

基于GIS侏罗系3₋₁煤层顶部砾石层隔水性评价

王 凯, 许光泉, 鲍 慧, 刘晓娟, 刘 倩, 张 著

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2023年12月3日; 录用日期: 2024年1月4日; 发布日期: 2024年1月12日

摘 要

鄂尔多斯盆地煤炭资源丰富, 侏罗系煤层开采过程中顶板砂岩水害威胁矿井安全生产, 而煤层顶板上覆砾石层的隔水性能对于采掘过程防治水工程和顶板管理有着重要影响。本文以泊江海子矿二盘区3₋₁煤层顶部砾石层为对象, 采用GIS信息与层次分析方法相融合, 建立了多因素影响下的多层次煤层顶板砾石层隔水性预测模型, 对开采前后影响砾石层隔水性的7个和9个指标进行评价分区。结果表明, 3₋₁煤层开采会导致砾石层隔水性相对减弱, 盘区西翼由采前大范围隔水性较强和中等区域变为隔水性弱和较弱区域, 且范围向四周扩散增大; 东翼隔水性强区和较强区范围大幅缩减, 且部分区域减弱为隔水性中等区; 中部所受影响较小, 隔水性鲜有变化。为泊江海子3₋₁煤层和鄂尔多斯盆地北缘侏罗系煤层开采水害防治提供理论指导。

关键词

砾石层厚度, GIS信息融合, 隔水性评价, 泊江海子矿

The Evaluation of the Water Resistance of the Gravel Layer at the Top of the Jurassic 3₋₁ Coal Seam Based on GIS

Kai Wang, Guangquan Xu, Hui Bao, Xiaojuan Liu, Qian Liu, Zhu Zhang

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

Received: Dec. 3rd, 2023; accepted: Jan. 4th, 2024; published: Jan. 12th, 2024

Abstract

The Ordos Basin is rich in coal resources. The roof sandstone water hazard in the Jurassic coal

文章引用: 王凯, 许光泉, 鲍慧, 刘晓娟, 刘倩, 张著. 基于 GIS 侏罗系 3₋₁ 煤层顶部砾石层隔水性评价[J]. 矿山工程, 2024, 12(1): 7-18. DOI: 10.12677/me.2024.121002

seam mining process threatens the safe production of the mine, and the water isolation performance of the overlying gravel layer on the coal seam roof has an important impact on the water prevention and control engineering and roof management in the mining process. In this paper, the gravel layer at the top of 3₋₁ coal seam in the second panel of Bojianghaizi coal mine is taken as the object, and the GIS information and the analytic hierarchy process are combined to establish a multi-level coal seam roof gravel layer under the influence of multiple factors. The prediction model evaluates and divides the 7 and 9 indicators that affect the water resistance of the gravel layer before and after mining. The results show that the mining of 3₋₁ coal seam will lead to the relative weakening of the water insulation of the gravel layer, and the west wing of the panel will change from a large range of strong and medium water insulation before mining to a weak and weaker water insulation area, and the range will expand to the surrounding area. The range of strong water-resisting area and stronger water-resisting area in the east wing is greatly reduced, and some areas are weakened to medium water-resisting area. The middle is less affected, and the water insulation is rarely changed. It provides theoretical guidance for the prevention and control of water disasters in Bojianghaizi 3₋₁ coal seam and Jurassic coal seam in the northern margin of Ordos Basin.

Keywords

Gravel Layer Thickness, GIS Information Fusion, Water Insulation Evaluation, Bojianghaizi Coal Mine

Copyright © 2024 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

鄂尔多斯盆地是我国重要的能源生产基地，其煤炭、油气资源极为丰富；对保障我国能源需求、加强战略能源储备、实现可持续发展具有非常重要的战略意义[1] [2] [3]。研究区位于鄂尔多斯盆地北缘泊江海子小流域内，自晚古生代结束地台沉积后形成了三叠系 - 侏罗系的一套河流 - 三角洲 - 湖泊相砾岩 - 砂岩 - 泥岩 - 煤层组合[4]。侏罗系中下统延安组为煤系地层沉积，3₋₁ 煤及顶部砾石层发育在侏罗系中下统延安组及直罗组过渡区，煤层开采受侏罗系中统、中下统及白垩系砂岩水害与采空水害威胁。水害作为煤炭类矿产资源开发的棘手问题是亟待解决的，由于该砾石层与煤系地层间隔较小，其隔水性能对煤层的安全开采具有重要意义。

到目前为止，许多专家和研究人员对岩层隔水性评价的研究取得了很大进展。针对岩层隔水性研究方法主要有物探法[5] [6]、压水试验法[7] [8]和多因素综合分析法等。物探和压水试验过程工作量大，费用高，且控制范围有限，多因素综合分析法更受青睐。多因素综合分析法是利用现有地层的地质、水文地质资料，综合不同机理作用的多种因素利用一定的评价方法对岩层隔水性能进行预测分区。在多因素综合分析研究中，武强等通过 GIS 对平朔井工一矿 4 煤顶板含水层富水性及华北型煤田中奥陶统碳酸盐岩古风化壳天然隔水性能进行了评价[9] [10]；牛鹏堃等采用基于 GIS 的层次分析法研究了古风化壳隔水性能评价分区并与突水脆弱性评价分区进行了对比[11] [12]。本研究采用层次分析法(AHP)与 GIS 相结合，运用 GIS 强大的数据管理与空间分析功能和信息融合技术，建立各项指标空间、属性数据库和归一化专题图；在此基础上，依据 AHP 方法获得各项指标权重系数将专题图复合叠加并重建拓扑关系。建立了泊江海子矿二盘区 3₋₁ 煤层顶板砾石层隔水性指数模型，对煤层开采前后砾石层隔水

性进行评价分区，为煤层安全开采提供了科学的依据，其他煤田亦可借鉴本方法，具有重要指导的意义。

2. 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯盆地北部次级构造单元伊盟隆起中东部，东胜煤田的西北部边缘，行政区划属鄂尔多斯市东胜区；各时代沉积建造特征与华北地台近于一致。井田构造形态总体为一走向东西，向北倾斜的单斜构造，褶皱构造发育，断层落差、延伸长度均较小，综合评价矿井构造属简单类型(如图 1)。

从水文地质系统看井田属鄂尔多斯盆地北部的白垩系碎屑岩裂隙孔隙含水层系统的富水性弱区；白垩系下伏为侏罗系地层，侏罗系地下水与白垩系地下水系统一致。由于受地层岩性、地貌、水文等因素控制，井田地下水的赋存运动规律受泊江海子子系统补、径、排条件控制，子系统从补给、径流至排泄构成一个完整的地下水系统。

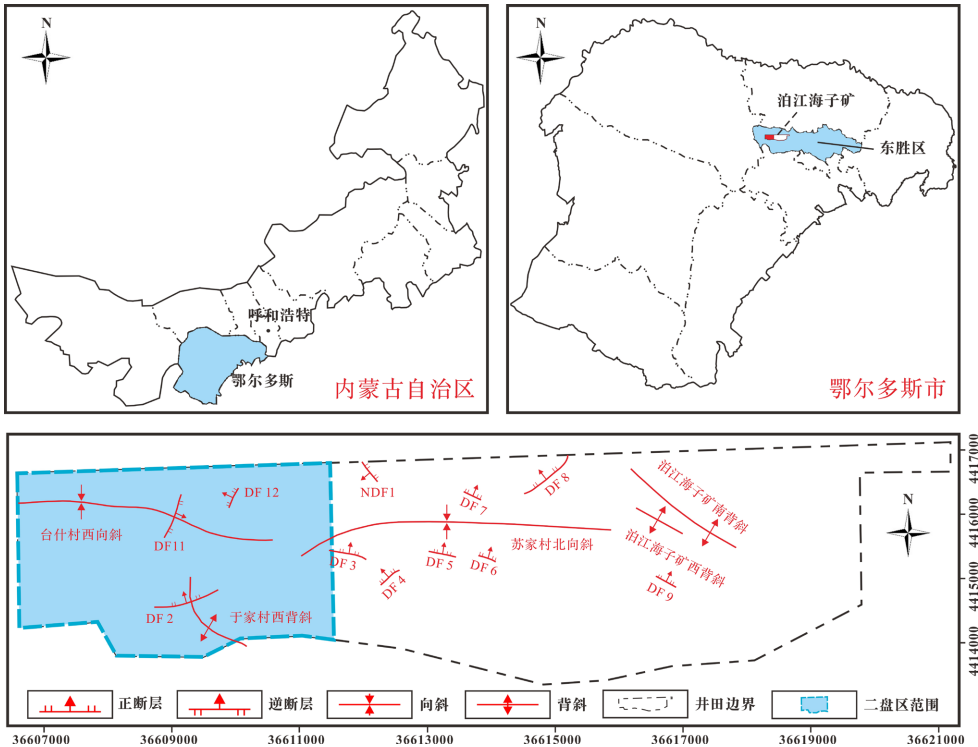


Figure 1. The geological structure map of Bojianghaizi mine field and the No. 2 panel area
图 1. 泊江海子矿井田及二盘区地质构造图

2.1. 地质与水文地质条件

研究区内地层由老至新发育有：三叠系上统延长组(T_{3y})、侏罗系中下统延安组(J_{1-2y})、侏罗系中统(J_2)、白垩系下统志丹群(K_{1zh})和第四系(Q)。井田含煤地层为侏罗系中下统延安组(J_{1-2y})，其沉积基底为三叠系上统延长组(T_{3y}) (详见图 2)。根据地下含隔水层赋存特征，自上而下可划分为五个含水层：第四系(Q)松散层潜水含水层、白垩系下统志丹群(K_{1zh})孔隙裂隙潜水 - 承压水含水层、侏罗系中统(J_2)直罗组碎屑岩裂隙含水层、侏罗系中下统延安组裂隙含水层、三叠系上统延长组(T_{3y})承压水含水层。侏罗系中统(J_2)直罗组裂隙含水层为直接充水含水层，很大程度上威胁着 3_{-1} 煤的安全开采。

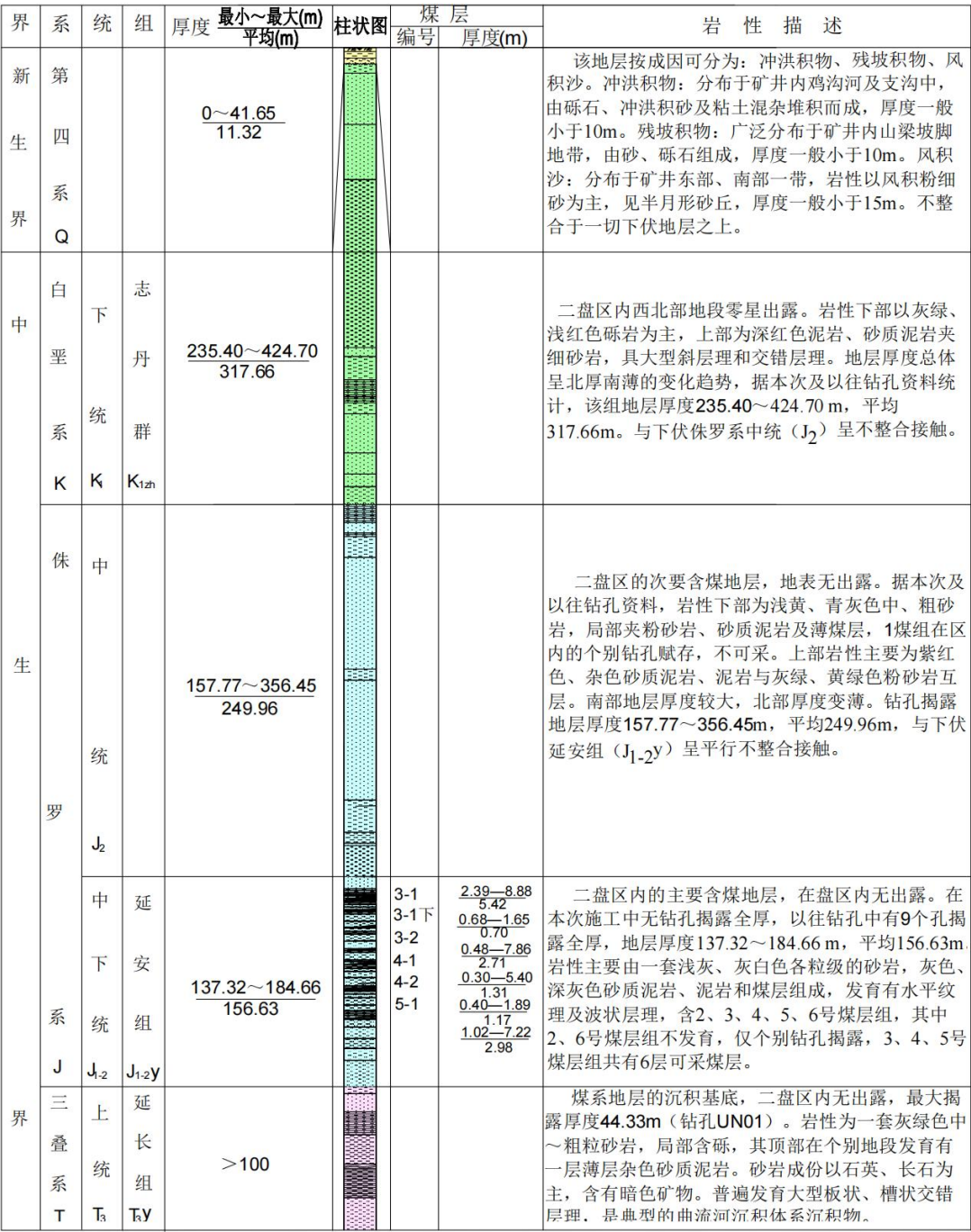


Figure 2. The comprehensive stratigraphic column of the No. 2 panel area
图 2. 二盘区地层综合柱状图

2.2. 二盘区砾石层分布规律

井田侏罗系延安组 3₋₁ 和 5₋₁ 煤为井田稳定可采煤层，3₋₁ 煤顶板与上部砾石层底板之间夹层为薄层至厚层的砂质泥岩和砂岩互层；顶部为侏罗系中下统延安组砂岩含水层，下部以砂质泥岩及粉砂岩为主；中部为巨厚中、粗粒砂岩和细砂岩。在二盘区东侧范围内，砾石层、煤层与砾石层夹层厚度较大，砾石层向西厚度逐渐减薄且煤层与砾石层直接接触(如图 3)。3₋₁ 煤采动产生“两带”(冒落带、裂隙带)，大范

围破坏砾石层上方和下方含隔水层结构,同时沟通不同含水层之间的水力联系,对后续工作面回采埋下安全隐患。

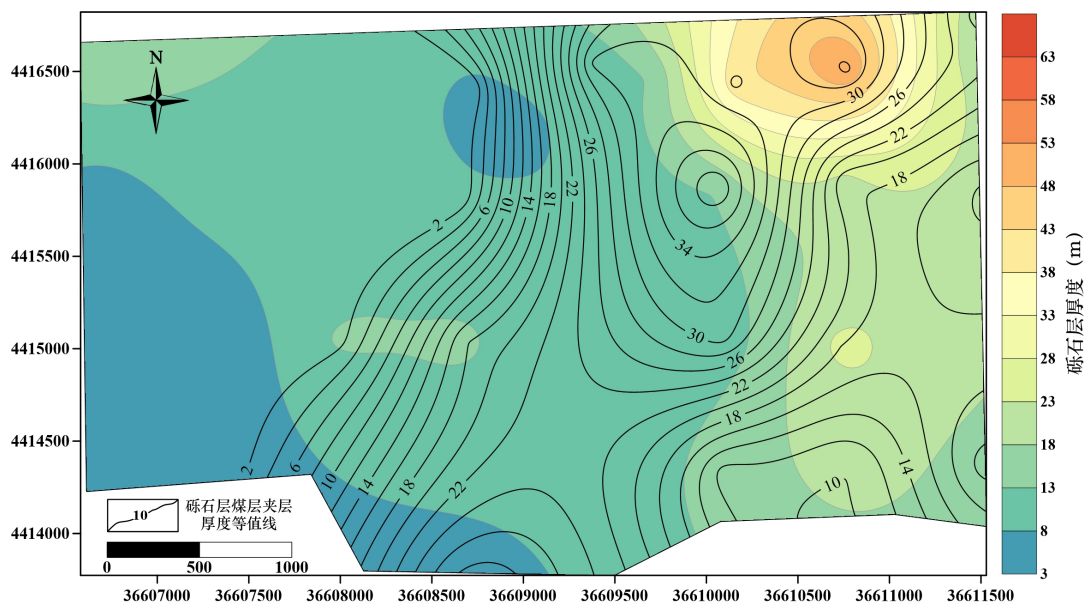


Figure 3. Gravel layer, coal seam and gravel layer floor to coal seam roof interlayer thickness contour map
图 3. 砾石层、煤层与砾石层底板至煤层顶板夹层厚度等值线图

3. 砾石层隔水性评价方法

GIS 作为一种用于捕获、存储、管理、分析和展示地理空间数据的计算机技术系统,将地理信息(地理位置、属性信息和拓扑关系)与属性数据有机结合,可高效的利用地理信息处理能力解决较为复杂的决策问题[13]。在本研究中可建立砾石层隔水性空间与属性数据库、不同作用机理下的指标专题图,亦可对多源影响因素但影响程度不同指标专题图进行归一化与复合叠加处理。

由于砾石层位于煤层顶板与侏罗系中统含水层底板之间,受沉积环境与后期构造影响,隔水性能评价需要从内因和外因出发,采用不同指标因素进行评价,通过建立评价模型,建立各个影响因素之间的联系,分析其影响程度。由于各指标因素数据在空间上分布具有不均匀性,利用 GIS 手段,将各指标因素数据进行统计、计算、分析及可视化处理。根据各因素指标对 3₋₁ 煤层顶板砾石层隔水性能的控制权重不同,将各指标归一化处理后叠加重建拓扑关系,即可得到各项因素指标综合作用下的 3₋₁ 煤层顶板砾石层隔水性能。

4. 影响砾石层隔水性因素

4.1. 煤层开采前影响砾石层隔水性因素

影响砾石层隔水性主要因素为砾石层厚度、含砾率及渗透性等内部因素;以及砾石层厚度发育先期沉积因素及后期构造因素,前者主要为砾石层上覆和下覆煤层形成沉积环境,即内陆河湖三角洲相形成沉积相,后者为构造运动产生褶皱和断层。

(1) 砾石层厚度

在不考其它因素情况下,砾石层隔水性程度与隔水层厚度成正相关关系。砾石层的厚度增加会提供更多的阻挡和滞留水分的空间,从而减缓水分的渗透速率,提高隔水性能。

(2) 砾石层渗透性

砾石层渗透性对于上覆侏罗系中统砂岩含水层发生盘区工作面间接越流补给而言,起重要作用。渗透性主要通过渗透系数来反映,而渗透性除了受流体性质影响外,主要受介质特性影响[14]。因此,它不仅综合反映岩石渗透能力,也是体现影响砾石层隔水性能一个很关键的指标之一,渗透系数越小,则砾石层隔水性能愈好。

(3) 砾石层含砾率

含砾率(百分比)不仅直观反映了砾岩层中砾石含量多少,也间接反映了砾石层孔隙度大小,从而反映出砾石层隔水性能大小[15][16]。野外现场揭露和实验模拟表明:砾石含量越高,岩层相对致密小,隔水能力相对差,反之亦然。

(4) 褶皱

煤层的褶皱反映了煤层受地质营力作用下发生弯曲和变形程度,它不仅影响煤层结构完整性,厚度起伏变化,而且对上覆地层的破坏起了关键作用[17]。苏联学者 B.E 扎比盖洛等在研究顿巴斯煤层突出的地质条件时提出了平面变形系数作为表述褶皱构造变形程度的定量指标,褶皱复杂程度越高,岩层隔水性能越差。

(5) 断层

断层分维值间接代表断层发育程度;断层分维值越大,表明断裂越发育,地质条件复杂程度越高,易形成导水通道。反之,当断裂分维值越小,断裂构造复杂程度越低,隔水性相对较好。因此,选取断层分维作为影响砾石层隔水性能作为评价因素,可以客观评价砾石层的隔水性能。常用统计断层复杂程度的分维方法有:容量维、信息维、相似维等,本次采用箱形覆盖法,计算其相似维[18]。

(6) 砾石层顶、底板砂岩厚度

砾石层顶底板砂岩含水层厚度反映了沉积前后事件,含水层富水性与含水砂层厚度呈正比例关系。砾石层隔水性能与顶底板含水层富水性直接相关,即砾石层顶底板砂岩越大其隔水性越小。

4.2. 煤层开采后影响砾石层隔水性因素

二盘区 3₋₁ 煤层顶板砾石层隔水性主要影响因素综合分析,从砾石层自身特性(厚度、渗透性、含砾率)、后期构造(褶皱、断层)作用及其顶底板砂岩厚度等方面深入研究。煤层开采前选取砾石层厚度、渗透性、含砾率、平面变形系数、断层分维系数及砾石层顶底板砂岩厚度等作为评价其隔水性主要因素指标。煤层采动产生裂隙和垮落大范围破坏砾石层上方和下方含隔水层结构,同时也沟通了不同含水层之间的水力联系。因此,在上述 7 个影响因素基础上,选择煤层开采厚度、开采裂隙带发育高度两个重要评价因素,作为采后砾石层隔水性能评价影响指标是非常必要的。

5. 二盘区砾石层隔水性评价

5.1. 确定隔水性指标及建立专题图

对上述 3₋₁ 煤层顶板砾石层隔水性主要影响因素综合分析,从砾石层自身特性(厚度、渗透性、含砾率)、后期构造(褶皱、断层)作用及其顶底板砂岩厚度等方面深入研究。煤层开采前选取砾石层厚度、渗透性、含砾率、平面变形系数、断层分维系数及砾石层顶底板砂岩厚度等作为评价其隔水性主要因素指标。煤层采动产生裂隙和垮落大范围破坏砾石层上方和下方含隔水层结构,同时也沟通了不同含水层之间的水力联系。因此,在上述 7 个影响因素基础上,选择煤层开采厚度、开采裂隙带发育高度两个重要评价因素,作为采后砾石层隔水性能评价影响指标是非常必要的。

结合研究区钻孔揭露资料,借助 GIS 强大的地理信息数据分析与计算功能建立各因素指标地理信息数据库对砾石层隔水性评价因素指标数据进行网格划分,采用 Kriging 插值方法生成各项因素指标专题图[19]。为便于各项评价因素指标数据统计分析,同时消除不同数据量纲对评价结果的不良影响对各项评价

因素指标数据无量纲化处理，建立各指标因素归一化专题图(见图 4)。

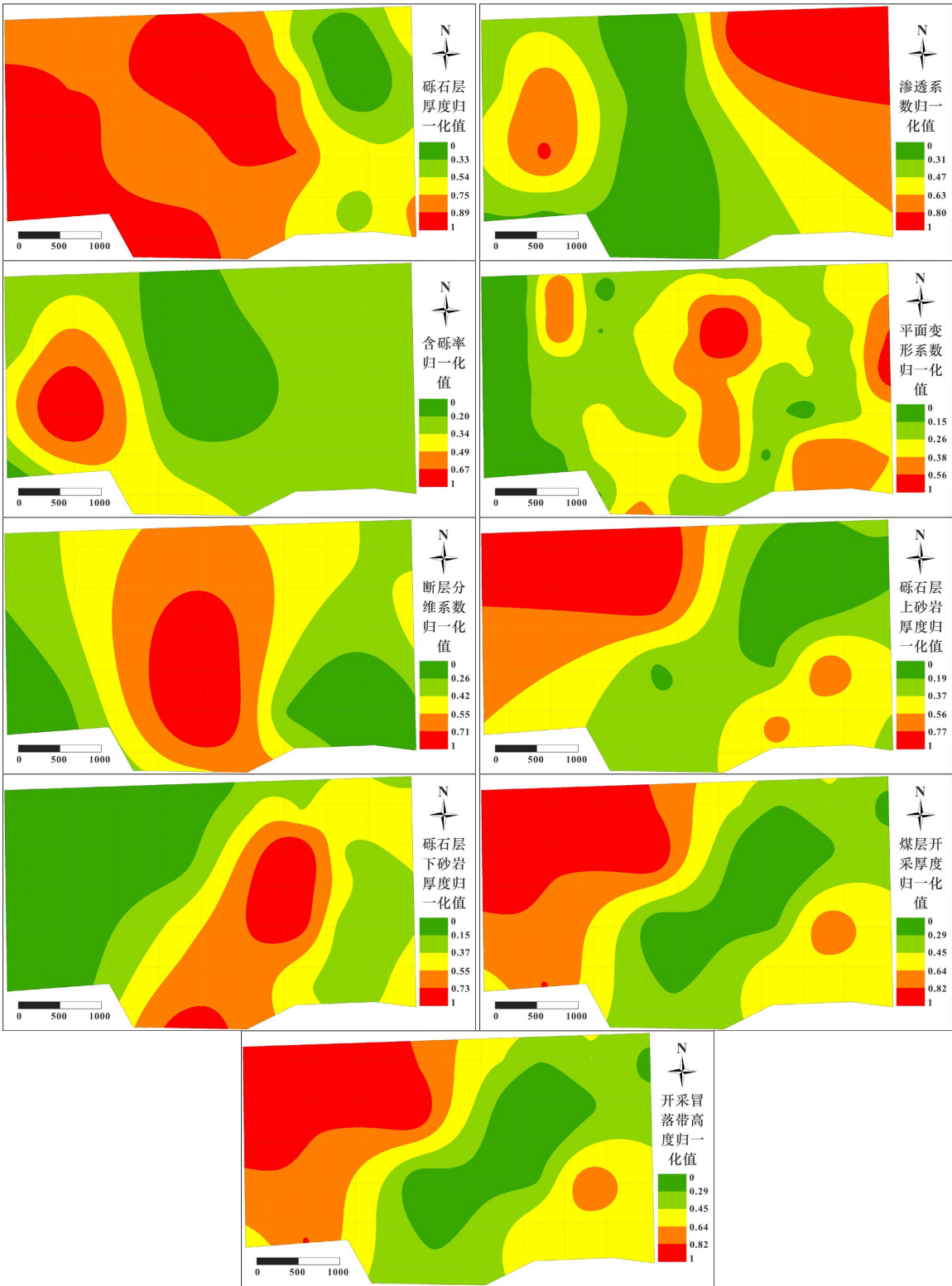


Figure 4. Gravel layer water insulation factor index normalized thematic map
图 4. 砾石层隔水性因素指标归一化专题图

5.2. 确定指标权重系数

由于该砾石层沉积于煤系地层顶部与侏罗系含水层之间，其隔水性能评价需要从不同作用机理的多个空间指标因素考虑，把各个影响因素全部纳入其评价体系中；因此，选用定量与定性相结合用于多准则决策和评估的层次分析法(AHP)，在确定砾石层隔水性指标因素权重方面会有很多优势。AHP 方法由美国数学家 Thomas Saaty 于 1972 年提出，其核心思想是通过将问题分解为不同层次的准则和子准则，并对它们进行两两比较和权重赋值，从而进行系统性的决策[20]。

根据 3₁ 煤层顶板砾石层隔水性主控因素指标的分析，采用层次分析法将采前砾石层隔水性指标体系划分为 3 个层次(见图 5)，采后为 4 个层次(见图 5)。砾石层隔水性为最终目的，作为模型目标层(A 层次)；煤层开采前砾石层本身的特性、地质构造及砾石层顶底板砂岩厚度，系统影响了砾石层隔水性能，为模型准则层(B 层次)；煤层开采后，产生的裂隙带和垮落进一步增大对砾石层厚度的破坏，增加煤层开采影响为第 4 个层次。具体因素，还需要通过相对应的具体因素来体现，各个具体要素构成了模型决策层(C 层次)。

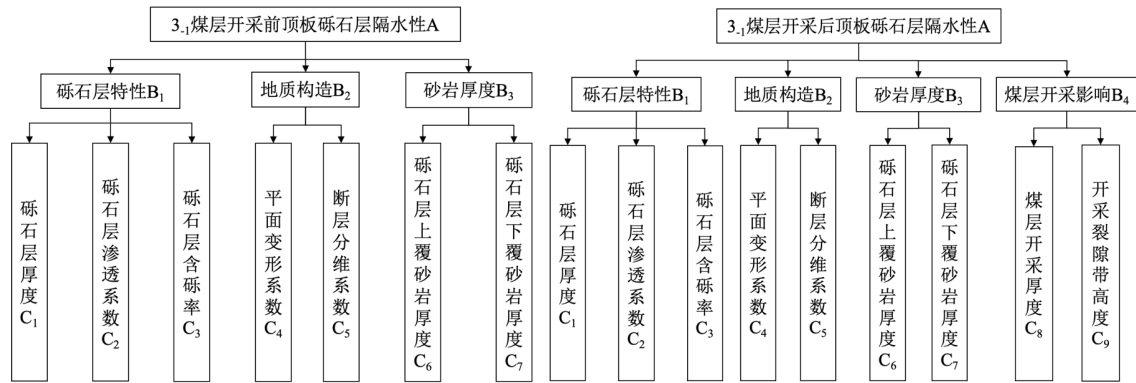


Figure 5. Hierarchical structure model of water insulation analysis of gravel layer before and after coal seam mining
图 5. 煤层开采前后砾石层隔水性分析层次结构模型

通过对该层次问题的决策，采用专家评分方法，对隔水性能的众多指标进行打分，根据最后累计得分情况，进行各指标间的总分比较，形成专家对各指标的评判集，由此构建 AHP 评价的判断矩阵。根据判断矩阵计算出各指标对砾石层隔水性能的最终影响权重值(见表 1 和表 2)。

Table 1. The weight of each factor index of gravel layer water insulation evaluation before coal seam mining

表 1. 煤层开采前砾石层隔水性评价各因素指标权重

因素指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
权重 ω_i	0.240	0.153	0.097	0.156	0.156	0.132	0.066

Table 2. The weight of each factor index of gravel layer water insulation evaluation after coal seam mining

表 2. 煤层开采后砾石层隔水性评价各因素指标权重

因素指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
权重 ω_i	0.220	0.140	0.089	0.080	0.040	0.057	0.114	0.087	0.173

依据上述表格煤层开采前后砾石层隔水性评价各因素指标权重值对各因素指标归一化专题图进行叠

加并确定重建拓扑关系。

5.3. 建立隔水性评价模型

专题图叠加是为了将多个指标的信息进行消除量纲归一化处理后整合成一个综合信息存储层,进而重新构建拓扑关系,并形成新的拓扑关系属性表。这个过程是将不同指标信息按照一定关系融合在一起,构成的新的信息层,它包含了所有相关指标信息,为后续分析提供了便捷。

依据各指标对砾石层隔水性能权重影响,经分析结合各指标因素归一化专题图,可构建隔水性评价数学模型为:

$$VI = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x, y) (i=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中, VI 为砾石层隔水性指数; ω_i 为指标因素的综合权重; $f_i(x, y)$ 为各指标因素归一化后的影响值函数,即各指标在该位置的叠加函数; x, y 为地理坐标; n 为指标个数。

通过对泊江海子矿二盘区 3₋₁ 煤层开采前后砾石层隔水性影响因素及权重,开采前后砾石层相应隔水性能评价模型分别为

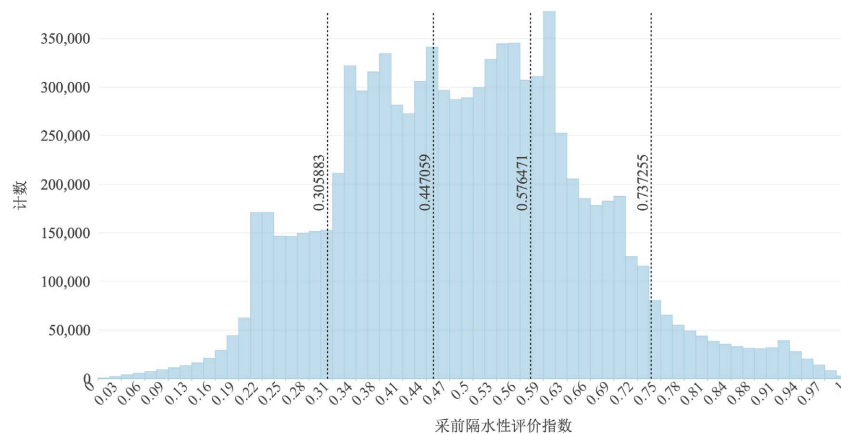
$$VI_{\text{采前}} = \sum_{i=1}^7 \omega_i f_i(x, y) = 0.240 f_1(x, y) + 0.153 f_2(x, y) + 0.097 f_3(x, y) + 0.156 f_4(x, y) + 0.156 f_5(x, y) + 0.132 f_6(x, y) + 0.066 f_7(x, y) \quad (2)$$

$$VI_{\text{采后}} = \sum_{i=1}^9 \omega_i f_i(x, y) = 0.220 f_1(x, y) + 0.140 f_2(x, y) + 0.089 f_3(x, y) + 0.08 f_4(x, y) + 0.04 f_5(x, y) + 0.057 f_6(x, y) + 0.114 f_7(x, y) + 0.087 f_8(x, y) + 0.173 f_9(x, y) \quad (3)$$

式中, $f_1(x, y), f_2(x, y), f_3(x, y), \dots, f_9(x, y)$ 分别为砾石层厚度、含砾率、渗透系数、平面变形系数、断层分维系数、砾石层顶板砂岩厚度、砾石层底板与煤层顶板间砂岩厚度、煤层采厚和开采裂隙带高度的影响值函数。

5.4. 砾石层隔水性评价分区

根据上述评价模型计算砾石层隔水性指数,采用 GIS 中自然分级法对其进行频数统计,并确定 3₋₁ 煤层顶板砾石层隔水性各级分区阈值,其隔水性指数频数统计直方图(如图 6 所示)。煤层开采前隔水性分区阈值为 0.31、0.45、0.58 和 0.74;煤层开采后隔水性分区阈值为 0.33、0.49、0.61 和 0.73。



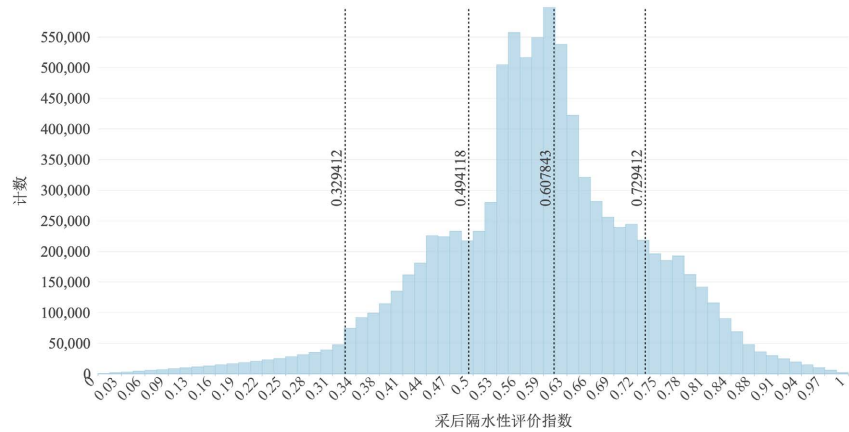
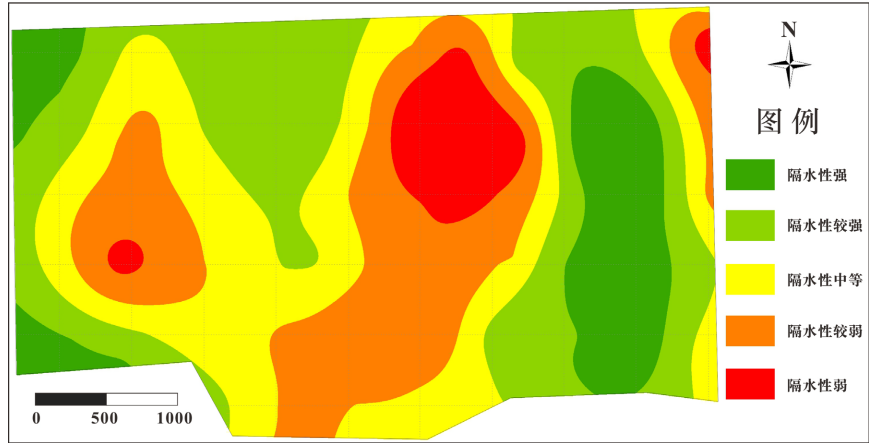
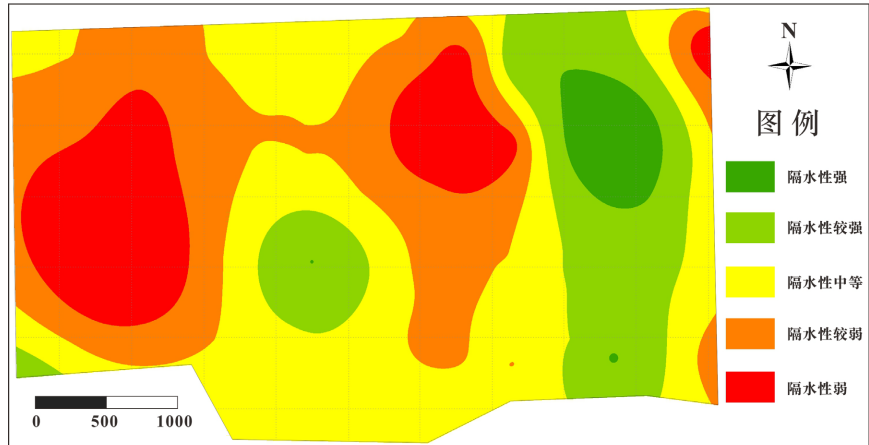


Figure 6. Frequency distribution diagram of water-resisting index of gravel layer before and after coal seam mining
图 6. 煤层开采前后砾石层隔水性指数频数分布图



(a) 煤层开采前砾石层隔水性评价分区



(b) 煤层开采后砾石层隔水性评价分区

Figure 7. Zoning map of water-resisting evaluation of gravel layer before and after 3₋₁ coal seam mining in No. 2 panel of Bojianghaizi Coal Mine

图 7. 泊江海子矿二盘区 3₋₁ 煤层开采前后砾石层隔水性评价分区图

据采前分区阈值将研究区划分为五个区域(如图 7(a)), 其中 $0 < VI \leq 0.31$ 为隔水性强区; $0.31 < VI \leq$

0.45 为隔水性较强区; $0.45 < VI \leq 0.58$ 为隔水性中等区; $0.58 < VI \leq 0.74$ 为隔水性较弱区; $0.74 < VI \leq 1$ 为隔水性弱区。采后分区阈值将研究区也划分为五个区域(如图 7(b)), 其中 $0 < VI \leq 0.33$ 为隔水性强区; $0.33 < VI \leq 0.49$ 为隔水性较强区; $0.49 < VI \leq 0.61$ 为隔水性中等区; $0.61 < VI \leq 0.73$ 为隔水性较弱区; $0.73 < VI \leq 1$ 为隔水性弱区。

因此, 煤层开采前隔水性强区和较强区分布于研究区东部和西部边缘地带, 该区域砾石层厚度较大、局部地段发育若干小构造、渗透系数较小, 砾石层隔水性强; 隔水性中等区主要分布于隔水性较弱区域与较强区域之间, 该区域的构造发育、砾石层稍薄一些、渗透系数中等, 砾石层隔水性稍弱。隔水性弱区和较弱区分布于研究区中部和西部、东北部边缘小范围; 该区域砾石层厚度较薄且渗透系数和含砾率较大, 断层发育和构造线密度一般, 砾石层隔水性弱。

而煤层开采后砾石层隔水性相对开采前发生一定的变化: 隔水性强区与较强区仍集中于研究区东翼、中西部圆形范围和西南区域边角地带, 与采前相比范围有较大的减少; 隔水性中等区分布于研究区中部, 东部呈条带分布, 在西部范围较小; 隔水性弱区与较弱区均位于中部、以及西部和东部的边缘, 范围相较开采前有所扩大。

综上分析, 泊江海子矿二盘区 3_{-1} 煤层顶板砾石层隔水性评价分区与砾石层厚度、构造发育程度等主要因素分析结果较为吻合, 从而为煤层开采前后水害防治提供参考依据。

6. 结论

基于 GIS 信息融合技术对研究区侏罗系 3_{-1} 煤层顶部砾石层隔水性进行评价, 主要结论为:

(1) 影响 3_{-1} 煤层顶板砾石层隔水性主控因素为砾石层本身特性(厚度、渗透性、含砾率)、后期构造作用及砾石层顶底板岩性与起伏变化控制, 尤其当煤层开采后冒落带和裂隙带高度影响较大。

(2) 煤层开采前, 砾石层隔水性较好的区域为分布于研究区东部和西部边缘地带, 隔水性中等区域主要分布在中、西部环状区及东部边缘条带, 隔水性较差的区域分布在中部和西部、东北部边缘小范围。

(3) 受开采破坏影响, 砾石层隔水性较强区域仍集中在东翼、中西部和西南地带, 相对采前范围有所缩减; 隔水性中等区仍在研究区中、西部环状区及东部边缘条带且有所扩大; 隔水性能较差的区域分布在研究区中部、西部和东部边缘, 范围相较开采前有所扩大。

参考文献

- [1] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 岳乐平, 赵俊峰, 王建强. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 617-638.
- [2] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
- [3] 李思田, 林畅松, 解习农, 杨士恭, 焦养泉. 大型陆相盆地层序地层学研究——以鄂尔多斯中生代盆地为例[J]. 地学前缘, 1995, 2(4): 133-136+148.
- [4] 钟建华, 倪良田, 孙宁亮, 郝兵, 薛纯琦. 鄂尔多斯盆地东胜东三叠系——侏罗系湖泊风暴沉积的发现及其意义[J]. 沉积学报, 2021, 39(2): 353-373.
- [5] 白海波, 戎虎仁, 杨城, 韦晓琪, 王延蒙, 陈耀杰. 新集二矿下组煤底板石灰岩层隔水性及应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 363-368+375.
- [6] 钱进, 崔若飞, 崔大尉, 孙学凯. 波阻抗反演预测奥陶系灰岩顶部含隔水性[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(6): 2169-2174.
- [7] 常海雷. 奥灰顶部相对隔水性及其在底板突水评价中的应用[J]. 中国煤炭, 2018, 44(8): 131-135.
- [8] 李小明, 刘德民, 连会青, 李博, 朱庆伟. 赵庄矿峰峰组碳酸岩层隔水性能研究及应用[J]. 煤炭工程, 2019, 51(10): 102-107.
- [9] 武强, 樊振丽, 刘守强, 张耀文, 孙文洁. 基于 GIS 的信息融合型含水层富水性评价方法——富水性指数法[J].

- 煤炭学报, 2011, 36(7): 1124-1128.
- [10] 武强, 贾秀, 曹丁涛, 梁永平. 华北型煤田中奥陶统碳酸盐岩古风化壳天然隔水性能评价方法与应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1735-1741.
- [11] 牛鹏堃, 李哲, 宫厚健, 曾一凡, 刘守强. 基于 GIS 的华北型煤田古风化壳隔水性能研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(9): 193-195.
- [12] 牛鹏堃, 李哲, 宫厚健, 曾一凡, 刘守强. 基于 GIS 的层次分析法在古风化壳隔水性能评价中的应用[J]. 煤炭技术, 2018, 37(7): 128-131.
- [13] 李永兵, 陈旭瑞, 胡俊峰, 谢玉玲, 徐九华, 刘建明. 基于 GIS 的地质数据库系统: 研究现状和发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(3): 532-539+558.
- [14] 张国栋, 廖爱明, 李泯蒂, 邱重阳, 徐志华. 碎石土渗透特性试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 91-95.
- [15] 侯孝东, 涂国祥, 邱潇, 李明, 王清, 钱昭宇. 汉源九襄地区深厚砾石层渗透特性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 192-197.
- [16] 杨进兵, 陈兴长, 汪惠, 田小平, 贾利蓉. 泥石流堆积物中细颗粒含量与渗透系数关系试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3184-3190.
- [17] 王生全, 王贵荣, 常青, 张添景, 王战峰. 褶皱中和面对煤层的控制性研究[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(4): 16-18.
- [18] Bai, Z.G., Liu, Q.M. and Liu, Y. (2022) Risk Assessment of Water Inrush from Coal Seam Roof with an AHP-CRITIC Algorithm in Liuzhuang Coal Mine, China. *Arabian Journal of Geosciences*, **15**, Article No. 364.
<https://doi.org/10.1007/s12517-022-09621-2>
- [19] 朱求安, 张万昌, 余钧辉. 基于 GIS 的空间插值方法研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 183-188.
- [20] Yang, J.Q. and Lee, H. (1997) An AHP Decision Model for Facility Location Selection. *Facilities*, **15**, 241-254.
<https://doi.org/10.1108/02632779710178785>