

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.08.011

新集矿区深部 1 煤层底板奥灰岩溶突水危险性评价

韩 锋¹, 詹 润¹, 孙 贵¹, 顾承串², 李宏泽³, 雷 震²

(1. 安徽省煤田地质局勘查研究院, 安徽 合肥 230088; 2. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 3. 中煤新集能源股份有限公司, 安徽 淮南 232001)

摘 要:奥灰岩溶裂隙含水层是影响华北型煤矿深部开采的重要水害,在水-岩相互作用下奥灰含水层易导致煤层底板突水。为进一步认识奥灰岩溶突水问题,文章以新集矿区深部 1 煤层开采为例,利用矿区近些年最新积累的奥灰钻孔资料,选取断层强度指数、断层交叉点与尖灭点、含水层水压、富水性、隔水层等效厚度、脆塑比 7 个因素作为奥灰岩溶突水的主控因素,并结合层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)确定各主控因素影响权重。运用地理信息系统(geographic information system, GIS)空间分析功能建立各主控因素专题图,通过对专题栅格图归一化处理,将各主控因素按照权重进行空间复合叠加,最终获得 1 煤层底板奥灰岩溶突水危险性评价分区结果。将评价结果与突水系数法计算结果对比分析可知,基于 GIS 的煤层底板突水危险性评价方法更符合矿区实际地质情况,可以为矿区深部煤层开采与水害防治工作提供参考依据。

关键词:层次分析法(AHP);地理信息系统(GIS);新集矿区;1 煤层;底板;奥陶系灰岩;突水

中图分类号:P641.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)08-1080-07

Water inrush risk assessment of Ordovician limestone karst in the floor of deep coal seam 1 in Xinji mining area

HAN Feng¹, ZHAN Run¹, SUN Gui¹, GU Chengchuan², LI Hongze³, LEI Zhen²

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

Abstract: The Ordovician limestone karst fissure aquifer is a main water hazard affecting the deep mining of North China type coal mine, and the Ordovician limestone aquifer is easy to cause water inrush in coal seam floor under the water-rock interaction. In order to further explore the Ordovician limestone karst water inrush, this paper took the mining of deep coal seam 1 in Xinji mining area as an example, and used the latest accumulation of borehole data of Ordovician limestone in recent years to select seven factors as the main control factors of Ordovician limestone karst water inrush, namely fault strength index, fault crossing point and peak point, aquifer water pressure, water richness, equivalent thickness of water-proof layer and brittle-plastic ratio. The analytic hierarchy process(AHP) was used to determine the influence weights of each main control factor. Using geographic information system(GIS) spatial analysis function, thematic maps of the main control factors were established. Through the normalization of the thematic grid map, the spatial composite superposition of the main control factors was carried out according to the weight, and finally the zoning results of the risk assessment of Ordovician limestone karst water inrush in the floor of coal seam 1 were obtained. By comparing the evaluation results with the calculation results obtained by water inrush coefficient

收稿日期:2021-10-28; **修回日期:**2022-01-19

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41902212);安徽省公益性地质工作资助项目(2021-g-2-14);中煤新集能源股份有限公司重点科研资助项目(ZMXJ-LZ-JS-2020-16)和安徽省博士后科研活动资助项目(2020B417)

作者简介:韩 锋(1984—),男,四川天全人,安徽省煤田地质局勘查研究院高级工程师;

詹 润(1986—),男,安徽淮南人,安徽省煤田地质局勘查研究院高级工程师,通信作者, E-mail: 391541286@qq.com.

method, it can be seen that the GIS-based coal seam floor water inrush risk assessment method is more in line with the actual geological situation of the mining area, and can provide reference for deep coal seam mining and water hazard prevention and control.

Key words: analytic hierarchy process(AHP); geographic information system(GIS); Xinji mining area; coal seam 1; seam floor; Ordovician limestone; water inrush

华北型煤矿主要为石炭—二叠纪煤系地层,大部分矿井开采普遍受到深部太原组与中奥陶统灰岩岩溶承压含水层突水威胁^[1]。近年来,随着矿井开采深度的不断加大,深部煤层开采过程中煤层底板岩溶突水问题日益严重,其中以奥陶系灰岩水害最为复杂、破坏性最大^[2-3]。

国内关于煤层底板突水评价与预测的研究方法开始于 20 世纪 60 年代,最早是将突水理论分为经验公式与力学模型两大类予以考虑,之后的 90 年代许多学者又提出“强渗通道说”“下三带理论”“底板两带模型”“递进导升理论”“岩水应力关系理论”“KS 关键层理论”^[4-9]等。20 世纪以来,在煤层底板突水研究方面出现了更多新理论、新技术、新方法,文献^[10]开展基于地理信息系统(geographic information system, GIS)和多源信息复合叠加的矿井突水评价与预测研究,取得较好的成果;文献^[11-12]在 GIS 的基础上,提出底板突水评价的脆弱性指数法、三图-双预测法;文献^[13]分别采用数值模拟和多源信息复合技术等方法对煤层底板突水进行研究。目前,针对煤层底板突水机理的评价预测模型与方法趋于完善,基于 GIS 的脆弱性指数评价方法由于充分考虑多种危险源因素的叠加效应得到广泛应用,并在华北型煤矿底板突水预警中取得良好效果。

新集矿区位于华北聚煤区南缘,随着浅部煤

层开采的枯竭,深部 1 煤组的开发利用迫在眉睫,但 1 煤层底板岩溶水害严重制约着矿井的深部开采。前人对该矿区突水的研究主要集中于太原组灰岩含水层对 1 煤组的影响^[14-16],关于奥灰岩溶突水的研究较少。通过近些年的勘探开发实践已证实,太灰岩层富水性总体较弱,尤其是太灰中、上段甚至可作为相对隔水层考虑^[16],一般通过地面区域注浆治理、疏水降压等措施,基本可将太灰水害影响降到最低。然而,奥灰岩层由于埋藏深度大、富水性不清、突水机理复杂,其对 1 煤层底板突水造成的潜在威胁仍需要进一步提前预报、预防。

本文利用近年来矿区最新施工的奥灰水文地质探查资料,建立地质构造、含水层、隔水层等多源控制因素耦合的矿井底板突水危险性综合判识模型,运用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)原理与 GIS 空间数据处理功能,对矿区 1 煤层底板奥灰岩溶突水危险性进行分区评价,并将该方法结果与传统突水系数法比较,达到合理预测煤层底板灰岩突水的目的。

1 研究区概况

新集矿区地处安徽省淮南市凤台县内,包括新集一矿、新集二矿 2 个生产矿井,研究区 1 煤层构造如图 1 所示。

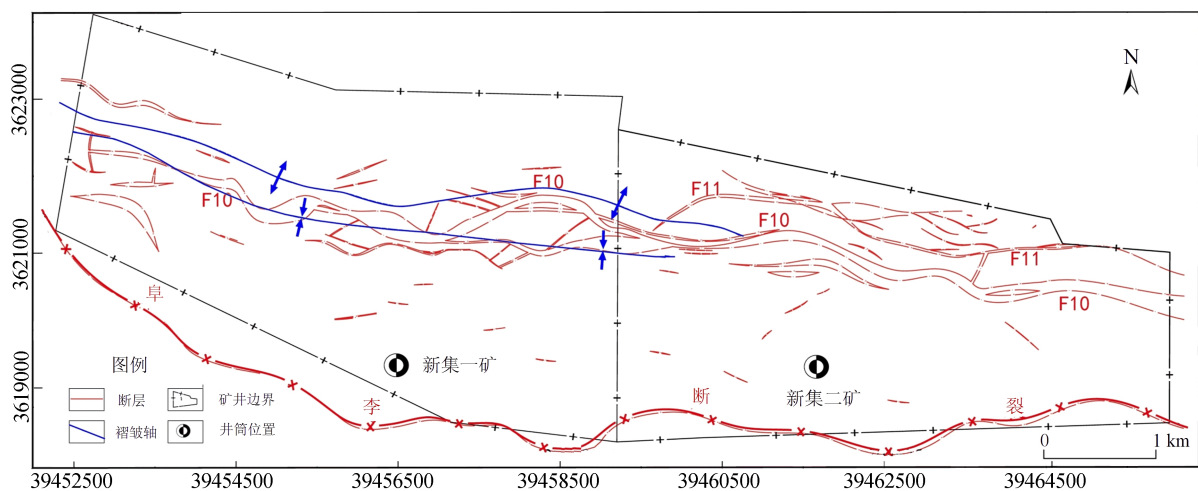


图 1 研究区 1 煤层构造图

在构造位置上,研究区处于淮南煤田南缘阜凤逆冲推覆构造带的中部,主体构造格架表现为近东西向展布的后展式逆冲推覆构造样式,主采煤层均位于下伏原地系统二叠系中^[17]。原地系统煤系地层整体向北倾伏,倾角一般在 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$,其内构造较简单,主要发育近东西向断层与褶曲。矿区南部边界为阜李逆冲推覆断裂,中部发育 F10 大型张性断裂。2 条断裂均横贯矿区,断距高达 380 m 以上,向深部都切入奥灰地层中。远离 2 条主控断裂地区,断层较少,且规模较小,落差一般都小于 20 m。

自上而下,矿区内发育有新生界松散含水层(组)、煤系砂岩裂隙含水层(组)、太原组灰岩岩溶裂隙含水层(组)和奥灰岩溶裂隙含水层(组)。本次研究的山西组 1 煤层直接充水水源为 1 煤层顶板砂岩、太灰与奥灰含水层。其中,奥灰含水层在矿区内广泛分布,岩性由浅灰-灰白色中厚层状结晶灰岩、白云质灰岩、夹薄层绿色铝质泥岩组成。1 煤层底板至奥灰顶界面距介于 94.0~166.0 m 之间,平均 123.7 m,富水性由弱至强很不均一,在构造带附近富水性较强。

2 底板灰岩溶突水主控因素建立与分析

2.1 评价原理与方法

AHP 方法具有系统性强、决策方便、无需较多定量信息等优点,在实际问题评价中得到广泛应用。其基本原理是通过分析复杂问题包含的因素及其相互联系,将问题分解为不同的要素,并将这些因素归并为不同的层次结构,建立系统评价的结构模型和数学模型。

GIS 可实现对影响底板突水各主控因素的量化处理,通过与层次分析模型耦合关联,利用 GIS 的空间赋权叠加工具,将各主控因素按照影响权重复合叠加运算,最终可得到符合实际的煤层底板突水危险性评价模型。

2.2 主控因素选取与专题图的建立

根据矿区地质与水文地质报告资料,充分考虑构造、含水层、隔水层等方面的影响,选取了断层强度指数、断层交叉点与尖灭点、含水层水压、富水性、隔水层厚度、脆塑比 7 个因素作为 1 煤层底板奥灰突水的主控因素。利用矿区范围内的 32 个奥灰钻孔资料,对上述 7 个主控因素进行量化处理,各主控因素专题图如图 2 所示。

1) 断层强度指数。断层构造会破坏岩体的完整性,对水源、水压、隔水层等均有影响,从而增

加突水发生的概率。以往多选取断层线密度或断层分形维数代表断层影响因素,但其无法表征不同规模、不同级别断层所造成的突水危险程度。为了更符合实际地质情况,本次将每条断层赋值落差,选取断层强度指数表征断层对底板突水的影响,并建立断层强度指数专题图(图 2a)。

从图 2a 可以看出,高值区位于 F10、F11 及阜李断裂发育处,主要与其落差较大、长期强烈活动有关。中值区位于新集一矿 F10 断裂与新集二矿 F10 断裂以北地区,主要是 F10 断裂落差变小处或其次生断裂发育区。远离 F10 断裂及阜李断裂区域,断层稀少且规模很小,断层强度指数呈现低值。

2) 断层交叉点与尖灭点。断层交叉点分布区域,一般岩体较破碎、地应力更集中、含水层连通性更好,该区域是突水的高发地带。本次利用 GIS 软件的核密度空间分析功能,建立生成了构造交叉点(图 2b)与端点(图 2c)分布密度专题图。

从图 2b、图 2c 可以看出,断层交叉点与尖灭点集中分布在矿区中部 F10 断裂带上。受多期应力场改造,在 F10 断裂旁侧形成了大量与其斜交的次级派生断层,导致该区域地应力集中,最易发生突水事故。F10 断层以南无断层交叉点分布,显示该区域断层稀少,构造较简单。

3) 含水层水压。底板含水层水压越大,越易克服隔水层内断裂面上的阻力,底板承压岩溶水在卸压情况下会沿隔水岩体的导水裂隙进入岩层,从而引发突水。矿区奥灰含水层水压由水头压力公式进行量化,并生成奥灰水压专题图(图 2d),其表达式为:

$$p = 0.0098(H - h) \quad (1)$$

其中: p 为水压; H 为承压含水层水位标高; h 为含水层的顶界面标高。

从图 2d 可以看出,奥灰水压整体呈现北高南低的特点,这与奥灰岩层埋藏北深南浅的趋势相对应。受高水压影响,深部奥灰水一旦出水,一般水量很大且持续时间较长,因此水压是影响煤层底板突水的重要因素之一。

4) 富水性。富水性表示含水层水量存储的大小及释水的能力。根据《煤矿防治水规定》,表征富水性强弱的主要指标是抽水试验获得的水文地质参数,一般以单位涌水量作为指标。本次以钻孔口径 91 mm、抽水水位降深 10 m 为准则的标准钻孔单位涌水量表征矿区富水性,并绘出富水性专题图(图 2e)。

从图 2e 可以看出,本区奥灰含水层富水性总

体不强,并呈现自西北向东南逐渐变大的趋势。富水性最低处位于新集一矿西部,富水性最大处位于新集二矿井筒南侧区域。

5) 脆塑比。脆塑性岩性组合比例不同,其阻水能力、抗压强度有较大差别。比例越大时,其抵抗底板承压水压的能力也越强。本文统计了 1 煤层底板至奥灰顶部之间脆性岩与塑性岩厚度比值,并绘出脆塑比专题图(图 2f)。

从图 2f 可以看出,脆塑比在新集二矿中东、部为高值区,向西至新集一矿中部逐渐变低,新集一矿西部边界处呈现为中值区。因此,新集二矿中、东部地区煤层底板岩石较为稳定,其抵抗深部

灰岩水头压力的能力也最强。

6) 隔水层等效厚度。隔水层的隔水能力与隔水层的厚度、力学强度以及岩性组合均有关。考虑隔水岩段对底板承压水的阻隔能力,先统计 1 煤层底板至奥灰含水层顶面之间的隔水岩层段,再根据不同的岩性的强度等效系数折算出等效隔水厚度^[18]。本文统计了隔水层等效厚度,并绘出隔水层等效厚度专题图(图 2g)。

从图 2g 可以看出,矿区内隔水层厚度差异不大,高值区分布在矿区东部边界处,中值区分布在矿区中部和西部,北部局部区域为低值区,整体上呈现东厚西薄的分布特点。

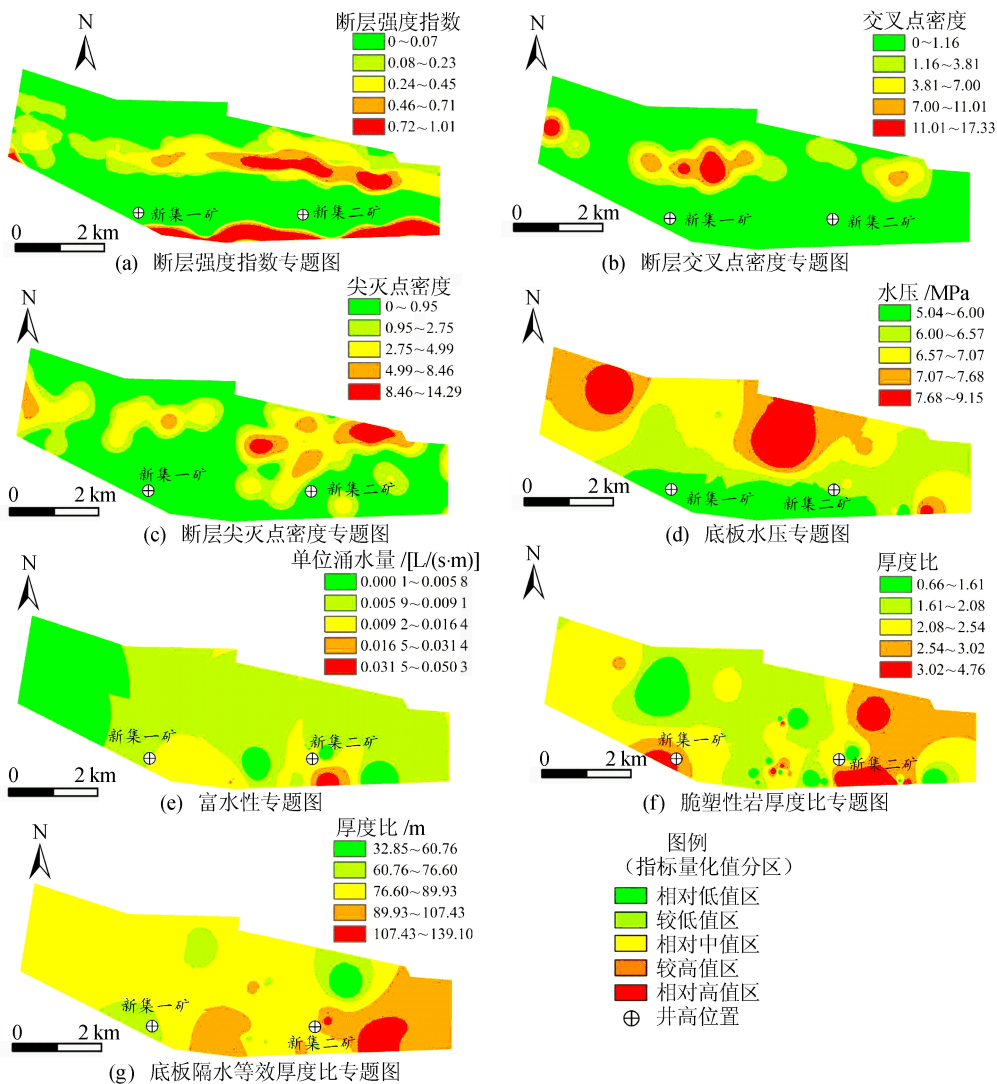


图 2 各主控因素专题图

3 各主控因素影响权重的确定

3.1 建立层级结构分析模型

通过对 1 煤层底板奥灰突水主控因素的分

析,将研究目标分为 3 个层次,建立层次分析模型。以 1 煤层底板突水危险性为模型的目标层(A 层次),选取地质构造、含水层、隔水层因素作为模型准则层(B 层次)。将各个具体的多源地学

信息作为模型的决策层(C 层次),通过对该层次问题的决策,可计算出各主控因素(C 层次)对于煤层底板突水(A 层次)的影响权重(W_i)。

3.2 构造判断矩阵与一致性检验

通过上述层级结构分析模型,在遵循客观性和评价主体特殊性两大原则的基础上,对同一层次各评价参数相对于上一层次重要性进行两两对比,采用改进的 4 级标度法^[19]构成判别矩阵。通过求解矩阵的最大特征根及其所对应的特征向量,即可算出各评价参数的相对权重。由上述过程即可构建 1 煤层底板奥灰突水 AHP 的判断矩阵,即 A-B_i($i = 1, 2, 3$)、B1-C_i($i = 1, 2, 3$)、B2-C_i($i = 4, 5$)、B3-C_i($i = 6, 7$),并得到最大特征值 λ_{\max} 与对应的特征向量值,各级指标的判别矩阵情况见表 1 所列。

表 1 1 煤层底板奥灰突水各级指标的判别矩阵

层次	矩阵			特征向量	λ_{\max}	R_c	
A-B	A	B1	B2	B3	WB	3.014	0.014
	B1	1.00	1.50	1.50	0.426		
	B2	0.67	1.00	0.70	0.253		
	B3	0.67	1.43	1.00	0.321		
B1-C	B1	C1	C2	C3		3.001	0.000 5
	C1	1.00	1.40	1.40	0.412		
	C2	0.71	1.00	1.10	0.304		
	C3	0.71	0.91	1.00	0.285		
B2-C	B2	C4	C5			2.000	0
	C4	1.00	1.30		0.565		
	C5	0.77	1.00		0.435		
B3-C	B3	C6	C7			2.000	0
	C6	1.00	0.90		0.474		
	C7	1.11	1.00		0.526		

从表 1 可以看出,判断矩阵平均随机一致性指标 R_c 均小于 0.1。根据层次分析法规定,若 $R_c < 0.10$ 时,则认为判断矩阵具有满意的一致性,否则需要调整判断矩阵,上述计算结果显示本次构建的判断矩阵一致性较好。

将各层次的权重向量,沿层次结构模型逐级进行计算,则可建立断层强度指数、构造交叉点、断层尖灭点、含水层水压、含水层富水性、脆塑比、脆塑比 7 个指标对总目标的权重分别为 0.176、0.130、0.122、0.143、0.110、0.152、0.168。

4 评价分区结果

4.1 评价模型的构建

由于各主控因素指标属于不同类别,其量纲不同致使无法对比。本文运用 GIS 极差空间变

换功能对各主控因素进行正规化处理,以消除量纲对评价结果的影响。各指标按照控制突水作用的不同,可分为正向指标和逆向指标。正向指标(如构造、含水层因素)是与突水呈正相关关系的主控因素;逆向指标(如隔水层厚度)是与突水呈负相关关系的主控因素。正、负向指标的计算公式分别为:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$X_i = \frac{x_{i,\max} - x_i}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

其中: X_i 为归一化处理后的数据; x_i 为归一化前的原始数据; $x_{i,\max}$ 、 $x_{i,\min}$ 分别为各主控因素量化值的最大、最小值; n 为样本个数。

根据上述原则,首先在 GIS 里建立各主控因素对应的属性数据库,再对各主控因素进行归一化计算,并建立归一化专题过程图。然后利用 ArcGIS 的空间复合叠加与统计分析功能,按照各主控因素影响权重对各归一化专题图进行叠加,建立 1 煤层底板奥灰突水危险性数学评价模型公式,表达式为:

$$V_i = \sum_{k=1}^m W_k f_k(x, y) = 0.176f_1(x, y) + 0.130f_2(x, y) + f_3(x, y) + 0.143f_4(x, y) + 0.110f_5(x, y) + 0.152f_6(x, y) + 0.168f_7(x, y) \quad (4)$$

其中: V_i 为危险性指数; W_k 为各主控因素权重; $f_k(x, y)$ 为主控因素影响函数; (x, y) 为栅格化后地理位置; m 为主控因素个数。

4.2 评价结果分析

根据上述数学模型,计算每个栅格突水危险性指数,危险性指数越高,表示发生突水的可能性越大。然后利用自然分级法对数据频数进行分级,再根据分区阈值,将研究区划分为相对安全区、较安全区、过渡区、较危险区、危险区 5 个区域,其中分区阈值分别为 0.260、0.325、0.393、0.480、0.606。评价分区图如图 3 所示。

从图 3 可以看出,自南向北、自西向东,奥灰岩溶突水区域整体上由安全区过渡至危险区。沿 F10 断裂一线,因为受构造影响大,且奥灰水压较高,所以均为危险区与较危险区。新集一矿与新集二矿之间 F10 断裂附近为全区最危险处,其发生突水的可能性最大。F10 断裂南北两侧发育大量次级中、小型断层,同属于 F10 断裂影响范围,该区域煤层连续性遭到严重破坏,在生产中如遇

到这些断层,会作为导水通道直接或间接将奥灰水导入工作面造成严重后果,因此基本都为较危险区或过渡区。

矿区南部构造简单、水压偏低、脆性岩较发育、隔水层等效厚度大,故属于相对安全区与较安全区。目前 1 煤层开采的 2201、2101 等工作面均

设置在该区域内,且尚未出现过 1 煤层底板灰岩突水现象,因此该区域为 1 煤层开采最有利区带。但靠近矿区南侧边界阜李断层处,突水危险性指数相对又变高,指示深部煤层开采受大型逆冲断层影响,诱发煤层底板高承压岩溶性突水的可能性较大。

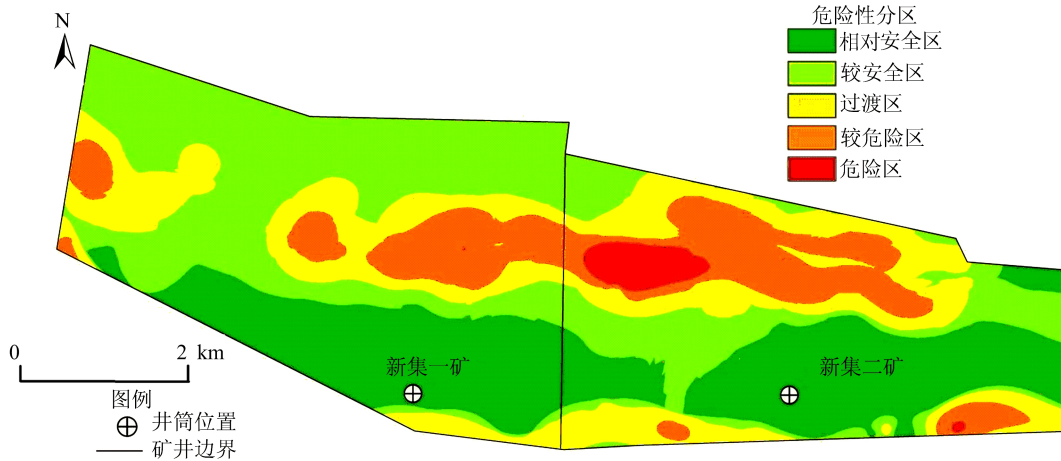


图 3 1 煤层底板奥灰岩突水危险性评价分区

5 与突水系数法结果对比分析

根据 2019 年修订的《煤矿防治水细则》,突水系数 $T = P/M$,其中: P 为底板隔水层承受的实际水头值; M 为底板隔水层厚度。细则规定煤层底板受构造破坏的地段突水系数一般不得大于

0.06 MPa/m,隔水层完整无断裂构造破坏的地段不得大于 0.10 MPa/m。

本文通过 GIS 栅格计算器功能对水压和隔水层厚度进行叠加运算,得到临界突水系数,并将研究区划分为 4 个预测区域,评价分区图如图 4 所示。

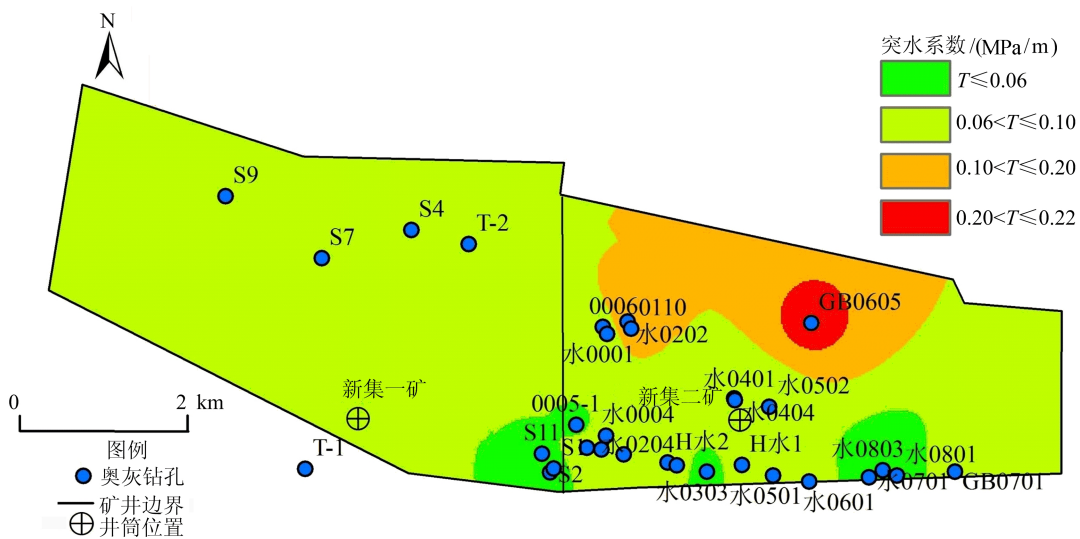


图 4 突水系数法评价分区图

本文将危险性指数法与突水系数法分区结果进行对比可以看出,突水系数法将大部分区域划

分为较安全区。矿区南部构造简单块段,突水系数虽然都小于 0.10 MPa/m,可界定为相对安全

区,但无法体现边界阜李断裂的影响。在矿区中部构造破坏块段,突水系数大于 0.06 MPa/m ,可界定为危险区,但不能显示构造复杂程度及岩性组合等对突水的影响差异,且其最危险区(GB0605孔附近)与实际也不符。这主要是由于突水系数法公式中忽视了隔水层的岩性组合、含水层富水性、地质构造等因素,其所划分的危险区域与本次评价结果相似,但安全区域与实际有较大出入,尤其在断层影响范围内突水系数法计算结果无法表征突水危险性程度。本文基于GIS信息融合技术,充分考虑了多种主控因素的影响,能较为全面、细致地反映不同区域的相对危险性,并可针对性地制定防治水措施,对实际生产更具有参考价值和指导意义。

6 结 论

1) 在对研究区1煤层底板奥灰突水因素分析基础上,确定了断层强度、断层交叉点与端点、水压、富水性、隔水层等效厚度、脆塑比等7个因素作为奥灰岩溶突水主控因素,这些因素共同影响着煤层底板岩溶突水灾害的发生与演化。

2) 利用GIS强大的空间数据处理系统,建立了研究区1煤层底板奥灰突水主控因素专题图,结合AHP确定了评价对象的层级模型与各控制因素影响权重。在GIS信息融合基础上,综合评价了奥灰岩溶突水危险性程度,其评价分区结果符合实际生产地质条件。

3) 将本文评价分区结果与传统突水系数法结果对比可知,基于GIS的突水评价方法可充分挖掘各类水文地质信息的价值,并能够结合专题图探究各个子因素的控制程度,该方法评价结果可为今后矿区奥灰岩溶水害防治工作提供针对性的指导意见。

[参 考 文 献]

[1] 范书凯. 华北型煤田南部底板突水评价与对策:以新集二矿为例[D]. 北京:中国矿业大学,2012.

- [2] 胡中信,许进鹏,郑世书. 华北煤矿奥灰突水特点就防治对策研究[J]. 中国煤炭地质,2009,21(10):34-45.
- [3] 张党育,蒋勤明,高春芳,等. 华北型煤田底板岩溶水害区域治理关键技术研究进展[J]. 煤炭科学技术,2020,48(6):31-36.
- [4] 张金才,刘天泉,张玉卓. 裂隙岩体渗透特征的研究[J]. 煤炭学报,1997,22(5):481-485.
- [5] 张金才,刘天全. 论煤层底板采动裂隙带的深度及分布特征[J]. 煤炭学报,1990,15(2):46-55.
- [6] 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,1999,18(4):11-18.
- [7] 王经明. 承压水沿煤层底板递进升突水机理的模拟与观测[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):546-549.
- [8] 黎良杰,钱鸣高,李树刚. 断层突水机理分析[J]. 煤炭学报,1996,21(2):119-123.
- [9] 黎良杰,殷有泉,钱鸣高. KS结构的稳定性与底板突水机理[J]. 岩石力学与工程学报,1998,20(1):40-45.
- [10] 冯启言,孟磊,张海荣,等. 基于GIS的梁北煤矿底板突水危险性评价[J]. 地理信息世界,2008(5):21-25.
- [11] 武强,黄晓玲,董东林,等. 评价煤层顶板涌(突)水条件的“三图双预测法”[J]. 煤炭学报,2000,25(1):62-67.
- [12] 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.
- [13] 朱宗奎,徐智敏,孙亚军,等. 基于无量纲多源信息融合的底板突水危险性评价方法研究[J]. 采矿与安全工程学报,2013,30(6):911-916.
- [14] 廉法宪,周学年,李磊,等. 脆弱性指数法在1煤层底板岩溶突水评价中应用:以新集二矿为例[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2018,38(5):47-56.
- [15] 秦立涛,孙占起,张建璞. 新集一矿开采的太灰上段突水分析[J]. 河北煤炭,2011,41(5):41-44.
- [16] 白海波,戎虎仁,杨城,等. 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):363-375.
- [17] 张鸣,张品刚,周士荣,等. 淮南煤田新集二矿构造特征与控煤规律[J]. 中国煤炭地质,2016,28(7):6-10.
- [18] 刘钦,孙亚军,徐志敏. 改进型突水系数法在矿井底板突水评价中的应用[J]. 煤炭科学技术,2011,39(8):107-109.
- [19] 冯玉龙,周林元,王乾,等. 基于多层次模糊数学法的煤层气井产能综合评价模型[J]. 煤田地质与勘探,2021,49(2):125-132.

(责任编辑 吴 亮)