

基于AHP-熵权组合模型的矿井地质构造复杂程度定量评价

康金虎^{1*}, 翟晓荣^{1,2}, 唐 明³, 张 磊³, 包福新⁴

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²矿井水害综合防治煤炭行业工程研究中心, 安徽 淮南

³淮南矿业(集团)有限责任公司张集煤矿, 安徽 淮南

⁴安徽省煤田地质局第一勘探队, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年4月16日; 录用日期: 2026年5月13日; 发布日期: 2026年7月9日

摘 要

矿井地质构造的复杂程度直接影响工作面合理布置, 并在断层等导水性异常构造存在时, 增加矿井水害等灾害风险。为实现井田构造复杂程度的科学定量评价, 在系统梳理井田地质条件的基础上, 结合钻探和物探资料所揭示的构造发育规律, 选取利用断煤交线通过滑动窗口法计算出的分维值、落差高度与断层发育长度计算得出的断层强度、单元格内断煤交线数量统计得出的断层密度及利用等高线计算出的褶曲平面变形系数作为四个主控因素, 构建矿井地质构造复杂程度的定量评价体系。针对层次分析法(AHP)赋权主观性强的问题, 引入客观赋权法-熵权法, 采用AHP-熵权法结合丰富的专家主观经验权重与数据分析得出的客观权重, 以此建立研究矿井定量评价模型, 对构造复杂程度进行合理评价。模型将研究区复杂程度划分为由高到低的四个等级, 为矿井高效安全生产提供科学依据。

关键词

层次分析法, 熵权法, 地质构造, 矿井, 定量评价

Quantitative Evaluation of Mine Geological Structural Complexity Based on an AHP-Entropy Weight Combination Model

Jinhu Kang^{1*}, Xiaorong Zhai^{1,2}, Ming Tang³, Lei Zhang³, Fuxin Bao⁴

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

*通讯作者。

文章引用: 康金虎, 翟晓荣, 唐明, 张磊, 包福新. 基于 AHP-熵权组合模型的矿井地质构造复杂程度定量评价[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 930-939. DOI: 10.12677/me.2026.144092

²Coal Industry Engineering Research Center for Comprehensive Prevention and Control of Mine Water Disaster, Huainan Anhui

³Zhangji Coal Mine, Huainan Coal Mining (Group) Co., Ltd., Huainan Anhui

⁴The First Exploration Team of Anhui Coalfield Geological Bureau, Huainan Anhui

Received: April 16, 2026; accepted: May 13, 2026; published: July 9, 2026

Abstract

The complexity of mine geological structures directly influences the rational layout of working faces and, in the presence of water-conducting anomalies such as faults, increases the risk of disasters like mine water hazards. To achieve a scientifically quantitative evaluation of the structural complexity in the mining field, a quantitative evaluation system for mine geological structural complexity was constructed based on a systematic review of the mining field's geological conditions, combined with the structural development patterns revealed by drilling and geophysical exploration data. Four primary controlling factors were selected: the fractal dimension value calculated using the slip line intersection via the sliding window method; fault strength calculated from throw height and fault development length; fault density obtained by statistically counting the number of slip line intersections within grid cells; and the fold plane deformation coefficient calculated from contour lines. To address the issue of strong subjectivity in weighting by the Analytic Hierarchy Process (AHP), the objective weighting method + Entropy Weight Method (EWM) was introduced. A combination of AHP and EWM was employed, integrating the abundant subjective expert experience weights with objective weights derived from data analysis, thereby establishing a quantitative evaluation model for the study mine to reasonably assess the degree of structural complexity. The model divides the study area's complexity into four levels, from high to low, providing a scientific basis for efficient and safe mine production.

Keywords

Analytic Hierarchy Process (AHP), Entropy Weight Method, Geological Structure, Mine, Quantitative Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地质构造复杂度是矿产资源开采的关键因素之一，在勘探和资源评估中复杂的构造会增加勘探难度，使资源量估计误差增大。在开采中复杂区域可能隐藏着地质异常，若未提前探明可能会引发突水、瓦斯突出等灾害。为了减少此类灾害发生，需对研究区的构造复杂度进行相关研究。近年来，国内外学术界围绕构造复杂程度评价已展开丰富探索，相关研究不断推进，并取得了阶段性成果。例如，周明闻[1]利用模糊评判和灰色技术结合预测了矿井复杂程度，为矿井开采提供参考；张春辉[2]利用模糊分析法对构造复杂度进行评价，利用因素权重和程度权重值相结合解决了矿井构造复杂性与动态预测性问题；汪伟民[3]、左林霄[4]、李亚飞[5]等运用 AHP 与熵权法结合对矿井复杂度进行定量评价，其中汪伟民结合此方法对钱营孜煤矿 32 复杂度进行了合理评价，李亚飞则在此方法评价的基础上对鹤壁矿区突水进行了危险性评价，三者均用此方法为矿区复杂度预测提供依据。结合前人各种方法上的优劣，本文利用 AHP 法

及熵权法，通过断层与褶皱中的四个指标构建符合矿区实际情况的评价模型，以模型的结果为依据，为规划开采区域及防护设置做出合理的建议。

2. 地质概况

矿井整体的形态分布为扇形且构造形式为单斜，位于谢桥北部、陈桥东部偏南区域。地层以转折性的间断弧形为走向：西部区域的地层段则是以北偏西 75°为走向，中部以偏东为主，北部区域向北趋近。倾角方面，石门西部约为 10°，东部约 5°，谢桥区域基本为 15°，边缘区域 30°，整体起伏趋于平稳；向斜轴以南附近断层较为发育。褶皱不甚发育，谢桥 - 古沟向斜轴在井田东南部穿过，有向西仰起的趋势，在六东线附近及以西地区，向斜形态已不明显，或被阜凤逆冲推覆构造带所截；向斜北翼地层成为以阜凤逆冲断层为主滑覆面的逆冲推覆构造之原地系统，呈现向南倾斜的单斜构造。矿井构造方法图如图 1 所示。

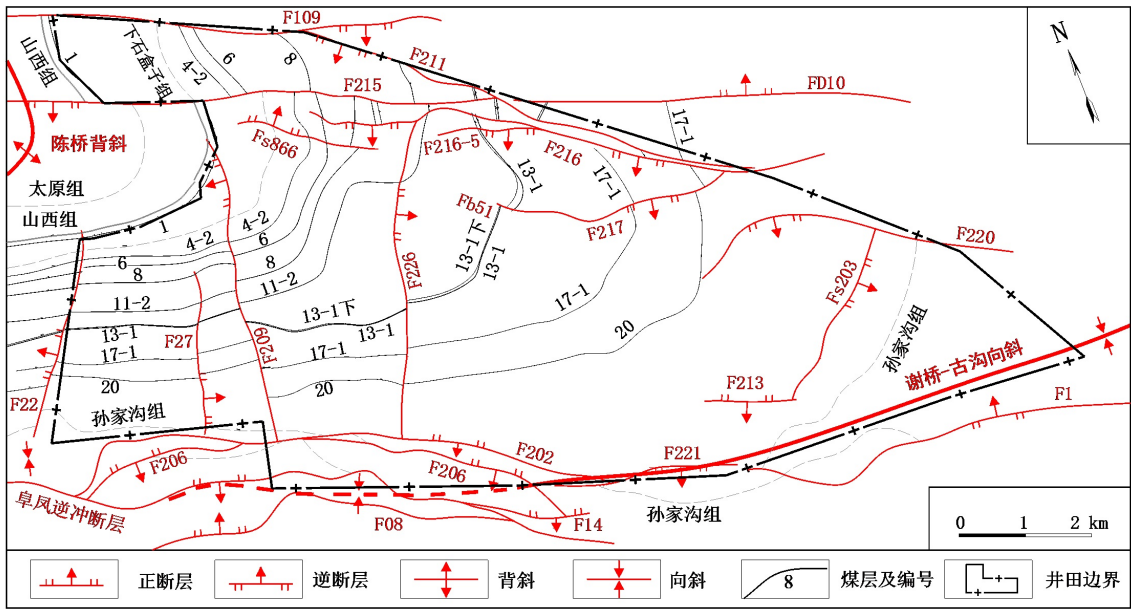


Figure 1. Mine structural outline map
图 1. 矿井构造纲要图

3. 评价指标的确定

基于勘探和资料分析，本文对地质构造复杂度的研究主要从断层和褶皱两方面探讨，并划分为四个研究指标，来对该区域的复杂度进行量化评价。断层方面的指标选取利用断煤交线通过滑动窗口法计算出的分维值、落差高度与断层发育长度计算得出的断层强度、单元格内断煤交线数量统计得出的断层密度，褶皱方面选取利用等高线计算出的褶曲平面变形系数作为四个主控因素。

3.1. 断层强度

断层强度是划分单元格内所有断层延伸长度及其落差高度的乘积之和。该指标通过对断层的数量、落差高度以及水平延伸长度的研究对其进行定量评价。即断层强度 F ：

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n L_i H_i}{S} \tag{1}$$

式中：\$S\$ 为划分的单元格面积，\$\text{m}^2\$；\$L_i\$ 为划分的单元格内第 \$i\$ 条断层的水平延伸长度，\$\text{m}\$；\$H_i\$ 为划分的单元格内的水平落差高度，\$\text{m}\$。

由于资料中的落差高度都是以范围形式出现，故本文均取最高值。如图 2 所示，断层强度高值区域主要在研究区的北部及东部聚集为 0.15~0.59，主要分布在大断裂区域，符合实际。西部区域强度中等为 0.15~0.25，中部强度较弱为 0~0.15。

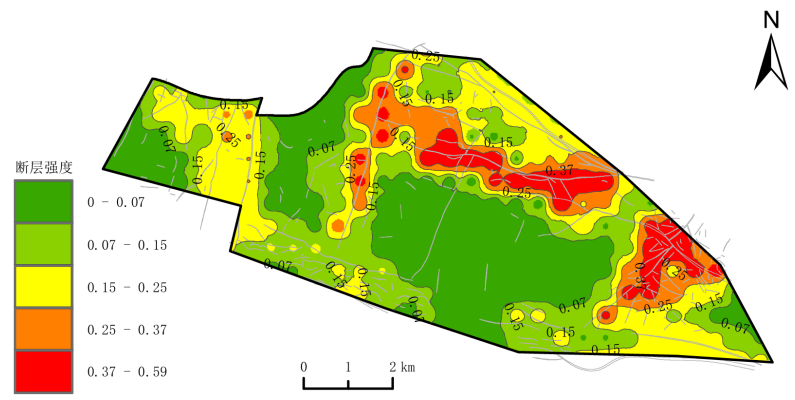


Figure 2. Fault strength contour map
图 2. 断层强度等值线图

3.2. 断裂分维值

断裂分维值中的多种变化关系可作为充分反映构造发育的综合性指标[6]。分维值可以通过断层的长度及数量等充分反应断层的构造发育程度，分维值较大的区域，构造发育程度较大[7]。分维的获取有多种方法，本次使用滑动窗口法[8]，运用边长 \$\varepsilon\$ 为 1000 m、500 m、250 m、125 m 的网格去覆盖断裂区域，网格分布图如图 3 所示，记录不同网格覆盖时包含断裂线的网格数 \$N(\varepsilon)\$ 值，将其带入公式中拟合出斜率[9]，计算对应单元格的得分值：

$$D_s = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{-\lg \varepsilon} \quad (2)$$

式中：\$N(\varepsilon)\$ 为单元格划分网格中包含断裂线的数目；\$\varepsilon\$ 为变化的单元格大小，\$\text{m}\$。

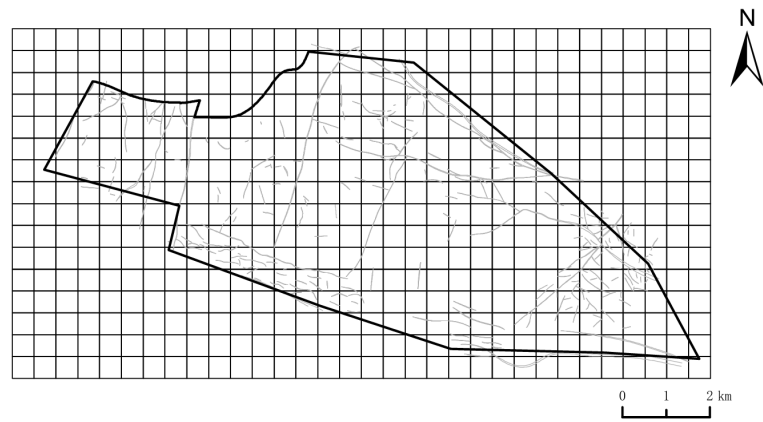


Figure 3. Grid meshing diagram
图 3. 网格分布图

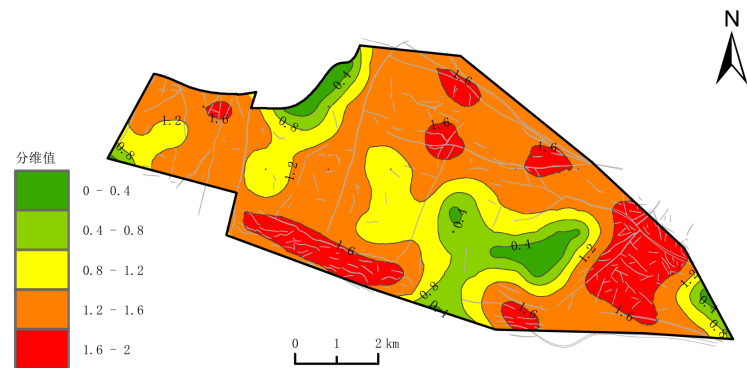


Figure 4. Fractal dimension value contour map of fractures
图 4. 断层分维值等值线图

由图 4 可直观看出, 研究区较高分维值区域聚集在断裂线较复杂地段, 主要分布在东南部和西南部, 为 1.6~2, 大部分区域在高值区, 为 1.2~1.6, 中部地区是低值区域, 为 0~1.2。

3.3. 断层密度

断层密度 M 是指划分单元面积内发现的断裂线的总条数。公式为[10]

$$M = \frac{N}{A} \tag{3}$$

式中: N 为单元格内包含的断裂线条数, 条; A 为单元格的面积, m^2 。

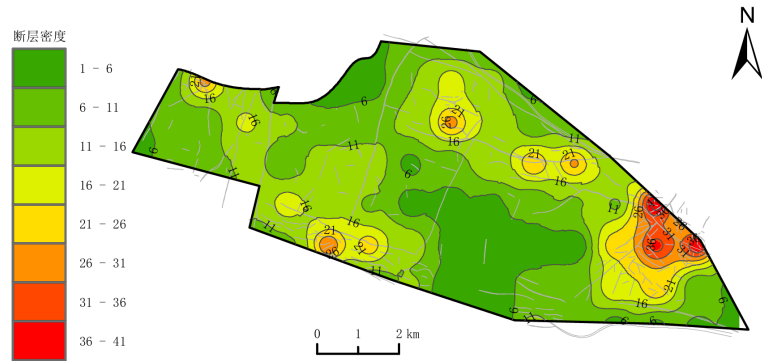


Figure 5. Fault density contour map
图 5. 断层密度等值线图

由图 5 可知, 研究区 $M=1\sim44$ 条, 东南部区域断裂线数量聚集, 西南部聚集一般, 其他区域断裂线较少。

3.4. 褶皱变形系数

可通过对褶皱平面变形系数 K_p 的研究为矿井的变形程度进行定量评价[11]:

$$K_p = \frac{HL_0}{L_1L_2} \tag{4}$$

式中: K_p 为平面变形系数; L_0 为距离划分单元格中心点最近的等高线的实际长度, m ; L_2 为割线长度, m ; L_1 为等高线间的平距, m ; H 为计算的两条等高线的高程值的差, m 。变形系数计算图如图 6 所示。

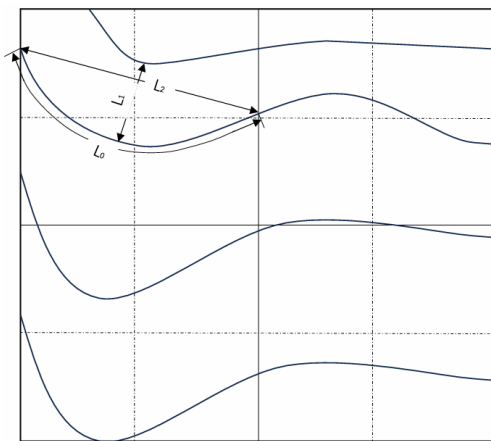


Figure 6. Schematic diagram of deformation coefficient
图 6. 变形系数计算示意图

由图 7 可知, 变形系数聚集区主要在中部及中部偏东, 即 0.18~0.57, 最高值可达 0.57, 是等高线变化程度最大的区域, 其他地区变形系数较低, 符合实际。

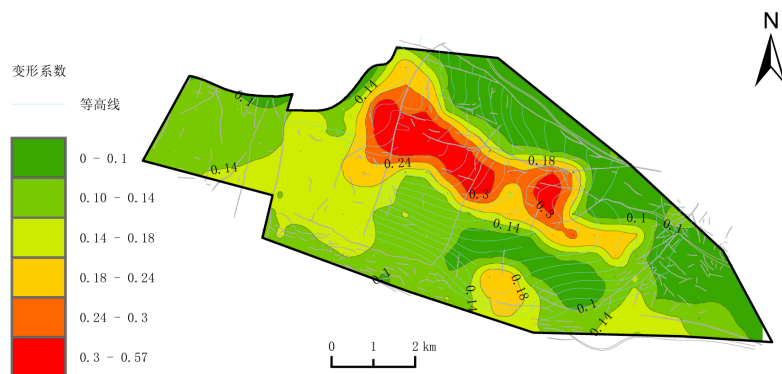


Figure 7. Contour map of fold plane deformation coefficient
图 7. 褶皱平面变形系数等值线图

3.5. 数据处理

利用标准化方法的归一化处理来消除上述四个指标的数据对最终复杂程度的影响[12] [13]。

$$W_i = \frac{X_i - X_{i,\min}}{X_{i,\max} - X_{i,\min}} \quad (5)$$

式中: W_i 为第 i 个归一化后的值; X_i 为第 i 个处理前的值; $X_{i,\max}$ 为 i 个未经过处理数据中的最大值; $X_{i,\min}$ 为 i 个未经过处理数据中的最小值。

4. 地质构造复杂程度评价

4.1. 确定指标的权重

4.1.1. 主客观权重确定

运用 AHP 规则建立判断矿井复杂程度得到体系模型(如图 8 所示), 并计算出主客观权重。

1) 评价模型建立

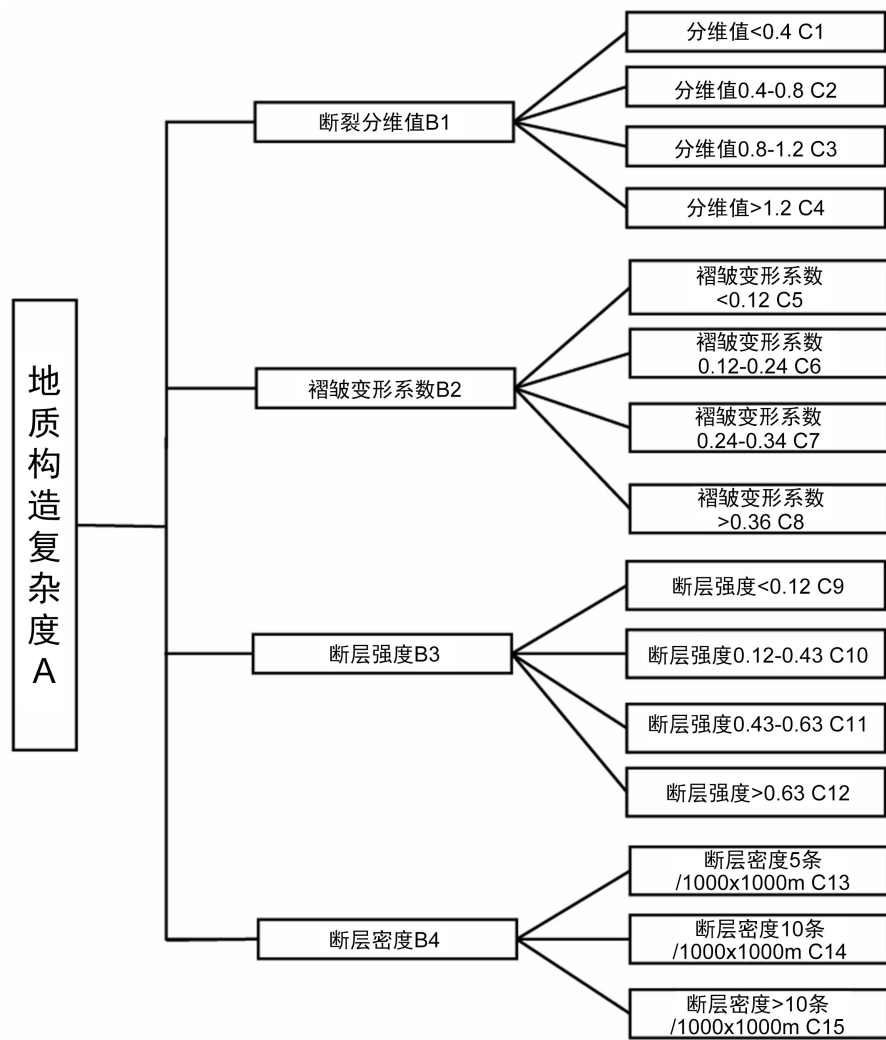


Figure 8. Evaluation index system
图 8. 评价指标体系

2) 构建判断矩阵

根据上述四种影响因素对井田构造复杂程度的影响情况，建立判断矩阵 Q ，即：

$$Q = \begin{bmatrix} A & B1 & B2 & B3 & B4 \\ B1 & 1 & 3/2 & 2 & 5/2 \\ B2 & 2/3 & 1 & 3/2 & 2 \\ B3 & 1/2 & 2/3 & 1 & 3/2 \\ B4 & 2/5 & 1/2 & 2/3 & 1 \end{bmatrix}$$

通过判断矩阵 Q 求出各主控因素 B1、B2、B3、B4 的权重值，如表 1 所示。

Table 1. AHP weight assignments for structural complexity evaluation indices
表 1. AHP 构造复杂程度评价指标权重赋值

评价指标	D_s	K_p	F	M
权重	0.386	0.277	0.196	0.141

3) 根据判断矩阵求出 $\lambda_{\max}$ ，通过 CI 判断矩阵是否准确[14]。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (6)$$

式中， m 为 Q 的阶数。

根据矩阵 Q 的阶数得到 RI 值为 0.89，计算出一致性比率 $CR = CI/RI$ 。当 $CR < 0.1$ 时有效，判断矩阵 Q 计算得出的结果为 $0.00188 < 0.1$ ，即所选取 Q 的一致性合理的，如表 2 所示。

Table 2. Consistency test indices for judgment matrices

表 2. 判断矩阵一致性检验指标

	$\lambda_{\max}$	CI	CR
A~B ($i = 1 \sim 4$)	4.005	0.00167	0.00188

由于一致性符合要求。即矩阵 Q 计算得出的权重值，可作为各主控因素的主观权重值。

4.1.2. 客观权重确定

熵权是通过各主控因素离散程度赋予权值。熵权的大小取决于因素之间的差异性，数据差异越大，熵权越大，对研究区复杂度评价结果的影响也越大[15]-[17]。熵权法构造复杂度评价指标的权重赋值如表 3 所示。为消除所选指标间的量纲差异和数量级差异，通过归一化方法进行处理，得到处理后的矩阵 R ：

$$R = \begin{bmatrix} 0.3764 & 0.3961 & 0.2980 & 0.3722 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.7647 & 0.2635 & 0.2312 & 0.2857 \end{bmatrix}$$

信息熵 e_j 计算公式为：

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

p_{ij} 计算公式为：

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (8)$$

根据公式(7) (8)，得出各指标的熵值向量 e_j 如下：

$$e_j = [0.7540, 0.8400, 0.6480, 0.7580]$$

熵权为：

$$w_j'' = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j} \quad (9)$$

即熵权重是：

$$w_j = [0.2460, 0.1600, 0.3520, 0.2420]^T$$

Table 3. Entropy weight method assignments for structural complexity evaluation indices

表 3. 熵权法构造复杂度评价指标权重赋值

评价指标	D_s	K_p	F	M
权重	0.246	0.160	0.352	0.242

4.1.3. 综合权重的确定

将上述 AHP 主观判断权重与熵权法客观判断权重相结合, 使得各主控因素的权重值分配合理准确 [18], 充分发挥各自的优缺点。

将两种方法得到的权值通过乘数合成归一法进行耦合 [19] [20]:

$$w_j = \frac{w'_j w''_j}{\sum_{j=1}^n w'_j w''_j} \tag{10}$$

不同方法的权重结果如表 4 所示:

Table 4. Weight results obtained by different methods

表 4. 不同方法求得的权重结果

评价指标	D_s	K_P	F	M
AHP	0.386	0.277	0.196	0.141
熵权法	0.246	0.160	0.352	0.242
综合权重	0.3917	0.1828	0.2847	0.1408

4.2. 矿井构造复杂程度定量评价

将四个指标数据归一化后导入 ArcGIS 地图处理软件中, 再根据计算的综合权重分别赋予对应指标, 利用软件进行加权叠加输出模型。

$$Q_i = \sum_{j=1}^4 W_j B_{ij} = 0.3917 B_{1j} + 0.1828 B_{2j} + 0.2847 B_{3j} + 0.1408 B_{4j} \tag{11}$$

式中, B_{ij} 为 i 指标数据中第 j 个归一化后的值。

通过构建的模型对每个数据对应的单元格进行分析, 最终的效果如图 9 所示, 利用自然间断点分级法将矿井划分为四个级别, 分别是简单区、一般区、复杂区、极复杂区。阈值分别为 0.039~0.271、0.271~0.410、0.410~0.551、0.551~0.808。其中 Q_i 指标低的区域复杂程度较低, 指标高的区域构造复杂程度较高。

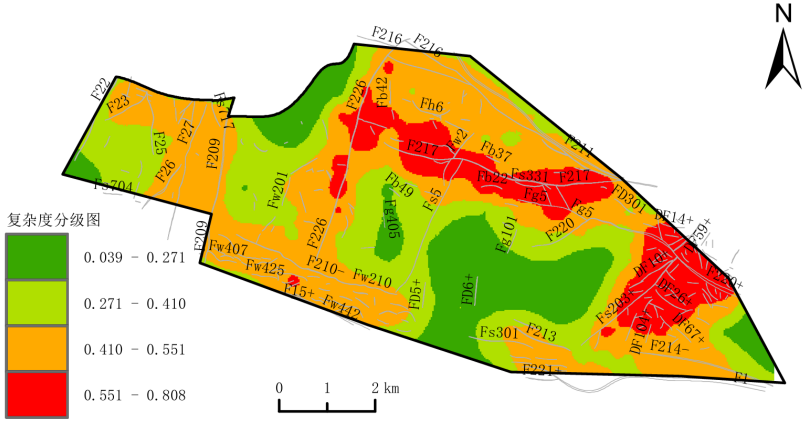


Figure 9. Classification map of structural complexity
图 9. 构造复杂度分级图

5. 结论

- 1) 基于矿井实际勘探资料, 分别从断层(分维值、密度、强度)和褶皱(变形系数)两个方面选取评价指

标, 将客观赋权的熵权法与主观赋权的 AHP 相结合, 确定各因素的综合权重, 并借助 ArcGIS 软件进行加权叠加分析, 构建研究区构造复杂度评价模型。

2) 根据模型结果, 生成复杂度分级图对研究区矿井进行合理化评价, 并利用自然间断点分级法将矿井划分为四个等级区, 分别是简单构造区、一般构造区、复杂构造区、极复杂构造区, 其阈值分别为 0.039~0.271、0.271~0.410、0.410~0.551、0.551~0.808。评价结果与实际相符。

3) 本次矿井研究区中, 中部区域构造复杂程度较为简单, 北部及西部 F27、F209 和南部 Fw210 区域复杂程度相对复杂。整体来看, F226 东部至 FD301 西部、Fb22 北部至 Fb37 南部区域, 以及 DF104 北部至 DF14 南部、Fs203 东部至 F220 西部区域的构造复杂程度相对较高。

参考文献

- [1] 周明闻. 煤矿矿井地质构造发育特征及定量评价预测技术[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(16): 193-196.
- [2] 张春辉, 廖俊杰, 王晓晨. 基于灰色模糊方法的地质构造复杂程度评价——以梁北煤矿为例[J]. 矿产勘查, 2025, 16(9): 2139-2147.
- [3] 汪伟民, 张红梅, 吴基文, 等. 煤矿待采孤立块段地质构造复杂程度评价[J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(6): 1-6+17.
- [4] 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.
- [5] 李亚飞. 鹤壁矿区地质构造复杂程度及底板突水评价[D]: [硕士学位论文]. 抚州: 东华理工大学, 2024.
- [6] 彭涛. 淮北煤田断裂构造系统及其形成演化机理[D]: [博士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [7] 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.
- [8] 黄伟. 钱营孜煤矿构造发育特征及复杂程度定量评价[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 汪伟民, 郝红俊, 翟晓荣, 等. 基于改进 AHP-独立性权系数法的地质构造复杂程度定量评价[J]. 煤炭技术, 2024, 43(4): 119-124.
- [12] 尚天成, 高彬彬, 李翔鹏, 等. 基于层次分析法和熵权法的城市土地集约利用评价[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2009, 11(6): 6-9.
- [13] 向文英, 杨静, 张雪. 模糊综合评价法的改进及其在水库水质评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(6): 344-348.
- [14] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [15] 王任一, 巨亚明, 石家骧. 基于熵权系数与 DTOPSIS 集成油田生产能耗评价研究[J]. 国土资源科技管理, 2005(2): 51-53.
- [16] 宫博, 许开立, 李德顺. 基于熵权-属性识别模型的地表水质量评价[J]. 环境科学导刊, 2011, 30(6): 74-77.
- [17] 张晓亮. 熵权耦合层次分析赋权在煤层底板突水评价中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(3): 91-95.
- [18] 唐李斌, 吴基文, 毕尧山, 等. 基于 AHP-熵权法耦合的含水层富水性评价研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(12): 147-152.
- [19] 徐慧, 牟义, 牛超. 矿井涌水量渗透系数构造分形优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(10): 228-232.
- [20] 魏大勇, 王飞, 许进鹏, 等. 基于分形与模糊综合评价法的矿井突水危险性评价[J]. 煤矿安全, 2013, 44(8): 184-186.