

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.03.018

## 分区变权顶板突水危险性评价方法改进及实例

刘传泽<sup>1</sup>, 谢成龙<sup>1</sup>, 詹润<sup>2</sup>, 李宏泽<sup>3</sup>, 孙贵<sup>2</sup>, 韩锋<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省煤田地质局 勘查研究院, 安徽 合肥 230088; 3. 中煤新集能源股份有限公司, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**为准确合理地评价煤层顶板突水危险性,文章基于地理信息系统(GIS)空间分析技术,结合熵权法对突水分区变权模型进行改进优化。为避免权重确定的主观性与计算复杂性,引入信息熵求取常权向量。为防止“极大”或“极小”值权重超调过大,提高各主控因素综合控制作用与各分区值变权重均衡性,采用保守型分区变权函数对变权模型进行修正。通过直接对主控因素栅格图运算和处理,避免因钻孔插值所造成的构造信息丢失问题。将改进模型与常权模型及仅通过钻孔构建的风险型分区变权模型进行比较,以实际突水点对评价模型进行识别检验。结果表明,改进的分区变权模型评价效果更好、精度更高,对煤矿顶板水害预测与防治具有指导性作用,在口孜东矿取得良好的应用效果。

**关键词:**突水危险性;口孜东矿;地理信息系统(GIS);熵权法;分区变权模型

**中图分类号:**TD745.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)03-0398-08

### Improved zoning variable weight method on risk assessment of roof water inrush and case study

LIU Chuanze<sup>1</sup>, XIE Chenglong<sup>1</sup>, ZHAN Run<sup>2</sup>, LI Hongze<sup>3</sup>, SUN Gui<sup>2</sup>, HAN Feng<sup>2</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Exploration Research Institute, Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Hefei 230088, China; 3. China Coal Xinji Energy Co., Ltd., Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to accurately and reasonably evaluate the water inrush risk of coal seam roof, this paper improves and optimizes the variable weight model of water inrush zone based on geographic information system(GIS) spatial analysis technology and entropy weight method. In order to avoid the subjectivity and computational complexity of weight determination, information entropy is introduced to obtain the constant weight vector. In order to prevent excessive overweighting of maximum or minimum values and to improve the balance between the comprehensive control function of each main control factor and the variable weight of each zone, the conservative variable weight function of each zone is used to modify the variable weight model. By directly calculating and processing the grid diagram of the main control factor, the problem of structural information loss caused by drilling interpolation can be avoided. The improved model is compared with the normal weight model and the zoning variable weight model constructed by drilling, and the actual water inrush point is used to identify the evaluation model. The results show that the improved zoning variable weight model has better evaluation effect and higher precision, and plays a guiding role in the prediction and prevention of water damage of coal mine roof, and has achieved good application effect in Kouzidong mine.

**Key words:** water inrush risk; Kouzidong mine; geographic information system(GIS); entropy weight method; zoning variable weight model

**收稿日期:**2022-04-13; **修回日期:**2022-04-29

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(41772210);中煤新集能源股份有限公司重点资助项目(ZMXJ-LZ-JS-2020-16)和安徽省博士后科研人员科研活动经费资助项目(2020B417)

**作者简介:**刘传泽(1998—),男,安徽阜阳人,合肥工业大学硕士生;

谢成龙(1978—),男,安徽阜阳人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:geoxie@hfut.edu.cn;

孙贵(1979—),男,安徽宣城人,安徽省煤田地质局正高级工程师。

## 0 引言

煤层顶板突水作为煤矿开采的主要灾害之一,是在多种地质因素综合影响下形成的一种非线性动力现象<sup>[1-6]</sup>。针对煤层顶板复杂、变化、量多的指标控制体系,基于地理信息系统(geographic information system, GIS)的多源信息集成技术与评价方法,目前已得到广泛的应用<sup>[7-13]</sup>。但以往评价方法在指标权重的确定上相对固定,大多数未考虑各类控制因素在不同组合状态下的相对重要性与均衡程度。为此,近年来一些学者提出了分区变权理论模型,旨在解决常权模型下突水评价、预测的难题<sup>[14]</sup>。这种理论模型不仅能综合考虑多种指标之间的复杂关系,而且通过对主控因素设定相应的“惩罚”和“激励”机制,能够达到调整各类指标在不同单元权重的目的,是一种更为先进合理的突水评价方法。然而,前人在进行分区变权评价过程中,其常权向量的确定通常采用层次分析法,主观判断性仍然较强,且计算过程相对繁琐。而且,其所构建的状态变权向量对“极大”或“极小”值过于凸显,一定程度上弱化了其余高值或低值的权重。再者,以往分区变权权重与脆弱性指数的计算,仅通过钻孔数据插值

获取,常忽略构造因素的影响,没有刻画因构造指标变化造成的突水情况。

基于上述研究背景,本文以口孜东矿 13-1 煤层顶板突水危险性为例,引入一种简单、客观的常权赋权方法——熵权法,将该方法与分区变权理论相结合,采用保守型函数改进状态变权向量;同时运用 ArcGIS 强大的数据处理与空间分析功能,建立地质构造、含水层与隔水层等多源因素耦合的分区变权改进判识模型。将该方法评价结果与仅通过钻孔构建的风险型分区变权模型及常权模型进行比较,确定本次改进模型的合理性与准确性,为煤矿顶板水害防治提供技术方法参考。

## 1 研究区地质背景

口孜东矿位于阜阳市颍东区与颍上县交界处,地处淮河冲积平原,年均降雨 893.74 mm,面积 43.447 5 km<sup>2</sup>。研究区东边界为 F12 断层,西边界为 DF3 断层,北边界为陈桥背斜露头区,南边界为阜风逆冲推覆断裂。其基本构造特征表现为一个不完整的向斜构造。

区内以发育 NNE 的张性断层为主,地质构造复杂程度中等,13-1 煤层构造如图 1 所示。

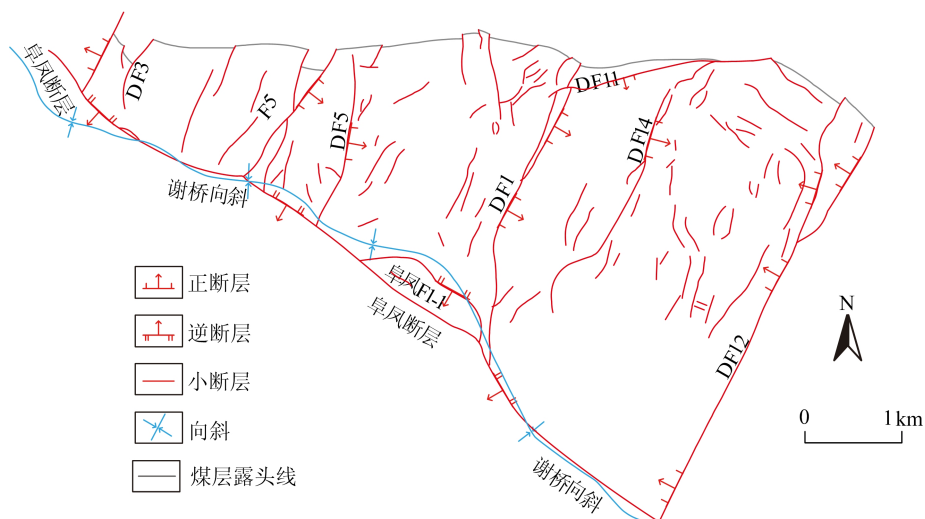


图1 研究区 13-1 煤层构造

13-1 煤层是口孜东矿的矿井首采煤层,其直接充水水源为顶板砂岩裂隙含水层,顶板突水危险性较高。但以往对该煤层的突水危险性评价工作较为有限,评价结果与地质事实吻合度不高。该煤层顶板岩性主要为灰色、灰白色细砂岩,具有垂向裂隙。由于区内裂隙发育不

均一,导致砂岩富水性差异较大,总体以静态存储量为主。

## 2 主控因素选择及数据归一化

主控因素的选取对于分区变权评价模型的构建及脆弱性指数评价结果的准确性起着关键性的

作用<sup>[15]</sup>。本文参考以往研究成果,结合口孜东矿实际生产资料,充分考虑构造、含水层、隔水层等方面的影响,选取导水裂隙带高度、关键层厚度、含水层厚度、隔水层厚度、脆塑性岩厚度比、断层强度、断层交叉点与尖灭点密度 7 个因素作为 13-1 煤层顶板突水的主控因素,7 个因素的具体含义如下:① 导水裂隙带高度,即煤矿开采时形成的突水通道,对煤层突水起促进作用;② 关键层厚度,即导水裂隙带内的关键层在煤层突水时能起到关键的阻水作用,与顶板突水性呈负相关;③ 含水层厚度,即导水裂隙带内的脆性岩是煤层顶板的主要含水层,其厚度是煤层顶板富水性的决定因素之一;④ 隔水层厚度,即导水裂隙带内的塑性岩在受到应力破坏时以蠕变变形为主,具有阻水作用;⑤ 脆塑性岩厚度比,即导水裂隙带高度内脆性岩与塑性岩的比值,可定性判断煤层顶板富水性的大小,比值越大,富水性越强;⑥ 断层强度,即指统计单元面积内所有断层的延伸长度与其落差的乘积之和,该指标不仅能反映研究区内

断层的分布情况,而且考虑了断层落差与长度,能客观真实地反映断层的复杂程度,表达式为  $F = \sum_{i=1}^n (H_i L_i) / S$ ,其中: $F$  为断层强度, $H_i$  为第  $i$  条断层的落差, $L_i$  为第  $i$  条断层的长度, $S$  为统计单元面积; $n$  为统计单元内断层的条数;⑦ 断层交叉点与尖灭点密度,即单位面积内的断层交叉点与尖灭点数量,该指标同样反映构造复杂程度。在断层交叉点与尖灭点处,构造应力薄弱,突水危险性更强。

利用收集到的钻孔抽水试验数据,对 13-1 煤层顶板各主控因素进行量化处理,借助 ArcGIS 空间插值功能可直接建立导水裂隙带高度、关键层厚度、含水层厚度、隔水层厚度、脆塑性比 5 个主控因素栅格分布情况。断层强度、断层交叉点与尖灭点密度采用 ArcGIS 线密度分析与点密度分析工具直接将线文件与点文件量化处理为栅格图。

不同主控因素数值分布的栅格图如图 2、图 3 所示。

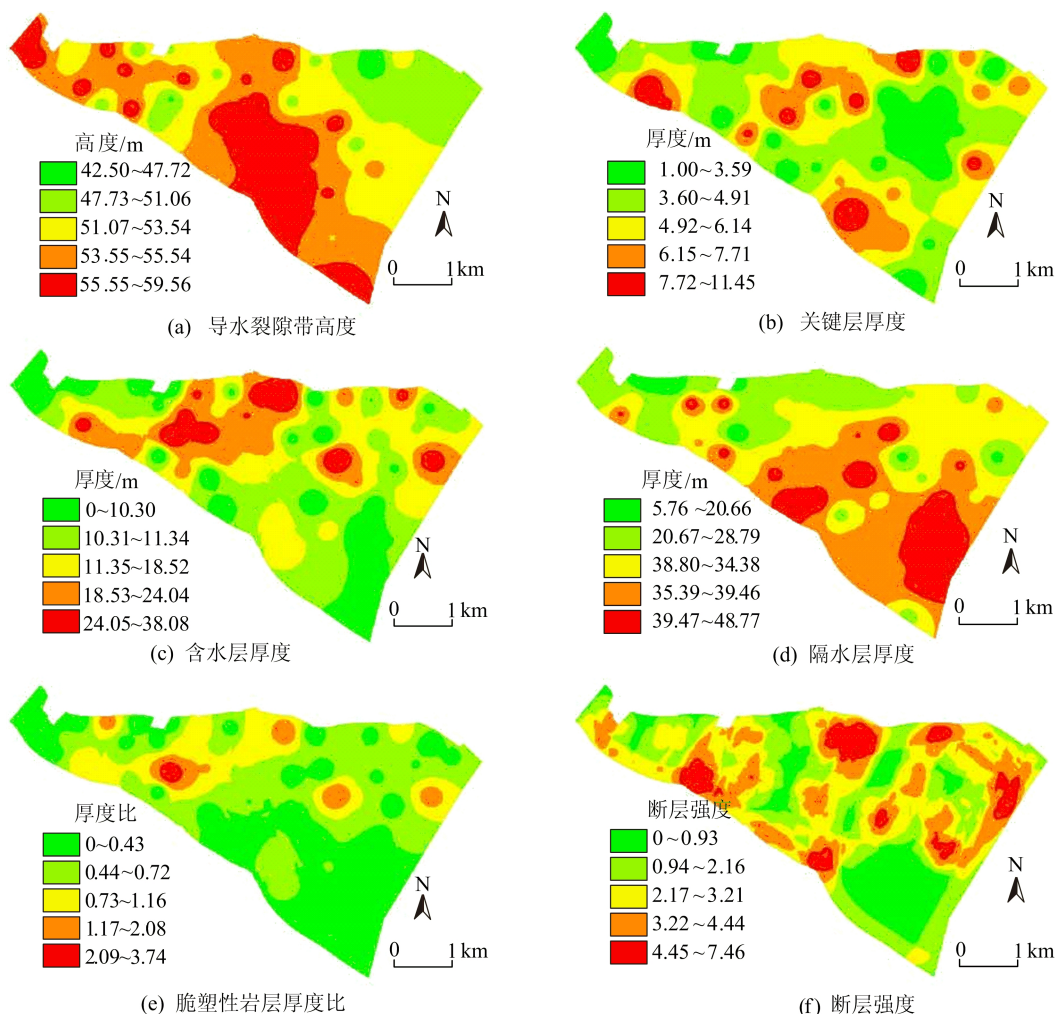


图 2 不同主控因素数值分布栅格图

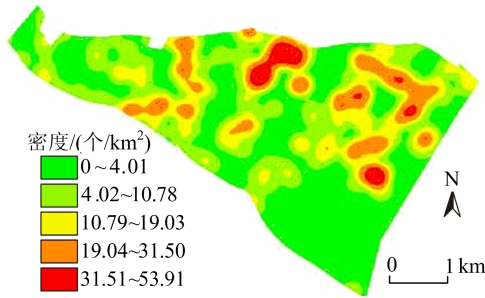


图 3 断层交叉与尖灭点密度分布栅格图

由于各主控因素分属不同类别,需对各因素量值进行归一化处理。各指标按照对煤层突水控制作用区别,可分为正向与逆向指标。

正向指标与突水呈正相关的关系,即量化值越大,越容易突水;反之,逆向指标主要对煤层突水起抑制作用。

正向指标归一化公式为:

$$y_j = (x_j - x_{j,\min}) / (x_{j,\max} - x_{j,\min}) \quad (1)$$

逆向指标归一化公式为:

$$y_j = (x_{j,\max} - x_j) / (x_{j,\max} - x_{j,\min}) \quad (2)$$

其中:  $y_j$  为归一化处理数据;  $x_j$  为归一化前各主控因素的量化值;  $x_{j,\max}$  和  $x_{j,\min}$  分别为各主控因素量化值的最大值和最小值;  $j$  为样本编号。

利用 ArcGIS 中模糊分类工具中的线性函数分类功能对主控因素专题图进行归一化处理,得到主控因素归一化专题过程图。该过程图是建立分区变权模型的基础。

### 3 分区变权模型构建

#### 3.1 熵权法确定常权向量

常规多通过层次分析法确定分区变权模型中的常权向量,但层次分析法操作过程繁琐,且需反复校验调整评价参数。熵权法作为一种客观赋值方法,可依据实际信息量的大小确定影响因素的权重<sup>[16-17]</sup>。信息量越大的因素,在评价中所起到的作用越大,其权重也越大;相反,信息量越小的因素,在评价中所起到的作用越小,其权重也越小。为排除人为因素影响,本文引入熵权法对分区变权模型进行改进。

在运用熵权法确定各主控因素的权重值时,首先要计算第  $i$  项主控因素中第  $j$  个数据的比重,其公式为:

$$f_{ij} = y_{ij} / \left( \sum_{i=1}^n y_{ij} \right)^{-1} \quad (3)$$

其中:  $y_{ij}$  为各主控因素归一化后数值;  $f_{ij}$  为第  $j$  个数据占第  $i$  项主控因素的比重。

第  $i$  项主控因素的信息熵为:

$$H_i = - \frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n (f_{ij} \ln f_{ij}) \quad (4)$$

其中:  $H_i$  为信息熵,可反映信息的无序程度;  $n$  为主控因素中数据的个数。

第  $i$  项主控因素的常权权重为:

$$\omega_i^0 = (1 - H_i) / \sum_{i=1}^m H_i \quad (5)$$

其中:  $\omega_i^0$  为第  $i$  项主控因素的权重;  $m$  为主控因素个数。运用熵权法计算的各常权主控因素常权权重见表 1 所列。

表 1 主控因素常权权重

主控因素	$\omega_i^0$
导水裂隙带高度	0.146
关键层厚度	0.145
含水层厚度	0.143
隔水厚度	0.140
脆塑性岩厚度比	0.143
断层强度	0.143
断层交叉点与尖灭点密度	0.139

#### 3.2 构建分区状态变权向量

构建变权模型的目的是为凸显主控因素突变时对煤层顶板突水的影响程度。设定合理的“惩罚”与“激励”机制可对主控因素原始权重进行调整,使主控因素指标高值或低值获得更大权重,从而提高评价结果的准确性<sup>[18-19]</sup>。“惩罚”区间的因素权重随量化值的增大而减小,“激励”区间的因素权重则随量化值的增大而增大。值得注意的是,单一指标值的激增会明显提高顶板突水危险性等级,但单一指标值的显著降低不一定会使顶板突水危险性等级降低。因此,在构建变权模型时应保证“激励”幅度比“惩罚”幅度大,以满足实际评价需求。

不同函数变权向量模型如图 4 所示。

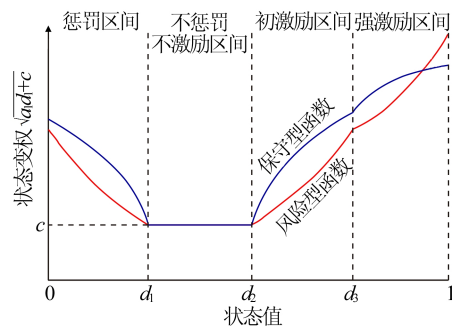


图 4 不同函数的状态变权向量模型

以往的状态变权向量多为风险型函数<sup>[20]</sup>,仅凸显了“极大”或“极小”指标值权重,而“较大”或

“较小”指标值的权重并未得到明显加强。由于煤层顶板突水的发生是由量变到质变的过程,且受多种地质因素综合影响,单指标异常也不一定引发突水。因此,仅凸显“极大”或“极小”指标值的权重并不能体现各影响因素对煤层突水的均衡控制作用。本文采用保守型函数对状态变权向量进行改进,使“较大”或“较小”指标值的权重同样获得较大加强,从而使主控因素权重在高、低异常值处变化更为均衡。构建的状态变权向量函数为:

$$\mathbf{S}_i(x) = (S_{i1}, S_{i2}, S_{i3}, S_{i4}) \quad (6)$$

$$\begin{cases} S_{i1} = \sqrt{a_1(d_1 - x)} + c, & x \in [0, d_1); \\ S_{i2} = c, & x \in [d_1, d_2); \\ S_{i3} = \sqrt{a_2(x - d_2)} + c, & x \in [d_2, d_3); \\ S_{i4} = \sqrt{a_3(x - d_3)} + \\ \quad \sqrt{a_2(d_3 - d_2)} + c, & x \in [d_3, 1] \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\mathbf{S}_i$ 为第*i*项主控因素的状态变权向量; $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 为各主控因素变权区间阈值; $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $c$ 为状态变权向量的调权参数。经计算与调整,确定  $c=0.18$ 、 $a_1=0.533$ 、 $a_2=1.592$ 、 $a_3=0.865$ 。

### 3.3 基于 GIS 的聚类分析及变权区间确定

在应用分区变权模型对各主控因素的常权重进行调整时,需对主控因素的指标值进行分区处理。根据指标值的相似性和差异性作出分类,确定“惩罚”与“激励”区间的范围。利用 GIS 的 isodata 聚类功能,即迁移平均值法对各主控因素指标值进行迭代运算<sup>[21-22]</sup>。相较于 K-均值聚类法,该算法更加灵活合理,通过设置特定的分裂与合并条件,可在聚类过程中自动增减类别数目。

在聚类过程中,首先将不同参数指标值输入分配至各聚类中心,然后计算输入值在各聚类区间的距离指标函数,再依据指定条件对聚类区间进行分裂或合并处理,从而获得新的聚类区间。通过上述步骤反复迭代运算,直到聚类结果收敛,最终获得各主控因素聚类分区图与分区阈值。

通过 20 次迭代运算,将栅格图中所有像元分为 4 类,对分区数据进行提取与归一化处理,得到研究区各主控因素变权区间见表 2 所列。

表 2 主控因素变权区间

主控因素	惩罚区间	不惩罚不激励区间	初激励区间	强激励区间
导水裂隙带高度	[0, 0.500 5)	[0.500 5, 0.648 6)	[0.648 6, 0.763 1)	[0.763 1, 1]
关键层厚度	[0, 0.437 5)	[0.437 5, 0.593 7)	[0.593 7, 0.726 9)	[0.726 9, 1]
含水层厚度	[0, 0.300 0)	[0.300 0, 0.424 0)	[0.424 0, 0.573 1)	[0.573 1, 1]
隔水厚度	[0, 0.236 8)	[0.236 8, 0.352 8)	[0.352 8, 0.484 9)	[0.484 9, 1]
脆塑性岩厚度比	[0, 0.121 7)	[0.121 7, 0.203 7)	[0.203 7, 0.360 8)	[0.360 8, 1]
断层强度	[0, 0.148 8)	[0.148 8, 0.334 3)	[0.334 3, 0.510 9)	[0.510 9, 1]
断层交叉点与尖灭点密度	[0, 0.043 6)	[0.043 6, 0.207 4)	[0.207 4, 0.405 3)	[0.405 3, 1]

### 3.4 建立变权权重栅格图

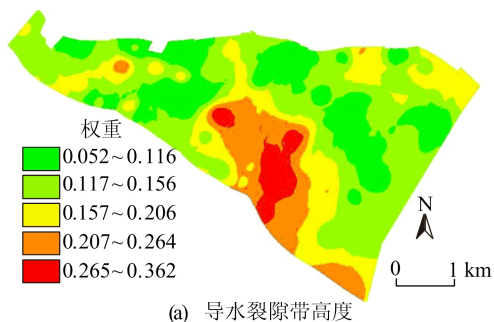
基于确定的主控因素变权区间阈值和调权参数,结合式(6),建立研究区 13-1 煤顶板突水主控因素的变权模型公式<sup>[23]</sup>为:

$$w_i = w_i^0 \mathbf{S}_i \left( \sum_{i=1}^m (w_i^0 \mathbf{S}_i) \right)^{-1} \quad (8)$$

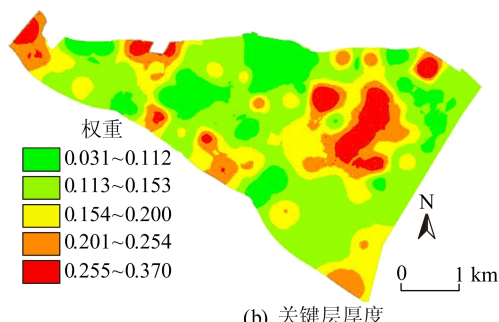
其中: $w_i$ 为第*i*项主控因素的变权权重向量; $w_i^0$ 为第*i*项主控因素的常权重; $\mathbf{S}_i$ 为第*i*项主控

因素的状态变权向量。

依据分区变权模型,借助 ArcGIS 软件,确定不同主控因素变权权重值的空间变化。首先,根据表 2,利用 GIS 栅格计算器 con 函数提取各主控因素不同区间的像元信息,然后使用式(6)、式(8)并结合常权重  $w_i^0$  对各区间栅格图进行运算、组合、叠加,最终得到的各主控因素变权权重栅格分区如图 5 所示。



(a) 导水裂隙带高度



(b) 关键层厚度

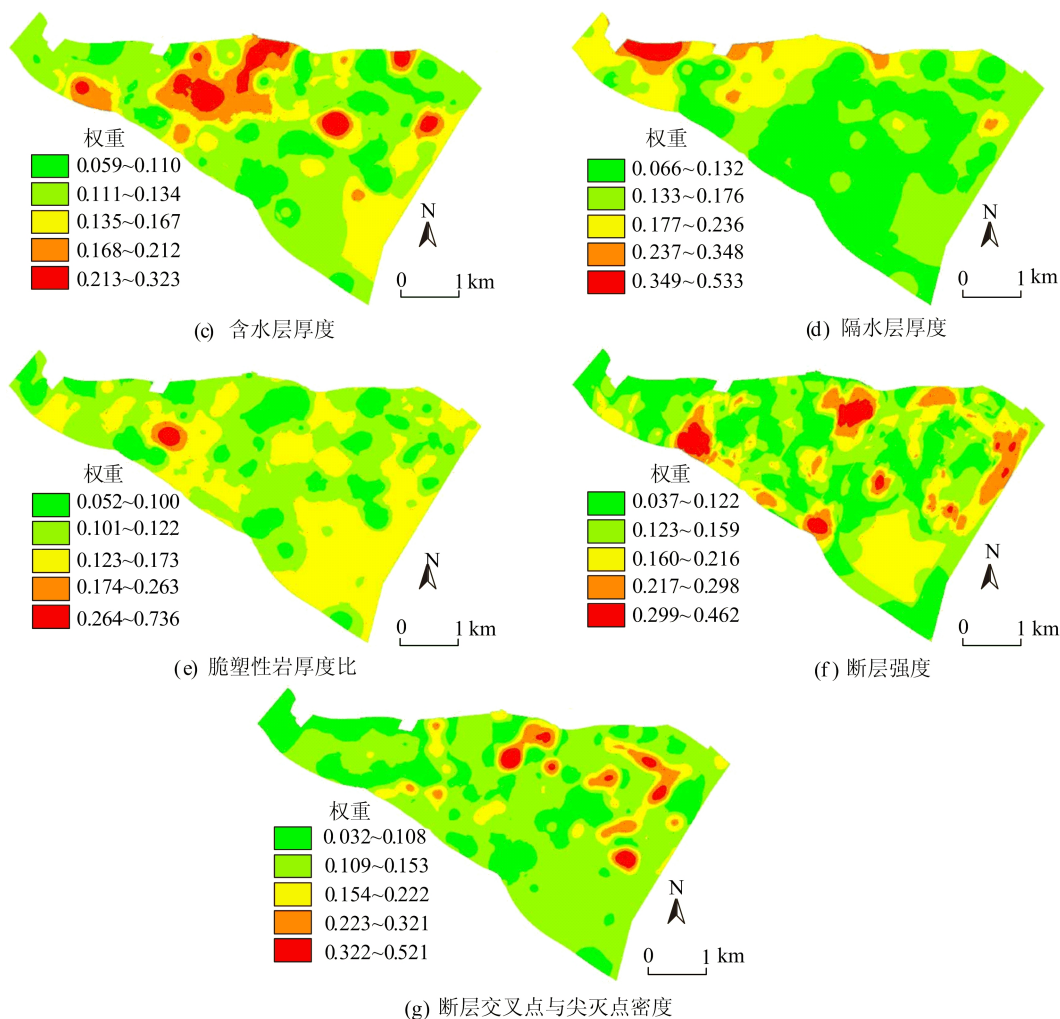


图 5 不同主控因素的变权权重栅格图

图 5 中每个栅格图像元的信息值代表各主控因素专题图对应位置的变权权重。

对比图 5 与图 2、图 3 可看出,主控因素专题图中正向指标红色区域的权重最高,橙色区与绿色区中等,黄色区与浅绿色区的权重最低。反向指标则为绿色区权重最高,浅绿色与红色区中等,黄色区与橙色区最低。

以上特点说明,各主控因素指标值在高值或低值时权重得到加强,这与变权模型的基本原理相符,侧面反映本次所构建的分区变权模型与计算方法准确性较高。

#### 4 顶板突水脆弱性评价

采用脆弱性指数法<sup>[10]</sup>,将分区变权模型确定的各主控因素变权权重与构造条件、岩性因素相结合,建立研究区顶板突水脆弱性评价模型:

$$I_V = \sum_{i=1}^m (w_i f_i(x, y)) \quad (9)$$

其中: $I_V$ 为脆弱性指数; $w_i$ 为第*i*各主控因素的变权权重向量; $f_i(x, y)$ 为第*i*项主控因素归一化后数据; $x, y$ 为地理坐标。

在 ArcGIS 中使用栅格计算器将变权权重栅格图与主控因素归一化专题图相乘后叠加,可计算出 13-1 煤层顶板突水脆弱性指数。采用自然间断点分级法对脆弱性指数预测分区,最终得到保守型变权模型顶板突水脆弱性评价结果如图 6 所示。

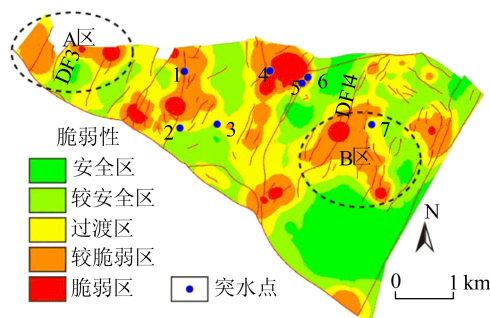


图 6 保守型变权模型顶板突水脆弱性评价结果

## 5 模型对比与验证

### 5.1 模型对比

为进一步证实本次建立的分区变权模型的准确性,将其与常权模型和仅通过钻孔构建的风险型分区变权模型进行对比,常权模型及仅通过钻孔构建的风险型变权模型如图 7 所示。由对比结果可知,3 种模型中各分区空间分布总体趋势相似。其中脆弱区与较脆弱区均呈 NNE 向展布,与矿井主体断裂走向保持一致,显示断裂构造是造成本区突水的主要因素。矿井南部阜风断裂与 NNE 向断层交汇处,脆弱性指数多呈现高值,说明构造交点处应力集中是造成顶板突水的高发地段。

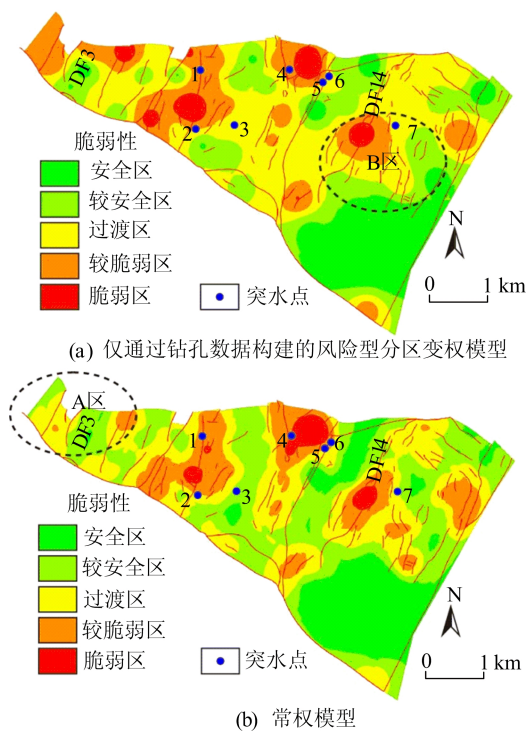


图 7 传统的风险型变权模型与常权模型评价结果

在分区结果上,3 种模型存在明显的差异。相较于图 7b 常权模型,图 6 变权模型缩小了突水较安全区,扩大了较脆弱区与脆弱区的范围。造成这种差异的原因在于构建状态变权向量的“激励”程度大于“惩罚”程度。与处在“惩罚”区间的指标相比,“激励”区间的指标被赋予了更高的权重,因此其安全区范围变小。同时,“强激励”区间的指标被赋予的权重最高,对突水的影响最大,因此脆弱区与较脆弱区范围扩大。此外,图 6 中过渡区范围较图 7a 明显减少,较脆弱区与脆弱区的范围增加,其原因是改进的保守型变权模型不仅

提高了指标值在“极大”或“极小”值的权重,也提高了“较大”或“较小”指标值的权重,从而增加了脆弱区与较脆弱区的范围,减少了过渡区的范围。对比图 6 与图 7a 也可明显看出,利用栅格图构建的评价模型受构造影响更为显著,在断层发育处突水危险性程度普遍提高,这更符合实际地质情况。

从局部地区来看,图 6 中变权模型 A 区 DF3 断层处为较脆弱区,而在常权模型图 7b 中相应位置却为过渡区。究其原因是该地区关键层厚度比周围薄许多,仅为 2 m 左右,且该地区导水裂隙带高度远高于周围,均大于 55 m。因此,相对于其他顶板突水主控因素,该区域关键层厚度和导水裂隙带高度的权重得到加强,指标突变对评价分区结果的影响得到加强。

对比图 7a 与图 6 中的 B 区可以看出,通过栅格图构建的分区变权模型中,B 区 DF14 断层附近为较脆弱区,但在仅通过钻孔构建的变权模型中却为过渡区。造成这种差异的原因是该区域断层密度较高,通过钻孔数据生成的模型仅能反映岩性场分布特点,无法精确地展示断层的影响和分布。而栅格图数据对断层密集程度的表达具有更好的效果,从而使该区域脆弱性指数相对变高。

### 5.2 模型验证

利用 GIS 将口孜东矿 13-1 煤实际突水点信息投影至本次构建的脆弱性评价模型图 6 中,共 7 个点,其中 3 个点位于较脆弱区,4 个点位于过渡区,表明预测模型与实际地质情况一致。位于较脆弱区内的 3 个点均离断层较近,受构造影响明显,且导水裂隙带高度或含水层厚度较大,隔水层厚度较低,脆弱性指数偏大。位于过渡区内的 4 个突水点与断层的距离相对较远,构造影响减弱,但其导水裂隙带厚度较大或关键层厚度较小,因而处于过渡区。

尽管通过钻孔数据构建的风险型变权模型及常权模型针对上述 7 个突水点的评价结果与本次工作基本一致,但两者与保守型变权模型相比,其总体的有效性较低。例如,突水点 3 本次评价在脆弱区,但在常权模型中则处于较安全区,与地质事实不符;2 个较严重的突水点 5、6 本次评价中位于较脆弱区,但在风险型变权模型中位于过渡区,与地质事实也不符合。综上验证,证明本文构建的分区变权模型相较另 2 种传统的模型,与实际情况更吻合,具有较高的精度。

## 6 结 论

1) 分区变权突水评价模型通过建立“惩罚”与“激励”机制,不仅能克服传统常权模型中各指标权重单一赋值的缺陷,而且构建的状态变权向量可对处于不同区间的指标值权重进行重新分配,使得各主控因素在不同组合状态下对煤层顶板突水危险性的影响程度更为合理。

2) 改用熵权法代替层次分析法求取常权向量,排除人为因素对分区变权模型的影响。利用保守型函数调整状态变权向量,使影响因素在异常值范围内的权重分布更加均衡。通过对 GIS 栅格图直接处理运算,简化构建过程,避免因钻孔插值造成的构造信息缺失,提高模型的精确性。

3) 通过与传统常权模型及仅通过钻孔信息构建的风险型分区变权模型进行对比,并利用突水点识别检验,证实了本次改进的分区变权模型评价效果更好,精度更高。

## [参 考 文 献]

- [1] 崔芳鹏,武强,林元惠,等. 中国煤矿水害综合防治技术与方法研究[J]. 矿业科学学报,2018,3(3):219-228.
- [2] WANG P P,JIANG Y D,REN Q S. Roof hydraulic fracturing for preventing floor water inrush under multi aquifers and mining disturbance; a case study[J]. Energies, 2022, 15(3):1-22.
- [3] 董书宁,虎维岳. 中国煤矿水害基本特征及其主要影响因素[J]. 煤田地质与勘探,2007(5):34-38.
- [4] SUN W J, WU Q, DONG D L, et al. Avoiding coal-water conflicts during the development of China's large coal-producing regions[J]. Mine Water and the Environment, 2012, 31(1):74-78.
- [5] 武强,许珂,张维. 再论煤层顶板涌(突)水危险性预测评价的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报,2016,41(6):1341-1347.
- [6] CHEN L W,OU Q H,PENG Z H, et al. Numerical simulation of abnormal roof water-inrush mechanism in mining under unconsolidated aquifer based on overburden dynamic damage[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 133:106005.
- [7] BAI Z G, LIU Q M, LIU Y. Risk assessment of water inrush from coal seam roof with an AHP-CRITIC algorithm in Liuzhuang Coal Mine, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(4):1-15.
- [8] ZHANG Y, TANG S F, SHI K. Risk assessment of coal mine water inrush based on PCA-DBN[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1):1370.
- [9] 钱鸣高,缪协兴,许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报,1996,21(3):2-7.
- [10] 武强,张志龙,张生元,等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 II: 脆弱性指数法[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1121-1126.
- [11] WU P, LIU Y, YU J H, et al. Evaluation of water inrush danger from coal seam floor based on EW-AHP[J]. International Core Journal of Engineering, 2021, 7(10): 535-541.
- [12] WANG X Y, WANG T T, WANG Q, et al. Evaluation of floor water inrush based on fractal theory and an improved analytic hierarchy process[J]. Mine Water and the Environment, 2017, 36(1):870-895.
- [13] 李白英. 预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用[J]. 山东矿业学院学报(自然科学版), 1999, 18(4): 11-18.
- [14] 武强,李博,刘守强,等. 基于分区变权模型的煤层底板突水脆弱性评价:以开滦蔚州典型矿区为例[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9):1516-1521.
- [15] XU Y C, ZHANG E M, LUO Y Q, et al. Mechanism of water inrush and controlling techniques for fault-traversing roadways with floor heave above highly confined aquifers[J]. Mine Water and the Environment, 2020, 39(2): 320-330.
- [16] ZHANG Y X, JIA R T, WU J, et al. Evaluation of groundwater using an integrated approach of entropy weight and stochastic simulation; a case study in east region of Beijing [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(14):7703.
- [17] HE X Y, SHEN J. New evaluation system for the modernization level of a province or a city based on an improved entropy method [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(1):1-10.
- [18] 李博,武强. 煤层底板突水变权脆弱性评价模型参数灵敏度分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6):911-917.
- [19] 武强,李博. 煤层底板突水变权评价中变权区间及调权参数确定方法[J]. 煤炭学报, 2016, 41(9):2143-2149.
- [20] 刘文奇. 变权综合中的惩罚-激励效用[J]. 系统工程理论与实践, 1998(4):42-48.
- [21] PAULA A, OLIVEIRA E J D, HONRIO L D M, et al. MISODATA: unsupervised clustering algorithm to capture representative scenarios in power systems[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(9):e13005.
- [22] VERMA A K, GARG P K, PRASAD H K S. Sugarcane crop identification from LISS IV data using ISODATA, MLC, and indices based decision tree approach[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(1):1-17.
- [23] NIU Q, YU L, JIE Q, et al. An urban eco-environmental sensitive areas assessment method based on variable weights combination [J]. Environment, Development and Sustainability, 2020, 22(3):2069-2085.

(责任编辑 闫杏丽)