

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2016.01.005

# 基于多元信息的证据权法在南岭钨锡多金属成矿预测中的应用

雷天赐, 罗士新, 王 磊

LEI Tian-Ci, LUO Shi-Xin, WANG Lei

(中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

(Wuhan Centre of China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

**摘要:**以南岭成矿带 1:50 万地质数据库、物化探数据为信息源,通过数据处理、分析与推断,编制相关成果图件。以 GIS 为平台、地质异常理论为指导,基于多元信息成矿耦合分析与异常提取,优选找矿要素有利区间并构建了 13 个有效证据层,基于 Morpas、Arc-wofe 证据权模型开展了成矿定量预测与评价。以 0.024、0.078 和 0.098 为后验概率临界值划分了三级成矿远景区,共圈定一级远景区 41 个、二级远景区 70 个和三级远景区 85 个,为该区找矿工作部署及资源规划提供了参考。

**关键词:**南岭成矿带; 优益度; 单位矿产当量; 证据权法; 成矿预测

中图分类号: P622+.6; P618.44; P618.67

文献标识码: A

文章编号: 1007-3701(2016)01-034-09

**Lei T C, Luo S X and Wang L. Application of weights of evidence method for prediction of W-Sn polymetallic deposits based on multi-source information in Nanling metallogenic belt. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2016, 32(1):34-42.**

**Abstract:** According to 1:500000 geological database, geophysical and geochemical exploration data in Nanling metallogenic belt, all kinds of related maps were compiled by data-processing, analyzing and interpreting. On basis of the GIS platform, guided by the geological anomaly theory, all favorable ranges of prospecting factors were selected through multi-information metallogenic coupling analysis and anomalous information extraction. Finally, 13 effective evidence layers were built. Ore-forming quantitative prediction and assessment was done based on weights of evidence of Morpas and Arc-wofe model. According to the critical value of 0.024, 0.078 and 0.098, 41 for prospecting, 70 secondary prospect areas and 85 triple prospect areas were submitted, it was significant to plan work and plan mineral resources in the region.

**Key words:** Nanling metallogenic belt; benefits; unit of mineral equivalent; weights of evidence; metallogenic prediction

## 1 前言

南岭成矿带属于我国 20 个重点成矿带之一,

跨湘、粤、桂、赣四省(区),地理坐标范围: 107° ~ 116° E, 24° ~ 27° N,面积约 30 万 km<sup>2</sup>。构造上位于扬子板块、华夏板块交汇处,区内岩浆活动强烈、

收稿日期:2015-12-30;修回日期:2016-02-09.

基金项目:中国地质调查局项目“武当-桐柏-大别成矿带多元信息提取及深部找矿评价”(12120113068900).

第一作者:雷天赐(1977-),男,高级工程师,从事地、物、化、遥等方面的生产与科研工作, E-mail:leitianci@126.com.

成矿条件十分优越,是我国有色、稀有及贵金属的重要生产基地,也是世界钨和原生锡矿床分布最密集、最有潜力的地区之一,拥有世界上主要钨、锡矿床类型。

南岭地区钨锡大规模成矿作用发生于中晚侏罗纪(165 ~ 150 Ma),古太平洋板块向大陆俯冲时形成一系列 NE 向伸展带与 EW 向古断裂的交汇部位是岩浆活动和成矿作用中心区<sup>[1]</sup>,钨锡多金属矿床(点)具有成带、成群分布特点,主要沿古板块结合带、大型隆起区与坳陷区结合部、深大断裂(带)等 3 个部位产出原生锡矿,包括云英岩型、变花岗岩型、矽卡岩型、石英脉型、破碎带蚀变岩型和斑岩型等 6 个主要类型,与 H 型和铝质 A 型花岗岩关系密切<sup>[2-3]</sup>。

证据权法是一种离散的多元统计方法,运用的是相似类比理论。其最早应用是在上世纪 60 年代的医学领域,80 年代末由 Agterberg 等<sup>[4]</sup>通过改进后首次引入地学领域。随后,作为一种新的数据模型方法,广泛应用于国内外矿产资源预测中并取得巨大成功<sup>[5-6]</sup>。目前,国内应用主要是基于 Morpas、MRAS 软件及 Arc-Wofe 模块。

本文以南岭成矿带为研究区、Morpas 为平台、钨锡多金属矿为预测对象,通过地、物、化、遥数据处理与分析、异常信息提取与成矿耦合关系研究,参照单位矿产当量指标优选找矿要素有利区间构建有效证据层,通过证据权重模型自动圈定并划分远景区。

## 2 证据权法及其理论基础

证据权法是一种基于 Bayes 的统计方法,它通过对一些与矿产形成相关的地学信息的叠加复合分析来进行矿产远景区的预测,其中的每一种地学信息都被视为成矿远景区预测的一个证据因子,而每一个证据因子对成矿预测的贡献都是由这个因子的权重值来确定的。

假设研究区被划分成面积相等的 T 个单元, D 为有矿单元个数。对于任意一个证据因子,其权重定义为:

$$W^+ = \ln \left\{ \frac{P(B/D)}{P(B/\bar{D})} \right\}, \quad W^- = \ln \left\{ \frac{P(\bar{B}/D)}{P(\bar{B}/\bar{D})} \right\}$$

式中,  $W^+$ 、 $W^-$  分别为证据因子存在区和不存在区的权重值,对于原始数据缺失区域权重值为 0; B 为因

子存在区的单元数,  $\bar{B}$  为因子不存在区的单元数。证据因子与矿床(点)的相关程度:  $C = W^+ - W^-$ 。当  $C > 0$  时,表示证据因子对成矿有利;  $C < 0$  时,表示证据因子对成矿不利;当  $C = 0$  时,表示证据因子与成矿与否无意义。

## 3 多源信息提取、评价及证据权层优选

### 3.1 构建成矿信息评价因子

对于成矿要素而言,评价其是否有利于成矿不仅看其赋矿数量,而且还要充分考虑其在预测中的有效性。因此,构建单位矿产当量(KN)评价因子作为统一衡量标准具有一定的现实意义,其数学表达式为<sup>[7]</sup>:

$$KN = N/S \quad (1)$$

(1) 式中, S 为赋矿因子出露面积, 单位  $\text{km}^2$ ; N 为由(2)式计算得到的矿产当量, 单位个。矿产当量计算表达式如下:

$$N = N_0 \times K_0 + N_1 \times K_1 + N_2 \times K_2 + N_3 \times K_3 + N_4 + N_5 \times K_5 \quad (2)$$

(2) 式中,  $N_0$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$ 、 $N_5$  分别为超大、大、中、小型矿床、矿点和矿化点的个数;  $K_0$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_5$  是超大、大、中、小型矿床和矿化点相应的权重系数。在南岭成矿带多元信息因子找矿有利度分析中,  $W_{\text{Sn-Mo-Bi}}$  矿产当量 (N) 计算取  $K_0=625$ 、 $K_1=125$ 、 $K_2=25$ 、 $K_3=5$ 、 $K_5=0.2$ , 总矿产当量为 8636.4 个。

### 3.2 地质信息提取与优选

#### 3.2.1 控矿构造

南岭地区断裂多形成于前加里东期、加里东期、印支期和燕山期, 构造特征主要为压扭性和张扭性; 深大断裂控制了矿床的形成与分布, 具有多期活动的特点, 以 NE 向为主, 伴有近 SN 向、近 EW 向和 NW 向<sup>[8]</sup>; 控矿模式空间上表现为横成排、纵成列, 交叉部位最优越<sup>[9]</sup>。NE 向断裂主要为燕山期以前各时期及不同期次的叠加复合。前燕山期形成的为基础断裂, 对后期的形成起着明显的控制作用; 燕山期的是重要的导岩导矿断裂, 其活动对花岗岩的侵位、钨锡及多金属矿的形成有着明显的控制作用。近 SN 向深大断裂大多形成于印支期和燕山期, 印支期的主要表现为压性或压扭性, 与盖层

中的波状弧形褶皱走向一致;燕山期的主要表现为波状弧形,以压扭-张扭活动为主。

本次分析断裂主要来源于重磁推断、遥感解译及1:50万地质数据库。为全面解析其控矿特征,依据线性构造地质意义或岩石力学意义引入4个评价指标:线性构造buffer区、优益度、等密度和方位异常度<sup>[9]</sup>;再参照它们的单位矿产当量值<sup>[11]</sup>,优选了各自的有利区间段分别构建了有效证据层。

#### 线性构造buffer分析

断裂构造对矿床(点)形成起着重要的作用,尤其是深大断裂,而且其对控矿的影响范围不一。结合本区构造控矿特征,选择深大断裂和次级断裂做半径( $r$ )1~5 km的缓冲区分析,计算各缓冲区的单位矿产当量值。根据各缓冲区r-KN统计图(图1a)看,KN与r呈反比,KN值随r的增大而降低;当3 km <  $r$  < 4 km时曲线变化趋势急剧放缓并出现明显拐点,说明该区3 km范围是断裂对矿产分布影响的拐点和最佳极值。

#### 线性构造优益度分析

一种有利储矿的构造特征函数,理论依据是多组断裂交汇处或断裂密集部位为内生矿产有利容矿构造部位。它以线性构造两两间的夹角和线性构造的方位的控矿程度加权的构造密度的度量,通过断层定量分析来对有利成矿区进行评价。其表达式如下:

$$\varepsilon = l_i w_i (1 + |\sin \theta|) / 2 + \sum_{i=2}^n l_i [1 + |\sin(a_i - a_{i-1})|] / 2 w_i \quad (3)$$

(3)式中: $i$ 为线性构造序数, $w_i$ 是第*i*条线性体在该单元内的控矿权重, $\theta$ 是一条线性构造与最后一条线性构造的夹角, $l_i$ 第*i*条线性体在该单元内的长度, $a_i$ 是第*i*条线性体的方位角,将 $\varepsilon$ 按 $a_1 < a_2 < \dots < a_n$ 及 $a_1 > a_2 > \dots > a_n$ 分别计算 $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_2$ 值, $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2$ 即为该统计单元的断裂优益度值。

通过优益度等值线图 $\varepsilon$ -KN统计分析(图1b)看,按单位矿产当量值选择0~11的4个区间为优益度证据层。

#### 线性构造方位异常度分析

方位异常度是一种排除区域优势方位构造影响的程度指数,评价局部性构造的指标。一般方位异常度指数越高表示其受优势方位构造的影响越小,反映局部构造特征越强。通过单元网格构建、以22.5°为间距在-90°~90°进行方位划定,编制了方

位异常图。

基于线性构造方位异常图的方位异常度-单位矿产当量统计图(图1c)看,优选了NS、NNE和NE向3个方位区为方位异常度有利成矿区。

#### 线性构造等密度分析

指统计网格单元格中各线状构造的长度之和,一定程度上揭示了线性构造空间分布结构特征及深部构造信息和找矿线索<sup>[12]</sup>。其表达式为:

$$L = \sum_{i=1}^{n_j} S_i$$

式中: $L$ 为等密度值, $S_i$ 为单元格中第*i*条线性构造的长度, $n_j$ 为第*j*个单元网格中总线性体数。

基于线性构造等密度图的L-KN统计分析结果(如图1d),优选了0~19间的4个区段为构造等密度有利成矿区。

#### 3.2.2 赋矿地层

南岭地区钨锡多金属矿的主要类型有石英脉型、花岗岩型(蚀变花岗岩型、云英岩型、花岗岩岩脉型、斑岩型)和矽卡岩型,表现为“多位一体”的复合矿床模式。其中,石英脉型分布最广、花岗岩型和矽卡岩型规模最大。

区内矽卡岩性矿床成矿方式为燕山期花岗岩类侵入于上寒武统、奥陶系、泥盆系、石炭系及二叠系等地层中,与地层中的灰岩、钙质砂岩等发生接触交代形成矽卡岩型钨锡多金属矿床。矿体呈层状、似层状、透镜状、囊包状、不规则状;成矿作用明显具多阶段性,并呈顺向分带。主要矿物组合:锡石、白钨矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿等。当多种成因类型复合时,则形成复控型矿床,往往形成大-超大型矿床。

利用GIS空间分析与统计功能,南岭地区优选出了3个W-Sn-Mo-Bi成矿元素的赋矿地层组:Nh-O、D-P和J-Qb,其中Nh-O、D-P地层组包含的矿床(点)数约占总矿床(点)数的90%。根据赋矿地层岩性单位矿产当量值,最终提取了Nh-O、D-P地层组构建有效证据层。

#### 3.2.3 岩浆岩

研究表明,南岭地区成矿岩体主要为燕山期侵入花岗岩体<sup>[13]</sup>。成矿花岗岩体多呈岩株、岩枝、岩筒、岩脉、岩瘤、岩盘或岩床产出,与围岩间接触界线清楚,其矿化富集部位常常在岩体的顶部或内外接触带;部分成矿花岗岩体具有隐爆特征,因而常

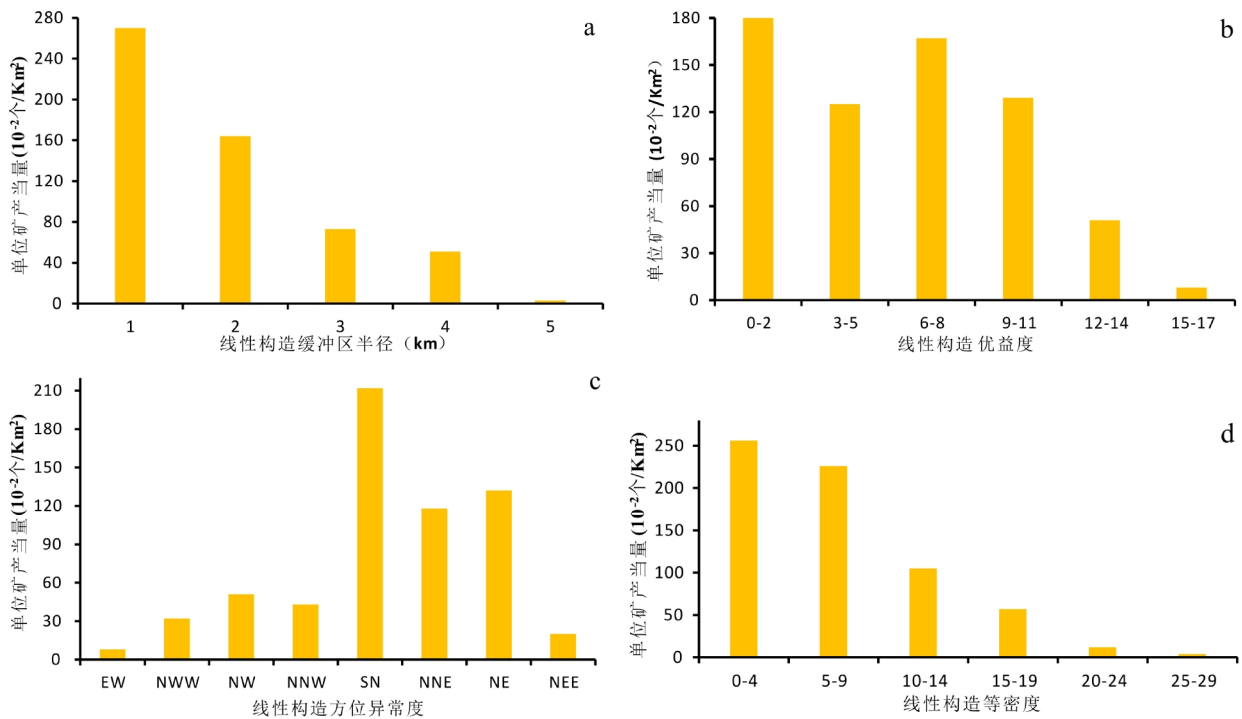


图1 南岭地区线性构造各参数单位矿产当量统计图

Fig. 1 Histogram of unit ore equivalence of all parameters on linear structure in Nanling region

有角砾岩伴生,为超浅成或次火山相产物。

区内的钨锡多金属矿床在成因上与燕山期的复式花岗岩,尤其是燕山中晚期酸性、中酸性岩体密切相关。这些含矿岩体或产在大型岩基的边缘部位、或是在隐伏岩基的顶部,一般都呈中、小型岩株。岩浆岩控矿特征:岩性上,含矿岩体的主要岩石类型为黑云母花岗岩、白云母花岗岩和二长花岗岩等;在成矿时间上,成矿年龄与成岩年龄比较接近;在空间上,矿床围绕岩体分布,且自岩体中心向外矿化具有明显的分带性,依次出现 Mo、W、Bi、Sn、Cu、Pb、Zn 等成矿特征。

根据重磁推断酸性岩体、岩浆岩带成果及 1:50 万地质图,编制了区内酸性岩体、岩浆岩带分布图,选择成钨、成锡花岗岩体组合<sup>[14]</sup>及边缘外扩 3km 区构建有效证据层。

### 3.3 重磁信息提取与优选

#### 3.3.1 重磁数据处理与信息提取

以南岭地区 1:20 万全国重磁扫面数据为对象,RGIS、Mapgis 为平台,通过滤波、单元网格化和克里格插值等处理编制了布格重力异常、航磁  $\Delta T$  等值线平面图等地球物理系列图件<sup>[15]</sup>。本区地质背景与地球物理场联系密切,矿化集中区主要分布在

重力梯度带偏负值一侧,尤其是重力梯度带的弯曲处、舌状重力低或短轴状重力异常边缘,如南丹矿化集中区、都庞岭矿化集中区;航磁方面,矿化集中区主要位于负磁异常内及弯曲处,正负磁场的交替带或短轴状正磁力异常的周缘。

本次重磁找矿有利度分析主要围绕布格剩余重力异常和航磁  $\Delta T$  异常开展。首先,通过 GIS 空间分析与统计功能,求出重磁各区间面积及对应的矿产当量值;然后,计算各区间的单位矿产当量,如图 2;再参考单位矿产当量指标优选重磁有利区间构建有效证据层。

剩余重力异常单位矿产当量分布在起始值为  $(-14 \sim 4) \times 10^{-5}/s^2$  间,明显呈 3 个区间段;高值分布在梯度带附近偏负重力场一侧,该区间可进一步优选为 2 个区间: $(-14 \sim -12) \times 10^{-5}/s^2$  和  $(-10 \sim -7) \times 10^{-5}/s^2$ 。航磁  $\Delta T$  异常单位矿产当量分布在  $-200 \sim 320nT/Km$  范围间,呈不规则齿状,提取的 3 个有效证据层区间分别为:  $-160nT/km$ 、 $20 \sim 140nT/km$  和  $220 \sim 320nT/km$ 。

#### 3.3.2 重磁异常地质推断

重磁主要推断了区内断层、岩体和岩浆岩带(图 3)。依据重磁异常特征(如线性梯度带、异常特



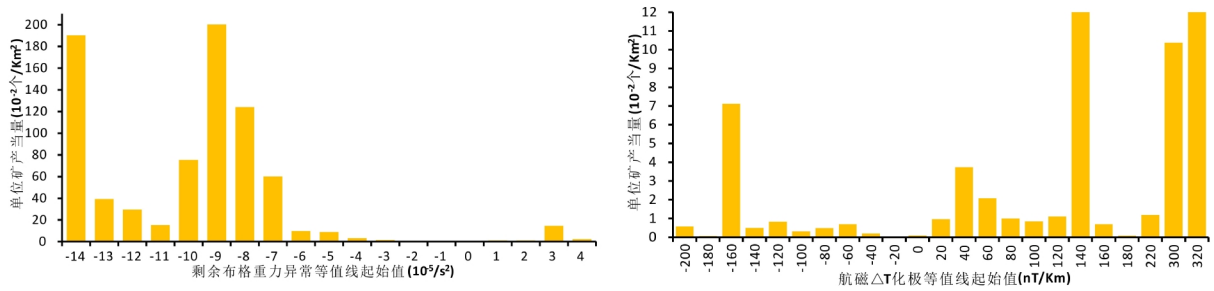


图2 重磁异常区单位矿产当量统计图(左:剩余重力异常,右:航磁ΔT异常)

Fig.2 Histogram of unit ore equivalence of gravity and magnetic anomaly zone (Left: residual gravity anomaly; Right: aeromagnetic anomaly)

征的分界线、异常的错动、等值线的规则性扭曲、异常宽度突变和串珠状异常等), 全区推断深大断裂12条、中层断裂40条和浅层断裂若干条。这些断裂不仅控制了本区地质构造基本格架,与成岩成矿有着密不可分的关系,而且大多数深大断裂(带)还构成了大地构造单元的分界线。

利用重磁推断岩体118个,包括已知岩体49个、半隐伏岩体28个和隐伏岩体41个,其中部分岩体表现出良好的重磁同源异常和成矿相关性。在剩余布格重力异常图上,出露花岗岩体呈低重异常,密集封闭的环状等值线反映了产状较陡的接触带;布格重力异常垂向二阶导中,负异常较好的反映了花岗岩体,零值线为岩体边界。此外,依据上延高度不同的重力异常特征,在南岭成矿带初步划分13条大型岩浆岩带。

航磁 ΔT 局部磁异常大体上反映了岩浆岩活

动强弱状况。以茶陵-郴州-恭城为界,西侧岩体较少,局部磁异常也较少;东侧出露岩体众多,局部磁异常也显著增多。

### 3.4 化探信息提取与优选

#### 3.4.1 地球化学数据处理与元素选择

化探分析数据来源于全国1:20万水系沉积物数据库,共包括39种元素及化合物。本次成矿预测矿种元素为W、Sn,根据华南地区燕山期重熔型花岗岩类有关的成矿系列的特征<sup>[16]</sup>,选择了W、Sn、Cu、Pb、Zn、Mo、Bi、Ag、As、F、B、Hg、Sb等13种与成矿相关的元素做R型分层聚类分析,以欧氏距离作为衡量变量间相似程度的统计量,聚类方法采用离差平方和法,聚类谱系图见图4。

相似系数取11.25时,W、Sn、Bi、Mo为一组,为高温矿物。其中W、Sn为区内主成矿元素,Bi、Mo为副成矿元素。结合成矿元素相关性分析,选择了

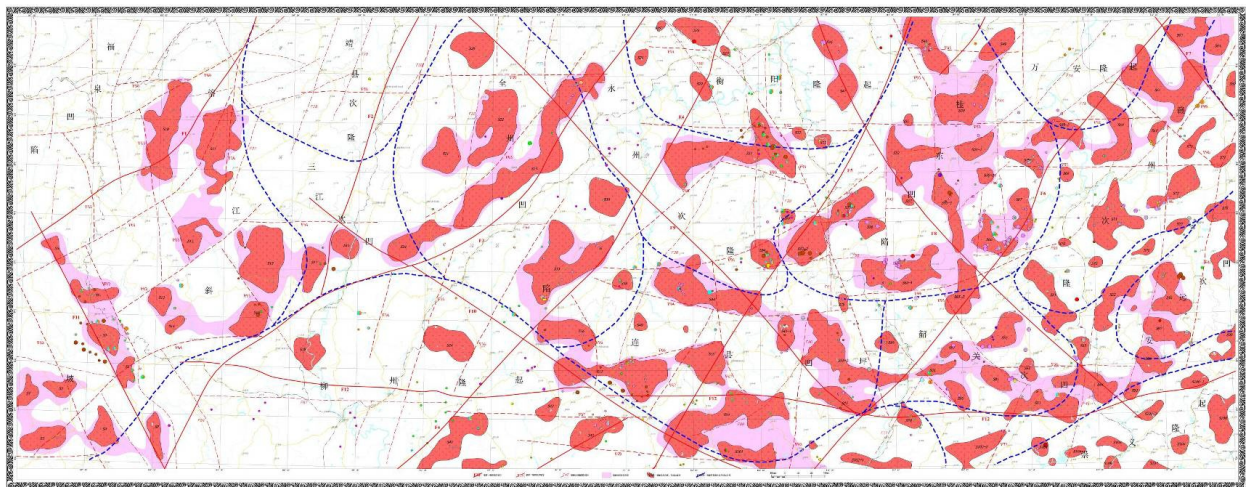


图3 南岭地区重磁推断主要断裂、酸性岩体及岩浆带

Fig.3 Map of interpretation of main faults, magmatic rocks and magmatic belt by gravity and magnetic in Nanling region

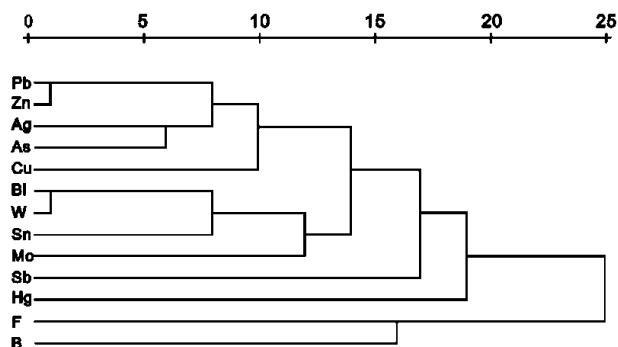


图4 南岭地区13种元素聚类分析龙骨图

Fig. 4 Diagram of cluster analysis of 13 elements in Nanling region

W、Sn、Bi、Mo 4 种元素开展地球化学分析与异常提取。

### 3.4.2 地球化学异常信息提取

首先,对数据进行中值低通滤波处理,填补原始数据缺失和消除孤立的噪声点,保证数据完整性;其次,通过数据处理与统计分析,采用迭代法、累频率法分别确定各元素异常下限,并求取元素相应的均值、标准方差、中位数及变异系数等(表 1);再与矿产叠加分析,优选异常下限求法:迭代法以均值 +2 倍方差确定异常下限、累频法以累积频率的 85%确定异常下限值;最后,迭代法按异常下限、2 倍异常下限和 4 倍异常下限划分异常区内带、中带和外带,累频法以累积频率的 85%、95%和 98.5%为阈值,划分异常区内带、中带和外带,编制

表1 南岭地区成矿元素异常参数

Table 1 Anomaly parameter of metallogenic elements in Nanling region

元素	平均值	标准方差	变异系数	异常下限确定方法	异常下限
W	7.63	62.86	8.24	迭代法 ( $X_a=X_0+2Std$ )	13.63
Sn	9.63	64.27	6.67	迭代法 ( $X_a=X_0+2Std$ )	17.55
Mo	1.58	10.52	6.66	迭代法 ( $X_a=X_0+2Std$ )	4.96
Bi	1.63	14.69	9.02	迭代法 ( $X_a=X_0+2Std$ )	1.60
W_Sn_Mo_Bi	5.10	25.15	4.94	累积频率法 (85%)	5.34

地球化学异常图(图 5)并作为有效证据层。

## 4 基于 Morpas 的证据权法模型的建立

根据预测比例尺及精度要求,工作区选择 4 km × 4 km 大小进行网格单元创建,尽量保证一个网格单元内只有一个矿床(点),全区共划分网格单元 19465 个。基于 Morpas 证据权重法预测模型与流程<sup>[7]</sup>(图 6),分别导入南岭地区地质、物化探证据层专题图件,构建了证据层并分别计算出各证据层证据权重值和成矿的相关系数(表 2),对研究区各网格单元进行成矿后验概率计算。

从找矿要素有利区间构建的有效证据层权重值( $W^+$  和  $W^-$ )及相关系数( $C=W^+-W^-$ )判断,地球化学手段系列证据层影响最大,是本次找矿预测最重要变量,对找矿具有重要的指示意义;W、Sn、Mo、Bi 组合异常高权重值反映了该区典型的成矿系列特征。燕山期酸性岩体证据层相关系数大于 2,反映了其在系列控矿要素中成矿优越性。赋矿地层和控

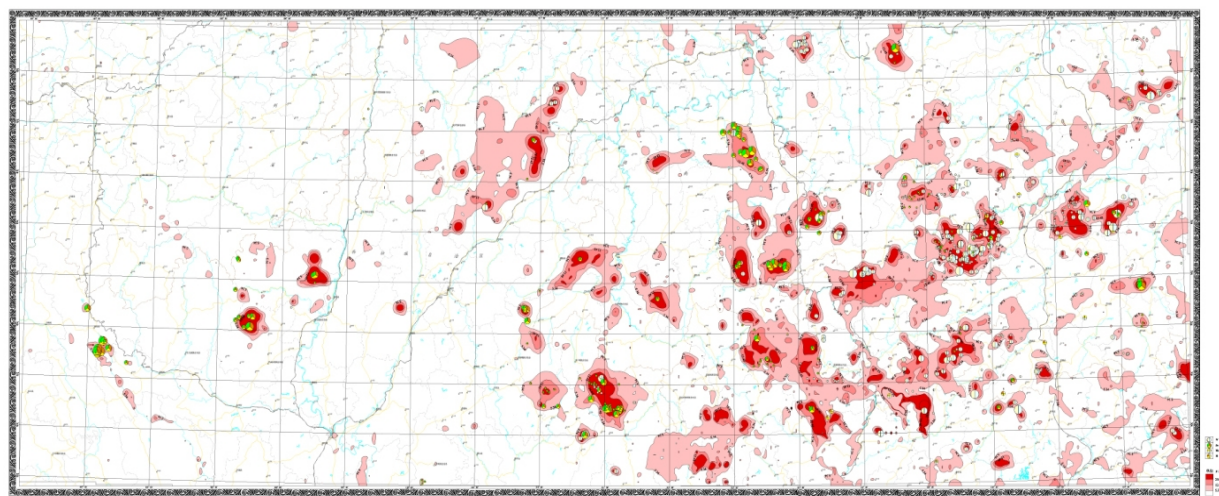


图5 南岭地区W\_Sn\_Mo\_Bi地球化学组合异常图

Fig. 5 Anomaly map of combined elements of W\_Sn\_Mo\_Bi in Nanling region

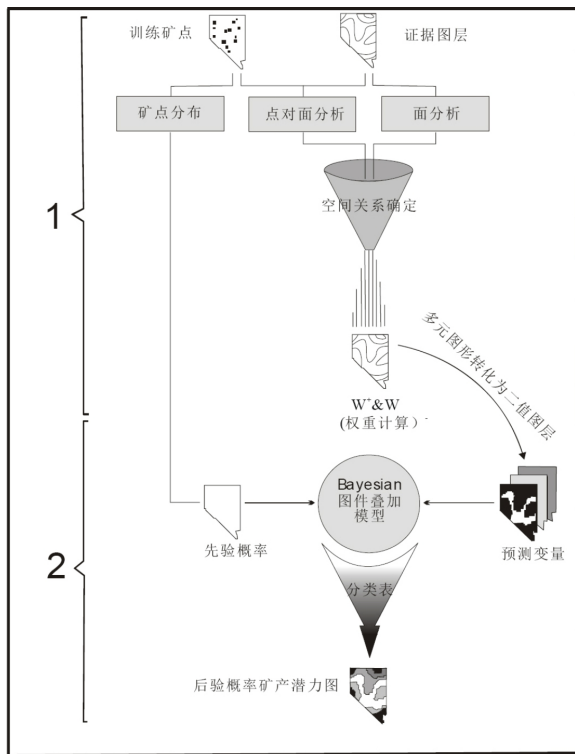


图6 证据权重法模型流程图

Fig. 6 Flow chart of weights of evidence model

矿构造系列参数证据层影响相对较小,分析原因有二:一、由于成矿后期地质构造过于复杂或构造活动太强,导致赋矿层位和矿体遭受不同程度破坏和剥蚀;二、地层以组合(或建造)形式构建的证据层,线性构造分解参数过多,降低了主要赋矿层和控矿

构造的影响。而重磁主要用来推断和验证构造和岩体等地质体,是一种间接的找矿信息,直接成矿指示作用不明显。

条件独立性检验对证据权法来说至关重要,如果地质找矿要素不满足条件独立性就会引起后验概率估计上的偏差<sup>[18]</sup>。

因此,计算后验概率前,基于 Arc-wofe 模块开展了条件独立性检验,在显著性水平为 0.02 时 13 个证据层彼此满足条件独立。

### 5 预测结果及评价

成矿远景区圈定与分级是基于后验概率临界值定的,后验概率临界值一般采用做含矿单元成矿概率值 - 累积面积对数曲线图求取。根据经验,一般视含矿单元成矿概率值 - 累积面积对数曲线变形点为成矿后验概率拐点值,即为成矿概率临界值<sup>[19]</sup>。借助 Arcview 软件,通过 Arc-Wofe 模块自动绘出后验概率值 - 累积面积关系变化曲线图 (图 7); 参考 Boleneus D E 等<sup>[20]</sup>观点,总结建立了如下 4 点确定成矿概率临界值标准:①曲线变化图中曲线自然变形点;②尽可能包含更多的已发现的成矿元素矿床;③成矿预测区应当含有较高后验概率值;④成矿预测区应当存在具有最高成矿相关度(C 值)的专题证据层。

参照上述标准,结合成矿带地质背景及成矿规

表2南岭地区钨锡多金属矿预测证据权重值

Table 2 Weight of evidence factor for W-Sn polymetallic deposits in Nanling region

序号	证据层名称	W+	W-	相关系数 (C)	先验概率
1	W 地球化学异常	3.756	-0.701	4.457	0.201975
2	Sn 地球化学异常	4.842	-0.866	5.708	
3	Mo 地球化学异常	1.449	-0.164	1.613	
4	Bi 地球化学异常	3.246	-1.101	4.347	
5	W_Sn_Mo_Bi 组合异常	4.159	-4.159	8.318	
6	剩余布格重力异常	0.038	-0.472	0.509	
7	航磁ΔT 化极异常	0.089	-0.773	0.862	
8	酸性岩体	1.253	-0.775	2.028	
9	赋矿地层	0.495	-0.156	0.651	
10	线性构造等密度	0.237	-0.237	0.474	
11	线性构造 buffer 区 (3km)	0.007	-0.057	0.064	
12	线性构造优益度	0	-0.114	0.114	
13	线性构造方位异常	0.025	-0.286	0.311	



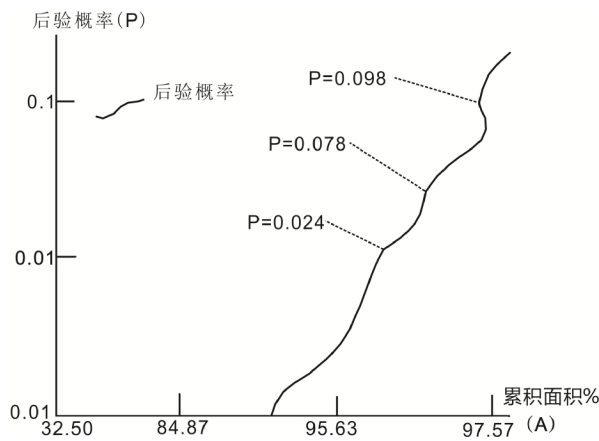


图7 后验概率值与累积面积关系变化曲线图

Fig. 7 Curve diagram of relation between Post-probability values and cumulative area

律, 本区确定了 3 个临界值:  $P = 0.024$ ,  $P = 0.078$  和  $P = 0.098$ , 按临界值大小划分 4 个区域, 划分标准为:  $P < 0.024$  为非成矿区域、 $0.024 < P < 0.078$  为可能成矿区三级远景区、 $0.078 < P < 0.098$  为可能成矿区二级远景区、 $P > 0.098$  为有利成矿区一级远景区, 见表 3。按求取的后验概率临界值, 圈定一级远景区 41 个、二级远景区 70 个和三级远景区 85 个。最终, 按成矿带构造特征、岩浆活动、地层岩性和成矿特征, 将 196 个远景区整合为 10 个潜在成矿区域 (I ~ X), 并编制了南岭成矿带钨锡多金属成矿远景区预测图 (图 8)。

表 3 后验概率临界值及远景区分级

Table 3 Critical value of post-probability and classification of prospect

成矿远景区	后验概率值 (x)
一级	$x > 0.098$
二级	$0.078 < x < 0.098$
三级	$0.024 < x < 0.078$

从成矿带面积分配来看, 有利成矿区占全区面积的 3.75%、可能成矿区 ( $0.024 < P < 0.098$ ) 占全区面积的 0.06%, 而非成矿区域占全区面积的 96.19%。

从矿床数量统计数据来看, 共有 571 个 W、Sn、Mo、Bi 矿床 (点) 落入可能成矿预测区, 占总矿床 (点) 数的 86%。其中: 一级远景区内分布 168 个矿床 (点)、二级远景区内分布 277 个矿床 (点)、三级远景区内分布 126 个矿床 (点)。

因此, 根据矿床 (点) 空间分布特征、区域面积分配与成矿概率关系判断表明, 基于证据权法的钨锡多金属成矿预测结果是可行的。

## 6 结论与问题

(1) 利用地质、物化探资料, 通过数据处理、分析及推断, 提取了南岭地区钨锡多金属矿的重要控

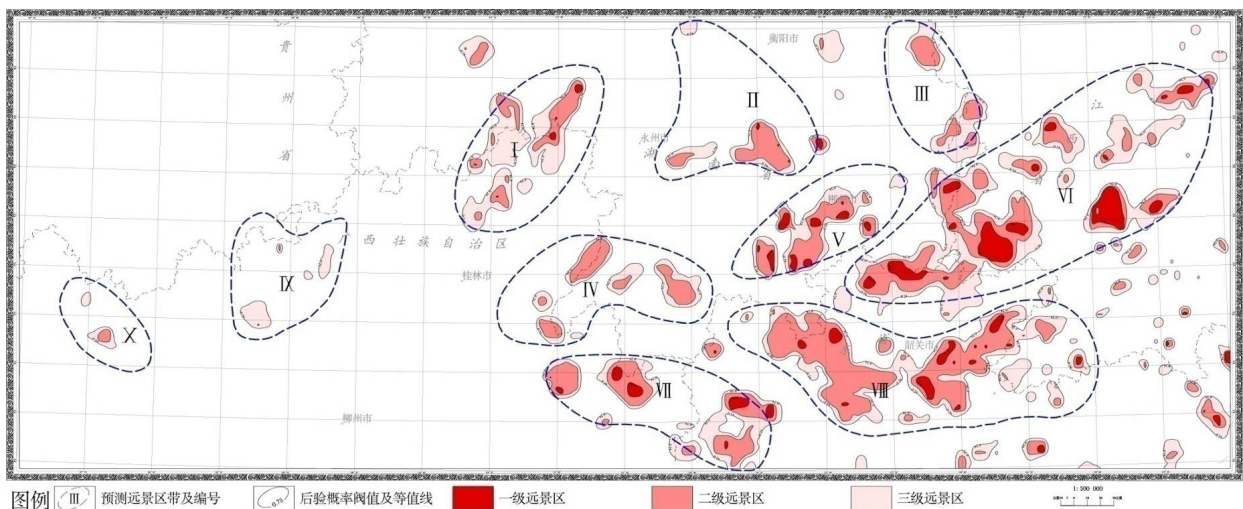


图8 南岭地区钨锡成矿预测图

Fig.8 Prognostic map of W-Sn polymetallic deposits in Nanling region



矿要素。基于成矿耦合分析与异常提取,依据单位矿产当量指标优选并构建了找矿要素有效证据层。采用证据权法开展了南岭地区钨锡多金属矿定量预测与评价,圈定并分级找矿远景区 196 个,经初步检验预测结果基本可行。

(2)基于 GIS 平台的多元信息集成与证据层权重预测,不仅数据集成度高、综合性强,而且主次突出、成果表达上可视性强;与传统人工预测相比具有更客观、更准确、更高效优势,是今后开展矿产资源快速预测和评价的重要方向。

(3)后验概率临界值还是一个基于数理统计法得出的经验值,其与成矿内在关联性不明,还有待进一步的机理研究。

#### 参考文献:

- [1] 毛景文,谢桂青,郭春丽,陈毓川.南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用:成矿时限及地球动力学背景[J].岩石学报, 2007,23(10):2329-2338.
- [2] 付建明,程顺波,卢友月,马丽艳.南岭地区钨锡多金属矿成矿规律及找矿方向 [J]. 地球科学进展,2012,27 (增刊): 162-165.
- [3] 魏道芳,潘仲芳,金光富.南岭锡矿调查评价主要进展及找矿前景分析[J].华南地质与矿产,2005,(2):2-11.
- [4] Bonham-Carter G F, Agterberg F P and Wright D F. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential [A]. Statistical Applications in the Earth Sciences [C]. Geological Survey of Canada, 1989: 89-9, 171-183.
- [5] 陈建平,王功文,侯昌波,唐菊兴.基于GIS技术的西南三江北段矿产资源定量预测与评价[J].矿床地质, 2005,24( 1): 15-24.
- [6] 丁清峰,孙丰月.基于专家证据权重法的成矿远景区划与评价以东昆仑地区金矿为例[J].地质科技情报, 2006,25(1):41-46.
- [7] 池顺都,周顺平,吴新林.GIS支持下的地质异常分析及金属矿产经验预测 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1997,22(1):99-103.
- [8] 付建明,徐德明,杨晓君,马丽艳,等.南岭锡矿[M].武汉:中国地质大学出版社,2011:11-14.
- [9] 陆庆岚.南岭及邻区深部构造与钨矿分布[J].河北地质学院学报, 1993,16(4):333-344.
- [10] 赵不亿,秦小光.遥感构造的定量分析方法[J].地质科技情报, 1988,7(1):127-136.
- [11] 朱建东,池顺都.新疆阿舍勒铜矿GIS预测时的找矿有利度和空间相关性分析[J].地质与勘探, 2006,42(2):60-64.
- [12] 王永立.天津北部山区遥感找矿信息提取及找矿远景分析[J].地质调查与研究, 2012,35(3):229-235.
- [13] 席斌斌,张德会,周利敏,张文淮,王成.江西省全南县大吉山钨矿成矿流体演化特征 [J]. 地质学报, 2008,82(7): 956-966.
- [14] 程顺波,付建明,马丽艳,卢友月.南岭地区成钨、成锡花岗岩组合的几个判别标志 [J]. 华南地质与矿产,2014,30(4):352-360.
- [15] 赵希刚,吴汉宁,柏冠军,王靖华.重磁异常解释断裂构造的处理方法及图示技术 [J]. 地球物理学进展, 2008,23(2):414-421.
- [16] 翟裕生,姚书振,崔彬,程小久,秦长兴,金伟.成矿系列研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1995:59-71.
- [17] 蒋小芳.川滇黔地区玄武岩铜矿资源评价(学位论文)[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2006.
- [18] 刘世翔,薛林福,鄯瑞卿,张旭东,孟庆龙.基于GIS的证据权重法在黑龙江省西北部金矿成矿预测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008,37(5):889-894.
- [19] 严冰,阳正熙,王小春.基于Arc-Wofe系统的证据权法在层控型铅锌成矿预测中的应用[J]. 新疆地质, 2005,23(3): 300-303.
- [20] Holeneus D E, Raines G L, Causey J D, Bookstrom A A, Frost P T and Hyndman P C. Assessment method for epithermal gold deposits in northeast Washington State: Using weights of evidence GIS modeling [M]. U.S. Geological Survey, 2001:30-39.