



移动扫码阅读

DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2023.06.026

郭强,成文举,杨廷军,等.基于博弈论组合赋权的断层定量评价模型及应用[J].煤矿安全,2023,54(6):199-206.

GUO Qiang, CHENG Wenju, YANG Tingjun, et al. Fault quantitative evaluation model and application based on game theory combination weighting[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(6): 199-206.

基于博弈论组合赋权的断层定量评价模型及应用

郭强¹,成文举²,杨廷军¹,王印¹,唐汝倩²,张呈伟²,徐国梁²,尹会永²

(1.枣庄矿业(集团)有限责任公司 蒋庄煤矿,山东 枣庄 277519;

2.山东科技大学 地球科学与工程学院,山东 青岛 266590)

摘要:为探究一种科学、有效的断层复杂程度评价方法,通过分析断层基本特征指标,基于分形理论,选取断层分维值、断层密度值、断层交变点个数及断层强度指数4个特征指标,利用博弈论思想构建序关系分析法和熵权法的组合赋权方法,对蒋庄煤矿北十采区断层复杂程度进行了评价。结果如下:断层简单及中等构造区主要位于研究区西部、南部及北部,呈环状分布;较复杂构造区主要位于研究区南部及北部,成条状及块状分布;复杂构造区主要位于研究区中部,部分零散分布于南部及北部;极复杂构造区主要呈大块状分布于研究区中部。

关键词:断层复杂程度;序关系分析法;熵权法;博弈论;组合赋权

中图分类号:TD163

文献标志码:B

文章编号:1003-496X(2023)06-0199-08

Fault quantitative evaluation model and application based on game theory combination weighting

GUO Qiang¹, CHENG Wenju², YANG Tingjun¹, WANG Yin¹, TANG Ruqian², ZHANG Chengwei², XU Guoliang², YIN Huiyong²

(1.Jiangzhuang Coal Mine, Zaozhuang Mining Group Co., Ltd., Zaozhuang 277519, China; 2.College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: In order to explore a scientific and effective fault complexity evaluation method, through analyzing the basic characteristic indicators of the fault, based on the fractal theory, selecting the fractal dimension value of the fault, the fault density value, the number of fault interchange points and the fault intensity index as the evaluation indicators, we use the idea of game theory to construct a combined weighting method of order relation analysis method and entropy weight method, and evaluate the complexity of faults in the north No.10 mining area of Jiangzhuang Coal Mine. The results are as follows: the simple and medium tectonic areas of the fault are mainly located in the west, south and north of the study area, and are distributed in a ring shape; the lower complex structural areas are mainly located in the south and north of the study area, distributed in strips and blocks; the complex structural areas are mainly located in the middle of the study area, and some are scattered in the south and north; the extremely complex structural areas are mainly distributed in the central part of the study area in large blocks.

Key words: fault complexity; order relation analysis method; entropy weight method; game theory; combination weighting

在矿井生产及地下工程建设过程中,断层是极为常见的1种地质构造,其对岩石及地层的完整程度具有一定的破坏作用,是威胁矿井安全生产及工

程安全建设的重要影响因素^[1-3]。特别是在煤矿生产过程中,断层极易发育成为突水通道,严重威胁煤层的安全开采^[4-7]。因此对断层进行复杂性评价,对于

收稿日期:2022-05-07 责任编辑:庚馨杰

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804101);山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MD013)

作者简介:郭强(1972—),男,山东枣庄人,高级工程师,本科,从事煤矿地测防治水管理工作。E-mail:jzkdck@163.com

预防矿井突水、瓦斯突出等煤矿地质灾害及其他工程地质建设灾害具有重要的实际意义。

目前,用于表征断层复杂程度的评价指标多为断层长度、断层落差、断层数量等^[8-9],将分维思想引入断层复杂性评价,使评价指标逐渐归结为断层分维值、断层密度及断层强度指数^[10-11];尹尚先等^[12]利用分形分维的思想对钱家营井田进行了构造复杂程度评价,对断层数量、规模、发育程度进行了量化;方家虎等^[13]选用断层密度、断层强度、断层走向指数对芦岭煤矿断层复杂程度进行了评价,结合褶皱指标对矿区构造复杂程度进行了评价。目前对于断层复杂程度的评价多为单方法分析评价^[14-15],仅有少量的文献采用多方法进行综合评价^[16-18];段宏跃等^[19]利用灰色模糊模型,结合褶皱指标对矿山构造程度进行了评价;施龙青等^[20]基于层次分析法-系统聚类分析的方法,结合断层、褶皱、岩浆岩指标对井田构造复杂程度进行了评价。单方法评价评价方法较为单一,不能排除评价方法带来的偶然性,而目前多方法中采用较多的层次分析法具有层次构建、一致性检验较为复杂的缺点,且对于主客观方法的权重

分配科学性不足,因此需要探究 1 种相对更加科学、有效的断层复杂程度评价方法。

序关系分析法是对层次分析法的改进,在保证权重准确性的基础上无需进行判断矩阵的构建,也无需一致性检验,操作性强;博弈论通过斗争与竞争的思想,权衡了博弈双方权重,使各因素权重分配更为科学、合理。因此,结合断层的基本特征,基于分形理论,选取断层分维值、断层密度值、断层交点个数及断层强度指数 4 个指标作为断层复杂程度的评价指标,利用博弈论的思想,对序关系分析法和熵权法进行组合赋权,充分考虑主客观赋权的影响,对蒋庄煤矿断层复杂程度进行评价。

1 研究区构造特征

蒋庄煤矿隶属于枣庄矿业(集团)有限责任公司,位于山东省济宁市微山县欢城镇与滕州市西岗镇交界处。研究区为北十采区,位于矿井东北部。研究区范围东至官家庄断层、赵庄断层,北至田陈煤矿井田边界,西至刘仙庄断层,南至 3_下煤可采边界线。

研究区 3 煤断层分布图如图 1。

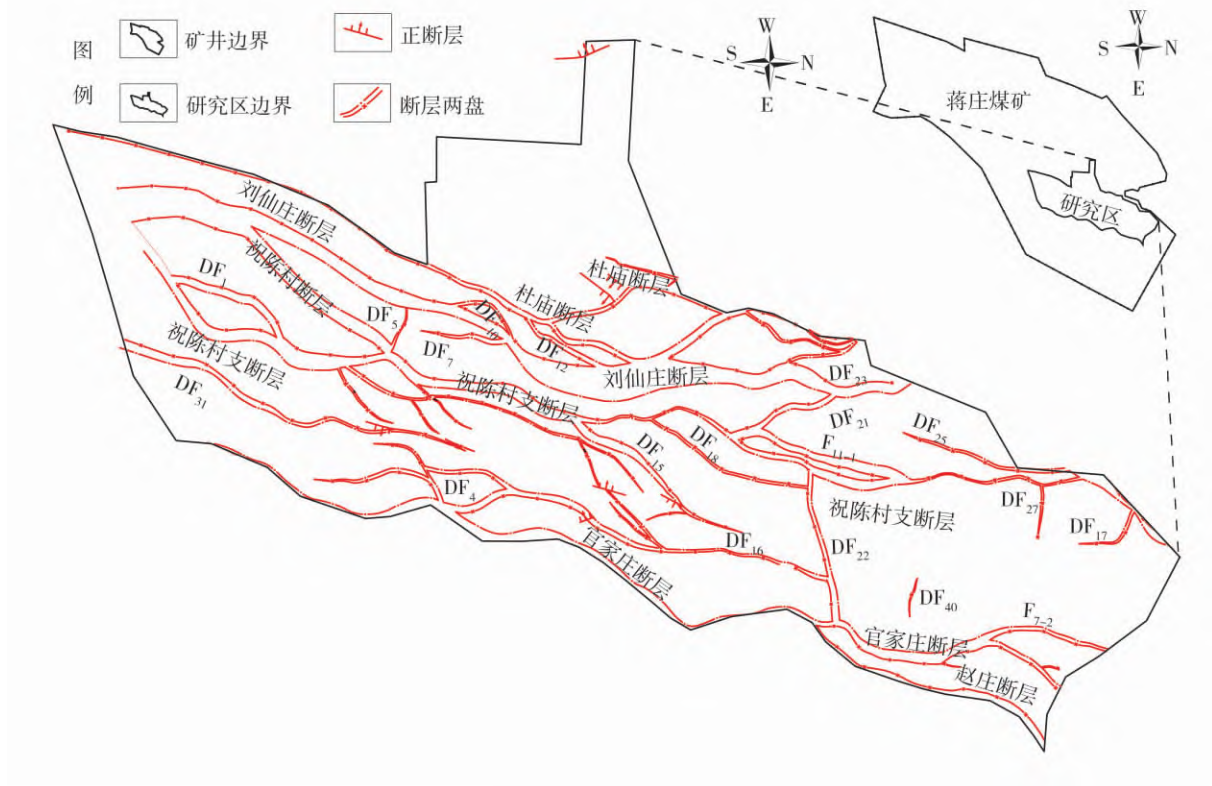


图 1 研究区 3 煤断层分布图

Fig.1 Distribution diagram of 3[#] coal faults in the study area

研究区主要煤(岩)层总体形态为倾向东南的单斜构造,倾角约为 13°,构造以断块构造为主,褶曲

宽缓,沿走向和倾向皆有起伏。研究区受杜庙断层、刘仙庄断层、祝陈村支断层、管家庄断层等控制,断

层多为 NNE、NEE~近 EW 向正断层,形成一断裂构造带,平面上呈脉状发育;剖面上 NNE 向正断层将煤系割裂成为多个深浅有异、高低不等的大致平行的条带。

研究区断层构造极为发育,对采区的开拓、工作面的回采影响较大。全区共发育大小断层 30 余条,均为正断层。其中断层落差大于 100 m 的断层有 6 条,呈南北向贯穿研究区;落差处于 50~100 m 之间的断层有 9 条,分布于整个研究区,主要呈南北方发育,少数呈东西向发育;落差处于 20~50 m 之间的断层有 9 条,主要分布于研究区中部,各个方向均有发育;落差小于 20 m 的断层更为发育,主要为大断层分支或其他小断层,各方向均有发育。为此,对研究区断层落差范围为 2~260 m 的断层进行统计,基本涵盖研究区已知所有断层。

2 评价方法

2.1 序关系分析法(G1 法)

序关系分析法(G1 法)是 1 种主观赋权方法,它在传统层次分析法的基础上,减少了确定各指标权重时的计算量,即不需要构造判断矩阵,且无需一致性检验,计算过程更加简洁清晰^[21]。步骤如下:

1) 指标序关系确定。依据评价指标的重要程度,结合专家给出的评定建议,确定各指标的重要性排序,即若指标 X_i 相对于 X_j 重要,则即为 $X_i > X_j$ 。

2) 相邻指标间相对重要程度判断准则。记专家赋值的评价指标 X_{k-1} 和 X_k 的相对重要程度之比为 R_k ,则:

$$R_k = \frac{X_{k-1}}{X_k} \quad (k=n, n-1, \dots, 2) \quad (1)$$

式中: R_k 为评价指标相对重要程度之比; X_{k-1} 、 X_k 为评价指标值; n 为指标总数。

3) 指标权重 ω_k 。

$$\omega_k = \left(1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n R_i \right)^{-1} \quad (2)$$

$$\omega_{k-1} = R_k \omega_k \quad (k=n, n-1, \dots, 2) \quad (3)$$

式中: ω_k, ω_k 为指标主观权重。

4) 通过序关系分析法求得的权重集合为 $\omega_k = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 。

2.2 熵权法

熵权法是客观赋权法,注重客观数据,通过一系列的数学公式计算得出相应的权重值^[22]。其一般步骤如下:

1) 对数据 $X_{m \times n}$ 进行量纲化处理。计算公式如下:

$$X_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (5)$$

式中: z_{ij} 为第 j 个指标在第 i 个方案标准化处理后的值。

2) 对第 j 个指标在第 i 个方案中所占的比重 p_{ij} 进行计算。

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}}, i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中: p_{ij} 为指标所占比重。

3) 对第 j 个指标的熵值 e_j 进行计算。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, j=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

式中: e_j 为指标的熵值, $k=1/\ln n \geq 0$, $e_j \geq 0$ 。

4) 对第 j 个指标的权重 ω_j 进行计算。

$$\omega_j = \frac{1-e_j}{\sum_{j=1}^m (1-e_j)}, j=1, 2, \dots, m \quad (8)$$

式中: ω_j 为指标客观权重。

2.3 基于博弈论思想的组合赋权

博弈论思想可以在权衡主客观赋权计算时发挥重要的作用,通过对主客观权重分配合理的比重来获得更为准确的组合权重^[23]。即将序关系分析法确定的主观权重 $W_1 = \omega_{11}, \omega_{12}, \dots, \omega_{1m}$ 作为博弈的一方,将熵权法确定的客观权重 $W_2 = \omega_{21}, \omega_{22}, \dots, \omega_{2m}$ 作为博弈的另一方,则博弈双方达到平衡状态的组合权重即为最优组合权重。计算步骤如下:

1) 记博弈论所得的组合权重 W 为:

$$W = \begin{bmatrix} \lambda_1 \omega_{11} + \lambda_2 \omega_{21} \\ \lambda_1 \omega_{12} + \lambda_2 \omega_{22} \\ \vdots \\ \lambda_1 \omega_{1m} + \lambda_2 \omega_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{21} \\ \omega_{12} & \omega_{22} \\ \vdots & \vdots \\ \omega_{1m} & \omega_{2m} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{pmatrix} = \lambda_1 W_1 + \lambda_2 W_2 \quad (9)$$

式中: W 为综合权重; λ_1, λ_2 为线性组合系数。

2) 基于博弈论的思想,建立目标函数,寻求最优线性组合系数 λ_1' 与 λ_2' ,使组合权重与分权重之间具有最小的离差之和。此时最优组合权重记为 W' ,目标函数与约束条件如下:

$$\min(\|W - W_1\|_2 + \|W - W_2\|_2) = \min(\|\lambda_1 W_1 + \lambda_2 W_2 - W_1\|_2 + \|\lambda_1 W_1 + \lambda_2 W_2 - W_2\|_2) \quad (10)$$

式中: $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$; $\lambda_1, \lambda_2 \geq 0$ 。

3) 根据微分原理, 以上模型取得最小值需要满足的一阶导数条件为:

$$\begin{cases} \lambda_1 W_1 W_1^T + \lambda_2 W_1 W_2^T = W_1 W_1^T \\ \lambda_1 W_2 W_1^T + \lambda_2 W_2 W_2^T = W_2 W_2^T \end{cases} \quad (11)$$

4) 对求得的 λ_1 、 λ_2 标准化处理。

$$\begin{cases} \lambda_1' = \frac{|\lambda_1|}{|\lambda_1| + |\lambda_2|} \\ \lambda_2' = \frac{|\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_2|} \end{cases} \quad (12)$$

5) 由以上计算可得评价指标的最优组合权重。

$$W' = \lambda_1' W_1 + \lambda_2' W_2 \quad (13)$$

式中: W' 为最优组合权重。

3 评价指标体系

3.1 断层分维值(D_0)

分形理论可以定量描述不规则形状或分布的自然现象, 并从中提取出规律性、确定性的产量。将分形理论应用到断层评价方面, 断层分维值可以定量表征断裂构造的几何结构和空间分布特征, 其包含断裂的长度、密度以及裂隙相互交叉关系等信息, 综合反映了断裂构造的发育程度^[24]。

在现有的构造研究中, 最常用的是分形理论中的相似维法^[25]。其原理为: 记 R 上任意非空有界子集为 $F(r)$, 覆盖 $F(r)$ 所需的分形基元 B 的相似集 r_B 的最小个数集合为 $N(r)$, 如果 $r \rightarrow 0$ 时, $N(r) \rightarrow \infty$, 从而得出所定义的分维值 D_0 :

$$D_0 = \dim F(r) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{-\lg r} \quad (14)$$

式中: D_0 为断层分维值; r 为网格宽度, m。

断层分维值的测算方法常采用计盒维数法, 即依据研究区的实际情况, 选取 200 m×200 m 的规格大小将研究区划分为若干个一级网格单元, 单元边长记为 l_0 ; 之后在一级网格单元的基础上, 不断对网格大小减半缩小, 即网格边长 $l = l_0/2$ 、 $l_0/4$ 、 $l_0/8$, 分别统计每个一级网格单元内被断层迹线穿过的各级网格数目 $N(l)$ 值; 最后将得到 $N(l)$ 值投放到 $\lg N(l) - \lg l$ 坐标系中, 通过最小二乘法求取拟合直线的斜率, 斜率的绝对值即为该一级网格单元的断层分维值。

3.2 断层密度值(M)

断层密度是指一级网格单元单位面积内断层迹线的条数, 是衡量一定范围内构造复杂程度的重要指标。断层密度值与煤层块段破坏程度成正相关关系, 一般断层密度值越大的区域, 断层对煤层块段的破坏程度越严重, 反之则说明破坏程度越小。断层密度值 M 的计算公式为^[25]:

$$M = \frac{N}{A} \quad (15)$$

式中: M 为断层密度值; N 为一级网格单元内断层总条数; A 为一级网格单元面积。

3.3 交变点个数(X)

交变点个数是指一级网格单元内断层尖灭点及交点的个数, 即为 X 。研究区断层均为张性正断层且各方向均有发育, 构造复杂, 小断层尖灭点及断层交点处岩层破碎程度相较于其他区域更为严重, 易在采动作用下活化沟通采动裂隙, 成为矿井突水的优势通道。

因此, 断层交变点个数可以判断断层之间的连通性, 反应断层形成时构造应力对地层的影响, 从而判断某区域内地层的破碎状态。

3.4 断层强度指数(F)

断层强度指数是指在一级网格单元单位面积上网格内所有断层的延伸长度与其落差的乘积之和, 是对断层落差、断层长度及断层数量综合作用的复杂程度的客观反映。断层落差和长度受地层自身物化性质及构造应力强度的综合影响, 因此对其进行综合考虑可以更加准确地断层自身的导水性能及断层带破坏程度。

断层强度指数通过断层分维划分求得:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N (H_i \times L_i)}{A} \quad (16)$$

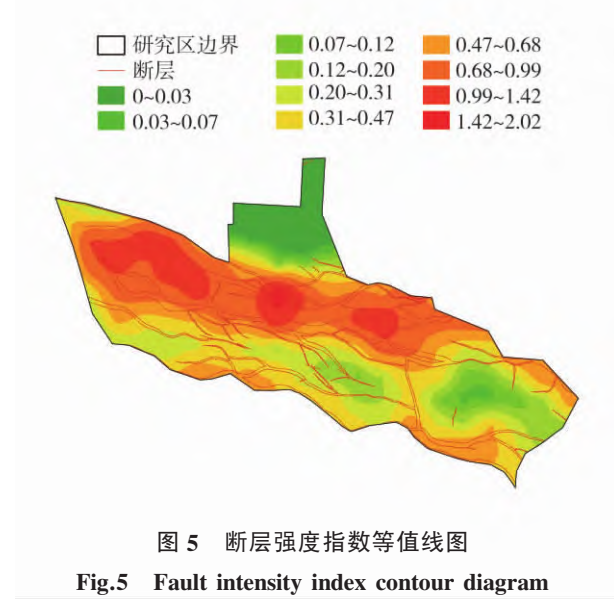
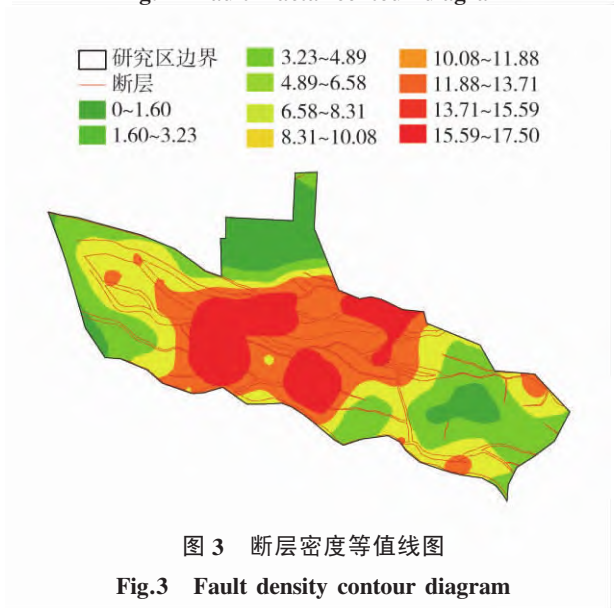
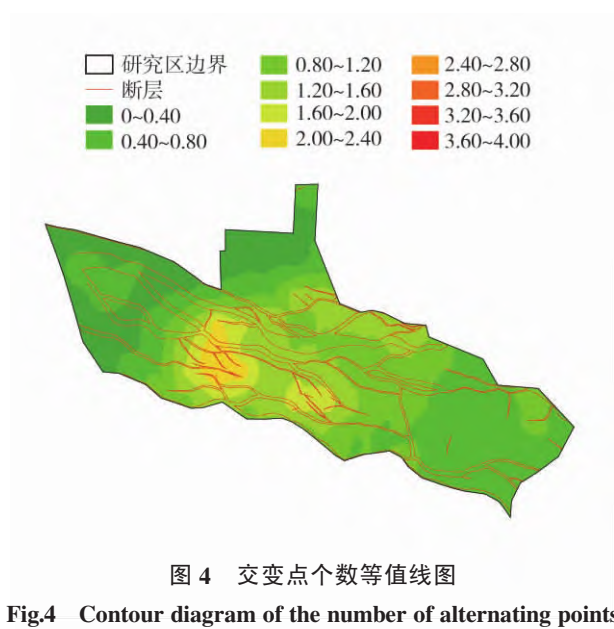
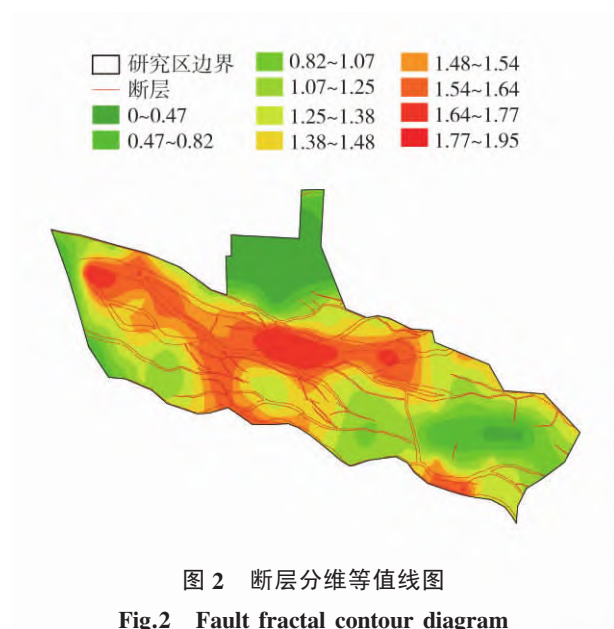
式中: F 为断层强度指数; H_i 为一级网格单元内第 i 条断层的落差, km; L_i 为一级网格单元内第 i 条断层的延展长度, km。

4 断层复杂程度评价

4.1 指标分析

在分形理论的基础上, 依据所选取的评价指标, 通过式(14)~式(16), 对研究区各指标特征进行统计及运算, 最终利用 ARCGIS 克里金插值得到各指标的等值线图。断层分维等值线图如图 2, 断层密度等值线图如图 3, 交变点个数等值线图如图 4, 断层强度指数等值线图如图 5。

由图 2 可知: 研究区断层分维值处于 0~1.95 范围内, 断层分维值的分布具有一定的规律, 大致沿断层线呈条带状分布, 其中断层分维值较大的区域主要位于研究区中部及南部, 表明该区域断层长度较大、密度较高, 其他其余断层长度相对较小, 密度较低。



由图3可知:研究区断层密度值处于区间0~17.50,分布规律大体表现为中间高、四周低。表明研究区的中部区域断层密度比较大,地质构造发育具有一定的聚集性,周边区域断层分布较为稀疏。

由图4可知:研究区断层歼灭点及交点个数处于区间0~4.00,研究区大部分区域交变点个数在2以下,仅在研究区中部小部分区域交变点个数在2以上。表明研究区小断层相对较少,在单位网格单元内断层交叉关系相对较差。

由图5可知:研究区断层强度指数位于处于0~4.29范围内,分布特征具有明显的规律性,数值较高区域表现出沿大断层呈条带状分布的特征,大体表现为中间及东侧高,西侧及中部偏东低,呈现相

间分布的特征,主要受到刘仙庄断层、祝陈村支断层及官家庄断层的影响。

4.2 数据归一化处理

在对断裂构造进行定量评价时,受到各指标统计及计算方法的不同,在利用多指标对断层进行复杂程度评价时,各指标量级会对结果造成一定的影响,为了消除这种影响,需要对各指标数据进行归一化处理。综合考虑所选取的4个评价指标,断层分维值(D)、断层密度值(M)、交变点个数(X)及断层强度指数(F)均与断层复杂程度呈现正相关关系,因此采用最大-最小标准化方法进行归一化处理:

$$w_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (17)$$

式中: w_i 为归一化处理第*i*个指标数据; x_i 为

未归一化处理的第 i 个指标数据; x_{\max} 为未归一化处理的第 i 个指标最大值; x_{\min} 为未归一化处理的第 i 个指标最小值。

4.3 基于博弈论的组合赋权

4.3.1 主观权重

1) 指标序关系确定。依据各项指标对断裂构造复杂性评价的影响程度, 基于研究区的实际地质构造情况, 结合专家意见及相关研究对各指标进行序关系排序。指标序关系赋值见表 1。

表 1 指标序关系赋值表

Table 1 Index order relationship assignment table

指标	交变点个数	断层分维值	断层密度值	断层强度指数
相对值	1.0	1.2	1.2	1.6

2) 指标主观权重。基于表 1 得到的各指标序关系, 通过式(1)~式(3)可计算出各指标的主观权重。各指标主观权重见表 2。

表 2 各指标主观权重

Table 2 Subjective weight of each indicator

指标	交变点个数	断层分维值	断层密度值	断层强度指数
主观权重	0.146 5	0.234 5	0.281 4	0.337 6

4.3.2 客观权重

利用式(17)对各指标原始数据进行归一化处理, 后通过式(4)~式(8)对归一化后的各指标数据进行计算, 最终得到影响断层复杂程度的各指标的客观权重。各指标客观权重见表 3。

表 3 各指标客观权重

Table 3 Objective weight of each indicator

指标	交变点个数	断层分维值	断层密度值	断层强度指数
客观权重	0.296 1	0.052 6	0.080 9	0.570 4

4.3.3 组合权重

由表 2 及表 3 可知: 各指标通过主客观评价得出的权重序列存在一定的差异, 运用博弈论的思想对主客观权重进行权衡, 以此得到更为准确的指标权重, 削弱主客观权重带来的误差。通过式(9)~式(12) 计算得出主客观权重的标准化后的线性比例系数分别为 0.285 4 和 0.714 6, 由式(13)可计算得到各指标的组合权重, 各指标组合权重见表 4。

4.4 评价结果

利用基于博弈论思想得到的组合权重, 对选用的各指标原始数据进行组合计算, 可得到研究区的

表 4 各指标组合权重

Table 4 The weight of each indicator combination

指标	交变点个数	断层分维值	断层密度值	断层强度指数
最优组合权重	0.253 4	0.104 5	0.138 1	0.504 0

断层复杂程度, 利用 ARCGIS 克里金插值模块中的自然断点法对计算结果进行自然断点分级, 将研究区分为简单断裂构造区、中等断裂构造区、较复杂断裂构造区、复杂断裂构造区及极复杂断裂构造区 5 级复杂程度。研究区断层复杂程度分区图如图 6。

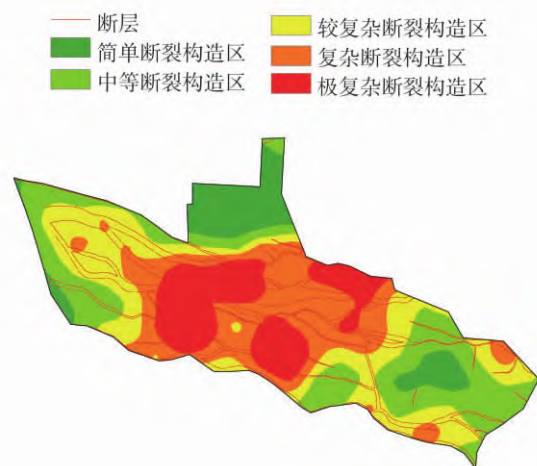


图 6 研究区断层复杂程度分区图

Fig.6 Zoning diagram of fault complexity in the study area

由图 6 可知: 研究区大部分区域断裂构造复杂, 简单断裂构造区及中等断裂构造区主要位于研究区西部、南部及北部, 大体呈环状分布; 较复杂断裂构造区主要位于研究区南部及北部, 成条状及块状分布; 复杂断裂构造区主要位于研究区中部; 另有部分区域呈小块状零散分布于研究区南部及北部; 极复杂断裂构造区主要呈大块状分布于研究区中部。

5 结 语

1) 基于研究区的实际构造情况, 选取断层分维值、断层密度值、交变点个数及断层强度指数作为评价断层复杂程度的影响指标, 利用序关系分析法、熵权法并通过博弈论思想进行耦合赋权, 构建断层复杂程度评价模型。

2) 利用研究得出的断层复杂程度评价模型对研究区断裂构造复杂程度进行定量评价, 通过 ARCGIS 自然断点法将研究区断层复杂程度划分为 5 个区

域:简单断裂构造区、中等断裂构造区、较复杂断裂构造区、复杂断裂构造区及极复杂断层构造区。

3)简单及中等断裂构造区主要位于研究区西部、南部及北部,呈环状分布;较复杂断裂构造区主要位于研究区南部及北部,成条状及块状分布;复杂断裂构造区主要位于研究区中部,部分零散分布于南部及北部;极复杂断裂构造区主要呈大块状分布于研究区中部。

参考文献(References):

- [1] 张学博,王豪,沈帅帅.小断层活化对采空区上覆岩层破坏及渗透性影响[J].煤炭科学技术,2022,50(2): 75-85.
ZHANG Xuebo, WANG Hao, SHEN Shuaihuai. Effect of small faults activation on failure and permeability of overburden strata in goaf[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 75-85.
- [2] 周光新,盛谦,崔臻,等.走滑断层错动影响下跨活断层铰接隧洞破坏机制模型试验[J].岩土力学,2022, 43(1):37-50.
ZHOU Guangxin, SHENG Qian, CUI Zhen, et al. Model test of failure mechanism of tunnel with flexible joint crossing active fault under strike-slip fault dislocation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 37-50.
- [3] 谢小平,吴刚,尉瑞,等.断层附近软岩巷道围岩破坏机理及控制研究[J].煤炭科学技术,2020,48(9): 195-202.
XIE Xiaoping, WU Gang, WEI Rui, et al. Study on the failure mechanism and control technology of surrounding rock of soft rock roadway near fault[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 195-202.
- [4] 尹会永,郎宁,周鑫龙,等.基于断层封闭性与数值模拟的断层导水性综合评价[J].煤矿安全,2022,53(3): 200-207.
YIN Huiyong, LANG Ning, ZHOU Xinlong, et al. Comprehensive evaluation of fault hydraulic conductivity based on fault sealing and numerical simulation [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(3): 200-207.
- [5] 李光辉,王杰,谢道雷,等.基于断层封闭性的导水性评价及防隔水煤柱设计[J].中国矿业,2021,30(3): 138-143.
LI Guanghui, WANG Jie, XIE Daolei, et al. Evaluation of water conductivity based on fault sealing property and design of water-proof coal pillar[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(3): 138-143.
- [6] 曹运兴,张海洋,张震,等.正断层上盘的煤与瓦斯突出特征与地应力场控制机理[J].煤田地质与勘探, 2022,50(4):61-69.

- 2022,50(4):61-69.
CAO Yunxing, ZHANG Haiyang, ZHANG Zhen, et al. Characteristics of coal and gas outburst and controlling mechanism of stress field in the hanging wall of normal fault[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(4): 61-69.
- [7] 曹佐勇,何学秋,王恩元,等.隐伏逆断层带的瓦斯涌出规律及控制因素研究[J].采矿与安全工程学报, 2018,35(3):657-662.
CAO Zuoyong, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Law of methane emission and its controlling factors in the blind reverse fault zone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 657-662.
- [8] 李静,刘晨,刘惠民,等.复杂断层构造区地应力分布规律及其影响因素[J].中国矿业大学学报,2021,50 (1):123-137.
LI Jing, LIU Chen, LIU Huimin, et al. Distribution and influencing factors of in-situ stress in complex fault tectonic region[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(1): 123-137.
- [9] 刘伟,吴基文,胡儒,等.矿井构造复杂程度定量评价与涌(突)水耦合分析[J].工矿自动化,2019,45(12): 17-22.
LIU Wei, WU Jiwen, HU Ru, et al. Quantitative evaluation of mine structure complexity and its coupling analysis with water bursting[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(12): 17-22.
- [10] 霍丙杰,张宏伟,韩军.地质构造对煤层复杂性影响的定量评价方法[J].煤田地质与勘探,2012,40(3): 13-17.
HUO Bingjie, ZHANG Hongwei, HAN Jun. Evaluation method of influence of structural geologic conditions on coal seam complexity[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(3): 13-17.
- [11] 聂凤祥,刘永杰,郭海峰.基于分形理论的断层构造对千米深井瓦斯赋存规律的影响研究[J].煤矿安全,2019,50(3):150-153.
NIE Fengxiang, LIU Yongjie, GUO Haifeng. Study on influence of fault structure on laws of gas occurrence in kilometer deep mine based on fractal theory[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(3): 150-153.
- [12] 尹尚先,吴志远.钱家营井田构造复杂程度定量评价[J].煤矿安全,2019,50(5):218-221.
YIN Shangxian, WU Zhiyuan. Quantitative evaluation of structural complexity of Qianjiaying Mine Field[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(5): 218-221.
- [13] 方家虎,李志,张洋,等.芦岭煤矿8煤层地质构造复杂程度综合评价[J].煤田地质与勘探,2016,44(1):

- 22-26.
- FANG Jiahu, LI Zhi, ZHANG Yang, et al. Comprehensive evaluation of geological structure complexity of 8th seam in Luling mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(1): 22-26.
- [14] 马良,郭瑞.准格尔煤田不连沟矿井构造特征及其对煤矿生产的影响[J].煤田地质与勘探,2020,48(3): 35-44.
- MA Liang, GUO Rui. The structural characteristics and their influence on production of Buliangou coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 35-44.
- [15] 李家宏,朱炎铭,唐鑫,等.唐山矿西南区构造复杂程度的熵函数评价[J].煤田地质与勘探,2015,43(3): 6-10.
- LI Jiahong, ZHU Yanming, TANG Xin, et al. Entropy function evaluation of geological structure complexity of southwest section in Tangshan mine[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(3): 6-10.
- [16] 徐文军,张莎莎,吴财芳,等.基于层次分析法的煤储层构造复杂程度定量评价[J].河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(2): 20-26.
- XU Wenjun, ZHANG Shasha, WU Caifang, et al. Quantitative assessment of structure complexity of coal reservoir based on analytical hierarchy process[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2019, 38(2): 20-26.
- [17] 张海涛,高珊.阳泉矿区基于分形理论的构造复杂程度定量评价[J].沈阳大学学报(自然科学版),2018, 30(3): 218-222.
- ZHANG Haitao, GAO Shan. Quantitative evaluation of structural complexity based on fractal theory in Yangquan Mining Area[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2018, 30(3): 218-222.
- [18] 左林霄,高鹏,冯栋,等.基于AHP-熵权法耦合方法的地质构造复杂程度定量评价[J].煤炭科学技术, 2022,50(11): 140-149.
- ZUO Linxiao, GAO Peng, FENG Dong, et al. Quantitative evaluation of geological structure complexity based on the coupling method of AHP-entropy weight method[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(11): 140-149.
- [19] 段宏跃,陆鹿,谢卫东,等.基于灰色模糊模型的塔山煤矿构造复杂程度定量评价[J].地质与勘探,2022, 58(2): 420-428.
- DUAN Hongyue, LU Lu, XIE Weidong, et al. Quantitative assessment of structural complexity in the tashan coal mine based on the grey fuzzy model[J]. Geology and Exploration, 2022, 58(2): 420-428.
- [20] 施龙青,滕超,韩进,等.基于层次分析法-系统聚类分析的井田构造复杂程度评价[J].中国科技论文, 2015,10(21): 2550-2554.
- SHI Longqing, TENG Chao, HAN Jin, et al. Evaluation of mine field structure complexity based on analytical hierarchy process and hierarchical cluster analysis[J]. China Sciencepaper, 2015, 10(21): 2550-2554.
- [21] 方国华,叶晓晶,姚怀柱,等.基于模糊物元法的农村河道生态状况评价[J].中国农村水利水电,2022(4): 80-84.
- FANG Guohua, YE Xiaojing, YAO Huaizhu, et al. Evaluation of rural river ecological conditions based on fuzzy matter element method[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(4): 80-84.
- [22] 刘国丹,纪铨行,滕润,等.基于熵权法的光热耦合综合能耗的百叶外遮阳控制策略[J].太阳能学报,2022, 43(3): 236-241.
- LIU Guodan, JI Yihang, TENG Run, et al. Control strategy of outer louver shading considering light-thermal coupling comprehensive energy consumption based on entropy weight method[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022, 43(3): 236-241.
- [23] 程灏,逯与浩,刘淑芳,等.基于云模型和博弈论组合赋权的地铁施工安全风险评价[J].青岛理工大学学报,2022,43(1): 115-122.
- CHENG Hao, LU Yuhao, LIU Shufang, et al. Safety risk assessment of subway construction based on combination of cloud model and game theory[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2022, 43(1): 115-122.
- [24] 彭涛.淮北煤田断裂构造系统及其形成演化机理[D].淮南:安徽理工大学,2015.
- [25] 邱梅,施龙青,滕超,等.构造预测与定量评价模型的构建及应用[J].煤矿安全,2013,44(9): 207-210.
- QIU Mei, SHI Longqing, TENG Chao, et al. Construction and application of structure forecast of quantitative evaluation model[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(9): 207-210.