第 24 卷 第 5 期　　地質与勘探　　Vol. 24, No. 5
1988 年 5 月　　GEOLOGY AND PROSPECTING　　May, 1988

矿床统计预测中的条件概率法

郭光裕　林卓虹　朱学文　丛桂新

（冶金工业部天津地质研究院）

由于矿床与控矿地质标志之间存在条件概率关系，故可把矿床预测视为一项对预测区的成矿条件概率分析工作。本文根据条件概率定义和概率乘法定理，建立了单元含矿性条件概率模型。该模型具有筛选变量和“预测”双重功能。

关键词：条件概率法；铁矿；矿床预测

工作方法

在矿床统计预测中，笔者多次应用条件概率分析。实践表明，该方法采用的数学模型具有筛选变量和“预测”的双重功能，与回归分析、判别分析、群分析等常用方法的预测精度和效果相同。在没有电子计算机时，可全用手算，特别适用于野外地质统计工作。

问题的提出

一定的矿产资源赋存在一定的地质环境中，因此，一定类型的矿床也必有一组控矿的地质标志。由于含矿和不含矿地区的控矿地质标志状态存在差异，故常通过控矿地质条件的研究来估计地质体的含矿性。但是，经长期、多次的地质作用，致使矿床和控矿地质标志的出现呈不确定性，两者之间存在的条件概率关系为：

$$P(A|B)=\frac{P(AB)}{P(B)} \qquad (1)$$

式中，A——出现矿床；B——出现控矿地质标志状态的某种组合；$P(A|B)$——在事件B出现的条件下，事件A出现的概率；$P(B)$——事件B出现的概率。

这样，可把矿床预测视为对预测区进行条件概率分析的一项具体工作。

数学模型

在矿床统计预测中，如将预测结果简化为含矿和不含矿两部分，把控矿地质标志数量限制在有限个，则根据贝叶斯公式，在一定控矿地质标志状态组合出现条件下的预测对象含矿概率为：

$$P(A|B_1B_2\cdots B_m)=\frac{P(B_1B_2\cdots B_m|A)P(A)}{P(B_1B_2\cdots B_m|A)P(A)+P(B_1B_2\cdots B_m|\overline{A})P(\overline{A})} \qquad (2)$$

式中，A—含矿；$\overline{A}$—不含矿；$B_1B_2\cdots B_m$—m个控矿地点标志状态同时出现。

根据条件概率定义概率乘法定理有：

$$P(B_1B_2\cdots B_m|A)=P(B_1|A)P(B_2|B_1A)\cdots P(B_m|B_1B_2\cdots B_{m-1}A) \qquad (3)$$

$$P(B_1B_2\cdots B_m|\overline{A})=P(B_1|\overline{A})P(B_2|B_1\overline{A})\cdots P(B_m|B_1B_2\cdots B_{m-1}\overline{A}) \qquad (4)$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$P(A|B_1\cdots B_m)=$$

$$=\frac{P(B_1|(A)\cdots P(B_m|B_1\cdots B_{m-1}A)P(A)}{P(B_1|A)\cdots P(B_m|B_1\cdots B_{m-1}A)P(A)+P(B_1|\overline{A})\cdots P(B_m|B_1\cdots B_{m-1}\overline{A})P(\overline{A})} \quad (5)$$

（5）式即为预测对象含矿性的条件概率模型。

应用条件和计算步骤

采用条件概率模型进行统计预测时，需满足下列条件：

1．根据（5）式要求，对控矿地质标志的存在和观察必须有一自然顺序。即当一个低序次标志B_{i-1}未观察时，标志B_i尚不能观察。

2．预知测区的含矿和不含矿概率。事实上，矿床的生成和分布是多种地质作用的结果，其作用的大小、性质、方向以及参与程度和组合特点等都不相同。由于在判断预测对象的含矿性时各控矿地质标志所起的作用不等，故在指示预测对象含矿性的地位也存在差异。预测时，要依据控矿地质标志的重要程度从大到小顺序排队。

预测区的含矿概率是未知的，对其仅能估计，最佳手段是经验估计法。即按德尔菲估计法的思路，集中测区有经验的地质专家们的见解进行综合估计。

采用条件概率法进行矿床预测时，当按下列计算步骤：

1．对预测区开展控矿地质条件研究，建立矿床生成地质概念模型。

2．划分预测单位。确定一定数量的有代表性的控制单位，其中包括已知的含矿和不含矿单位。

3．估计预测区的含矿概率和不含矿概率。

4．根据矿床生成地质概念模型，选择地质标志并赋值。建立控制单位矿化特征及地质标志原始数据表（表1）。

5．按地质标志的不同状态，进行原始数据处理，依数量化理论二态变量赋值。建立控制单位矿化特征及地质标志状态数据表（表2）。

控制单元原始数据　　表 1

顺序	预测单位	矿床特征	地质标志			
			B_1	B_2	…	B_m
1	108	A	b_{11}	b_{12}	…	b_{1m}
2	173	A	b_{21}	b_{22}	…	b_{2m}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	…	⋮
$n-1$	1520	$\overline{A}$	b_{n-11}	b_{n-12}	…	b_{n-m}
n	1537	$\overline{A}$	b_{n1}	b_{n2}	…	b_{nm}

A—含矿；$\overline{A}$—不含矿（下同）。

控制单位矿化特征和地质标志状态数据　　表 2

顺序	预测单位	矿化特征	地质标志状态							
			B_1			B_2		…	B_m	
			$B_1^{(1)}$	$B_1^{(2)}$	$B_1^{(3)}$	$B_2^{(1)}$	$B_2^{(2)}$	…	$B_m^{(1)}$	$B_m^{(2)}$
1	108	A	0	1	0	0	1	…	0	1
2	173	A	0	0	1	0	1	…	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	…	⋮	⋮
$n-1$	1520	$\overline{A}$	1	0	0	1	0	…	1	0
n	1537	$\overline{A}$	1	0	0	0	1	…	1	0

6．筛选控矿地质标志，按各标志指示预测单位含矿性的重要程度顺序排队。

尤其在大比例尺预测中，要求每个控矿地质标志对矿与非矿具有较高的可辨性。表现在条件概率上，这类标志应含有性质截然不同的两种状态。即当部分状态出现，预测对象具有相当大的含矿概率；当另一部分状态出现，则有相当小的含矿概率。

因此，筛选控矿地质标志和评判标志的相对重要性时，必须满足下列条件方可选入控矿地质标志：

（1）在各地质标志状态中，至少有一种状态并当其出现时，预测对象具有很高的

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

条件概率（在45%以上）。这种状态对矿具有较大的指示作用。

（2）在地质标志各状态单独出现的含矿概率中，较高数值与较低数值的差值大到一定限度，其概率比值＞3。

筛选方法举例：

经计算，某地区地质标志B_i、B_j、B_e、B_k的各状态单独出现条件下含矿概率为：

（1）标志B_i

1）$P=(A|B_i^{(1)})=100\%$；2）$P(A|B_i^{(2)})=45.4\%$；3）$P(A|B_i^{(3)})=5.1\%$

（2）标志B_j

1）$P=(A|B_j^{(1)})=37.1\%$；2）$P(A|B_j^{(2)})=31.5\%$；3）$P(A|B_j^{(3)})=10.2\%$

（3）标志B_e

1）$P(A|B_e^{(1)})=100\%$；2）$P(A|B_e^{(2)})=3.2\%$

（4）标志B_k

1）$P(A|B_k^{(1)})=55.3\%$；2）$P(A|B_k^{(2)})=7.1\%$

其中，标高状态$B_i^{(1)}$、$B_j^{(2)}$、$B_e^{(3)}$、$B_k^{(4)}$单独出现条件下的含矿概率都在50%以上。$P(A|B_i^{(1)})/P(A|B_i^{(3)})$为19.6，$P(A|B_i^{(2)})/P(A|B_i^{(3)})$为8.9，$P(A|B_e^{(1)})/P(A|B_e^{(2)})$为31.3，$P(A|B_k^{(1)})/P(A|B_k^{(2)})$为7.8。表明标志$B_i$、$B_e$、$B_k$对矿与非矿具有较高的识辨能力，因此确定它们为控矿地质标志。标志B_j各状态单独出现条件下的含矿概率都在38%以下，各概率值之间的差别较小，表明标志B_j对矿的指示作用不大，可予剔除。

再比较控矿地质标志B_i、B_e、B_k所属各状态单独出现条件下的含矿概率及同一标志各状态条件概率比值，按条件概率及其比值对标志由大到小排队：

1）标志B_e；2）标志B_i；3）标志B_k

7．归纳简化标志状态。把标志状态按条件概率大小分为指示含矿和指示不含矿两类。前者赋值为1，后者赋值为0。建立控制单位矿化特征及控矿地质标志数据表（表3）。

控制单元矿化特征及控矿地质标志数据 表 3

顺序	预测单元	矿化特征	控矿地质标志			
			B_1	B_2	…	B_k
1	108	A	1	0	…	1
2	173	A	1	1	…	1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	…	⋮
n-1	1520	$\bar{A}$	0	0	…	0
n	1537	$\bar{A}$	0	0	…	1

8．分析表3，可知k个控矿地质标志可有2^k个标志状态组合。应用（5）式计算每个标志状态组合出现时的条件概率值。根据预测区矿化特征确定矿与非矿的条件概率区分值。再按区分值把标志状态组合分为两部分。条件概率大于区分值的指示含矿；小于区分值的指示不含矿。

9．对该方法的精度和效果进行检验。常是对控制单位与其它已知单位进行含矿性评判，用预测含矿单位含矿概率理论值、丢矿风险系数、判错率等指标来评价预测精度和质量。

10．根据上述标志状态组合分类，对预测单位的含矿性进行评判。

11．最后，对预测结果进行地质分析和检查，按一定的决策理论确定成矿远景区。

实　　例

预测区B内发育层状铁矿床。出露地层为H_3硅质板岩岩段；H_4泥质板岩岩段；H_5含铁白云岩岩段；H_6含钾板岩岩段。区内地层构成轴向近东西的向斜构造，并在北、南边缘各发育一条东西向压性构造带。H_5为含矿层，磁异常是含矿层的指示标志。要求在B区范围（46.72km²）内，开展1/万的铁矿床统计预测。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用条件概率法，对B区进行铁矿床统计预测时，应当通过下列步骤：

1．通过控矿地质条件研究，认为B区铁矿床属沉积变质—热液改造型。

2．根据矿化特征，提出几种单元划分方案。经择优对比，把测区划分为0.2×0.2 km^2的单元1168个。从中提取100个控制单元，其中已知含矿单元87个，已知不含矿单元13个。

3．走访在B区三位专家，按德尔菲法估计该区含矿概率为25%，不含矿概率为75%。

4．选取单元内磁异常强度面积加权平均值、地层组合、单元中心点距向斜轴距离、距南部东西向压性构造带距离、距北部东西向压性构造带距离等地质标志，测定取其值，建立控矿单元原始数据表（表4）。

控制单元原始数据 表 4

顺序	预测单元	矿化强度	地质标志								
			Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ				
							H_5	H_6	H_4	H_3	其他
1	108	1598	1341	690	1040	70	0.02	0	0.68	0.30	0
2	173	1042	3850	470	1000	20	0.95	0	0.05	0	0
3	177	2693	3047	510	940	0	0.74	0	0.26	0	0
4	178	808	3220	540	960	0	0.73	0	0.27	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
97	570	0	−593	430	70	910	0.35	0	0	0	0.65
98	573	0	−60	520	0	990	0	0	0	0	1
99	761	0	1480	30	580	1250	0	0	0	0	1
100	762	0	1025	40	600	1250	0	0	0	0	1

Ⅰ--单元内磁异常强度面积加权平均值(γ)；Ⅱ—单元中心点距向斜轴距离(m)；Ⅲ—单元中心点距南部东西向压性构造带距离(m)；Ⅳ—单元中心点距北部东西向压性构造带距离(m)；Ⅴ—单元内地层出露面积（%）。

5．将地质标志按状态进行分类，根据数量化理论，用二态变量对其赋值。即当某状态在单元中出现时，赋值为1；否则赋值为0。建立控制单元矿化特征及地质标志状态数据表（表5）。

控制单元矿化特征及地质标志状态数据 表 5

顺序			1	2	3	4	…	97	98	99	100
矿化特征			A	A	A	A	…	$\bar{A}$	$\bar{A}$	$\bar{A}$	$\bar{A}$
地质标志	Ⅰ	<1500	1	0	0	0	…	1	1	1	1
		≥1500	0	1	1	1	…	0	0	0	0
	Ⅱ	0～250	0	0	0	0	…	0	0	1	1
		250～400	0	0	0	0	…	0	0	0	0
		>400	1	1	1	1	…	1	1	0	0
	Ⅲ	400～1500	1	1	1	1	…	0	0	1	1
		其他	0	0	0	0	…	1	1	0	0
	Ⅳ	0～150	1	1	1	1	…	0	0	0	0
		150～900	0	0	0	0	…	0	0	0	0
		>900	0	0	0	0	…	1	1	1	1
	Ⅴ	H_5	0	0	0	0	…	0	0	0	0
		H_5+H_6	0	0	0	0	…	0	0	0	0
		其他	1	1	1	1	…	1	1	1	1

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、同Ⅴ表4。

6．依（5）式计算每个标志状态单独出现条件下的含矿概率，得：

（1）单元内磁异常强度面积加权平均值：

1) $P(A|\geqslant 1500r)=100\%$；

2) $P(A|<1500r)=5.43\%$

（2）单元中心点距向斜轴距离：

1) $P(A|0\sim 250m)=23.01\%$；

2) $P(A|250\sim 400m)=21.5\%$；

3) $P(A|>400m)=32.5\%$

（3）单元中心点距南部东西向压性构

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

造带距离：

1）$P(A|400\sim1500m)=55.13\%$；2）$P(A|其他)=6.08\%$

（4）单元中心点距北部东西向压性构造带距离：

1）$P(A|0\sim150m)=35.4\%$；

2）$P(A|150\sim900m)=29.74\%$；

3）$P(A|>900m)=9.06\%$

（5）单元内地层组合：

1）$P(A|H_5)=45.11\%$；

2）$P(A|H_5+H_6)=100\%$；

3）$P(A|其他)=7.15\%$

7．结合B区矿化特征，对上述条件概率综合分析，若满足下列条件时，规定为控矿地质标志：

（1）标志中至少有一种状态单独出现，其含矿概率应>45%。

（2）标志中两类状态（条件概率大、小两类）单独出现条件下，含矿概率的比值>4。

依此，筛选出单元内磁异常强度面积加权平均值、单元中心点距南部东西向压性构造带距离、单元内地层组合作为控矿地质标志。其他两类地质标志被剔除。

依控矿地质标志的相对重要程度对其排队、归并、赋值于下：

（1）单元内磁异常强度面积加权平均值：

1）≥1500γ，指示单元含矿，赋值为1。

2）<1500γ，指示单元不含矿，赋值为0。

（2）单元内地层组合：

1）H_5或H_5+H_6，指示单元含矿，赋值为1。

2）其他组合，指示单元不含矿，赋值为0。

（3）单元中心点距南部东西向压性构造带距离：

1）400～1500m，指示单元含矿，赋值为1。

2）其他距离，指示单元不含矿，赋值为0。

根据上列排队顺序和赋值，建立控制单元矿化特征及控矿地质标志状态组合征特（表6）。

控制单元矿化特征及控矿地质标志状态组合特征　　表6

序号		1	2	3	4	…	97	98	99	100
矿化特征		A	A	A	A	…	$\bar{A}$	$\bar{A}$	$\bar{A}$	$\bar{A}$
控矿地质标志	(1)	0	1	1	1	…	0	0	0	0
	(2)	1	1	1	1	…	0	0	1	1
	(3)	0	0	0	0	…	0	0	0	0

8．从表6可知，控矿地质标志状态共有8种组合，即：

（1）000；（2）100；（3）010；（4）001；（5）110；（6）101；（7）011；（8）111

以表6为依据，按（5）式计算各标志状态组合出现条件下的含矿率，得：

（1）$P(A|000)=0$；

（2）$P(A|100)=100\%$；

（3）$P(A|010)=1.81\%$；

（4）$P(A|001)=0.01\%$；

（5）$P(A|110)=100\%$；

（6）$P(A|101)=100\%$；

（7）$P(A|011)=0.11\%$；

（8）$P(A|111)=100\%$

9．以具有条件概率100%为预测含矿单元，否则为不含矿单元定作含矿性判别准则。这样，含矿单元具有下列控矿地质标志状态组合为：（1）111；（2）110；（3）101；（4）011；（5）100。表征不含矿单元的控矿地质标志组合为：（1）000；（2）001；（3）010。

10．依上述准则，对本区100个控制单元

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

进行评判，其中13个已知不含矿单元全部预测为不含矿单元；87个已知含矿单元中，预测出80个为含矿单元，7个为不含矿单元。预测含矿单元的含矿概率理论值为100%，丢矿风险系数为0.0805，判错率为7%。这表明用条件概率分析法评判单元含矿性是具有较高的预测精度。

11．根据单元控矿地质标志状态组合特征，对测区1168个待测单元进行了成矿预测，其中有264个预测为含矿单元。除1个单元为热液型磁铁矿不具工业意义外，其余263个预测含矿单元和87个已知含矿单元一并构成成矿远景区。该区包括了全部铁矿露头，沿地层走向近东西连一整体，呈狭长带状分布于测区中部。在远景区已施工的76个钻孔中，有72个钻孔见矿，这足可验证此法在矿床预测中的有效性。

结　　语

条件概率法是一种以定量类比为基础的预测方法。预测效果和精度主要取决于控矿地质标志、标志状态及其组合的选择。从矿床成因研究入手，作控矿地质条件分析，建立矿床形成地质概念模型是应用该法进行矿床预测的关键。预测对象含矿性评价依据的各指标是对控制单位深入研究取得的，可见预测结果的准确程度应取决于所选取的控制单位有否代表性。因此，对测区开展地质综合研究，认真考察控制单位的代表性，也是采用该法进行矿床预测的重要内容。

主要参考文献

［1］王梓坤：《概率论基础及其应用》，北京，科学出版社，1976年.

［2］赵鹏大等：《矿床统计预测》，北京，地质出版社，1983年.

Condition Probability Method for the Statistical Prognostication of Ore Deposits

Guo Guangyu　Lin Zhuohong　Zhu Xuewen　Cong Guixin

A condition probability relationship is existed between a deposit and its controlling guides and for this reason the ore deposit forcasting may be regarded as an statistical analysis of metallogenetic conditions of the prognostic province. Based upon the definition of condition probability and the multiplication theorem of the probability theory, a model for ore potentiality of a mining district is established, which has a double function: variable sieving and metallogenetic prognosis.

YKS-30型空气反循环连续取样砂矿钻机及工艺通过初步技术鉴定

在冶金部地质局主持下，1988年2月5～6日，在第一冶金地质勘探公司探矿技术研究所，对YKS-30型空气反循环连续取样砂矿钻机及工艺进行了初步技术鉴定。

参加这次会议的有来自15个单位的32名代表。中国地质大学(北京)杨惠民教授和中国有色金属工业总公司矿产地质研究院张智远高级工程师担任技术报告的主审，会议先由冶金部地质局探矿处处长吴棣华同志和装备处副处长刘振邦同志介绍冶金地质钻探工作现阶段的有关情况、发展设想以及开展该钻机研制技项目的背景。之后，探矿术研究所作钻进新工艺研究报告，中南冶金机械厂的代表作试制报告，以及有关文献技术介绍。在此基础上，代表们观看了反映野外钻进试验情况的录像和钻机的实钻表演，并进行了认真的讨论。代表们认为，该机采用空气反循环连续取样钻进工艺是成功的。钻机机体结构、双壁钻杆的组成、空气反循环系统的设计能满足钻进工艺的需要。这台钻机的研制成功，为我国自行设计和制造空气反循环连续取样钻机及时地提供了经验；是改造我国旧砂矿钻探技术方法的一次突破性尝试。代表们一致通过对该钻机和其新工艺的初步技术鉴定。同时，提出了进一步完善钻进工艺、取样规范以及在典型矿区扩大生产试验的建议，以利于这项新技术的早日推广应用。

〔李志民供稿〕

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net