

基于模糊逻辑法的冀西北地区 铅锌银多金属矿定位预测

李随民¹ 姚书振² 韩玉丑³ 郝华金³ 陈树清³ 李永峰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:模糊逻辑空间决策模型在变量取值上不是采用二态法将研究区分为成矿有利区和成矿不利区两部分,而是根据地质数据的规律取连续变化的隶属度赋值,有效避免了有用地质信息的丢失。笔者在 GIS 平台上利用 Arc-SDM 模块对冀西北地区的地质、地球化学、地球物理等资料进行了处理,利用证据权法进行了线缓冲形成的证据层与矿床(点)之间的亲近度分析,在此基础上采用列表法对原始地质变量进行了直观模糊隶属度赋值。模糊逻辑的预测结果表明,在圈出的仅占研究区面积 13.2%的靶区范围内有 85%的已知矿床(点)出现,与已知矿床(点)吻合程度高,预测效果理想,其结果可用于指导下一步找矿工作。

关键词:模糊逻辑;冀西北;定位预测;铅锌矿床

中图分类号:P618.42-43;P618.52

文献标志码:A

文章编号:1000-3657(2008)04-0762-08

目前在 GIS 平台上利用与成矿关系密切的地质、地球化学场、地球物理场等资料进行资源潜力评价时,多借助一些空间决策模型来实现成矿远景区或靶区圈定。近年来经过多次实践检验,模糊逻辑模型、证据权法模型、逻辑斯蒂回归模型和人工神经网络模型等空间决策模型在矿化靶区圈定中已具有一定的成熟性,被较多的使用^[1]。为使上述空间决策模型得到广泛的应用,加拿大地质调查所的 Laura Kemp 编写了基于 ArcView/ArcGIS 平台的 Arc-SDM 模块^[2]。该模块集成了上述 4 种资源预测方法。其中,证据权法、逻辑斯蒂回归和人工神经网络法模型均采用“唯一条件组”数据模型。该数据模型的基本思路是:将所有网格单元不同变量相同的逻辑组合加以合并,这些单元被归并为同一个“唯一条件组”,所有的唯一条件组构成该数据模型。建立唯一条件组数据模型的目的一方面是为了提取有效的规

则,另一方面也是为了减少计算工作量。每一个唯一条件组加上目标变量都可以写成一条规则。通过唯一条件组的模型建立,全部规则清晰可见。唯一条件表中的图层不仅可以取二态值,还可以取多态值。但需注意的是证据权法中利用权重值及相关程度值(C)等参数对各证据层进行的重要性排序,证据层之间的独立性检验均是基于二态证据层的^[3-8]。

集成在 Arc-SDM 模块中的模糊逻辑空间决策模型使用的数据模型与上述不同,它使用模糊逻辑数学模型,即将原始观测值转换为隶属函数值。该方法可以避免二态赋值法的一些缺陷。这是由于对大多数地质数据来说,要将其分为截然不同的两部分:有利成矿区域(Value=1)和不利成矿区域(Value=0)是很困难的。如化探数据,一般以异常下限值作为分界点,高于该值部分的区域为成矿有利区域(Value=1),低于该值部分区域为成矿不利区域

收稿日期:2008-01-23;改回日期:2008-04-18

基金项目:河北省地勘局博士后工作站“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”项目资助。

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:sml71@163.com。

(Value=0)。而实际上从高值场到低值场对成矿的影响是一个连续过渡的渐变过程,不能将其截然分为两部分。常见的各类断裂缓冲区、岩体外缓冲区等对成矿的影响也是逐渐过渡的,也不能简单地找一个分界值(Cut off)将其分为上述两部分。因此模糊集理论可以避免地质数据中有价值的信息丢失。

此外,Arc-SDM 模块中提供的常规证据权法、逻辑斯蒂回归和人工神经网络法在远景区预测时均需一定数量的已知矿床(点),因此被较多的用于有一定已知矿床(点)数目的区域。而模糊逻辑法预测过程中不需要已知矿床(点),属于无导师学习型算法,因此可同时适用于勘查工作程度高和未勘查的地区。

模糊逻辑自 20 世纪 70 年代后期在国内外矿产资源评价领域就有着广泛的应用,但基于 GIS 的模糊逻辑应用,无论对矿产资源评价还是其他地质学领域,仍然处于初级阶段。美国地质调查所和加拿大地质调查所近年来已将模糊逻辑作为重要的矿产资源评价方法之一。如 Carranza 和 Hale(2000,2001)采用模糊逻辑推理对菲律宾斑吉奥(Baguio)地区的金矿资源进行了评价,Wright 和 Bonham-Carter(1996)对加拿大奇色尔湖—安德逊湖(Chisel Lake-Anderson Lake)海相火山岩型块状硫化物矿床的成矿有利区域应用模糊逻辑法进行了研究,取得了较好的效果。近年来,国内曹殿华^[9]、邢学文等^[10-11]运用模糊逻辑法空间决策模型对云南中甸和秦岭松潘地区的铜金成矿远景区进行了预测和评价。

笔者在分析冀西北地区地质、物化探等资料的基础上,对研究区采用模糊逻辑法进行了铅锌银成矿远景区预测,已知矿床(点)绝大部分出现在预测的高值区域,效果理想,预测结果可用于指导下一步找矿工作。

1 模糊逻辑原理及实现过程

1.1 模糊逻辑原理

模糊逻辑概念最早由美国控制论专家 Zadeh 于 1965 年提出,他将普通集合只取 0 或 1 的特征函数推广到在 $[0,1]$ 区间上连续取值的隶属函数。建立在普通集合上的布尔逻辑,任何命题只有两种取值,即逻辑真(1)或者逻辑假(0),而模糊逻辑建立在模糊集合上,命题的真实性只是一定程度的真实性,命题的取值除了真和假外,可取“0”与“1”之间的任何值

(比如 0.85),表示命题断言为真的程度(即隶属度)。

在地质学领域中,存在着大量模糊概念,如矿床赋存于断裂附近、与岩体关系密切等等。模糊概念的数学表达是模糊集合,而对模糊集合而言,其表达方式是隶属函数。由于模糊逻辑具有极大的灵活性,它能比精确的逻辑方法更多地使用地质学家的知识,从而使矿产资源评价的结果更为合理和科学。

1.2 模糊逻辑实现过程

应用模糊逻辑方法进行矿产预测时主要分为两步:①变量模糊化,即把输入变量转化为由隶属度描述的模糊集;②模糊综合,应用模糊算子对模糊化后的变量进行综合,生成预测结果图。

1.2.1 变量模糊化

该过程是把原始地质变量转换为由隶属度函数表示的模糊集。模糊集取值在 0 和 1 之间,对成矿完全有利的区域取值为 1,对成矿完全不起作用的区域取值为 0,大多数区域对成矿的贡献值介于二者之间。据此根据证据层对指示找矿作用的程度,将证据层属性表中的值划分为不同的区段。每个区段赋予不同的模糊隶属函数值。

隶属函数值的确定一般有两种方法,一是利用构造的隶属函数曲线计算,二是根据地质规律人工赋值,即采用列表的方式构造隶属函数。由于隶属函数曲线对隶属函数的取值是自动的,在有些区间的取值可能违背地质学家的意愿,而隶属函数的列表方法能充分表达地质学家的意愿,因此在矿产资源评价中,证据层各区间的隶属函数值确定较多采用列表法。李裕伟等^[12]认为主观赋值法并不是一个缺点,对于一个经验丰富的地质工作人员,主观赋值法是调动他知识的重要方式。笔者认为对于一个研究程度较高的成矿区域,根据已掌握的成矿规律进行模糊隶属度赋值,比简单利用构造隶属函数计算的效果要好,它可以充分考虑和利用已取得的知识和经验。因此本文的地质变量模糊化取值主要采取主观赋值的列表法确定。

1.2.2 模糊综合

模糊综合操作是将各模糊化的集合综合到一个集合,形成最终的预测结果图。美国地质调查所通过近年来的矿产资源评价实践,认为 5 种算子在合成地质命题方面是很实用的。这 5 种算子为模糊与(AND)、模糊或(OR)、模糊代数和、模糊代数积和模糊伽马算子(γ)。不同的推理逻辑是有差别的:逻

辑算子“OR”的使用将加大预测的靶区面积;“AND”的使用将缩小预测的靶区面积;代数和与代数积算子的情形与逻辑算子相似,代数和取值较大,而代数积取值较小; γ 算子是两种代数算子的调和,使所获得的靶区面积介于二者之间一个合适的水平。因此模糊推理网络一般由两个层次组成:第一级推理使用简单的逻辑或代数算子,第二级推理均使用 γ 算子。Arc-SDM 模块^[3]提供了这5个算子,用于将各模糊化的地质图层综合到一个集合成预测图。

2 冀西北地区铅锌银矿模糊逻辑法定位预测

2.1 冀西北铅锌银矿集区地质概况

张家口地区位于华北地台北缘中段,区内主要

包括两个Ⅱ级构造单元,即北部的内蒙地轴和南部燕山台褶带。二者以东西向尚义—赤城深大断裂带为界,南部燕山台褶带内铅锌银多金属矿床主要分布在中元古代蓟县系盖层中,成因上以与燕山期岩浆活动有关的接触交代型为主。北部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(图1),分布有蔡家营、兰阎、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,除西部有一片元古宇化德群沉积外,其他地区从中元古代至整个古生代均无沉积。受北部内蒙—大兴安岭海西地槽褶皱回返的强烈影响,该区燕山期有强烈的岩浆活动,构造以断裂为主,褶皱次之。前人研究表明内蒙地轴中的铅

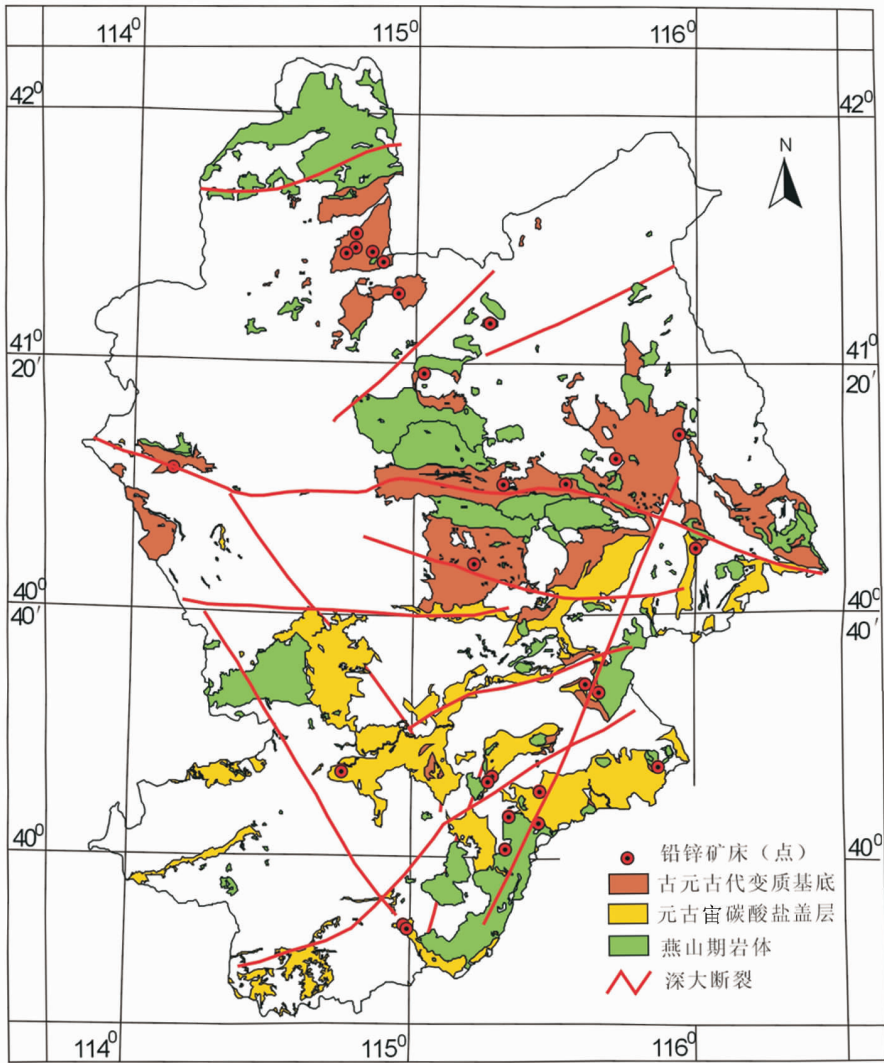


图1 研究区地质简图

Fig.1 Geological sketch map of the study area

锌矿床成矿物质主要来源于古老变质基底,成矿期主要为燕山期。

2.2 数据组织与赋值

2.2.1 预测变量选取及赋值原则

根据前人总结和分析的区内铅锌矿床成矿规律和控矿因素,本次利用模糊逻辑法进行成矿远景区预测时,选取了地层、岩浆岩、断裂和物化探异常等 5 个地质变量(证据层)。地质变量模糊隶属度值的大小本次按两种方法赋值:主观赋值的列表法和依据相关程度值和司都顿统计量来确定。其中,地层、化探异常场和物探异常场采用主观赋值的列表法确定,赋矿地层取值较高,其余地层取值低。物化探中心取值高,按距已知矿床距离的远近,不同的异常场区间赋不同的隶属度值。断裂和岩浆岩的隶属度值主要反映了不同的缓冲范围对铅锌矿的影响不同。由于在证据权重法中,控矿地质因素与矿床(点)产出状态之间的关联性强弱,可以通过其正负权重之差的相关程度值(C)来度量,即:

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

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 $C_j = 0$, 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; $C_j < 0$ 表示该找矿标志的存在不利于成矿。Agterberg 和 Bonham Carter 等认为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。因此本文中断裂与岩体边界不同缓冲距离与已知矿床(点)之间的隶属度值采用证据权法计算的相关程度值和司都顿统计量来确定。其中,相关程度值(C)表示了地质变量(证据层)中不同的含量变化区间与已知矿床(点)之间的亲近程度。司都顿统计量是相关程度值与其标准差的比值。

2.2.2 地层

研究区北部内蒙地轴中铅锌矿主要赋存在元古代的红旗营子群变质结晶基底中,南部燕山台褶带内的铅锌矿主要赋存在元古宙的碳酸盐地层中,且南北两侧的铅锌矿均与燕山期酸性岩体关系密切(图 1)。

因此本次赋予红旗营子群和元古代碳酸盐岩地层较高的模糊隶属度值,分别赋予 0.9。此外,区内铅锌矿与燕山期岩体关系密切,赋予燕山期岩体(主要

为燕辽超单元)模糊隶属度值为 0.65,其余地层均赋予较低的 0.05 模糊隶属度值。

2.2.3 地球化学场

冀西北地区地球化学场与已知铅锌矿床(点)之间有较好的对应关系,已发现的铅锌矿床,如蔡家营、青羊沟等均位于异常浓集中心(图 2)。因此化探异常场对铅锌矿分布有很好的指示效果。从异常中心到区域背景与对应的矿化强度之间为渐变连续的关系。本次地球化学场模糊隶属度取值规律为:元素的异常下限值取值为 0.5,高于异常下限值的部分对应的矿化强度也较强,分别取 0.6 到 0.9 较高的模糊隶属度值,低于异常下限值的部位对应的矿化强度较弱,依据元素含量分布,取 0.05 到 0.5 之间的值。由于地球化学元素对矿化有直接的指示作用,因此应用模糊或对 Pb、Zn、Ag 元素进行综合,形成地球化学因子(图 3)。

2.2.4 地球物理场

由于研究区南、北两个构造单元内赋矿地层不同,可能会造成北部内蒙地轴中对铅锌矿床有指示意义的重力或航磁变化区间,在南部燕山台褶带内对寻找铅锌矿没有任何指示意义,因此南北两区地球物理场数据(重力和航磁)应分开赋值。本次采用在 GIS 平台上利用点对面的叠加功能,提取了与铅锌矿关系密切的物探场区间,分别将其赋予较高的模糊隶属度值,其他物探区间按距已知矿床(点)距离的远近依次赋值。这样在北部内蒙地轴中与铅锌矿床关系密切的物探区间有较高的隶属度值,而南部对应的区间却不一定赋予较高的隶属度值,这就使得选取的高隶属度值物探场区间只与已知矿床对应(图 2)。由于地球物理场数据对矿床的直接指示作用不如地球化学场明显,因此本次采取了保守的综合算法,应用模糊与运算功能将重力场和航磁场数据进行合并,获得地球物理因子(图 3)。

2.2.5 岩浆岩

冀西北地区铅锌银多金属矿床与燕山期中酸性岩体关系密切,说明燕山期岩浆活动促使了含矿层中的成矿元素活化、迁移,在矿床的形成过程中起到了热源作用。有些铅锌矿床处于岩体与碳酸盐岩的接触部位,而有些距岩体较远。为研究矿床与岩体距离之间的定量关系,将岩体不同距离的缓冲区图层与矿床(点)进行亲近度分析,根据相关程度值(C)和 C 的司都顿统计量确定矿体与岩体不同距离的

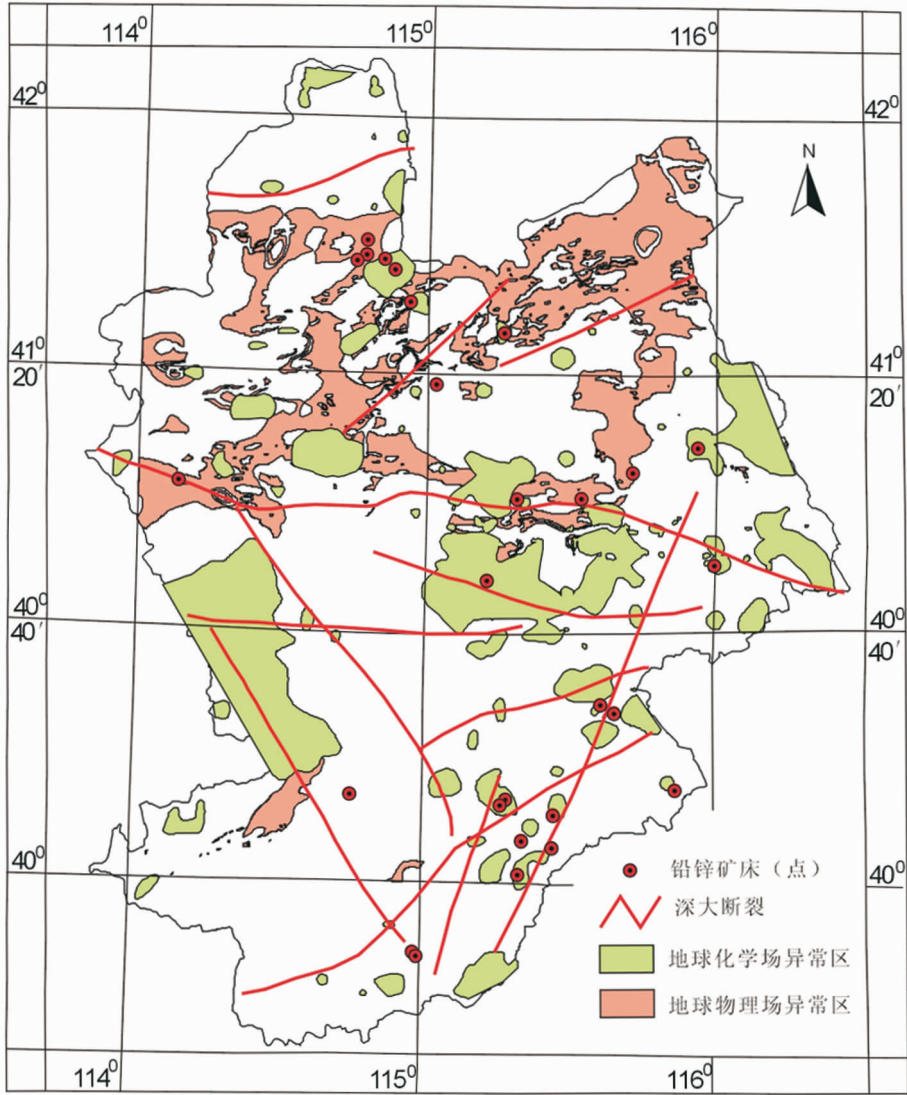


图2 研究区物化探异常综合图

Fig.2 Composite geophysical and geochemical anomaly map of the study area

模糊隶属度值(表1)。亲近度分析表明,矿床点主要出现在岩体 1 km 和 5 km 范围附近,结合区内已知矿床(点)发现,岩体 1 km 范围内的矿床主要出现在元古宇碳酸盐岩地层与燕山期岩体接触部位,距岩体 5 km 左右的矿床主要分布在北部内蒙地轴中红旗营子群内。以上事实说明,内蒙地轴和燕山台褶带内的铅锌矿分别处于距燕山期岩体不同的范围内。

2.2.6 断裂构造

断裂在成矿过程中是矿液运移的主要通道,起到了导矿、容矿作用。其中深大断裂控制了中酸性岩体

的分布,次级的线性断裂是由深部断裂在活动中派生的规模较小、条件封闭、序次较高的破碎带和裂隙。这些破碎带和裂隙大多沿着一定方向的构造带分布而形成成矿带,次级构造起到了赋存矿带或矿体的作用。因此不同级次的断裂对成矿的控制程度不同。本次按上述原则从构造纲要图中提取了区内深大断裂和次级断裂。分别就其不同缓冲距离图层与已知矿床(点)进行了亲近度分析,按照与上述岩体缓冲相同的方法进行了模糊隶属度赋值。由于深大断裂具有导矿作用,次级断裂是矿体赋存的有利部位,岩体的产生不仅与深大断裂关系密切,而且起到了对成矿元素的

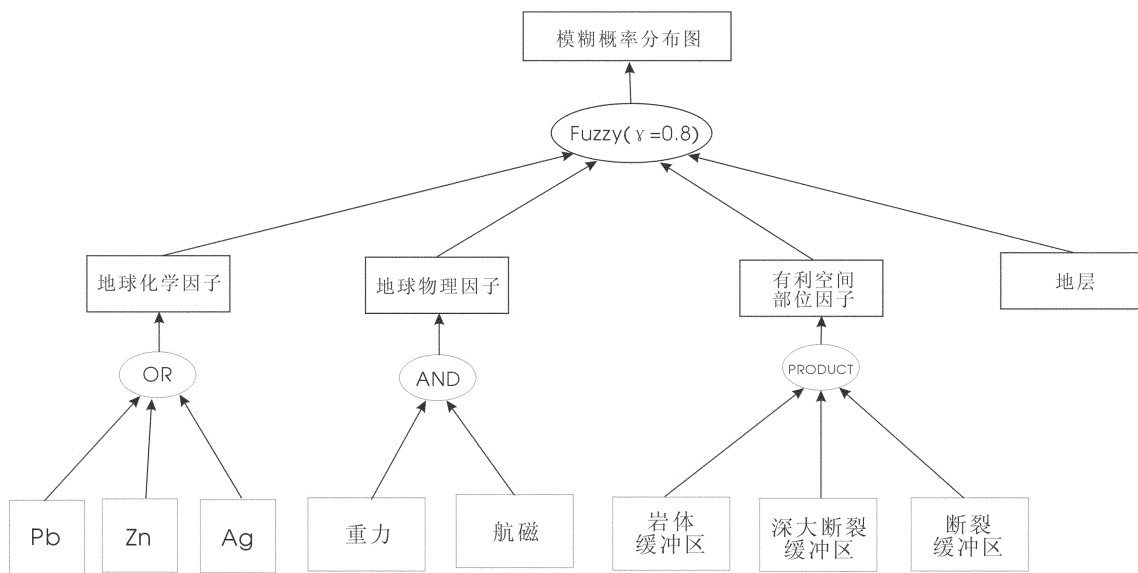


图 3 模糊推理网络组成

Fig.3 Structure of the fuzzy inference network

表 1 燕山期岩体缓冲区与已知矿床点亲近度分析
(缓冲距离 1 km)

Table 1 Analysis of the close relationship between the buffer area of the Yanshanian intrusion and known mineral deposits (the buffer distance is 1 km)

Class	相关程度值 (C)	C 的司都顿统计量	模糊隶属度值
1	1.2902	3.2049	0.9
2	0.2126	0.28587	0.3
3	0.0021	0.0028	0.05
4	0.1897	0.25514	0.2
5	1.0854	2.1396	0.85
6	-0.4102	-0.3998	0
7			0
8			0
9	0.4969	0.6662	0.3
10			0

活化、迁移作用,因此断裂和岩体共同决定了矿床的空间赋存部位。模糊积算子虽具有“减弱”效应,但这种算法的优点是利用了所有参与合成的图层信息。因此应用模糊积算子对构造和岩体图层信息进行了综合,形成有利空间部位因子(图 3)。

2.3 数据综合

数据综合是应用模糊逻辑法进行成矿远景区预测的第二步工作。相对于一次即可联合所有证据图层的综合方法来说,有时整合一些证据图层去支持

一个中间假设的方法效果会更好(Bonham_Carter, 1994),其结果可以与其他证据图层或其他的中间计算结果整合成最终的成矿有利度图层,从而构成模糊推理网络(图 3)。最终图件的综合一般均选择伽马算子,该算子的选择是为了在综合递增和递减趋势中选择最佳的结果,同时保证整个图件总体的增强趋势,便于对图件的最终解释。 γ 取值一般在 0.7 与 0.9 之间。通过比较不同 γ 取值情况下,预测的成矿有利区面积与落入预测区内已知矿床(点)的数目来最终确定 γ 值。

3 结果与讨论

当预测单元内表示成矿有利度的模糊概率值接近于 1 或者 0,就认为其有很大的确定性;模糊概率值接近于 0.5,就认为其有很大的不确定性,可以是潜在矿化区,也可以是非矿化区。本次以模糊概率值 0.6 作为阈值,综合分析了 γ 取 0.7、0.75、0.8、0.85 和 0.9 等不同值时的预测结果,从圈定的远景区面积和已知矿床(点)数目两方面综合考虑,认为 $\gamma = 0.8$ 时,预测效果最佳(图 4)。在圈出的仅占研究区总面积 13.2% 的范围内,有超过 85% 的已知矿床(点)出现。且在出现模糊概率值(代表成矿有利度)大于 0.6 的区域中,有 66.3% 的单元模糊概率值在 0.7~0.8。因此从预测面积与预测出的已知矿床(点)

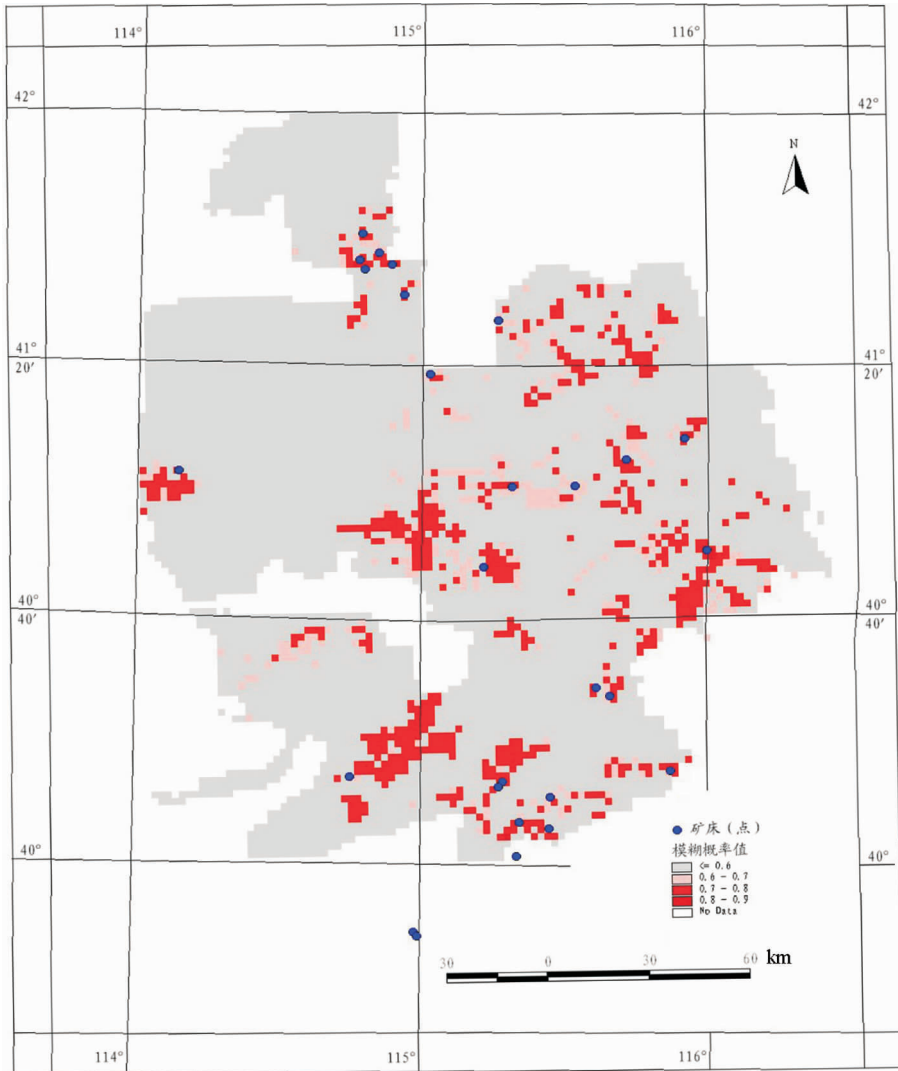


图 4 冀西北地区铅锌银矿模糊定位预测模糊概率分布图

Fig.4 Distribution of fuzzy probabilities of the fuzzy location prediction of lead-zinc-silver deposits in northwestern Hebei

数目看,本次在冀西北地区应用模糊逻辑法预测成矿远景区是成功的,预测结果可用指导该区下一步找矿工作。

参考文献 (References):

- [1] 李裕伟, 赵精满, 李晨阳. 基于 GMS、DSS 和 GIS 的潜在矿产资源评价方法[M]. 北京:地震出版社, 2007.
Li Yuwei, Zhao Jinman, Li Chenyang. Undiscovered Mineral Resources Assessment Based on GMS, DSS and GIS [M]. Beijing: Seismological Press, 2007.
- [2] Kemp L D, Bonham-Carter G F, Raines G L, et al. Arc-SDM: A review extension for spatial data modelling using weights of

evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis [EB/OL].<http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>, 2004-04.

- [3] 陈江, 付建飞. 利用 GIS 知识驱动模型开展区域矿产资源预测[J]. 地质与勘探, 2005, 41(5):66-68.
Chen Jiang, Fu Jianfei. Mineral exploration prediction based on GIS knowledge-driven model[J]. Geology and Prospecting, 41(5) :66-68(in Chinese with English abstract).
- [4] Agterberg F P, Bonham-Carter G F. Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration[C]//Proc. 28th Intern. Symp. Computer Applications in the Mineral Industries]. Golden, Colorado, 1999:483-490.
- [5] Agterberg F P, Bonham-Carter G F, Cheng Q M, et al. Weights of evidence modeling and weighted logistic regression for mineral

- potential mapping[C]//Davis J C and Herzfeld U C, ed. Computers in geology:25 years of progress. New York:Oxford University Press 1993:13-32.
- [6] 陈永清, 夏庆霖, 黄静宁, 等. “证据权”法在西南“三江”南段矿产资源评价中的应用[J]. 中国地质, 2007, 34(1):132-141.
Chen Yong-qing, Xia Qing-lin, Huang Jingning, et al. Application of the weights-of-evidence method in mineral resource assessments in the southern segment of the “Sanjiang metallogenic zone”, southwest in China [J]. Geology in China, 2007, 34 (1):132-141 (in Chinese with English abstract).
- [7] Agterberg Frederik P, Qiuming Cheng. Conditional Independence Test for eights -of -Evidence Modeling [J]. Natural Resources Research, 2002.11(4):249-255.
- [8] Bonham -Carter G F, Agterberg F P. Weights of Evidence:An Mew Approach to Mappig Mineral Potential, Statistical Applications in the Earth Sciences [C]. Canada:Geological Survey of Canada, 1990. 171-183.
- [9] 曹殿华, 王安建, 管焯, 等. 基于模糊逻辑的中甸岛弧斑岩型铜矿定位预测[J]. 矿床地质, 2006. 25(2):199-206.
Cao Dianhua, Wang Anjian, Guan Ye, et al. Position prediction of porphyry copper deposits in Zhongdian island arc based on fuzzy logic [J]. Mineral Deposits, 2006, 25 (2):199-206 (in Chinese with English abstract).
- [10] 邢学文, 胡光道. 模糊逻辑法在秦岭松潘成矿区金矿潜力预测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(2):298-303.
Xing Xuewen, Hu Guangda. The application of fuzzy logic method to gold deposit prediction in Songpan area, Qinling [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36 (2): 298-303(in Chinese with English abstract).
- [11] 邢学文, 胡光道, 王正海, 等. 模糊逻辑法在云南中甸地区铜矿潜力预测中的应用[J]. 地质科技情报, 2006, 25(6):53-58.
Xing Xuewen, Hu Guangdao, Wang Zhenghai, et al. Porphyry copper mineral prediction using fuzzy logic method in Zhongdian, Yunnan Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(6):53-58(in Chinese with English abstract).

Position prediction of lead-zinc-silver polymetallic deposits in northwest Hebei based on the fuzzy logic method

LI Sui-min¹, YAO Shu-zhen², HAN Yu-chou³,
HAO Hua-jin³, CHEN Shu-qing³, LI yong-feng³

(1. Shijiazhuang College of Economy, Shijiazhuang 050031, Hebei, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hebei, China;

3. Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Shijiazhuang 050081, Hebei, China)

Abstract: The fuzzy logic space decision model does not use binary maps to divide the study area into the area advantageous to mineralization and the area disadvantageous to mineralization but uses continuously changing fuzzy membership values based on the regularity of geological data, thus avoiding the loss of useful geological information effectively. In this paper the geological, geochemical and geophysical data are analyzed and processed using the Arc-SDM extension based on the GIS platform and the close relationship between ore deposition and evidence themes is analyzed using the method of weights of evidence. On that basis, different fuzzy membership values are given to original geological variables using the tabulation method. The results of fuzzy logic prediction show that 85% of the known mineral deposits (occurrences) appear within the target limits that only make up 13.2% of the study area, which are highly coincident with the known mineral deposits (occurrences). The prediction results are ideal and may be used to guide further mineral prospecting.

Key words: fuzzy logic method; northwestern Hebei; position prediction; lead-zinc-silver deposit

About the first author: LI Sui-min, male; born in 1971, doctor and associate professor, mainly engages in the study of mineral deposit geology and geoscience information processing; E-mail: smli71@163.com.