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

张生元[1,2],成秋明[2],张素萍[1],夏庆霖[2]

1. 石家庄经济学院资源与环境工程研究所,河北石家庄 050031
2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室,湖北武汉 430074

摘要:为了消除和减弱当证据层不满足条件独立性假设时对预测结果产生的影响,提出了逐步证据权模型和加权证据权模型.加权证据权模型通过对logit模型进行修改,对各个证据层给予一定的权重,以调整由于证据层与其他证据层的条件相关性对模型的影响;逐步证据权模型是将证据层按照一定的顺序逐步加入到模型中,在加入到模型的过程中依次用已经获得的后验概率作为模糊训练层的方法.以个旧锡铜多金属矿产资源预测为例,应用4种证据权模型的后验概率进行异常圈定,结果表明两种新的模型对减弱证据层不满足条件独立性假设所产生的影响是有效的.

关键词:逐步证据权;加权证据权;logit模型;云南个旧.
中图分类号:P628 **文章编号**:1000-2383(2009)02-0281-06 **收稿日期**:2008-12-20

Weighted Weights of Evidence and Stepwise Weights of Evidence and Their Applications in Sn-Cu Mineral Potential Mapping in Gejiu, Yunnan Province, China

ZHANG Sheng-yuan[1,2], CHENG Qiu-ming[2], ZHANG Su-ping[1], XIA Qing-lin[2]

1. *Institute of Natural Resources and Environment Engineering, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang* 050031, *China*
2. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan* 430074, *China*

Abstract: This paper proposes two kinds of new models of weight of evidence: weighted weights of evidence and stepwise weights of evidence to reduce the influence of correlation among evidence layers when hypothesis of conditional independence is not held. In the weighted weights of evidence model, an adjustment of weight of evidence is made to reduce the influence of correlation among evidence layers. In the stepwise model, each evidence layer is added into the logistic model as if a single layer whose weight can be calculated by using the previously calculated posterior probability as a new prior probability. These two models are compared with other models through a case study of calculating posterior probability maps for Sn-Cu mineral deposits in Gejiu, Yunnan, China. The result shows that both models are effective to reduce the influence of correlations among evidence layers on delineation of Sn-Cu anomalies.

Key words: stepwise weights of evidence; weighted weights of evidence; logit model; Gejiu of Yunnan Province.

证据权模型作为一种人工智能模型被国内外学者广泛用于多元信息综合和空间决策支持系统,在矿产资源勘查和评价中,证据权方法发挥了重要作用.证据权方法最初应用在没有空间意义的医学诊断上.早在20世纪80年代,加拿大Agterberg和Bonham-Carter等数学地质学家对此方法进行了修改和发展,将其应用于矿产预测中,将不同地质现象和控矿要素作为"症状",矿床预测作为"诊断结果"(Bonham-Carter *et al.*, 1988; Agterberg *et al.*, 1990; Bonham-Carter, 1994).近年来许多学者在

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 40638041);地质调查项目(No. 121201063390110);地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(No. GPMR200803);国家863项目(Nos. 2006AA06Z115, 2006AA06Z113);地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助.
作者简介:张生元(1961-),男,博士,教授,主要从事矿产资源定量评价方法、科研开发和教学工作. E-mail: zhangsh3002@126.com

各种矿产资源评价和环境评价中应用了该方法，如2005年在多伦多召开的国际数学地质和地学信息大会的“GIS环境下空间数据建模”分会上就有近20余篇论文是关于证据权方法的理论、方法或应用成果. 近年来的研究成果不仅涉及证据权方法的应用，而且涉及证据权方法的理论和技术，具有代表性的成果包括：Cheng and Agterberg (1999)发展了模糊证据权方法，克服了普通证据权方法在离散图层易造成信息损失的不足；张生元等(2006)和 Zhang *et al.* (2008)将模糊证据权方法进一步扩展，使其能够处理基于模糊训练集和勘探程度的预测问题；Cheng *et al.* (1994)提出了可以预测具有空间聚类分布特征的未发现矿床的分形证据权方法，该成果使证据权方法能够预测具有空间聚类分布的矿床类型；Cheng (2007)将矿床空间分布局部奇异性和聚类性引入了证据权方法中，使得证据权方法不仅能预测矿床的可能分布位置，而且能够给出预测矿床的空间聚类特征. 应用证据权方法的重要条件和困难之一是证据层之间在预测对象作用下的条件独立性假设，为此人们研究了多种独立性检验方法，这方面的进展包括 Agterberg and Cheng(2002)提出的A-C模型. 该模型给出了简便而实用的检验方法(Thiart *et al.*, 2007)；Journel (2002)提出了 Tau 模型，该模型可以避免条件独立性问题. 遗憾的是 Journel 的工作完全忽视了与证据权方法的关系，如何将 Tau 模型与传统证据权方法相结合还需进一步研究. Cheng (2008)探讨了证据权方法的条件独立性问题，结果表明证据权方法只需证据图层之间满足弱条件独立性，如果不满足条件独立性，可通过校正模型以保证该方法在图层不满足条件独立性的情况下仍然可以使用.

本文提出了两种新的证据权方法——逐步迭代的证据权方法和加权证据权方法，这两种方法均可有效地减弱证据权方法中各个证据层不满足条件独立性所产生的影响；应用4种证据权模型对个旧地区多元信息进行了综合和集成，并对预测结果进行了比较.

1 多种证据权模型

1.1 后验 logit 模型

用 D 表示所要预测的事件，S 是研究区域. 为了表示方便仍用 D 表示在研究区 S 内事件 D 已经出现的训练层. 设 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 是与 D 相关的证据层，则在证据层 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 的条件下 D 发生的后验几率模型为：

$$O(D \mid A_1A_2\cdots A_n) = \frac{P(D \mid A_1A_2\cdots A_n)}{P(\overline{D} \mid A_1A_2\cdots A_n)} = \frac{P(D)}{P(\overline{D})} \cdot \frac{P(A_1 \mid D)}{P(A_1 \mid \overline{D})} \cdot \frac{P(A_2 \mid DA_1)}{P(A_2 \mid \overline{D}A_1)} \cdot \cdots \cdot \frac{P(A_n \mid DA_1\cdots A_{n-1})}{P(A_n \mid \overline{D}A_1\cdots A_{n-1})}. \tag{1}$$

对(1)取对数得 logit 模型为：

$$\mathrm{logit}(D \mid A_1A_2\cdots A_n) = \log(O(D \mid A_1A_2\cdots A_n)) = W_0 + W_1 + \cdots + W_n. \tag{2}$$

其中，

$$W_0 = \log\frac{P(D)}{P(\overline{D})}, \quad W_i = \log\frac{P(A_i \mid DA_1\cdots A_{i-1})}{P(A_i \mid \overline{D}A_1\cdots A_{i-1})}, \quad i = 1, \cdots, n. \tag{3}$$

$A_0 = S$，从 W_i 的定义可以看出，W_i 不仅与 D 和 A_i 有关，而且与 $A_1, A_2, \cdots, A_{i-1}$ 有关.

1.2 证据权模型

到目前为止所有的证据权模型，包括普通证据权模型、模糊证据权模型以及模糊预测对象的证据权模型等，都遵循一个基本假设，那就是条件独立性假设. 在条件独立性假设下，可以证明(3)为

$$W_i = \log\frac{P(A_i \mid D)}{P(A_i \mid \overline{D})}, \tag{4}$$

此时，W_i 仅和证据层 A_i 和训练层 D 有关，与其他的证据层无关. 因此，这些证据权模型是后验 logit 模型的特例. 尽管证据权模型得到了广泛的应用，但在实际问题中各个证据层很难满足条件独立性，独立性问题成为证据权模型应用的瓶颈. 为了克服这一问题，本文提出了逐步证据权方法.

1.3 逐步证据权模型

逐步证据权模型的基本思想是：将证据层逐步加入到证据权模型中，在逐步加入证据层的过程中，用获得的后验概率代替证据权模型中的训练层，以削弱证据层之间不满足条件独立性假设对模型所产生的影响.

定义：$$\widetilde{W}_i = \log\frac{P(A_i \mid D_{i-1})}{P(A_i \mid \overline{D}_{i-1})}, \tag{5}$$

其中，$D_{i-1} = (D \mid A_1\cdots A_{i-1})$，$\overline{D}_{i-1} = (\overline{D} \mid A_1\cdots A_{i-1})$，$i = 1, \cdots, n$. 逐步证据权模型就是用(5)定义的 $\widetilde{W}_i$ 代替(3)定义的 W_i，这时 $\widetilde{W}_i$ 的计算相当于将 D_{i-1} 的后验概率作为基于模糊训练层的证据权模型(张生元等，2006)的模糊训练层而得到的证据权重 W_i.

为了表示方便,在本文中仍用 W_i 表示 $\widetilde{W}_i$.

逐步证据权模型的基本步骤为:(1)根据实际问题确定预测对象、训练层和相关的证据层.(2)将证据层 A_1 加入到模型中,用公式(4)计算 W_1 以及对应的后验概率 $P(D|A_1)$.(3)将未引入到模型中的证据层 A_i 加入到证据权模型中,用公式(5)计算 W_i 并计算后验概率 $P(D|A_1\cdots A_{i-1})$.(4)重复步骤(3)直至所有的证据层被加入到模型中.

1.4　加权证据权模型

Journel(2002)提出了 Tau 模型,该模型可以在一定程度上避免条件独立性问题,但 Journel 等人的工作完全忽视了与证据权方法的关系.本文将 Tau 模型的思想和证据权模型相结合提出加权证据权方法:

$$\text{logit}(D \mid A_1A_2\cdots A_n) = W_0 + \tau_1 W_1 + \cdots + \tau_n W_n \ , \tag{6}$$

其中,$\tau_1 \geqslant 0, \tau_2 \geqslant 0, \cdots, \tau_n \geqslant 0$ 为模型加权系数,W_i 按照(4)定义.关于加权系数的取值,Journel(2002)建议用 SK 方程组求解模型.但本文建议用另外两种加权系数取值方法.

(1)相关系数取值法

定义:$\tau_i = 1 - r_i, i = 1, \cdots, n$　　(7)

其中,$r_i = r(A_i, \prod_{j\neq i, 1\leqslant j\leqslant n} A_j \mid D)$ 为在 D 的条件下 A_i 与 $\prod_{j\neq i, 1\leqslant j\leqslant n} A_j$ 的相关系数.

在此定义下,如果模型满足条件独立性假设,则 $\tau_i = 1$,此时的加权证据权模型就是证据权模型,如果某证据层与模型中的其他证据层完全相关,即,$r_i = 1$,则 $\tau_i = 0$,也就是说该证据层在模型中没有作用.如果 $0 < r_i < 1$,则说明 A_i 与其他证据层正相关,也就是该证据层所包含的成矿有利信息在其他证据层中已有一定的体现,该证据层加入模型将造成部分信息重叠,此时 $\tau_i < 1$,在一定程度上会抑制这种效应.反之,如果 $-1 < r_i < 0$,则说明 A_i 与其他证据层负相关,也就是该证据层所包含的成矿有利信息在其他证据层被压制,此时 $\tau_i > 1$,在一定程度上会提升该证据层所包含的成矿有利信息.

r_i 的严格计算不是很容易,在本文中使用如下方法进行近似计算:

①在模糊证据权模型下计算 A_i 的每个子区域的显著性,并按照从大到小的顺序,以其顺序代替分类值生成新的图层.

②首先将其他所有的证据层进行叠加,将叠加后的图层在模糊证据权模型下计算每个子区域的显著性,并按照从大到小的顺序,以其顺序代替分类值生成新的图层.

③把模糊证据权模型得到的后验概率除以其和,使其满足概率密度的定义,将其看作是①和②生成的两个图层的联合概率分布,在此基础上计算这两个图层的相关系数.用此相关系数作为 r_i.

(2)求解线性方程组法

选取部分 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 进行叠加所生成的互不相交的子区域,在这些子区域上直接估计后验概率 $P(D|A_1^* A_2^* \cdots A_n^*)$,把所估计的后验概率值代入到(6)的左边得线性方程组,

$$\log \frac{P(D \mid A_1^* A_2^* \cdots A_n^*)}{1 + P(D \mid A_1^* A_2^* \cdots A_n^*)} = W_0 + \tau_1 W_i^* + \cdots + \tau_n W_n^* \ , \tag{8}$$

其中,$A_1^* A_2^* \cdots A_n^*$ 是选取的互不相交子区域,解方程组(8)可得到模型加权系数.

关于模型加权系数 τ_i 的赋值问题,还可以有其他方法,至于哪种赋值方法更优尚需进一步研究.

2　逐步证据权模型在个旧锡铜多金属矿产资源预测研究

选择的研究区为云南个旧锡铜多金属矿区,总面积约 1 700 km^2,是我国滇东南锡矿带上最重要的、规模最大的锡多金属矿集区之一.为了应用证据权模型,选取研究区内的 11 个矿床构成训练层,选取 4 个证据层:(A)构造交汇点 6 km 缓冲区(图 1a)、(B)采用 *S-A* 方法分解得到的地球化学综合异常图(图 1b)、(C)采用局部奇异性方法得到的局部地球化学异常图(图 1c)、(D)个旧组地层(图 1d).有关证据层的选择、定义和相应的方法参见成秋明等(2009a,2009b).

2.1　模糊证据权模型(Ⅰ)的应用

以 1 km^2 作为单元格大小,运用 GeoDAS GIS (Cheng, 2000)计算各个证据层的统计结果如表 1,后验概率如图 2a.用 New Ominbus-test(Agterber and Cheng,2002)对模型的独立性进行检验,$CI = 8.5$,说明模型中的证据层不满足条件独立性假设,其后验概率明显偏大.用其估计矿床数达到 22.2 个,是实际矿床数的 2 倍.

2.2　逐步证据权模型(Ⅱ和Ⅲ)的应用

从表 1 可以看出,模型中 4 个证据层对矿床出现的显著性按照从大到小排列依次是:*S-A* 方法

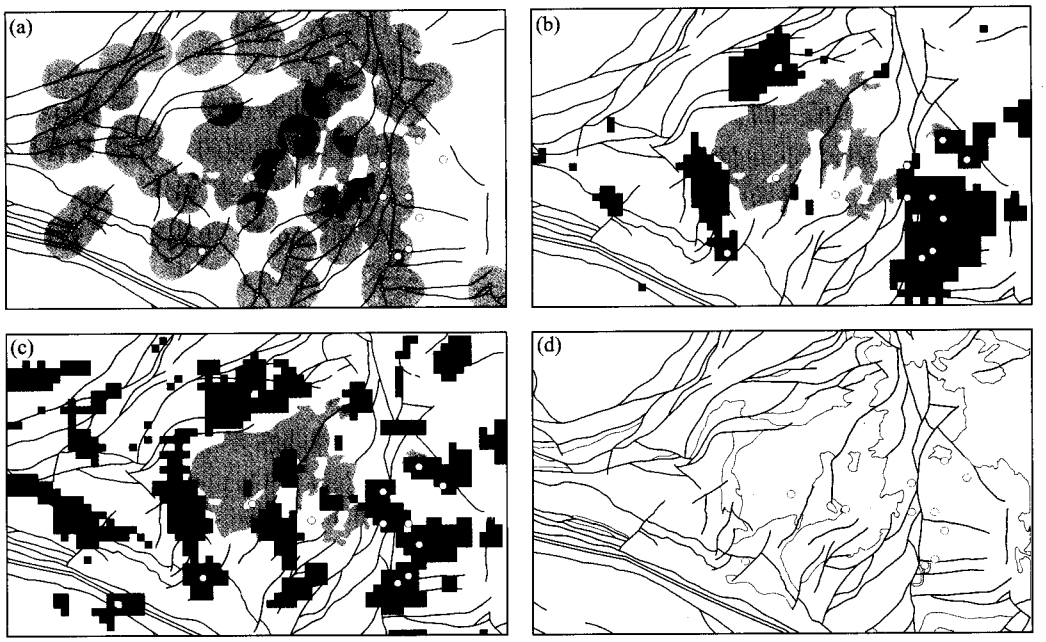

图1 采用证据权方法确定的控矿要素二态图层

Fig. 1 Binary maps of ore control factors obtained by using fuzzy weights of evidence method

a. 构造交汇点距离6 km缓冲区，白色点表示构造交汇点；b. 采用S-A方法分解得到的地球化学综合异常图；c. 采用局部奇异性方法得到的局部地球化学异常图；d. 个旧组地层，粉红色多边形区域为出露个旧岩体，白色圆圈表示Sn矿床，黑色线条表示断裂构造

表1 模糊证据权模型参数统计

Table 1 Statistical parameters calculated by using fuzzy weights of evidence method

证据层	面积	矿床数	正权重	正权重标准差	负权重	负权重标准差	衬度	T—检验
A	496.22	6.44	0.42	0.4	−0.39	0.47	0.8	1.31
$\overline{A}$	782.33	4.56	−0.39	0.47	0.42	0.4	−0.8	−1.31
B	185	8	1.65	0.36	−1.14	0.57	2.79	4.12
$\overline{B}$	1 093.56	3	−1.14	0.57	1.65	0.36	−2.79	−4.12
C	230.44	6.33	1.18	0.4	−0.66	0.46	1.84	3.01
$\overline{C}$	1 037.33	4.67	−0.65	0.46	1.14	0.4	−1.78	−2.91
D	501.78	6.89	0.48	0.38	−0.48	0.49	0.96	1.54
$\overline{D}$	776.78	4.11	−0.48	0.49	0.48	0.38	−0.96	−1.54

得到的地球化学综合异常图1b、局部奇异性方法得到的局部地球化学异常图1c、个旧组地层1d和构造交汇点6 km缓冲区1a. 在本文中用两种不同的顺序逐步加入证据层，第一种是按照证据层中矿床出现的显著性从大到小顺序：B→C→D→A(Ⅱ)把4个证据层逐步加入到证据权模型中，后验概率见图2b；第二种是按照A→B→C→D(Ⅲ)的顺序依次把4个证据层逐步加入到模型中，其后验概率见图2c. 从图2b和图2c可以看出逐步证据权的结果与证据层的加入顺序有关，前者较后者要好，这是因为首先加入的证据层如果其显著性较差，将会使得其后验概率的分布均匀化，影响模型的预测效果. 因此，如何决定证据层加入模型的先后顺序有待进一步探讨.

2.3 加权证据权模型的应用(Ⅳ)

在本例中模型的加权系数按照相关系数取值法，以模糊证据权模型的后验概率为条件计算各个相关系数，得$\tau_B=0.66$，$\tau_C=0.69$，$\tau_D=0.87$，$\tau_A=1.02$，用加权证据权模型计算后验概率如图2d所示.

2.4 预测结果比较

把上述4种方法得到的后验概率基于4个证据层叠加后的子区域进行分区统计并按照后验概率的大小排序，结果见表2，计算的4个后验概率的相关系数见表3. 从表3可以看出，模型Ⅱ、Ⅲ和Ⅴ的后验概率高度相关，特别是模糊证据权模型(Ⅰ)与加权证据权模型(Ⅳ)和逐步证据权模型(Ⅱ)的后验概率的相关系数分别达到了0.99和0.97，模型Ⅳ与

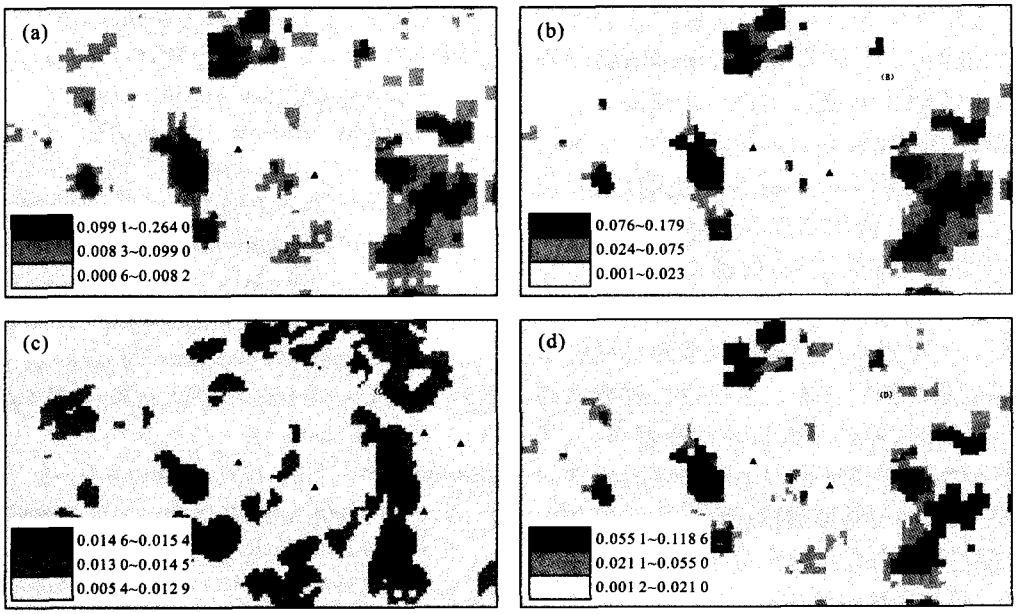

图 2　采用 4 种证据权模型锡铜矿床预测后验概率图

Fig. 2　Posterior probability map using four kinds of weights of evidence model

a. 模糊证据权模型(Ⅰ);b. 逐步证据权模型(Ⅱ);c. 逐步证据权模型(Ⅲ);d. 加权证据权模型(Ⅳ);图中三角形符号表示 11 个 Sn 矿床单元

表 2　基于各个子区域 4 种模型后验概率从大到小排序

Table 2　The rank of 4 posterior probability maps in unique condition

子区域	面积单元数	模糊证据权	逐步证据权(BCDA)	逐步证据权(ABCD)	加权证据权
ABCD	31.6	1	1	1	1
ABC $\bar{D}$	19.4	3	3	5	3
AB $\bar{C}$D	22.0	5	5	2	4
AB $\bar{C}\bar{D}$	10.3	7	7	6	8
A $\bar{B}$CD	23.6	8	9	3	6
A $\bar{B}$C $\bar{D}$	20.7	11	11	7	10
A $\bar{B}\bar{C}$D	158.6	13	13	4	12
A $\bar{B}\bar{C}\bar{D}$	207.1	15	15	8	15
$\bar{A}$BCD	42.6	2	2	9	2
$\bar{A}$BC $\bar{D}$	17.3	4	4	13	5
$\bar{A}$B $\bar{C}$D	36.3	6	6	10	7
$\bar{A}$B $\bar{C}\bar{D}$	5.2	9	8	14	11
$\bar{A}\bar{B}$CD	13.9	10	10	11	9
$\bar{A}\bar{B}$C $\bar{D}$	61.9	12	12	15	13
$\bar{A}\bar{B}\bar{C}$D	171.7	14	14	12	14
$\bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}$	429.7	16	16	16	16

表 3　4 种模型后验概率相关系数

Table 3　Correlation among four posterior probability maps

	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
Ⅰ	0.97	0.29	0.99
Ⅱ		0.21	0.95
Ⅲ			0.36

Ⅱ后验概率的相关系数也达到了 0.95,这说明上述 3 个模型的后验概率的空间分布非常相近. 事实上,就后验概率的异常划分而言,从表 2 可以看出,如果按照加权证据权模型的后验概率排序进行划分:1—3 划为一级异常,占研究区总面积的7.4%,包含了 6 个已知矿床;4—7 为二级异常区,占总面积的 6.8%,包含了 3 个已知的矿床;8—11 为三级异常区,占总面积的 5%,包含了 0 个已知矿床,由于该级异常区包含 0 个已知矿床数也将其与剩余部分合并为背景区,占总面积的 85.8%. 这样异常区总面积占研究区总面积的 14.2%. 同时注意到,如果基于模糊证据权或逐步证据权模型的排序用相同方式进行异常分级,它们的结果与加权证据权模型的分级结果大致相同. 但就后验概率的数值大小而言,它们之间是有区别的. 如果按照面积乘以后验概率估计矿床数,则模型Ⅰ、Ⅱ和Ⅳ估计的矿床数分别为 22.2、20 和 12.8. 这说明模型Ⅳ和Ⅱ能有效地降低由于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高估. 而模型Ⅲ与上述 3 个模型圈定的异常差别较大,效果较差.

3　结论

逐步证据权模型是证据权模型的改进,该模型可以削弱由于证据层不满足条件独立性假设对预测结果产生的影响. 但必须指出的是,从应用实例的效果可以看出预测结果与证据层加入模型的顺序有

关,一种建议是按照证据层对预测对象的显著性大小排序加入到模型中.更多关于加入证据图层的排序以及如何影响预测结果还需要进一步研究.

加权证据权模型比较有效地减弱了由于证据层不满足条件独立性假设对预测结果产生的影响.从本应用实例可以看出,使用相关系数法确定模型的加权系数可以产生较好的效果,但其他方式获得加权系数的方法也值得探讨.

从本应用实例可以看出模糊证据权模型尽管由于证据层不满足条件独立性假设会使得后验概率的值被高估,但就运用后验概率进行异常圈定而言,其与逐步证据权模型和加权证据权模型圈定的异常非常一致.这也再次说明尽管证据权模型要求满足条件独立性假设,但当这一假设不完全满足时可以对后验概率进行校正,而不会对异常的圈定造成太大影响.

References

Agterberg, F. P., Bonham-Carter, G. F., Wright, D. F., 1990. Statistical pattern integration for mineral exploration. In: Gáal, G., Merriam, D. F., eds., Computer applications in resource estimation prediction and assessment of metals and petroleum. *Computers and Geology*, 7: 1−21.

Agterberg, F. P., Cheng, Q. M., 2002. Conditional independence test for weights-of-evidence modeling. *Natural Resources Research*, 11(4): 249−255.

Bonham-Carter, G. F., 1994. Geographic information systems for geoscientists: Modeling with GIS. *Computer Methods in the Geosciences*, 13: 398.

Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., Wright, D. F., 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11): 1585−1592.

Cheng, Q. M., 2000. GeoData analysis system (GeoDAS) for mineral exploration: User's guide and exercise manual. Material for the Training Workshop on GeoDAS Held at York University, Nov. 1 to 3, 2000. 204, www.gisworld.org/geodas.

Cheng, Q. M., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geol. Reviews*, 32(1−2): 314−324.

Cheng, Q. M., 2008. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments. *Mathematical Geosciences*, DOI: 10.1007/s11004−008−9172−6.

Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., 1999. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping. *Natural Resources Research*, 8(1): 27−35.

Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., Ballantyne, S. B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2): 109−130.

Cheng, Q. M., Zhao, P. D., Chen, J. G., et al., 2009a. Application of singularity theory in prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China: Weak information extraction and mixing information decomposition. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 232−242 (in Chinese with English abstract).

Cheng, Q. M., Zhao, P. D., Zhang, S. Y., et al., 2009b. Application of singularity theory in prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China: Information integration and delineation of mineral exploration targets. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 243−252 (in Chinese with English abstract).

Journel, A. G., 2002. Combining knowledge from diverse sources: An alternative to traditional data independence hypotheses. *Mathematical Geology*, 34(5): 573−596.

Thiart, C., Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., et al., 2007. An application of the new Omnibus test for conditional independence in weights-of-evidence modeling. In: Harris, J., Wright, D., eds., GIS for Geosciences Geological Association of Canada, 132−142.

Zhang, S. Y., Cheng, Q. M., Chen, Z., 2008. Omnibus weights of evidence method implemented in GeoDAS GIS for information extraction and integration. *Journal of China University of Geosciences*, 19(4): 404−409.

Zhang, S. Y., Wu, Q., Cheng, Q. M., et al., 2006. Weights of evidence method based on fzzy training layer and its application in desertification assessment. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 389−393 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

成秋明,赵鹏大,陈建国,等,2009a.奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用:成矿弱信息提取和复合信息分解.地球科学——中国地质大学学报,34(2):232−242.

成秋明,赵鹏大,张生元,等,2009b.奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用:综合信息集成与靶区圈定.地球科学——中国地质大学学报,34(2):243−252.

张生元,武强,成秋明,等,2006.基于模糊预测对象的证据权方法及其在土地沙漠化评价中的应用.地球科学——中国地质大学学报,31(3):389−393.