# 勘查指数及其在黑龙江多宝山地区斑岩铜矿勘查中的应用

王品清

(中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

提要:详细地介绍了一个综合运用遥感、地质、物探、化探等地学信息进行区域性矿产资源勘查与预测的数学模型。模型中在对各类地学信息进行有益的变换、提取的基础上,借助概率论中广义二项分布函数对其进行综合处理与分析。该模型的输出结果不仅为区域性矿产预测提供定量分析数据,而且还是一种寻找与已知矿床具有类似地质条件和地球物理及地球化学环境的有效方法。

关 键 词:勘查指数;斑岩铜矿;勘查;黑龙江多宝山

中图分类号:P624 文献标识码:A 文章编号:1000-3967(2001)04-0427-07

在系统地收集、整理、分析和总结前人研究成果的基础上,根据区内已知斑岩型铜金矿床成矿地质特征,充分利用现有的各类地学信息,尤其是陆地卫星TM图像资料提供的区域构造信息,对研究区内斑岩型铜矿的分布特征进行了综合分析和预测。在方法技术方面,以陆地卫星TM图像数据为主,结合区内的地质、矿产及物化探等地学数据进行综合预测。注重地球物理及地球化学资料中所含信息的二次开发和利用,特别是在地学信息的变量提取、变换和综合分析与处理方法方面进行了探索。勘查指数概念的提出及其相应数学模型的建立,为综合各类地学信息进行区域矿产资源评价及找矿靶区预测提供了一种有效的方法。

## 1 区域地质概况

地层:研究区位于黑龙江东北部。区内出露地层主要有前奥陶系、古生界、中生界、新生界,其中以古生界为主,从奥陶系到二叠系均有出露。下奥陶统至下泥盆统属海相沉积,为一套海底火山岩和碎屑岩建造组合;中泥盆统到下石炭统为海陆交互相沉积,主要岩性为海相陆源碎屑岩和陆缘火山岩及凝灰岩;中石炭统至二叠系为陆相沉积,岩性为陆缘火山岩和湖相沉积建造;中生界、新生界以陆相沉积为主。

构造:就其大地构造位置来讲,研究区位于天山—兴蒙地槽系的兴蒙褶皱带与吉黑褶皱带接触部位的兴蒙褶皱带一侧。由于主要经历了加里东期和华力西期两个构造阶段,因此

收稿日期:2000-12-20;修订日期:2001-06-18

作者简介:王品清(1952-),男(汉族),吉林通化人,教授级高级工程师,从事遥感地质工作。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

在本区内可以划分出3个比较明显的构造层:即前古生界构造层、古生界构造层和中生界构造层。前古生界构造层属基底构造,由绿片岩、混合岩和片麻岩组成,大部分被古生界和中生界所覆盖。古生界构造层包括奥陶系、志留系、泥盆系、下石炭统等海相地层和中上石炭统火山岩、二叠系火山岩和碎屑岩等陆相地层。此构造层为多宝山斑岩型铜、金多金属矿床的形成提供了有利的区域构造条件。中生界构造层主要是在燕山运动影响下,沿北北东方向形成一些不规则的断陷盆地,沉积了大量基性火山岩、中酸性火山熔岩和凝灰岩,含煤岩系及湖相碎屑岩。

岩浆活动:岩浆活动在本区极为频繁,并具有岩石类型多、时空分布广、与成矿关系密切等特点。喷出岩以加里东期、华力西早期及燕山期为主;侵入岩则以华力西中晚期为主。岩浆活动为本区金属矿床的形成提供了重要的物质来源和热动力条件。这些喷出岩和侵入岩是多宝山斑岩型铜金多金属矿床的成矿围岩。华力西中期的岩浆活动形成了中、晚石炭世火山岩和侵入岩,如多宝山矿区的花岗闪长岩、花岗闪长斑岩以及卧都河西北花岗岩、斜长花岗岩等;晚期则以侵入岩为主。燕山期以陆相火山喷发为主,形成上侏罗统火山岩系。岩浆侵入活动多形成浅成相侵入岩体,均以岩株和岩墙产出。

成矿地质特征:加里东期本区处于优地槽发展的早期阶段,沉积了一套中、酸性海底火山喷发岩;而华力西期则主要以大规模的中酸性岩浆侵入活动为主,形成了一系列与成矿作用有关的次火山岩相斑岩侵入体。多宝山矿区发育巨大而复杂的裂隙系统,由于构造系统压力多变,引起多次岩浆活动,尤其在华力西中期。岩浆的侵入活动造成热对流和物质转换,导致矿化作用,并产生钾化、黑云母化、青磐岩化等蚀变。杜琦[1~2]在《多宝山斑岩铜矿床》一书中指出,"斑岩成矿系统相对于围岩而言,常常是一个负压区,"……"活动中心多次开放,斑岩岩浆热液系统对围岩长期地时弱时强抽吸作用和沿中心及其周围裂隙带多次活动、脉动,同时排泄岩浆和热流体,"随着整个系统的冷却,热液活动减弱,最终在构造薄弱部位富集成矿。

## 2 工作方法

### 2.1 遥感地质解译

本次研究主要利用了陆地卫星TM图像数据中4、5、7(R,G,B)波段组合的假彩色合成图像。由于区内植被覆盖严重、土壤极为发育,因此给图像的岩性解译分析工作带来极大的困难。尽管如此,各类遥感图像中仍能反映出大量的线性构造和环形构造特征。其中有许多线性构造(如东西向构造)在前人工作中未能引起足够的重视。通过综合分析和研究发现,这些构造对区内的地层及内生金属矿产的空间分布均有一定控制作用。而环形构造可在一定程度上反映出火山机构和侵入岩的基本特征。

研究区内环形构造十分发育。在各类遥感图像中的表现形态也不尽相同,如有单层环形水系合围构成、多层同心状水系及山脊构成(如多宝山环形构造)、同心状和放射状水系共同构成,以及从色调及其他综合标志表现出来的环形构造等等。就其成因来说,比较肯定的有与火山机构有关的环形构造、与岩浆侵位有关的环形构造和与褶皱构造转折端及多组不同方向构造构成的环状断裂形成的环形构造。多宝山就位于与岩浆活动有关的环形构造的边缘。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

## 2.2　地球物理及地球化学资料变换与处理

### 2.2.1　航磁资料的处理与梯度带信息的提取

一般来说,斑岩型铜矿与具有斑状结构的次火山侵入岩体有关,这类岩体往往受区域性深大断裂控制。因此研究中除利用各类遥感图像资料提供的构造信息外,还对区内的航磁资料进行了处理与分析。结果表明,航磁资料除能证实由遥感图像所揭示的区域性构造特征外,还反映出一些区域性深大断裂的存在,尤其在由不同方向导数方法所提取出的梯度带信息对区内已知矿产空间分布规律反映得十分明显。

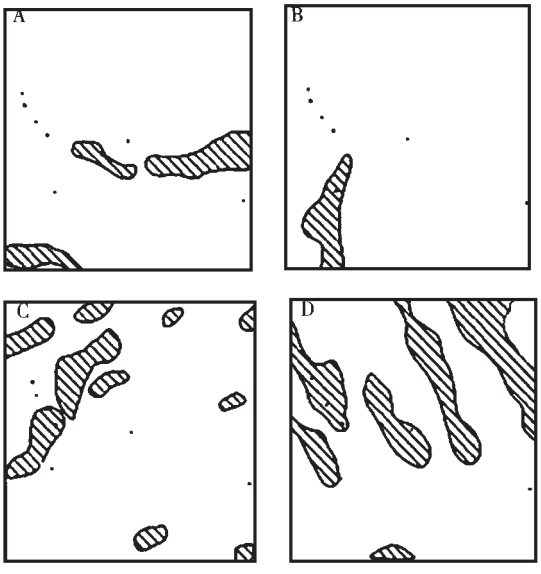



图 1　多宝山地区由不同方向导数提取出的梯度带信息

Fig. 1　Information of the gradient zone extracted from derivatives with different directions in the Duobaoshan area

A—东西向;B—南北向;C—北东向;D—北西向

如图1所示,研究区内的主要铜矿,如铜山、多宝山、小多宝山、育宝山和三矿沟等矿床和矿点均与这些区域性构造带有关。其中铜山和多宝山两个大型铜金多金属矿床受北东及北西两组不同方向梯度带交会部位的控制。通过对区内地质、矿产及由遥感图像资料所揭示的区域性构造信息的综合分析发现,北东向区域深大断裂控制着成矿带的分布,而北西向构造直接控制成矿母岩的产出部位和岩体的形态。因此,北东向构造与北西向构造的交会部位为成矿有利地段。

### 2.2.2　地球化学数据的归一化处理

在通常情况下,由于各种地球化学元素在地壳中分布的丰度不同,因而导致在地球化学勘探中各种元素的分析单位存在明显差异(通常为几个数量级)。在矿床统计分析预测中,首先应保证分析样品的随机性和一致性。换言之,各种观测样品应具有相同的被抽取机会和保持抽样方式及条件的一致性。只有在满足这种条件下,才能提供可进行相互对比的信息。为了解决上述问题,充分利用遥感、地质、物化探等信息进行综合性矿产资源评价,在本次研究中首先对所采用的地球化学数据进行了归一化处理:

$$X'_j = \frac{X_j - X_{j\min}}{X_{j\max} - X_{j\min}} \qquad (0 \le X'_j \le 1) \qquad (1)$$

方程(1)中,$X_j$ 为原始数据;$X_{j\min}$ 为第 $j$ 个变量的最小值;而 $X_{j\max}$ 则为第 $j$ 个变量的最大值。在经过上述变换的化探数据中,不仅解决了不同地球化学数据中分析单位不统一的问题,而且变换前后各变量间的相关关系仍保持不变。从几何意义上讲,相当于把座标原点移至变量最小值的位置。在此类数据中 $X'_j$ 是一个标量,其最小值为 0,最大值为 1。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnl

### 2.2.3 相关分析

除此之外，为了客观地反映出每一类地球化学变量与成矿元素之间的相互关系，研究中还利用多宝山矿一号矿体中 ZK560 号钻孔和 1080 号勘探线探槽中的岩石化学分析数据（前者 74 个，后者 30 个）进行了相关分析，并建立起相应的各化学元素间的相关系数距阵（表 1），故：

$$R_{XY}=\frac{COV(X,Y)}{D(X)^{1/2}D(Y)^{1/2}} \qquad (0\leq R_{XY}\leq 1) \qquad (2)$$

由方程(2)所计算出的各元素间的相关系数 $R_{XY}$ 可以定量地描述各类地球化学元素间的共生组合关系，并为矿床形成的地质条件及地球化学环境分析提供重要的依据。其中 $COV(X,Y)$ 为 $X$ 和 $Y$ 两个变量间协方差；$D(X)$和 $D(Y)$分别为它们的方差。

如表 1 数据所示，在多宝山铜金多金属矿床中，与铜关系最为密切的元素有 Ni、Au、Zn、Ba 等元素，而 Sr 与 Cu 呈负相关，即 $R_{XY}=-0.71$。在上述地球化学元素组合中，除元素 Ni 外，

表 1 多宝山矿床地球化学元素共生组合相关系数距阵

Table 1 Correlation coefficient matrix of the geochemical element assemblage in the Duobaoshan deposit

| | Au | Ag | Sn | As | Sb | Bi | Hg | W | Mo | Ba | Co | Cu | Pb | Zn | Mn | Sr | Ni |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Au | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ag | 0.50 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sn | 0.31 | 0.46 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | |
| As | 0.29 | 0.17 | 0.30 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | |
| Sb | 0.19 | 0.12 | 0.28 | 0.80 | 1.00 | | | | | | | | | | | | |
| Bi | 0.31 | 0.55 | 0.33 | 0.23 | 0.18 | 1.00 | | | | | | | | | | | |
| Hg | 0.46 | 0.38 | 0.54 | 0.45 | 0.42 | 0.18 | 1.00 | | | | | | | | | | |
| W | 0.16 | 0.47 | 0.38 | 0.17 | 0.24 | 0.44 | 0.23 | 1.00 | | | | | | | | | |
| Mo | 0.43 | 0.10 | 0.12 | 0.41 | 0.36 | 0.00 | 0.41 | -0.12 | 1.00 | | | | | | | | |
| Ba | 0.10 | 0.02 | 0.46 | 0.12 | 0.19 | -0.07 | 0.50 | 0.17 | 0.19 | 1.00 | | | | | | | |
| Co | 0.05 | 0.35 | 0.65 | 0.18 | 0.24 | 0.29 | 0.39 | 0.24 | -0.10 | 0.36 | 1.00 | | | | | | |
| Cu | 0.51 | 0.44 | 0.29 | 0.21 | 0.11 | 0.25 | 0.50 | 0.06 | 0.30 | 0.38 | 0.23 | 1.00 | | | | | |
| Pb | 0.13 | 0.38 | 0.39 | 0.14 | 0.19 | 0.09 | 0.38 | 0.30 | -0.03 | 0.31 | 0.39 | 0.28 | 1.00 | | | | |
| Zn | 0.14 | 0.35 | 0.53 | 0.31 | 0.32 | 0.30 | 0.40 | 0.33 | -0.10 | 0.37 | 0.68 | 0.44 | 0.44 | 1.00 | | | |
| Mn | -0.04 | 0.19 | 0.52 | 0.12 | 0.20 | 0.12 | 0.33 | 0.15 | -0.11 | 0.40 | 0.75 | 0.25 | 0.35 | 0.75 | 1.00 | | |
| Sr | -0.06 | -0.14 | 0.24 | 0.03 | 0.16 | -0.13 | 0.19 | -0.07 | 0.09 | 0.35 | 0.37 | -0.07 | 0.15 | 0.10 | 0.36 | 1.00 | |
| Ni | 0.01 | 0.20 | 0.25 | 0.13 | 0.08 | 0.07 | 0.30 | 0.18 | -0.02 | 0.37 | 0.41 | 0.73 | 0.35 | 0.59 | 0.45 | 0.04 | 1.00 |

相关系数最高的为 Au 元素，其相关系数为 $R_{XY}=0.51$。事实上，上述分析恰恰反映出多宝山斑岩型铜金多金属矿床的成矿地质环境及地球化学特征，即除了金属铜以外，该矿床以伴生元素金的含量极高为其主要特征。最终，为满足综合分析及预测的需要，利用归一化和相关分析结果对各类地球化学数据进行了以下变换：

$$C_{kj}=X'j\times R_{kj} \qquad (0\leq C_{kj}\leq 1) \qquad (3)$$

经过上述处理的地球化学数据 $C_{kj}$ 不仅考虑到各类地球化学元素间的相互关系，而且还分别考虑到它们各自在成矿作用中的影响和贡献，为综合遥感、地质及物化探等地学信息进行矿产资源预测奠定了基础。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

### 2.3　成矿条件评价模型

到目前为止,各类遥感图像为人们提供了大量的区域性构造信息,而地质学家们所面临的主要问题不是怎样才能从中提取出这类构造信息，而是如何才能有效地将它们运用到区域性地质研究和矿产勘探中去。众所周知,某种特定成因类型矿床的形成往往是由于多次地质作用叠加的结果。成矿作用的发生、发展、演变乃至最终的空间分布规律受为数众多的地质因子控制[3]。对各类与成矿作用有关的地质因子来说,无论是它们各自形成的地质环境及时空分布特征,还是它们对成矿作用的贡献大小、作用方式及其组合关系等方面都是极为复杂的[4]。正是由于各类地质现象及成矿作用的多样性、变异性和复杂性,使之存在大量的不确定性和不精确性。这种不确定性、不精确性,既有随机性,更具模糊性。就其统计学的角度而言,我们可以把这类地质因子视为随机变量,而把矿床(点)的存在及其空间分布视为这类随机变量中的‘ 稀有事件 ”。换言之,各类地质变量及矿床(点)的分布满足统计独立条件。据此利用统计分析与概率计算等数学方法来处理、研究地质现象和成矿条件更具有理论意义和实际应用价值。鉴于上述讨论和分析,在本项研究中采用了笔者所建立的概率模型,对区内的斑岩型铜矿床的空间分布特征和规律进行了预测分析：

$$P_t(M\geq 1)=1-P_t(M=0)=1-\prod_{i=1}^{N}P_i(M=0)$$
$$(0\leq P_t(M\geq 1)\leq 1) \qquad (4)$$

方程(4)中,$P_t(M\geq 1)$是每一个网格区域内所有的地质因子中至少有一个矿化事件出现的概率[5]。$P_i(M=0)$为第$i$个地质变量至少有一个矿化事件的概率 ;$N$为参加概率分析的地质变量的数量。需要强调指出的是,由方程(4)所计算出来的每一个网格区域内至少有一个矿化出现的概率值$P_t(M\geq 1)$,不仅分别考虑到不同方向线性构造和有关地层、岩性以及地球化学等地质变量对成矿作用的影响和贡献，而且还从数值上确定了各类控矿地质因子的空间分布特征及其组合关系,最终达到为区域成矿地质条件评价和找矿靶区预测提供定量分析数据的目的。

### 2.4　勘查指数

在通常情况下,矿床预测是以类比法为基础的,其主要理论依据是类似的地质条件应产生类似的矿床。所谓地质条件,亦即矿床形成的地质环境(地层分布、构造条件及岩浆活动等)。在方程(4)中所描述的成矿地质条件评价概率模型为这类分析工作提供了一种有效的方法。根据前面的统计假设,借助上节中所介绍的归一化变换、相关分析等方法,建立矿床的数学模型,并用来进行区域成矿条件评价和找矿预测，以定量类比的方法为矿产勘探决策提供依据是区域矿产资源预测的最终目的。

勘查指数是本次工作中提出的一个新概念，其目的在于综合运用各类地学信息为区域矿产资源评价和预测提供定量的类比分析方法。从地质意义上讲,可将勘查指数定义为 :勘查指数=成矿地质条件+地球化学表征+地球物理表征。

根据以上概率计算、相关分析及变换后的地球化学数据,可以将上述概念模型表达为：

$$I_e=1-\prod_{k=1}^{M}P_t(M=0)(1-C_k)=1-\prod_{k=1}^{M}(1-X'_jR_k)\quad P_t(M=0)$$
$$(0\leq I_t\leq 1) \qquad (5)$$

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnl

方程(5)中$C_{kj}$是经过方程(2)变换后的地球化学变量；$M$为参加分析的地球化学变量的总数。据此模型计算出的勘查指数$I_e$是根据已知矿床产出地质条件及地球化学特点，采用类比的方法对各类地质变量在成矿作用中的影响和贡献进行综合评价，为区域性找矿靶区圈定工作提供定量分析数据。

图2示出了由勘查指数模型输出的找矿靶区圈定结果。与现有的地质、矿产资料的对比分析结果表明，由该模型所圈定的找矿靶区与目前已知矿床(点)的分布情况极为吻合。除此之外，还新发现了其他几个未知的找矿靶区(图2-a、b、c)。由此说明，该模型是寻找与已知矿床产出类似地质条件与环境的有效方法。

## 3 成果讨论

根据勘查指数模型计算结果，野外研究中重点对多宝山东北9 km处的564高地铜找矿靶区进行了验证(图3)。区内出露地层为志留系黄花沟组：粉砂岩、泥质板岩、中细粒硬砂岩夹砂砾岩及灰岩透镜体；八十里小河组：凝灰砂岩、石英砂岩、粉砂岩。靶区西北侧为奥陶系上统的多宝山组：安山玢岩、安山质凝灰岩，英安玢岩、流纹斑岩及其凝灰岩；裸河组：安山质凝灰岩，英安质、流纹质凝灰岩夹凝灰砂岩、灰岩透镜体。

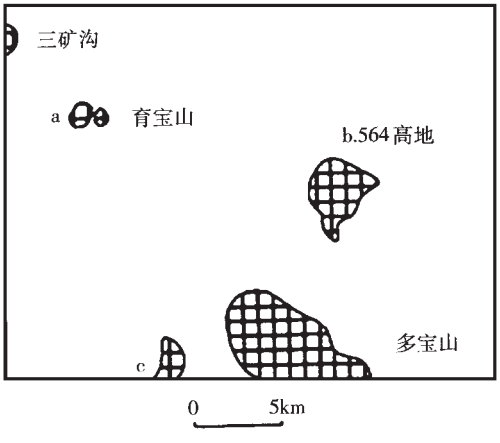



图2 由模型圈定出的找矿靶区

Fig. 2 Mineral exploration target delineated by the model

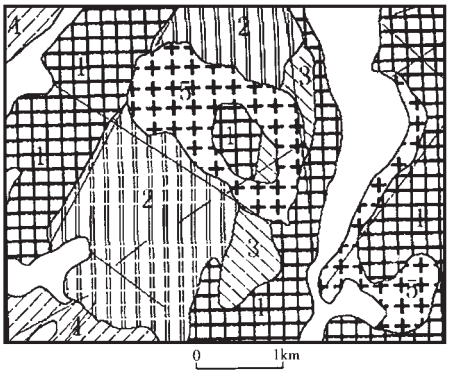



图3 564高地铜找矿靶区的遥感解译图

Fig. 3 Interpretation of remote sensing information in the copper exploration target at Height 564

1—志留系未分；2—黄花沟组；3—裸河组；4—多宝山组；5—华力西期花岗闪长岩

志留系地层以黄花沟组为核部、八十里小河组为两翼构成背斜褶皱。NE向一五三煤矿—多宝山断层穿过此区，NW向多宝山—三矿沟断层、泥鳅河—卧都河断层分别在靶区南侧和北侧通过。受这3条构造带影响，靶区内部NE向、NW向构造发育。在陆地卫星TM图像上可以看出，该靶区位于多宝山环形构造东南侧。从构造角度分析该靶区具备良好的成矿条件和有利的构造环境。

在一点槽采集的岩石样品化学分析结果表明，铜含量为$200\times10^{-6}$。此外，该靶区Cu、Ni组合异常非常明显，Zn也有异常显示。说明该靶区具有与多宝山矿床类似的地球化学特征。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnl

## 4 结　论

尽管研究区地处高寒林区，但各类遥感图像资料仍可为遥感地质调查及找矿工作提供大量的有用信息。特别是区内大量的线性构造和环形构造解译及其与矿产分布之间关系的研究，使我们对区内矿产资源的空间分布规律的认识得以深化，为下一步的普查找矿工作提供了有益线索，进而建立了该区应以北东向区域性深断裂带与北西向构造交会部位为成矿有利地段的找矿模式。

借助方向导数、归一化变换、相关分析等数学方法对各类地学信息的提取、变换及综合处理与分析方法进行了探索。在此基础上，结合区内的地质、地形及物化探和重砂等地学信息，利用改进的概率模型对区内铜、金矿化的空间分布规律进行了综合分析和评价预测。

勘查指数概念的提出及其相应数学模型的建立，为今后利用遥感、地质及物化探等综合地学信息进行区域矿产资源评价和预测创立了一种有效的定量分析方法。事实上，本次研究所采用的勘查指数模型不仅从数值上考虑到每一类地质因子对成矿作用的影响和贡献，而且还考虑到它们各自的空间分布特征及其组合关系，是寻找与已知矿床(点)产出类似地质条件与环境矿床的有效方法。因此，它可在一定程度上模拟地质学家在日常工作中所采用的综合分析及解释推断方法，为成矿地质条件的综合评价和预测提供定量分析数据。

**参考文献：**

[1] 杜琦.多宝山斑岩铜矿成矿规律研究及应用[J].中国地质，1980，(6).
[2] 杜琦.多宝山斑岩铜矿床[M].北京：地质出版社，1988.
[3] 赵鹏大.矿床统计预测[M].北京：地质出版社，1983.
[4] 冯保成，汪培庄.模糊数学实用集粹[M].北京：中国建筑工业出版社，1991.
[5] 王品清.陆地卫星TM数据用于辽东地区铅锌矿产预测的方法探索[A].见：中国科学技术文库，综合卷[M].北京：科学技术文献出版社，1998.1066.

# Exploration index and its application in the exploration of porphyry copper deposits in the Duobaoshan district, Heilongjiang

WANG Pin-qing

(*Aerial Geophysical Survey and Remote Sensing Ceter, Beijing* 100083, *China*)

**Abstract**: This paper introduces in detail a mathematical model of the application of the integrated remote sensing, geological, geophysical, geochemical and other information in regional mineral exploration and prediction. In the model, all kinds of geoscience information are subjected to integrated treatment and analysis on the basis of the valuable transformatino and extraction of the informatio and by aid of the general binomial distribution function. The output of this model can provide not only quantitative data for regional mineral prediction but this model is also a useful method to find the geological, geophysical and geochemical environment similar to that of the known mineral deposits.

**Key words**: exploration index; porphyry copper deposit; exploration; Duobaoshan, Heilongjiang

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnk