

文章编号 10258-7106(2008)05-0647-08

证据权重法在张家口地区铅锌银富集区 定量评价中的应用^{*}

李随民¹ 姚书振² 韩玉丑³ 郝华金³ 陈树清³

(1 石家庄经济学院资源学院, 河北 石家庄 050031; 2 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074;
3 河北省地质矿产勘查开发局, 河北 石家庄 050081)

摘 要 文章以张家口铅锌银多金属富集区为例, 在前人研究的基础上, 运用 GIS 平台提取了与成矿关系密切的赋矿层位、岩体 5 km 缓冲区、深大断裂 3 km 和次级断裂 1 km 的复合缓冲区及化探、物探异常等证据图层, 选用证据权重法模型对研究区进行了成矿远景区分析和评价, 取得了较好效果, 并讨论了预测过程中信息提取时应注意的问题。

关键词 数学地质, 证据权重法, GIS, 远景评价, 铅锌银多金属矿床, 张家口地区

中图分类号: P628

文献标志码: A

Application of weights of evidence method to quantitative prognosis and evaluation of mineral resources in Zhangjiakou area, Hebei Province

LI SuiMin¹, YAO ShuZhen², HAN YuChou³, HAO HuaJin³ and CHEN ShuQing³

(1 Shijiazhuang College of Economy, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3 Hebei Bureau of Exploration and Development of Geology and Mineral Resources, Shijiazhuang 050081, Hebei, China)

Abstract

Based on the lead-zinc-silver metallogenic regularity of Zhangjiakou area in Hebei Province, the authors studied strata, buffering zone of magma and faults, and geochemical and geophysical anomaly zones by using geographic information system software. Through an analysis of integrated evidence factors through evidence weight, the authors finally completed ore-prospecting target prognosis of the study area and also discussed some problems concerning the extraction of ore-controlling information in the prognostic process.

key words: mathematical geology, weights of evidence method, GIS, prospective evaluation, lead-zinc-silver-polymetallic deposit, Zhangjiakou area

证据权重法是加拿大数学地质学家 Agterberg (1990) 提出的基于二值图像的一种地学统计方法, 该方法作为一种预测模型, 在矿产资源预测中已有很多被成功应用的实例(韩绍阳等, 2002; 陈建平等, 2005; 严冰等, 2005; 杨茂森等, 2005; 丁清峰等, 2006)。为了使证据权重法被更多的地质工作者使用, 加拿大的 Kemp^① 在 Arc View 平台上用 Avenue 语言编写了证据权重法扩展模块(WofE Extension

^{*} 本文得到河北省地质矿产勘查开发局博士后工作站“河北张家口北部铅锌银多金属矿床成矿规律及找矿方向研究”项目的资助

第一作者简介 李随民, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 主要从事矿床学和地学信息处理的研究。E-mail: smli71@163.com

收稿日期 2007-10-12; 改回日期 2008-04-14。许德焕编辑。

① Kemp L D, Bonham-Carter G F and Raines G L. 1999; 2000. Arc-WofE: Arcview extension for weights of evidence mapping. 网上资料. <http://www.ige.unicamp.br/wofe/> 和 <http://www.ige.unicamp.br/sdm/>

和 ARCSDM),使得地质工作者在地理信息系统(GIS)平台中利用证据权重法进行成矿远景区预测工作成为可能。张家口地区是河北省重要的铅锌银多金属矿富集区,已发现有蔡家营、青羊沟等大-中型铅锌矿床和众多的小型铅锌矿床。该地区地质资料丰富,研究程度较高,具备了进行成矿远景区定量预测的前提和数据资料基础。本文在对区域成矿规律和控矿要素认识的基础上,分别提取了与成矿关系密切的地质和物探、化探证据层,在 GIS 平台中应用证据权重法对成矿远景区进行了评价和预测,取得了理想的效果。

1 区域地质概况

张家口地区位于华北地台北缘,区内主要包括 2 个Ⅱ级构造单元,即内蒙地轴和燕山台褶带,两者以 EW 向尚义—赤城深大断裂带为界。该断裂带的南侧为燕山台褶带,是张家口地区金矿的主要富集区,只在中元古界蓟县系盖层中发现有少量铅锌矿床(点),其成因主要为与岩浆活动有关的接触交代型。该断裂带的北侧为内蒙地轴,是目前张家口地区已发现铅锌矿床(点)的主要富集区,分布有蔡家营、兰沟、彭家沟、三道沟、青羊沟等大、中、小型铅锌矿床。

内蒙地轴由广泛分布的古元古界红旗营子群构成结晶基底,除其西部有一片元古界化德群沉积外,其他地区缺失中元古界至古生界沉积。由于受北部内蒙—大兴安岭海西地槽褶皱回返的强烈影响,在该区产生了较强烈的海西期岩浆侵入活动,局部还波及到燕山台褶带的北缘。至燕山期,该区又发生强烈的构造活动,以断裂为主,褶皱次之,岩浆活动剧烈。前人研究(王金锁,1997;毛德宝等,2001;胡小蝶等,2005)认为,内蒙地轴内铅锌矿床的成矿物质主要来源于古老变质基底,成矿期主要为燕山期。

2 控矿因素提取

将收集到的 1:25 万张家口地区地质矿产图、构造纲要图和物探、化探异常图等资料进行坐标配准入库。由前述地质背景可知,研究区北部内蒙地轴中的铅锌矿主要赋存在古元古界红旗营子群变质结晶基底内,而南部燕山台褶带中的铅锌矿主要赋存在元古界由碳酸盐岩地层组成的盖层内。赋存在不同时代地层中的铅锌矿均与燕山期酸性岩体及构造

关系密切(图 1)。因此,在进行本次成矿远景区预测时,分别考虑了地层、岩浆岩、断裂 3 个地质因素和物、化探异常对铅锌矿的控制作用。在证据权重法中,控矿地质因素(证据因子)与矿床(点)产出状态之间关联性的强弱,可通过其正、负权重差值的大小来度量(Agterberg et al., 1990;1999),即:

$$C_j = W_j^+ - W_j^-$$

其中, C_j 为相关程度值, $j = 1, 2, 3, \dots, n_0$ 。

$$W_j^k = \begin{cases} W_j^+ & \text{证据因子 } j \text{ 存在时的权重;} \\ W_j^- & \text{证据因子 } j \text{ 不存在时的权重;} \\ 0 & \text{证据因子 } j \text{ 数据缺失时的权重。} \end{cases}$$

其中, k 表示证据因子存在(+)和不存在(-), $j = 1, 2, 3, \dots, n_0$ 。

C_j 值大,表示该地质标志的找矿指示性好, C_j 值小,表示该找矿标志的找矿指示性差,若 $C_j = 0$,则表示该找矿标志对有矿与无矿无指示意义; $C_j > 0$,表示该找矿标志的存在有利于成矿, $C_j < 0$,则表示该找矿标志的存在不利于成矿。Agterberg 等(1990)认为, C_j 还可以用来确定线性控矿地质因素(如控矿断裂)周围缓冲区的最优宽度。

2.1 赋矿层位

运用点对面叠加功能,选取了铅锌银多金属矿赋存层位,结果表明,张家口地区的铅锌矿主要赋存在古元古界红旗营子群、中元古界长城系和蓟县系以及侏罗系的火山地层中。在地层主题属性表中增加一个 Value 字段,设置所有赋矿地层的 Value = 2,其余地层的 Value = 1。将矢量类型地层主题转换为栅格类型,在转换过程中,选择栅格主题的属性字段为 Value。按本次研究的需要,在所有矢量型证据层转换时,将栅格单元的大小设定为 5 km × 5 km。

2.2 岩体外接触带

以往的研究表明,研究区内铅锌银矿与燕山期岩浆活动关系密切(王金锁,1997;毛德宝等,2001;胡小蝶等,2005)。为定量计算岩体对铅锌矿的影响范围,对检索出的岩浆岩主题按 1 km 距离作缓冲区分析,结果表明,在 1 km 和 5 km 处分别出现较高的相关程度值(表 1)。据进一步分析得知,在岩体 1 km 缓冲范围内出现的 11 个铅锌矿床(点)中,有 10 个分布于研究区南部的燕山台褶带内,主要赋存在中元古界长城系和蓟县系碳酸盐岩地层与中酸性岩体的接触部位;其北部内蒙地轴中的铅锌矿在成因上与燕山期岩浆活动也关系密切,但矿体多产于古元古界红旗营子群或侏罗纪的火山地层中,与岩体

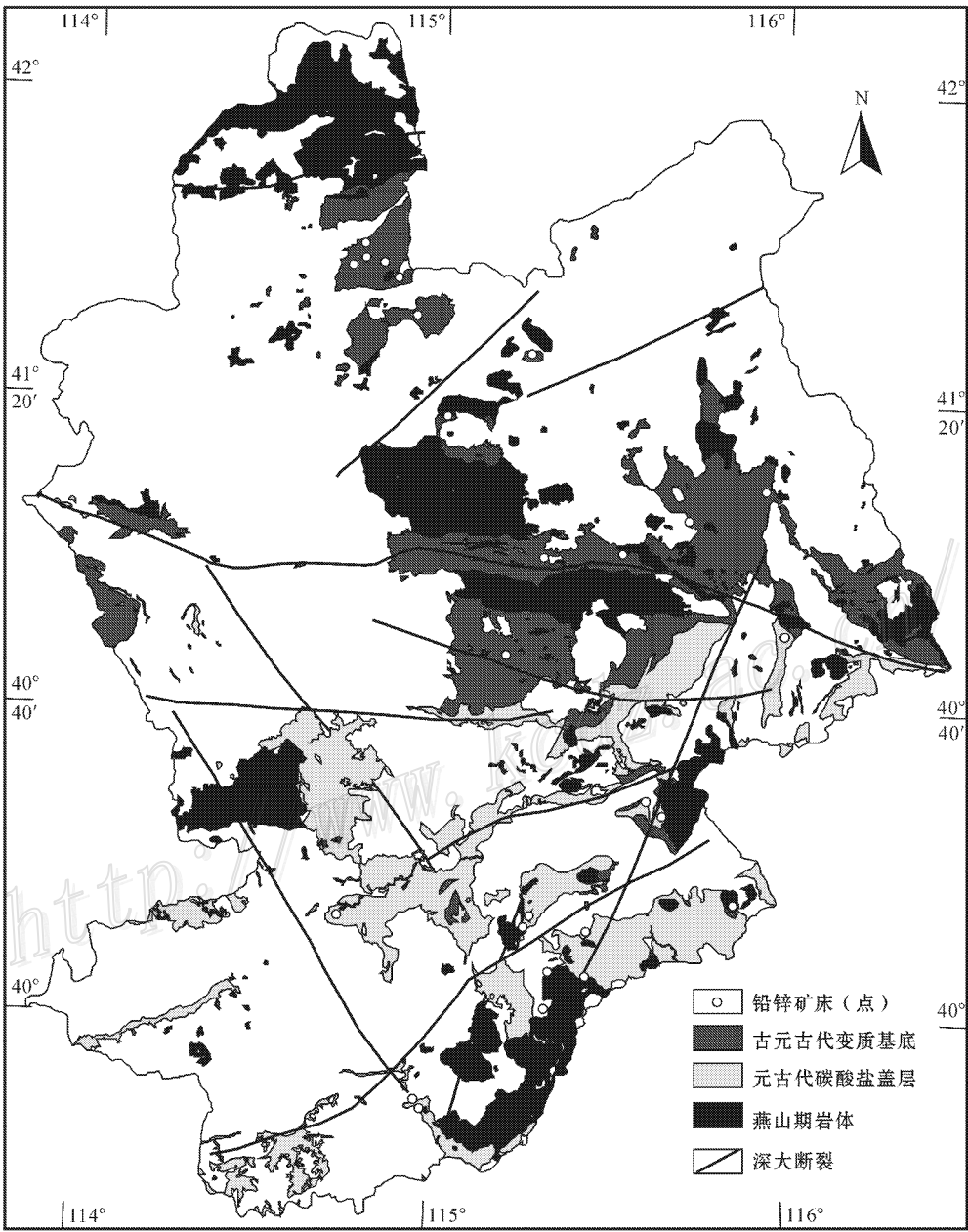


图 1 研究区地质构造略图

Fig. 1 Geological and structural sketch map of the study area

有一段距离,在成矿过程中,岩体提供了热源和矿源。经综合分析,笔者认为,选择岩体 5 km 缓冲区较为合理,可充分考虑与成矿关系密切的所有岩体。

2.3 断裂级次及影响范围

张家口地区深大断裂的形成时间较早,活动时间很长,切割深,规模大,在很大程度上控制着大地构造单元的界限和岩浆岩带的展布,在成矿作用过程中是矿液运移的通道,起到了导矿作用。而次级断裂是由深部构造在活动中派生的规模较小的破碎

带和裂隙,大多沿着一定方向的构造带分布而形成矿带,起到了赋存矿带或矿体的作用。因此,不同级次的断裂对矿体的控制程度是不同的。

提取研究区内已知的 12 条深大断裂(图 1)进行缓冲分析,结果表明,在 3 km 处,相关程度最大(为 1.7425),其余地段与矿床(点)的相关程度均较小(表 2)。对研究区内深大断裂之外的其余次级断裂作缓冲区分析,发现仅在 1 km 处出现最大的相关程度值,其余地段的相关程度值均很小。这与上述地

表 1 岩体不同缓冲半径与矿床(点)的相关程度							
Table 1 Correlation between different buffer distance of rock mass and ore deposits							
缓冲半径/km	矿床(点)数	积累 W^+	W^+ 标准差	积累 W^-	W^- 标准差	C(相关程度)	C 标准差
1	11	0.9240	0.3081	-0.3662	0.2598	1.2902*	0.4030
2	2	0.1978	0.7146	-0.0148	0.2059	0.2126	0.7437
3	2	0.0019	0.7133	-0.0002	0.2059	0.0021	0.7424
4	2	0.1763	0.7144	-0.0134	0.2059	0.1897	0.7435
5	5	0.9492	0.4572	-0.1362	0.2199	1.0854*	0.5073
6	1	-0.3908	1.0059	0.0193	0.2018	-0.4102	1.0259
7	0						
8	0						
9	2	0.4664	0.7169	-0.0306	0.2058	0.4969	0.7459
10	0						

* 表示最大相关程度 C 值的位置。

表 2 深大断裂与矿床(点)的相关程度							
Table 2 Correlation between deep faults and ore deposits							
缓冲半径/km	矿床(点)数	积累 W^+	W^+ 标准差	积累 W^-	W^- 标准差	C(相关程度)	C 标准差
1	2	-0.3019	0.7118	0.0298	0.2060	-0.3317	0.7410
2	2	0.2756	0.7154	-0.0199	0.2059	0.2954	0.7444
3	7	1.4914	0.3927	-0.2511	0.2310	1.7425*	0.4556
4	1	-0.3733	1.0061	0.0183	0.2018	-0.3916	1.0262
5	3	0.5399	0.5861	-0.0530	0.2103	0.5929	0.6227
6	0						
7	1	-0.2141	1.0072	0.0096	0.2018	-0.2237	1.0272
8	1	-0.2664	1.0068	0.0123	0.2018	-0.2787	1.0268
9	0						
10	1	-0.0597	1.0084	0.0025	0.2018	-0.0621	1.0284

* 表示最大相关程度 C 值的位置。

质认识相吻合,即:派生的次级断裂起到了赋矿、储矿空间的作用,因此,对矿体的影响距离较近;而深大断裂在成矿过程中是良好的导矿构造,离矿体较远,因此,在 3 km 处相关程度值较高。

根据上述认识,本次研究所提取的断裂影响区域为:深大断裂 3 km 缓冲区与次级断裂 1 km 缓冲区的复合叠加部位。

2.4 化探异常区域

马忠社等^①分析了燕山和冀北地区 9 880 个水系沉积物数据后得出,在冀北地区,成矿元素 Au、Ag、Cu、Zn 之间具有显著的线性相关关系,相关系数在 0.73 以上。在本次研究所收集到的 Pb、Zn、Ag、Au 和 Cu 等 5 种元素的化探异常分布图上,只圈出了异常范围,而未进行异常浓度等级的区分,因此,笔者在实际应用中,将异常范围设置为成矿有利区域,异常范围以内的 Value = 2,异常范围之外的 Value = 1。绝大多数矿床(点)位于所圈定的化探异常范围内(图 2),说明所确定的化探异常区域对指示找矿效果显著。

2.5 物探异常区域

由于燕山期中酸性岩体的密度低于围岩(下元古界变质岩),在区域重力场中表现为负异常。对重力数据进行趋势分析后发现,内蒙地轴中已知的铅锌银多金属矿床(点)多分布于低值区域附近;而利用重力场数据来寻找赋存于南部燕山台褶带碳酸盐岩盖层中的铅锌矿,则效果较差(图 2),这是由于碳酸盐岩地层的密度低于基底变质岩石,而与中酸性侵入体的密度大致相当。因此,凡由岩浆岩引起的重力低及边部梯度带,对指示找矿有利,而由盖层引起的重力低及边部梯度带,对找矿的指示性则较差。花岗岩类为低缓的航磁异常,其平面形态多呈椭圆状,梯度变化缓,对找矿的指示有一些效果。

根据已知矿床(点)及重力场数据,在 GIS 平台中运用叠加分析,计算出重力场的有利成矿标志区分别为:重力值 $(-60 \sim -64) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ $(-72 \sim -94) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ $(-108 \sim -132) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

航磁异常数据的处理方法与重力数据相似,运用叠加分析,计算出航磁的有利成矿标志区为 0 nT,

① 马忠社等. 1995. 河北省金银多金属遥感综合信息成矿预测报告. 25~33. 内部资料.

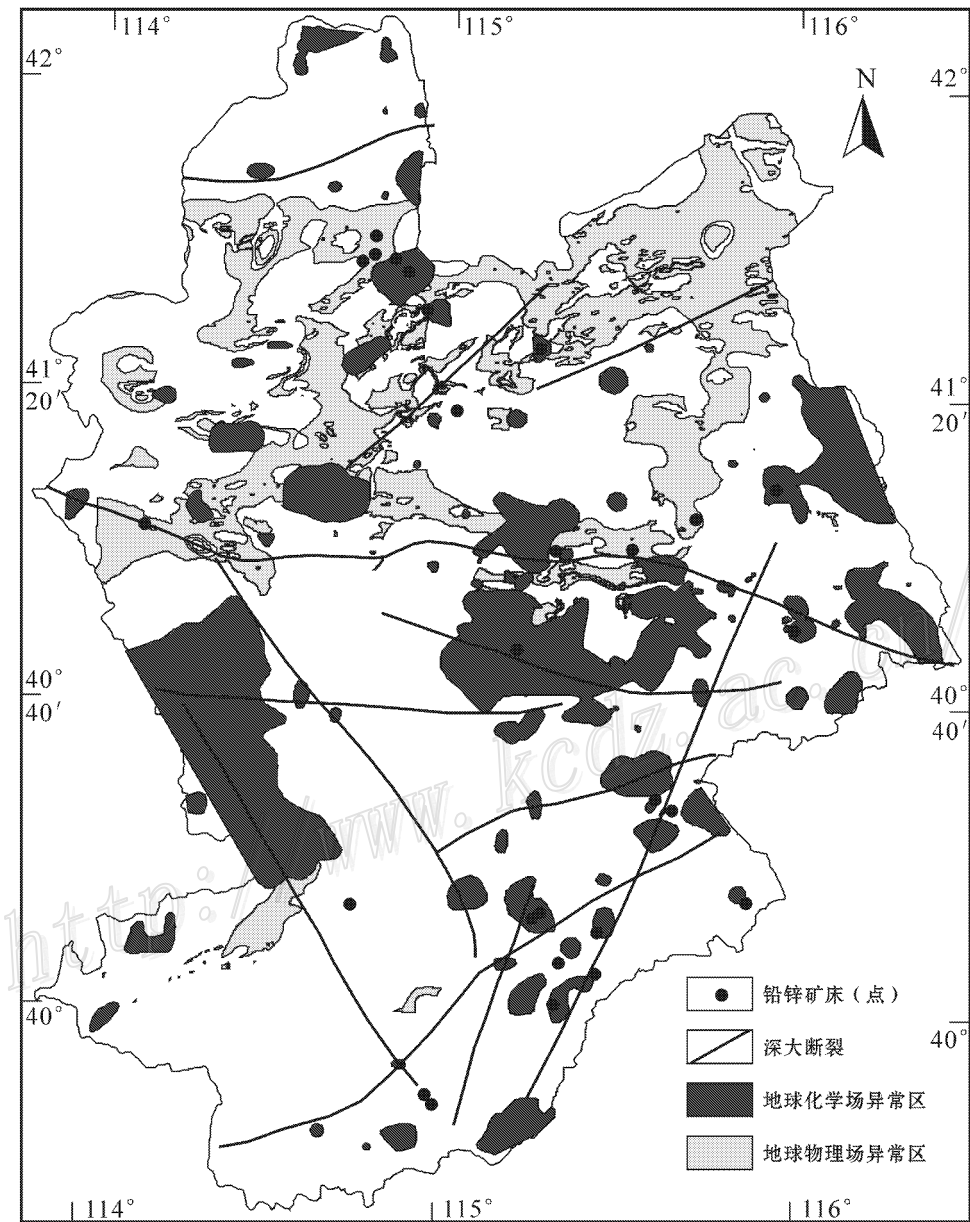


图 2 研究区物、化探异常综合图

Fig. 2 Geophysical and geochemical composite anomaly map of the study area

- 50 ~ - 200 nT , 150 ~ 200 nT。

3 实现过程及结果评价

将研究区范围按 5 km×5 km 网格单元进行了划分,共计有 1 514 个网格单元。在 GIS 平台中对上述提取的证据层进行条件独立性检验(Agterberg et al. , 2002),结果表明 ,Zn 与 Pb、Ag 的相关性较大 ,未通过条件独立性检验 ,其余各证据层均通过相关性检验。因此 ,本次预测时去掉了 Zn 元素异常图

层 ,选取了 Pb、Ag、Au、Cu 4 种元素异常图层和赋矿层位、岩浆岩 5 km 缓冲区域、断裂复合缓冲区域(将主干断裂 3 km 区域和次级断裂 1 km 区域进行叠加形成一个图层)及重力、航磁异常分布区等 9 个证据图层。在独立性检验前后 ,找矿标志组合模型无明显变化 ,只是对相关性较强的 Zn、Pb、Ag、Au、Cu 5 种元素进行了重组 ,去掉了 Zn 异常层 ,其他证据图层未发生改变。

运用通过条件独立性检验后的证据因子 ,计算出各自的正、负权重(表 3)。

表 3 各证据因子正、负权重参数
Table 3 Weight values of evidence layers

证据层	W1	W2	C	C 的司都顿统计量
Pb	-0.2206	1.9944	2.2151	4.5481
Ag	-0.5171	1.3064	1.8235	4.6426
Au	-0.0236	0.9116	0.9352	0.8982
Cu	-0.0495	0.3274	0.377	0.6856
赋矿地层	-1.2432	0.885	2.1282	4.251
岩体	-1.1973	0.5451	1.7424	3.191
断裂缓冲区	-0.4774	0.6724	1.1498	2.9366
重力	-1.12	0.1979	1.3179	1.781
航磁	-0.4608	0.0522	0.513	0.6915

注 断裂缓冲区是指主干断裂 3 km 区域与次级断裂 1 km 区域叠加的复合缓冲区。

W1 表示证据缺失情况下的证据层权重 ;W2 表示证据图层存在时的权重 ;C 表示相关程度 ,该参数可在一定程度上说明各证据层在资源预测中的重要程度。经分析发现 ,Pb 元素异常图层、Ag 元素异常区图层、赋矿层位图层及岩浆岩 5 km 缓冲区图层的相关程度值均较大 ,这也从侧面说明 ,在张家口地区寻找铅锌银多金属矿时 ,化探异常和地层、岩浆岩等是关键找矿条件和控矿因素。此外 ,重力与铅锌矿的相关程度值也较高 ,这可能跟重力场数据与岩体之间有良好的响应有关。据此 ,计算出了研究区后验概率图(图 3)。从预测结果看 ,绝大部分已知

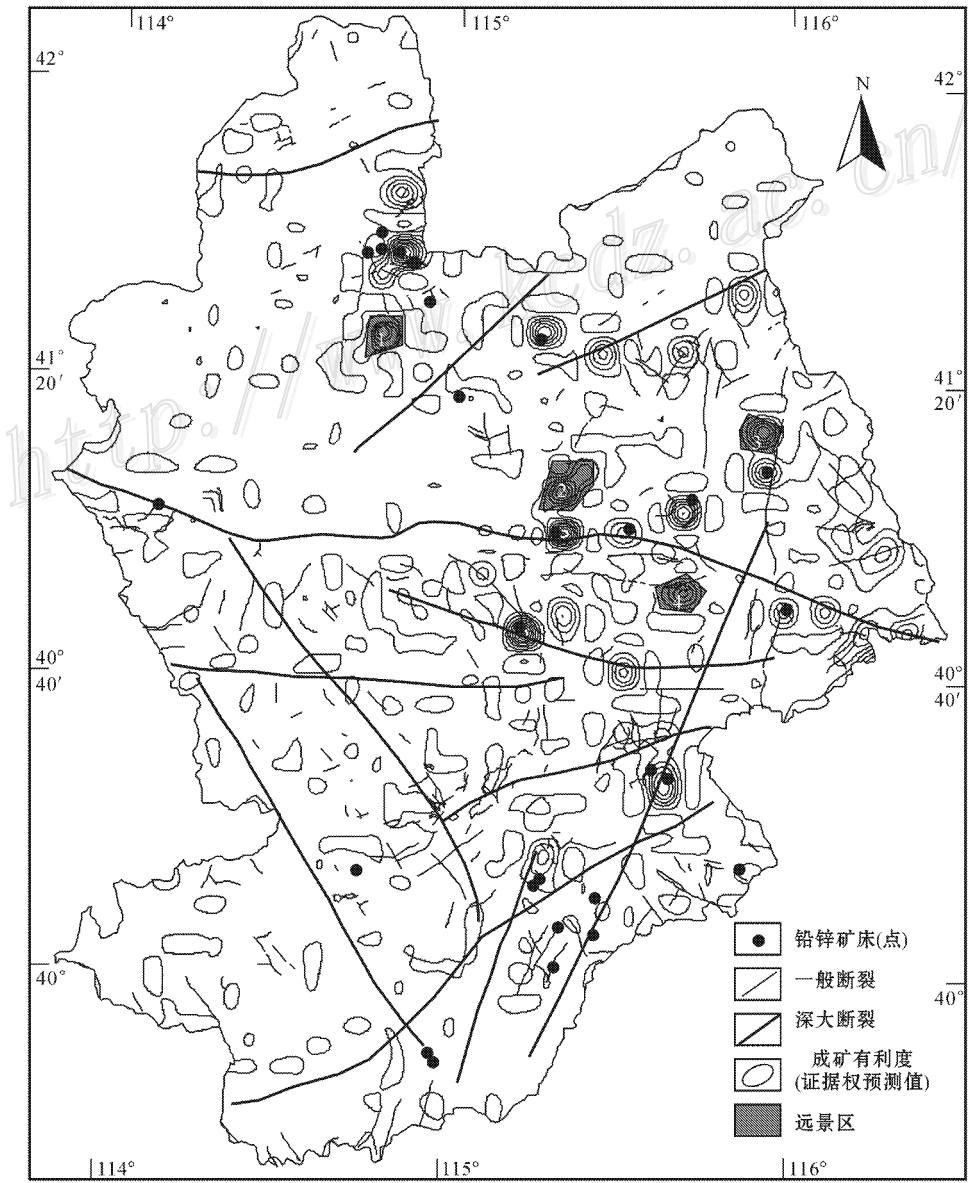


图 3 研究区证据权重法预测结果图

Fig. 3 Prognostic map of the evidence weight method of the study area

的矿床(点)都落入后验概率值较高的区域,说明预测结果可信度较高。结合地层、岩体和化探异常等控矿因素,本次研究筛选出了丁字沟、白旗-青虎沟、青羊沟北区和大岭堡北部等 4 个远景区域。其中,丁字沟靶区位于航磁异常分布区,化探异常元素以中低温元素组合为主,异常位于古元古界红旗营子群中,异常中心出现在斑状混合岩部位。白旗靶区也存在较强的航磁异常,区内有燕山期花岗斑岩、正长斑岩出露,化探异常和构造发育。其他 2 个预测靶区的成矿条件与此类似。综上所述,预测的 4 个靶区范围内的地层均为古元古界红旗营子群,且在其附近有燕山期酸性岩体(脉)和化探异常出现。因此,本次研究所圈出的后验概率较高且目前尚未发现矿床(点)的区域,可作为下一步找矿勘探的重点区域。

此外,对研究区内划分的 1 514 个网格单元的后验概率进行了统计,所得结果是,区内 80 % 左右的范围,其成矿有利度低于前验概率值(Prior Probability, 为 0.0178),也就是说,研究区内仅有 20 % 左右的范围是成矿有利区域。曲线在后验概率为 0.07 (累计面积为 90 %)处出现较明显的拐点(图 4),该值可作为用后验概率划分出成矿最有利区域的分界点。

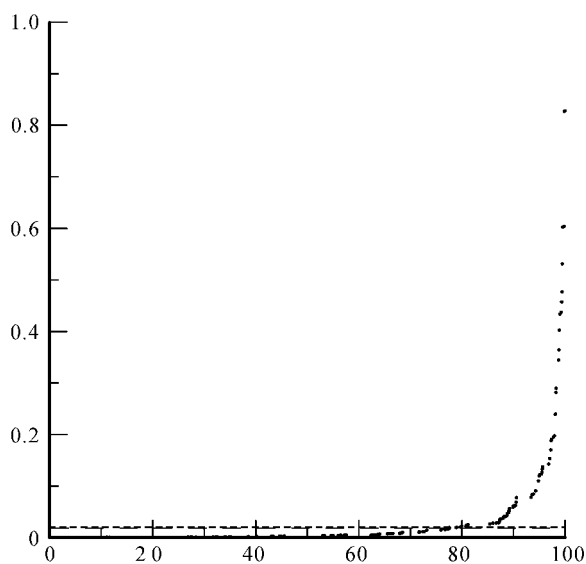


图 4 后验概率与研究区累计面积的关系(虚线对应前验概率值部位)

Fig. 4 Relationship between posterior probability and cumulative area of the study area

4 讨 论

(1) 控矿信息的提取要以区域成矿规律认识为前提和基础。前人的大量研究表明,研究区内的铅锌矿与构造关系密切,但不同的构造级次对矿的控制作用也不相同,因此,本次研究按一级深大断裂和次级断裂分别构造了缓冲区域,所获的信息为,深大断裂 3 km 缓冲区及次级断裂 1 km 缓冲区与铅锌矿的关系最为密切,用其复合缓冲区域作为证据图层,使得证据层的选择与实际地质情况相吻合。

(2) 证据层与矿床(点)之间的相关程度值可用来确定线性控矿地质因素缓冲区的最优宽度,但在具体确定时,应结合区域成矿规律和前人研究成果。岩体的缓冲区在 1 km 和 5 km 处分别出现较高的相关程度值,结合研究区已知矿床成因类型和区域成矿规律,笔者认为,岩体 1 km 缓冲区反映了接触交代型矿床的有利部位,而 5 km 缓冲区则可充分考虑与成矿关系密切的所有岩体。

(3) 研究区内已知产有蔡家营大型铅锌矿床、青羊沟中型铅锌矿床,但在证据权重模型预测时,所有已知矿床(点)仅作为出现矿产地的栅格单元进入模型,而不考虑矿床规模的大小,该缺陷在一定程度上影响了预测精度。

志 谢 本文在撰写过程中得到了河北省地质调查院马忠社高工的帮助和指导,在此表示感谢!

References

- Agterberg F P and Bonham-Carter G F. 1990. Weights of evidence: An new approach to mapping mineral potential, statistical applications in the earth sciences[C]. Canada: Geological Survey of Canada. 171-183.
- Agterberg F P and Bonham-Carter G F. 1999. Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration[A]. In: Proc. 28th Intern. Symp. Computer Applications in the Mineral Industries[C]. Golden, Colorado. 483-490.
- Agterberg F P, Bonham-Carter G F, Cheng Q M and Wright D F. 1993. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral potential mapping[A]. In: Davis J C and Herzfeld U C, ed. Computers in geology: 25 years of progress[C]. New York: Oxford University Press. 13-32.
- Agterberg F P and Cheng Q M. 2002. Conditional independence test for weights-of-evidence modeling[J]. Natural Resources Research, 11 (4): 249-255.

- Chen J P, Wang G W, Hou C B and Tang J X. 2005. Quantitative prediction and evaluation of mineral resources based on GIS in northern segment of Three River (Sanjiang) Region, Southwest China[J]. Mineral Deposit, 24(1): 15-24 (in Chinese with English abstract).
- Ding Q F and Sun F Y. 2006. Delineation and assessment of deposit prospect based on expert weights of evidence: An example from gold deposits in eastern Kunlun Mountain area[J]. Geological Science and Technology Information, 25(1): 41-46 (in Chinese with English abstract).
- Han S Y, Hou H Q and Huang S T. 2002. The application of the evidence weighting method based on arcview 3.2 to the quantitative evaluation of the interlayer oxidation zone sandstone uranium deposits[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 26(6): 443-449 (in Chinese with English abstract).
- Hu X D, Shen B F, Mao D B and Zhong C T. 2005. On metallogeny of the Caijiaying Pb-Zn deposit[J]. Geological Survey and Research, 28(4): 221-227 (in Chinese with English abstract).
- Mao D B, Zhong C T, Chen Z H and Hu X D. 2001. Pb isotope characteristics of Pb-Zn(Ag) deposits in the middle north margin of North China Block: Constraints on source process[J]. Progress in Precambrian Research, 24(4): 193-200 (in Chinese with English abstract).
- Wang J S. 1997. Metallo-geological conditions of silver deposits in the northwestern part of Hebei Province[J]. Jour. Geol. and Min. Res. of North China, 12(1): 85-94 (in Chinese with English abstract).
- Yan B, Yang Z X and Wang X C. 2005. Applying the Arc-Wofe system to predict the potential for stratabound Pb-Zn[J]. Xinjiang Geology, 23(3): 300-303 (in Chinese with English abstract).
- Yang M S, Li Q H and Yang H W. 2005. Application of the evidence weight method to the prognosis of mineral resources in Jiaodong gold ore concentration area[J]. Acta Geoscientia Sinica, 26(5): 487-491 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈建平, 王功文, 侯昌波, 唐菊兴. 2005. 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, 24(1): 15-24.
- 丁清峰, 孙丰月. 2006. 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, 25(1): 41-46.
- 韩绍阳, 侯惠群, 黄树桃. 2002. 基于 ArcView 3.2 的证据权重法在层间氧化带型砂岩铀矿定量评价中的应用[J]. 物探与化探, 26(6): 443-449.
- 胡小蝶, 沈保丰, 毛德宝, 钟长汀. 2005. 冀北蔡家营铅锌矿床成因探讨[J]. 地质调查与研究, 28(4): 221-227.
- 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 胡小蝶. 2001. 铅同位素特征对成矿物质来源的制约——以华北地块北缘中段铅锌银矿床为例[J]. 前寒武纪研究进展, 24(4): 193-200.
- 王金锁. 1997. 冀北西部银矿成矿地质条件[J]. 华北地质矿产杂志, 12(1): 85-94.
- 严冰, 阳正熙, 王小春. 2005. 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, 23(3): 300-303.
- 杨茂森, 黎清华, 杨海巍. 2005. GIS 支持下的证据权法在胶东金矿集中区预测中的应用[J]. 地球学报, 26(5): 487-491.