*m*个矿床数的值。对所有(*g*个)专家,重复上述操作,则可得到*m* × *g*个矿床数的值,将它们作成统计分布图,便得到单元*j*中矿床数的统计分布。根据这些数值可求得其平均值 \bar{N}_j ,则其为单元*j*的期望矿床数。

2. 建立单元*j*矿床规模的总概率分布

利用转换向量*A_{ij}*,将远景带及空白区中抽样所得到的矿床规模转换成单元中的矿床规模,设第*i*个专家所划第*k*个远景带中矿床规模抽样值为*t_{ik}^{*}*,则该专家在第*j*个单元中的矿床规模值为:

$$t_{ij} = \frac{1}{N_{ij}} \sum_{k=0}^{m_{ij}} a_{ijk} \cdot N_{ik}^* \cdot t_{ik}^*$$

把远景带中抽样得到的*m'*个矿床规模值转进单元*j*中,可得到*m'*个矿床规模值,对所有专家重复上述操作,则可得到(*m'₁* + *m'₂* + ... + *m'_g*)个矿床规模的值,将它们作成统计分布图,便可得到单元*j*中矿床规模的统计分布图。据此求得的平均值 \bar{t}_j 则为单元*j*的期望矿床规模。

3. 建立单元*j*矿床的矿石品位的总概率分布

利用*A_{ij}*,将远景带及空白区中抽样所得到的矿床的矿石品位转换成单元中的矿床的矿石品位。设第*i*个专家所划第*k*个远景带中矿床的矿石品位抽样值为*C_{ik}^{*}*,则该专家在第*j*个单元中的矿床品位值为:

$$C_{ij} = \frac{1}{N_{ij} \cdot t_{ij}} \sum_{k=0}^{m_{ij}} a_{ijk} \cdot N_{ik}^* \cdot t_{ik}^* \cdot C_{ik}^*$$

经转换亦可获得 m 个品位值, g 个专家则可得到 $m \times g$ 个品位值, 将它们作成统计分布图, 则可得到单元 j 中矿床的矿石品位的统计分布。据此所求得平均值 \bar{C}_j 即为单元 j 的矿床的期望矿石品位。

4. 单元中矿产资源量的估计

一个单元各参数的分布确定以后, 我们便可以建立单元矿产资源的分布。为了使预测结果更明确, 可以用以上求得各参数的平均值来求单元矿产资源量(金属量)的期望值。

$$\bar{M}_j = \bar{N}_j \cdot \bar{t}_j \cdot \bar{C}_j$$

全区矿产资源总量, 则可用各单元累加而求得: $M = \sum_{i=1}^P \bar{M}_j$, P 为预测单元总数。

四、预测结果及其分析

根据十位专家提供的资源量参数值, 应用蒙特卡洛抽样方法, 利用电子计算机进行了计算。

为了了解区内潜藏金属的空间分布, 对每一个预测基本单元分别计算了矿床数、矿床规模及品位的平均值。预测储量大于 5 万吨的单元共有 32 个, 其中大于 20 万吨的最富有单元仅有

表 2 安徽沿江地区最富有单元(大于 20 万吨)预测储量及参数分布一览表

单元号	矿床数				矿床规模(矿石量 Mt)				矿床品位				预测储量 (10 ⁴ t)
	期望值	分布方差	置信度	置信区间	期望值	分布方差	置信度	置信区间	期望值	分布方差	置信度	置信区间	
223	2.19	0.0451	0.49	(2.0, 2.3)	19.70	122.6421	0.42	(12.0, 22.0)	1.10	0.0172	0.91	(0.8, 1.2)	47.26
224	2.33	0.0642	0.59	(2.1, 2.5)	15.84	75.0286	0.52	(8.0, 20.0)	1.05	0.0173	0.90	(0.8, 1.2)	38.76
274	1.98	0.0479	0.54	(1.8, 2.1)	12.86	21.5295	0.60	(8.0, 14.0)	1.22	0.0266	0.71	(0.8, 1.2)	31.06
288	1.48	0.0224	0.55	(1.3, 1.5)	17.07	76.6989	0.32	(12.0, 22.0)	1.17	0.0184	0.88	(0.8, 1.2)	29.55
222	1.52	0.0405	0.51	(1.3, 1.6)	15.52	65.4486	0.47	(10.0, 18.0)	1.11	0.0154	0.93	(0.8, 1.2)	26.42
225	1.58	0.0208	0.65	(1.4, 1.7)	14.51	53.7738	0.61	(6.0, 20.0)	1.12	0.023	0.85	(0.8, 1.2)	25.68
273	1.27	0.0233	0.52	(1.1, 1.3)	14.70	59.4300	0.45	(8.0, 14.0)	1.20	0.0204	0.74	(1.0, 1.4)	22.48

7 个, 10—20 万吨的富有单元 8 个, 余为 5—10 万吨的次富有单元。32 个富有单元仅占总预测面积的 9%, 而预测储量累计却占全区预测总量的 66%, 足见预测储量的分布是比较集中的。预测储量为 1—5 万吨的单元有 64 个, 0.5—1 万吨的单元有 41 个, 其余均为小于 0.5 万吨的空白单元(图 5)。

仅仅了解资源量参数的平均值还远远不够, 因平均值不够表示变化范围及可靠程度, 还必须仔细分析每个单元出现矿床数、矿床吨位数和品位数的统计分布特征, 以便确信所预测的资源总量的可靠性。图 6—8 是七个最富有单元矿床数、矿床规模吨级数和矿床的矿石品级

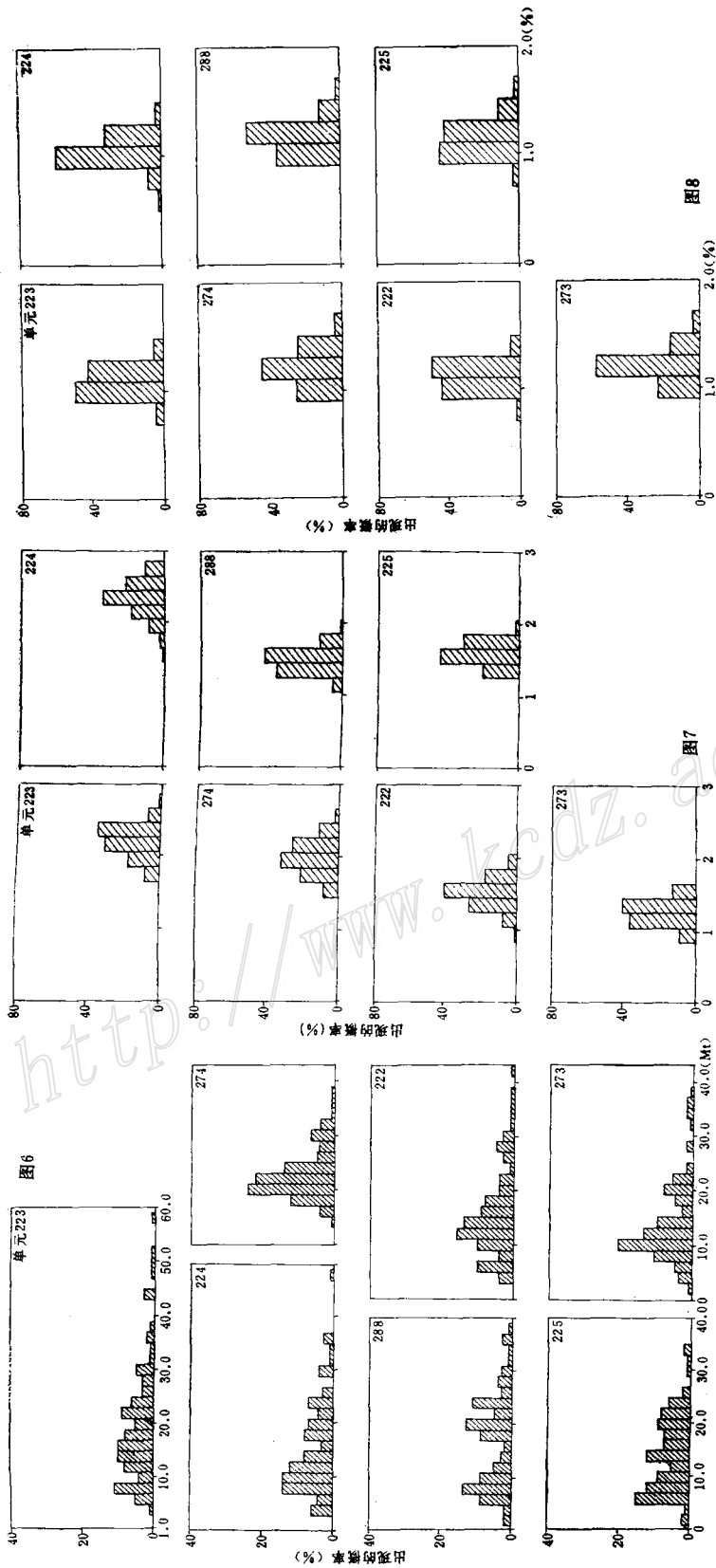


图 6 最富有单元内矿床规模的概率分布
 Fig. 6. Histogram showing probability distribution of ore sizes in the richest unit.

图 7 最富有单元内矿床数的概率分布
 Fig. 7. Histogram showing probability distribution of number of ore deposits in the richest unit.

图 8 最富有单元内矿石品级的概率分布
 Fig. 8. Histogram showing probability distribution of ore grade in the richest unit.

数的概率分布图。单元内资源量参数分布方差、置信度和置信区间见表2。

在32个富有单元内矿床数的概率分布中,出现小于0.5个矿床的概率较高的仅有193、247、26、275号四个单元,这些单元内的平均预测储量均在5—10万吨之间,它们出现小于0.5个矿床的可能性分别是50%、29%、21%、15%,可见若在这些单元中勘探铜矿床显然带有较大的风险。在其余28个富有单元中勘探铜矿床的风险将较小。

各单元内的预测储量与本单元的平均矿床数之间呈正相关关系,经对32个富有单元的计算后建立的回归方程为: $Y = -5.8874 + 20.2955X$

式中: Y 为单元内预测储量;

X 为单元内平均矿床数

相关系数 $R = 0.94 \gg R_{0.001}(30) = 0.55$

$F = 232.57 \gg F_{0.01}(30) = 7.56$

经 R 检验和 F 检验^[2],证明所建立的回归方程是高度显著的,也就是说,在富有单元内预测储量与平均矿床数之间呈相当密切的线性相关关系,单元内的预测储量可以根据平均矿床数利用回归方程求得。

根据成矿地质特征和预测储量的空间分布情况,划分出预测储量相对富集的铜陵、安庆、庐枞、贵池、宣城、歙县、马鞍山等七个远景区以及相对分散的广德庙西、巢县苏家湾、无为、怀宁五居山及天长长兴集、和县等六个次一级的远景区。当然,不同地区的远景是相对的,不是绝对的,因为预测的结果在一定程度上受个人经验和开发程度或地质工作程度的限制。

在这些远景区中,铜陵远景区探明矿床虽多,但勘探深度一般多为600m以上,深部勘探特别是深部岩体的工作做得不多,且以往侧重在接触带及其附近寻找矽卡岩型矿床,对斑岩铜矿注意不够,冬瓜山深部斑岩型铜矿的发现,使其总储量增长了一倍多,这充分证明老矿区的深部确实仍具有较大的远景;安庆远景区内月山矿区600m以下深处龙门山矿床的新发现,开阔了根据成矿理论寻找隐伏矿床的前景;庐枞远景区铜矿化极为普遍,铜矿点星罗棋布,除在沙溪斑岩型铜矿外围及深部仍有一定远景外,其余地区亦有较大的希望;贵池远景区有良好的成矿地质条件,该区地质工作程度比较低,在加强普查的基础上,有希望在某些地段找到新的隐伏矿床;歙县远景区以往施工多集中在岩体上,面上研究不足,特别是中南部隐伏、近东西向构造-岩浆活动地段值得注意,是寻找新矿床的有利地段。

由于预测区内有较长的普查勘探历史,地质研究和成矿规律研究较深透,加之参加预测的地质专家素质较好,且预测是严格按照标准步骤进行的,因此,预测结果的可靠程度较高。但需指出的是,预测结果只反映可能存在的东西,而不是可能供给的东西。预测结果的有效性目前不能很快用其它方法来验证,只能通过以后的找矿勘探来证实。另外,本次预测时规定铜矿床的矿石边界品位为0.2%,略低于现行工业要求,预测深度定为1500米,也比现行的勘探深度稍大。因此,预测矿床即使存在,也只有一部分预测储量在现阶段能转为可能供给的资源,而随着经济和技术条件的改进,转为可能供给的资源将逐步增加。

应用主观概率法进行如此大面积的矿产资源总量预测,是在国内尚无先例,国外亦无成套经验(仅有个别例子)的条件下边摸索边进行的。通过对该方法进行研究和实践,体会到这种方法的确是矿产资源总量预测的一个重要方法,它能充分发挥人的因素,是其它客观地

质方法所不及的。同时它还具有简便易行、快速、省费用、较准确等优点，它适用于各种不同的矿种和不同工作程度的地区，只要较严格地按照标准步骤进行，便能保证其预测结果有较大的可靠性。

以上是我们对主观概率法进行研究和实践后的一些认识，不妥之处，欢迎批评指正。

参 考 文 献

- (1) 中国科学院计算中心概率统计组编著 1979 概率统计计算 科学出版社
- (2) 南京大学数学系计算数学专业编 1979 概率统计基础和概率统计方法 科学出版社
- (3) Harris. D. P., 1973, A Subjective probability appraisal of metal endowment of Northern Sonora, Mexico. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*. Vol. 68, No. 2.

METHOD OF SUBJECTIVE PROBABILITIES FOR TOTAL COPPER RESOURCES PROGNOSIS AND ASSESSMENT ALONG YANGTZE VALLEY IN ANHUI PROVINCE

Xie Yingkui, Duan Zhonghui and Wang Wenjie

(Anhui Institute of Geology)

Abstract

Method of subjective probabilities is an important means for total resources prognosis with which the quantitative assessment of mineral resources can be made on the basis of geologists' experience and knowledge instead of on the objective geological data. The first step is to single out prospective metallogenetic districts of different classes in a predicted area by some experienced geological experts with a probabilistic approach to present the data in the form of such parameters as number, size and ore grade of deposits which might occur in the area. And then, one can synthesize the experts' appraisals by means of Monte Carlo's method and the coefficient of transformation to obtain the data on total mineral resources and their distribution in the area.

The Yangtze-valley region in Anhui Province was selected as an area for ore-predicting. Ten experienced geological experts were invited to prognosticate the areal total copper resources. According to the spatial distribution of prognostic reserves, seven prospective (such as Tongling) and six secondary prospective (such as Miaoxi) metallogenetic districts have been recognized, with their distribution approximately in agreement with that of regional geological metallogenetic features and geophysical and geochemical anomalies. The results of prognosis can be taken as a basis for prospective planning and work disposing.