

混合模糊证据权模型在河北承德煤炭资源预测中的应用

黄 秀¹, 张 钊^{2,3}, 陈建平¹, 刘清俊^{1,4}, 别立东¹

HUANG Xiu¹, ZHANG Zhao^{2,3}, CHEN Jian-ping¹,

LIU Qing-jun^{1,4} BIE Li-dong¹

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 中国煤炭地质工程总公司, 北京 100073;

3. 中国煤炭地质总局特种技术勘探中心, 北京 100073;

4. 中国地质大学长城学院, 河北 保定 071000

1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *China Coal Geology Engineering Corporation, Beijing 100073, China;*

3. *Special Technology Exploration Center of China Coal Geology Bureau, Beijing 100073, China;*

4. *Great Wall College, China University of Geosciences, Baoding 071000, Hebei, China*

摘要:应用模糊逻辑法、加权证据权法相结合的混合模糊证据权模型和 GeoDAS GIS 技术开展了承德煤炭资源预测研究。采用模糊逻辑法对与煤炭矿床有关的证据层进行了系统的处理和分析,并在此基础上采用加权证据权方法编制了成矿后验概率图,最终划分出 5 个主要的找矿远景区。研究结果不仅对进一步开展预测区优选评价具有重要的参考意义,而且为混合知识驱动与数据驱动的混合预测模型提供了一种可借鉴的有效方法。

关键词:模糊逻辑法;证据权模型;资源预测;河北承德地区

中图分类号:P612;P618.11

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2010)07-1075-07

Huang X, Zhang Z, Chen J P, Liu Q J, Bie L D. Application of hybrid fuzzy weights of evidence model in mineral resource assessment for coal in Chengde area, Hebei, China. *Geological Bulletin of China*, 2010,29(7):1075-1081

Abstract: The hybrid fuzzy weights of evidence model method and GeoDAS GIS were applied to delineate targets for exploration of coal mineral deposits in Chengde region, China. Based on the comprehensive analysis of relative evidential layers of coal deposits using fuzzy logic method, the five targeting areas were delineated using fuzzy weights of evidence method and were suggested for further exploration. The result not only can be a great referenced value for mineral resources prediction and evaluation but also provides an effective way to combine the knowledge-driven model with data-driven model.

Key words: fuzzy logic method; evidence weight model; mineral resources prediction; Chengde area, Hebei

近年来,各种数据模型被广泛应用于矿床预测和资源评价研究,如证据权模型^[1]、模糊证据权模型^[2-3]、逻辑斯蒂回归模型^[4]、模糊逻辑模型^[5]、证据

信任函数模型(EBF)^[6-9]、神经网络模型^[10-12]等。这些模型各具优缺点。其中,证据权模型、逻辑斯蒂回归模型和神经网络模型是基于数据驱动的预测模型,

收稿日期:2009-12-22; 修订日期:2010-01-20

基金项目:国家“973 计划”课题(编号:2006CB202202)、国家“863 计划”专题课题(编号:2006AA06Z235)和国家自然科学基金项目(编号:40772096)联合资助

作者简介:黄秀(1981-),女,在读博士,从事含油气盆地沉积学研究。E-mail:huangxiu1983@yahoo.cn

结果具有很强的客观性,使用这些模型的前提条件是变量之间需要相互独立。但地质变量之间总是存在直接或间接的关系,变量之间完全独立几乎是不可能的,因此预测结果都具有一定的不确定性。模糊逻辑模型以模糊集理论为基础,对地质数据进行模糊量化,充分发挥地质学家的知识,具有很大的灵活性,但在预测过程中过多地依赖于人的主观判断,结果缺乏客观性。为了更好地利用这些预测模型的优点,有人提出了使用知识驱动与数据驱动的混合模型,例如模糊隶属函数与模糊证据权相混合的模型^[3],模糊隶属函数与贝叶斯规则线性形式相结合的混合模型^[13-14],模糊关系分析与多层次模糊综合评价方法相结合的混合模型^[15]等。在对某一地区的矿床资源进行预测评价时,应根据实际情况选择合适的预测模型,使预测结果更为合理和科学。

本文根据承德地区的地质环境和勘探情况,在 GeoDAS GIS^[16]平台下,应用模糊隶属函数与加权证据权相结合的混合模型对承德煤炭资源的潜力进行研究,利用结果文件圈划了研究区的有利成矿(煤矿)地段——成矿远景区。

1 模糊逻辑法模型

1.1 模糊逻辑方法

在模糊逻辑方法中,用 D 表示所研究的事件,设 X_i ($i=1\text{ton}$) 是与矿产资源预测相关的证据层,证据层通常是分类数据或有序数据,每个层有 $j=1,2,\cdots,r_i$ 个离散的分类值或状态。若 X_{ij} 表示第 i 个证据层的第 j 个分类值,则模糊集合 A_i 为^[17]:

$$A_{ij}=\{(X_{ij}, \mu_A) | X_j \in X_i\} \tag{1}$$

其中, μ_A 为 X_i 的隶属函数, $\mu_A \in [0,1]$ 。

对多级证据图进行模糊化的隶属度函数为^[17]:

$$\mu_{AX_{ij}}=\frac{1}{1+e^{-a(X_{ij}-b)}} \tag{2}$$

其中, b 为拐点; a 为函数的斜率; X_{ij} 是第 i 个图层的第 j 个级别, $X_{ij}=w_i \times w_j$ 。式中, w_i 是第 i 个证据图层的权值, w_j 是证据图层层内第 j 个级别的权值。在模糊逻辑模型中,权值的分配主要是根据经验和专家知识进行主观分配的,证据图件分为 1~10 个级别,但是通常赋予的权值大小范围是 5~10^[3]。

1.2 混合模糊综合

定义如下:

$$A_{i1}=\{X_{ij}, |\mu_{A_{ij}}=Max(\mu_{A_{ij}}) | X_j \in X_i\} \tag{3}$$

$$A_{i2}=\{X_{ij}, |\mu_{A_{ij}}=Min(\mu_{A_{ij}}) | X_j \in X_i\} \tag{4}$$

式中, A_{i1} 与 A_{i2} 分别为模糊集合 A_i 的最大隶属度和最小隶属度, $i \in [0,1]$ 。

模糊权重值^[3,18]

$$W_{\mu A(X_{ij})}=\ln \left\{ \frac{\mu_{A_i}(X_{ij})P[A_{i1}/D]+[1-\mu_{A_i}(X_{ij})]P[A_{i2}/D]}{\mu_{A_i}(X_{ij})P[A_{i1}/\bar{D}]+[1-\mu_{A_i}(X_{ij})]P[A_{i2}/\bar{D}]} \right\} \tag{5}$$

其中,在 D 存在的条件下, A_{i1} 与 A_{i2} 的模糊条件概率分别为 $P[A_{i1}/D]$ 和 $P[A_{i2}/D]$,在 D 不存在的条件下,为 $P[A_{i1}/\bar{D}]$ 和 $P[A_{i2}/\bar{D}]$ 。

模糊后验几率为^[3]:

$$\ln O[D/X_i]=\ln O[D]+\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r W_{\mu A(X_{ij})} \tag{6}$$

根据公式(6)得到的模糊后验概率为^[3,18]:

$$P[D/X_i]=\frac{\ln O[D/X_i]}{1+\ln O[D/X_i]} \tag{7}$$

由于模糊证据权模型^[18]得到的后验概率值可能因证据层不满足条件独立性假设而被高估,因此,为了更有效地减弱证据层不满足条件独立性假设对预测结果产生的影响,采用改进后的加权证据权模型^[19]计算后验概率值,最终生成矿产资源潜力分布图。

加权证据权方法^[20]

$$\text{logit}(D/A_1A_2\cdots A_n)=W_0+\tau_1W_1+\cdots+\tau_nW_n \tag{8}$$

其中, $\tau_1 \geq 0, \tau_2 \geq 0, \cdots, \tau_n \geq 0$ 为模型加权系数, W_i 按照定义式(5)。

相关系数取值法^[19]定义:

$$\tau_i=1-r_i, \quad i=1,\cdots,n \tag{9}$$

其中 $r_i=r(A_i, \prod_{j \neq i, 1 \leq j \leq n} A_j/D)$ 为 D 条件下 A_i 与 $\prod_{j \neq i, 1 \leq j \leq n} A_j$ 的相关系数。其中,当 $\tau_i=1$ 时,模型满足条件独立性假设;当 $r_i=1$ 时,则 $\tau_i=0$,证据层在模型中没有作用;当 $0 < r_i < 1$ 时, $\tau_i < 1$,说明 A_i 与其他证据层正相关;当 $-1 < r_i < 0$ 时, $\tau_i > 1$, A_i 与其他证据层负相关。

混合模糊证据权模型的实施主要包括以下 7 个步骤:①根据实际问题确定研究目标;②确定与目标相关的空间图层;③提取与目标相关的变量,用公式(2)对变量进行模糊化(计算隶属度);④利用公式(3)和(4)分别求出各个单元网格的最小隶属度和最大隶属度,用公式(5)计算证据层的模糊权重;⑤综合多个模糊证据层,计算后验概率;⑥利用公式(8)与(9)计算模型加权系数和后验概率,形成矿产资源

潜力分布图;⑦模型检验和预测区解释。

2 承德煤炭资源预测

2.1 区域地质概况

研究区大地构造位置处于华北晚古生代含煤盆地北部的边缘地带,面积约 35000km²,含煤地层从老到新有石炭系—二叠系、三叠系上统杏石口组、下侏罗统下花园组、中侏罗统九龙山组和髫髻山组、下白垩统西瓜园组和青石砬组。其中石炭系—二叠系为重要的含煤地层,其次为下侏罗统。区域内构造形变极为复杂,具有逆冲推覆、向斜、复合构造等多种构造类型,其中逆冲推覆构造最为发育。

2.2 证据图

根据前人总结分析的区内煤矿床成矿规律和控

矿因素,本次利用混合模糊证据权模型进行煤炭资源预测,选取了地层、构造和沉积相 3 个地质变量(证据层)。

2.3 变量模糊化

应用隶属度函数公式(2)对变量进行模糊化,其中 a 、 b 取值分别为 0.1 和 50。S 型曲线的拐点为 (50,0.5),其中 50 是级别评分,0.5 是相应的知识驱动的模糊隶属度值^[3]。证据图层、级别的权值见表 1。

研究区的煤层在石炭系—二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系中均有产出,但主要赋存在石炭系—二叠系中,因此预测模型中地层图件的权值赋为 10。

含煤岩系沉积相分析结果表明,古构造格局和海平面升降的变化控制了本区石炭系—二叠系的沉积演化特征,控制了成煤沼泽的发育^[2],当时的沉积

表 1 证据图层的图层权值、级别权值、级别得分、模糊隶属度和模糊权重
Table 1 Map weights, class weights, fuzzy membership values, and fuzzy weights of patterns in predictor maps

变量类别	图 层 权 值	级 别 权 值	级 别 得 分	模 糊 隶 属 度	模 糊 权 重	变量类别	图 层 权 值	级 别 权 值	级 别 得 分	模 糊 隶 属 度	模 糊 权 重
泥岩、页岩、煤含量	10	10	100	0.9933	3.8078	断裂距离/km					
地层总厚度	10	9	90	0.982	2.286	0~0.5	8	10	80	0.9526	1.95151
总地层组合熵	10	8	80	0.9526	1.768	0.5~1.0	8	9	72	0.7151	1.80524
石炭系	10	7	70	0.8808	3.2061	1.0~1.5	8	8	64	0.6336	1.67094
二叠系	10	6	60	0.7311	3.2271	1.5~2.0	8	7	56	0.5562	0.95151
三叠系	10	5	50	0.5	2.701	2.0~2.5	8	6	48	0.4502	0.45151
侏罗系	10	4	40	0.2689	1.5074	2.5~3.0	8	5	40	0.2689	-0.2577
白垩系	10	3	30	0.1192	1.3691	3.0~3.5	8	4	32	0.1419	-0.3659
DS1-3S-沼泽	9	10	90	0.982	1.8135	3.5~4.0	8	3	24	0.0691	-0.6987
DS1-3X-潮坪	9	8	72	0.9002	2.2437	4.0~4.5	8	2	16	0.0323	-0.7398
DS1-3X-三角洲	9	6	54	0.5987	1.0607	4.5~5.0	8	1	8	0.0148	-1.9515
DS1-3S-隆起	9	4	36	0.1978	0.8389						
DS1-3X-隆起	9	4	36	0.1978	1.4464						
中心对称度											
0.1	7	10	70	0.8808	1.613						
0.2	7	8	56	0.5562	0.783						
0.3	7	6	42	0.31	0.3543						
0.4	7	4	28	0.0998	-0.936						
0.5	7	1	7	0.0134	-1.613						

环境对聚煤作用起到了决定性作用，所以对沉积相图件赋值为 9。

该区对晚古生代煤系具有控制作用的推覆构造广泛分布于尚义—平泉断裂以南、遵化复式背斜以北的广大区域，沿北东东向的兴隆—平泉复式向斜的两翼向向斜腹地推覆。由西向东断续分布着鹰手营子、宽城缸窑沟、大吉口至平泉杨树岭等许多逆冲推覆构造，老地层覆盖于石炭纪—二叠纪煤系地层之上，对矿床进行了后期改造。因此赋值为 8。由于线环构造主要来自于图像解译，并非地表直接发现的构造，因此权值相对于断裂小一些，其中心对称度

赋值为 7。

2.4 混合模糊综合

本次研究中，以 GeoDAS GIS^[16]为平台，结合公式(7)计算各个证据层的模糊权重和后验概率，其中模糊权重的统计结果见表 2，后验概率如图 1 所示。用 New Ominbus-test^[22]对模型的独立性进行检验，结果表明，模型中的证据层不满足条件独立性假设，但是条件独立性的假设可以忽略，这是因为后验概率是相对意义上的解释，没有绝对的意义^[3,23]。以上述第⑤步骤得到的后验概率为条件，计算各个相关系数，用加权证据权模型计算后验概率，形成矿产资

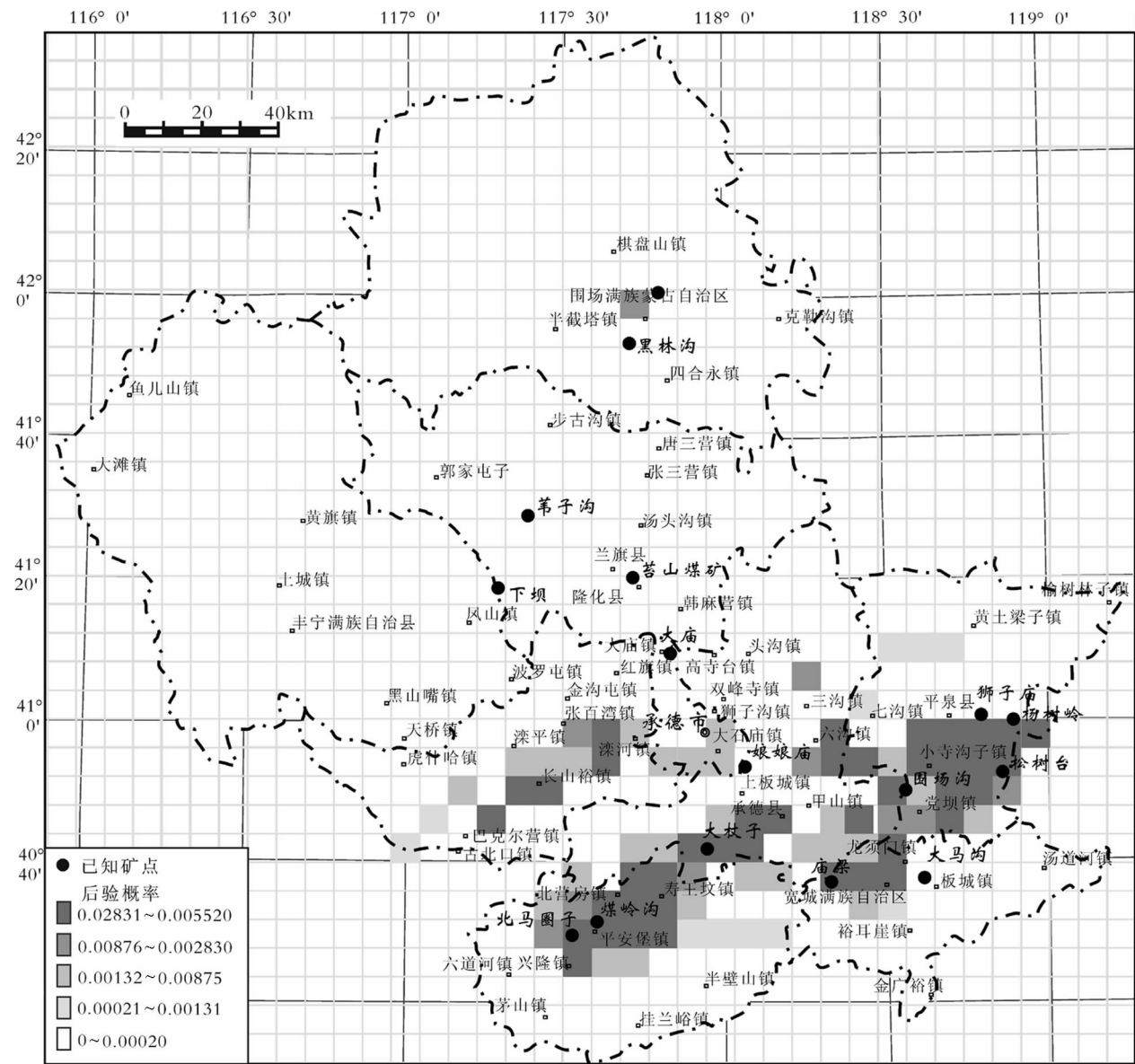


图 1 采用模糊证据权方法矿床预测后验概率图

Fig. 1 Posterior probability map using fuzzy weights of evidence model

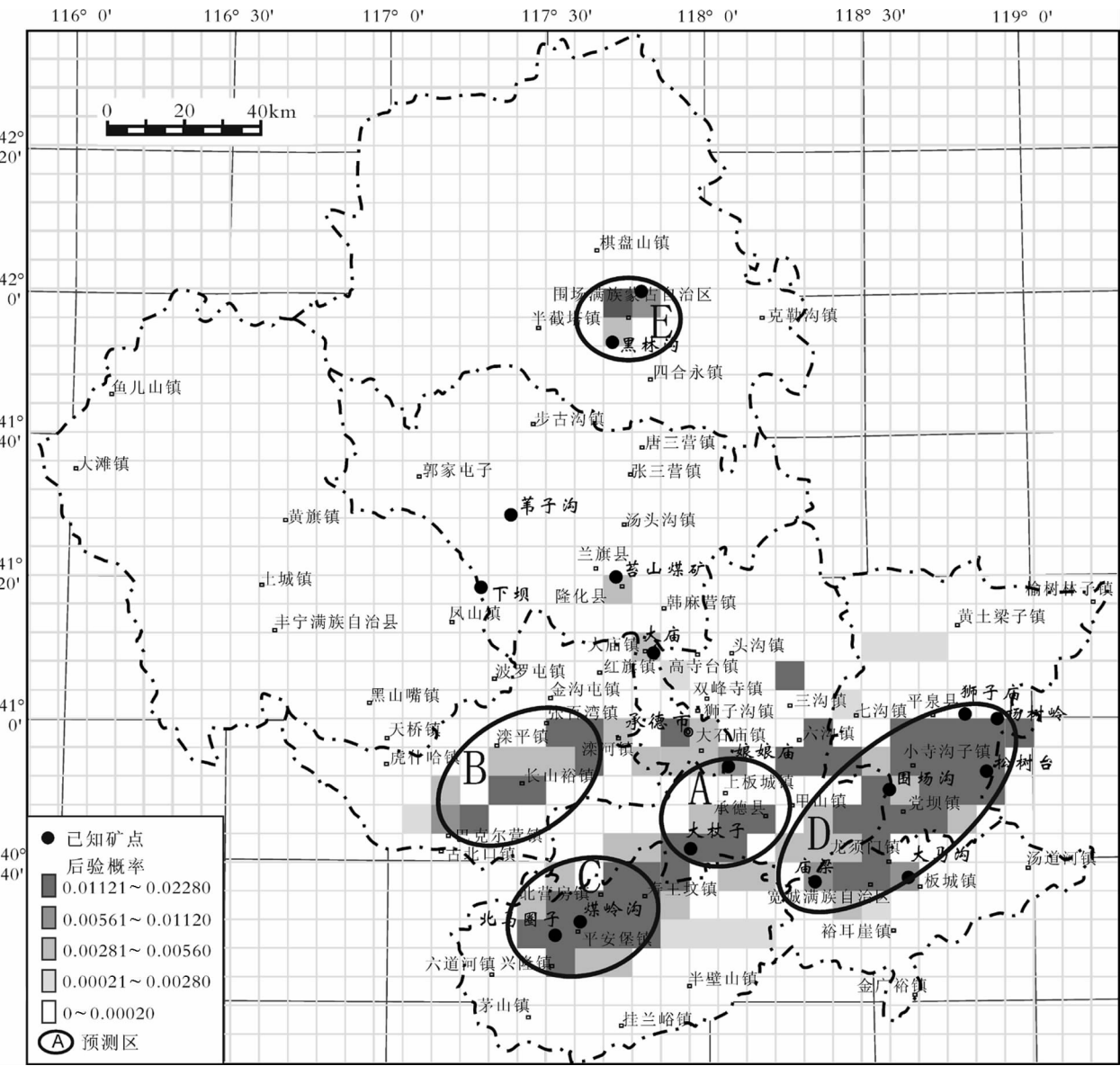


图 2 采用加权证据权方法矿床预测后验概率图

Fig. 2 Posterior probability map using weighted weights of evidence model

源潜力分布图(图 2)。

2.5 模型验证及讨论

整个研究区划分为 1590 个网格单元(3000m×3000m),对比图 1 与图 2 可以得出,预测的远景区与已知的矿床均具有很好的空间关系,如平泉县的围场沟、松树台矿区,兴隆县的北马圈子、煤岭沟都在重点预测区域之内。为了验证混合模糊证据权法的有效性,分别对模糊证据权和混合模糊证据权使用相同的降序方式进行异常分级,2 种模型的后验概率图分级结果大致相同,各分为 5 类(各类对应的

后验概率数值范围分别与图 1、图 2 中的分级范围对应),但后验概率的数值大小有区别(图 1 和图 2)。对混合模糊证据权法和模糊证据权法后验概率、矿床累积概率进行统计,做出了对比曲线图(图 3)。从图 3 中可见,混合模糊证据权方法计算得到的矿床累积概率比模糊证据权方法对应类别的矿床累积概率高,如在最高概率类别 1 中,模糊证据权的矿床累积概率为 37.50%,而混合模糊证据权的矿床累积概率达到了 43.75%,这意味着混合模糊证据权法所计算的高概率层比模糊证据权法计算的对应类别的

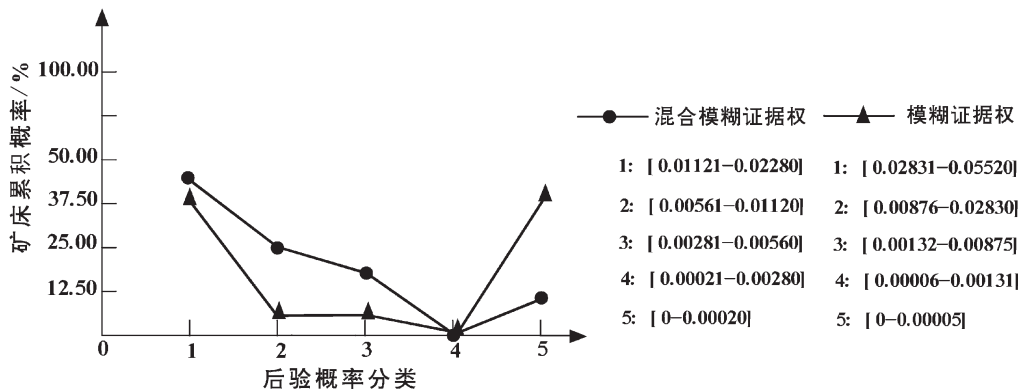


图3 模糊证据权法和混合模糊证据权法后验概率结果分类与矿床累积概率对比曲线
Fig. 3 Posterior cumulative classifications versus the cumulative probabilities to contrast the optimum results from fuzzy weights and hybrid fuzzy weights

概率层包含更多的已知矿点，表明混合模糊证据权的预测精度高于模糊证据权的预测精度。同时在矿床累积概率相同的情况下，混合模糊证据权的后验概率值较小，如矿床累积概率为 25.00% 时，模糊证据权的后验概率为 0.02748，而混合模糊证据权的后验概率值为 0.00939。说明混合模型能有效地降低因证据层不满足条件独立性假设而使得模糊证据权模型对后验概率的过高估算，并且更符合承德地区的煤炭资源分布情况。

3 预测结果

以混合模糊证据权方法所得到的后验概率图(图 2)为依据进行资源潜力评价，划分出下述 5 个成矿区。

A 预测区：位于承德大杖子一带，面积约 45km²，后验概率为 0.0118~0.0216，具有良好的找煤前景。预测成矿区主体具备的有利找煤因素有：①该区有半数以上的区域出露有石炭系、二叠系；②地层总厚度和泥岩、页岩、煤的含量高；③全区位于构造线密度异常范围内。

B 预测区：位于长山峪镇至大石庙镇，面积约 90km²，后验概率为 0.0032~0.0194，具有较好的找矿前景。预测区具备如下几个成矿有利条件：①全区位于白垩系范围中；②地层总厚度和泥岩、页岩、煤含量高；③全区位于构造线密度异常范围内；④全区位于沼泽沉积相范围内。

C 预测区：预测区中心位于北马圈子—煤岭

沟—大杖子—小寺沟镇一带，面积大约 153km²，后验概率为 0.0043~0.0217，具有良好的找矿前景。预测区具备的有利找矿条件包括：①全区位于石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系范围中；②地层总厚度和泥岩、页岩、煤含量高；③全区位于构造线密度异常范围内；④全区位于沼泽沉积相范围内。

D 预测区：预测区中心位于庙梁—围场沟—松树岭—狮子庙一带，面积约为 171km²，后验概率反映明显，为 0.0055~0.0228，同样具有良好的找矿前景。预测区具备以下几个有利的成矿条件：①全区位于二叠系、三叠系、侏罗系范围中；②地层总厚度和泥岩、页岩、煤含量高；③全区位于构造线密度异常范围内；④全区位于潮坪沉积相范围内。

E 预测区：预测区中心位于围场—黑林沟一带，面积约为 27km²，后验概率为 0.0037~0.0209，为良好的找矿远景区。预测区具备的有利找矿条件包括：①全区位于白垩系和侏罗系范围中；②全区位于构造线密度异常范围内。

4 结 论

(1)在矿产潜力预测中，使用知识驱动、数据驱动相结合的混合模糊证据权模型处理多级和连续的地质数据证据图层，充分发挥了地质专家的主观作用，并有效地减弱了因证据层不满足条件独立性假设对预测结果产生的影响，提高了预测精度，结果更能反映地质变量的关系，更符合实际。

(2)混合模糊证据权模型为如何使用混合计算

模型与人的解释提供了一种可借鉴的有效的方法。

(3)在承德地区应用混合模糊证据权模型,划分出5个主要找矿远景区,认为围场—马圈子—煤岭沟—大丈子—小寺沟镇一带、长山峪镇至大石庙镇一带和庙梁—围场沟—松树岭—狮子庙一带都具有较大的煤炭资源开发潜力,有进一步开发的价值。预测结果对进一步开展预测区优选评价具有重要的参考意义。

致谢:在成文过程中,中国地质大学(北京)地球科学与资源学院周洪瑞教授给予很多具体的指导和建议,在此表示衷心的感谢!

参考文献

- [1]Bonham-Carter G F, Agterberg F P, Wright D F. Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential[C]//Agterberg F P, Bonham Carter G F. Statistical Applications in the Earth Sciences. Geological Survey of Canada Paper, 1989, 89(9):171-183.
- [2]Cheng Q. Order analysis method and its application in geology[C]//Proceedings of International Workshop on Statistical Mineral Resource Prediction. Wuhan: Chinese University of Geosciences, 1990, 20(25): 64-70.
- [3]Porwal A, Carranza E J M, Hale M. A hybrid fuzzy weights-of-evidence model for mineral potential mapping[J]. Natural Resources Research, 2006,8: 27-35.
- [4]Agterberg F P, Bonham-Carter G F. Logistic regression and weights of evidence modeling in mineral exploration[C]//Proceedings, 28th International Symposium, Computer Applications in the Mineral Industries. Golden, CO, 1999: 483-490.
- [5]An P, Moon W M, Rencz A. Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration[J]. Canadian Journal of Exploration Geophysics, 1991, 27:1-11.
- [6]Moon W M. Integration of remote sensing and geological/geophysical data using Dempster-Shafer approach[C]//Proceedings, International Geosciences Remote Sensing Symposium. 1989: 838-841.
- [7]An P, Moon W M, Bonham-Carter G F. On knowledge-based approach on integrating remote sensing, geophysical and geological information[C]//Proceedings, International Geosciences Remote Sensing Symposium. 1992: 34-38.
- [8]Wright D F, Bonham-Carter G F. VHMS favourability mapping with GIS-based integration models, Chisel Lake-Anderson Lake area [C]//Bonham-Carter G F, Galley A G, Hall, G E M. EXTECH I: A multidisciplinary approach to massive sulphide research in the Rusty Lake-Snow Lake Greenstone Belts, Manitoba. Geological Survey of Canada Bulletin, 1996, 426: 339-376, 387-401.
- [9]Carranza E J M, Woldai T, Chikambwe E M. Application of data-driven evidential belief functions to prospectivity mapping for aquamarine-bearing Pegmatites, Lundazi District, Zambia [J]. Natural Resources Research, 2005, 14: 47-63.
- [10]Singer D A, Kouda R. Application of a feed forward neural network in the search for Kuroko deposits in the Hokuroku district, Japan[J]. Mathematical Geology, 1996, 28: 1017-1023.
- [11]Singer D A, Kouda R. Classification of mineral deposits into types using mineralogy with a probabilistic neural network[J]. Nonrenewable Resources, 1997, 6: 69-81.
- [12]Porwal A, Carranza E J M, Hale M. Artificial neural networks for mineral potential mapping: a case study from Aravalli Province, Western India[J]. Natural Resources Research, 2003, 12:156-171.
- [13]Feltrin L. Predictive modelling of prospectivity for Pb-Zn deposits in the Lawn Hill Region, Queensland, Australia[J]. Ore Geology Reviews, 2008, 34: 399-427.
- [14]Porwal A, Carranza E J M, Hale M. Knowledge driven and data-driven fuzzy models for predictive mineral potential mapping [J]. Natural Resources Research, 2003, 12(1): 1-25.
- [15]Zuo R G, Chengn Q M, Agterberg F P. Application of a hybrid method combining multilevel fuzzy comprehensive evaluation with asymmetric fuzzy relation analysis to mapping prospectivity[J]. Ore Geology Reviews, 2009, 35: 101-108.
- [16]Cheng Q M. GeoData analysis system (GeoDAS) for mineral exploration: User's guide and exercise manual [EB/OL]. Material for the Training Workshop on GeoDAS Held at York University (2000-01-03)[2000-02-04] www.gisworld.org/geodas.
- [17]Zimmerman H J. Fuzzy set theory - and its applications (2nd edn.) [M]. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1991:399.
- [18]Cheng Q, Agterberg F P. Fuzzy weights of evidence and its application in mineral potential mapping[J]. Natural Resources Research, 1999, 8(1): 27-35.
- [19]张生元,成秋明,张素萍,等. 加权证据权模型和逐步证据权模型及其在个旧锡铜矿产资源预测中的应用[J].地球科学 2009,34(2): 201-206.
- [20]Journel A G. Combining knowledge from diverse sources: An alternative to traditional data independence hypotheses[J]. Mathematical Geology, 2002, 34(5):573-596.
- [21]朱宝存,唐书恒,张佳赞,等. 承德地区石炭—二叠系层序岩相古地理[J].中国煤炭地质, 2009,21(1): 5-16.
- [22]Agterberg F P. Cheng Q M. Conditional independence test for weights-of-evidence modeling[J]. Natural Resources Research, 2002, 11(4):249-255.
- [23]Pan G C, Harris D P. Information synthesis for mineral exploration [M]. New York: Oxford Univ. Press, Inc., 2000: 461.