

谭文辉,张丽萍,李子建.基于 GIS 的金属矿巷道突水预测[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(2):10-18. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.002

TAN W H, ZHANG L P, LI Z J. Prediction of Water Inrush in Metal Mines Based on GIS [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(2): 10-18. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.002

基于 GIS 的金属矿巷道突水预测

谭文辉*, 张丽萍, 李子建

(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 突水事故是地下开挖工程中常见的工程事故,为保障矿区的安全开采,以金属矿地下巷道为研究对象分析突水的主要影响因素,建立基于 GIS 和 BP 神经网络的脆弱性指数突水预测模型,并进行金属矿井突水预测.研究表明:金属矿巷道突水是多因素共同作用的结果,影响金属矿巷道突水危险性程度由大到小的因素依次是采动影响、断层、充水含水水压、巷道围岩防突性能和充水含水分布特性;巷道中严重的突水灾害易发于充水含水丰富且距离采场近的区域,并且与距断层的距离、充水含水水压和巷道围岩防突性能密切相关.

关键词: 地理信息系统(GIS); BP 神经网络;金属矿巷道;突水;预测

中图分类号: TU451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2023)02-0010-09

Prediction of Water Inrush in Metal Mines Based on GIS

TAN Wenhui, ZHANG Liping, LI Zijian

(School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Water inrush often occurs in underground excavation. In order to ensure the safety of mining area, the main influencing factors of water inrush are analyzed by taking underground roadway of metal mine as the research object. The water inrush prediction model of vulnerability index based on GIS and BP neural network is established, and the water inrush prediction of metal mine is carried out. The research shows that: (1) water inrush in metal mine is the result of multiple factors. The degree of impact on water inrush from big to small is mining, fault, water pressure, outburst performance of surrounding rock and distribution of water in rocks, and (2) serious water inrush is more prone to happen in the water-filled and water-rich rock mass close to the stope, and it is related to the distance from the fault and the water pressure and the anti-outburst performance of surrounding rock.

Keywords: Geographic Information System(GIS); BP neural network; metal mines; water inrush; prediction

矿山开采过程中不可避免地会遇到强含水层、裂隙水和地下水,从而导致透水甚至突水事故,对矿山生产以及工人的人身安全产生巨大隐患,因此,对地下工程建设进行突水预测非常重要.

对于地下工程建设过程中的突水预测,学者们进行了一些研究.在煤矿突水预测方面,申建忠^[1]运用地下水动力学法和水文地质比拟法对矿山主开采区域 3 号煤层底板的突水危险性进行预测;王连国等^[2]建立煤层底板突水的尖点突变(cusp)模型,并分析了煤层底板失稳破坏发生突水的机制;LIU 等^[3]将主成分 Logistic 回归分析和 GIS 空间地理分析相结合,建立底板突水风险预测模型,用于底板突水评价;

收稿日期:2021-05-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804103)

*通信作者, E-mail: wenhui.t@163.com

LI 等^[4]将熵权法与变异系数法相结合,建立综合加权脆弱性指数模型,预测底板突水风险;韦韬等^[5]通过求解状态变量实现煤层底板突水危险性评价;李博等^[6]通过变权模型评价效果分析,进一步明确煤层底板突水变权脆弱性评价模型的评价特点;张杰等^[7]基于平面固液耦合实验平台,开展浅埋煤层顶板突水致灾演化试验,揭示开采扰动及渗流作用下隔水土层的2种破坏失稳规律,并基于多元拟合公式及有限元差分软件FLAC^{3D}应力-渗流耦合系统,进行突水判别分析与仿真模拟预测,提出沟谷下留设煤柱的防水开采措施.在隧道突水预测方面,LI 等^[8]应用非线性回归高斯过程分析方法,建立隧道突水预测模型和基本评价指标体系及相应的判据;PENG 等^[9]运用AHP-TOPSIS评价理论建立突水涌泥风险预测模型,并将其应用于福建龙津溪引水工程;QIU 等^[10-11]提出利用含水层的含水指数、结构指数、含水量指数、含水层水压力指数和地下压力指数这5个指标来预测地下水涌水量的概率指数法,采用该方法计算突水概率指数和突水阈值,并利用GRA和FAHP计算权重建立突水特性指数模型,用于预测灰岩突水特性的空间分布;HUANG 等^[12]提出一种将水化学与多元统计方法相结合的识别模型;XUE 等^[13]基于尖点突变模型,分析伸展断层、剪切断层和压缩断层引起的突水或突泥机理,并建立相应的风险预测方法;SHI 等^[14]结合地质分析、涌水量计算和超前地质预报分类方法进行工程突水预测;HU 等^[15]利用激光诱导荧光技术实现了准确、快速地识别突水类型;LI 等^[16]用水化学方法对矿井涌出海水的危险性进行评价;FAN 等^[17]建立水流破碎带上方隔层水危害的力学模型,推导第一次和周期突水分层的理论判别式,采用突水系数法对突水分层风险进行划分.

这些研究以煤矿和隧道的突水研究居多,而对金属矿山的突水研究较少.金属矿山的矿体成因、矿体分布和开采方法与煤矿不同.三山岛金矿是我国目前最大的海底黄金矿山,该矿水文地质条件复杂,随着开采深度的增加,矿井发生突水事故的可能性逐渐升高,影响矿山的安全稳定开采.本文以三山岛金矿西山分矿为研究对象,分析矿井突涌涌水特征,选取影响突水的主要控制因素,建立基于GIS和BP神经网络的脆弱性指数突水预测模型,并在矿山进行验证和预测,建立显示矿井巷道突水危险性信息的综合预测专题图,为矿山突水预测提供参考.

1 工程简介

三山岛金矿位于胶东半岛,最大开采深度超过-1 000 m,进入深部开采揭露的岩石主要为钾化花岗岩、绢英岩化花岗岩和绢英岩,局部为黑云母花岗岩^[18],岩体裂隙发育,地下水赋存,矿坑涌水量不断增大,对矿山生产造成极大影响.自矿山开采以来,各个中段和斜坡道都发生过不同程度的突水事故,最严重的事故曾迫使矿山停产一年.

矿区的主要控水断裂有3条(图1).F1断裂为压扭性断裂,在主裂面上发育有厚度为50~100 mm的断层泥,具有良好的隔水性.在F1断裂西侧发育有一条规模较小的伴生F2断裂,为张扭性断裂,具有良好的导水性能,但因距离主要开采区较远,对矿区的稳定开采和突水灾害的影响较小.F3断裂与F1断裂直交并切断F1断裂,产状为NW305°/NE∠85°,横穿整个矿区,是区内最大的导水断裂.F3断裂的主裂面位于南侧,有角砾填充,南侧岩体的完整性较好,主要发育NW-SE向节理,节理面平直,岩体破碎,节理开度大,具有良好的导水性,为地下水的存储空间及运移通道,在开挖过程中极易发生塌方、冒顶及突水事故.

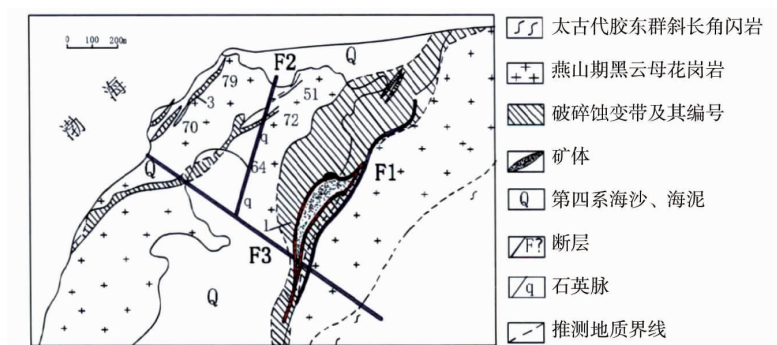


图1 三山岛金矿矿区地质

2 突水影响因素与数据库建立

2.1 数据库建立

由于影响突水的因素多,而地理空间数据库为基础的地理信息系统(Geographic Information System, GIS),能够实现地理空间数据的高效应用和统计分析,保证数据的属性统一与质量良好.因此,基于 ArcGIS 软件平台^[19],将收集的资料全部整理为统一坐标(WGS1984)和统一投影方式的 GIS 数据格式文件,建立包括地形地貌信息、断层信息、围岩质量信息、水文信息、矿区灾害信息和现场监测信息等多个子库,构建西山分矿地理信息数据库.图 2 和图 3 分别是数据库中-780 m 中段的灾害信息和监测信息.

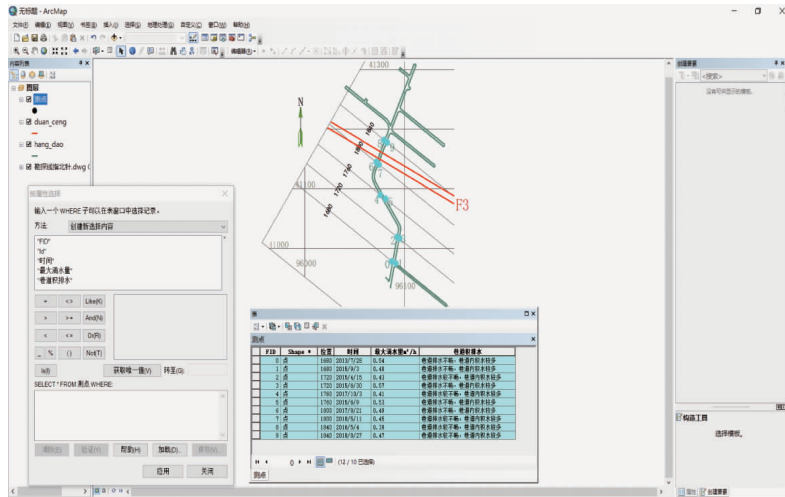


图 2 -780 m 中段灾害信息

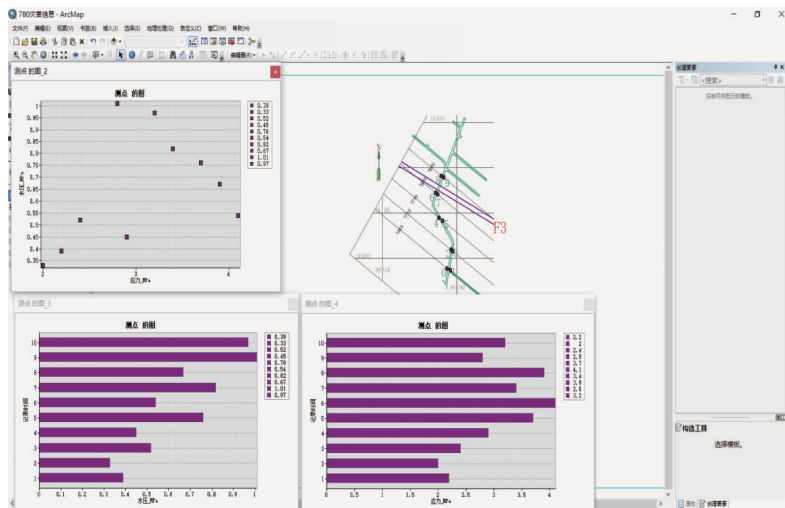


图 3 -780 m 中段监测信息

2.2 突水主要影响因素

在现场探查及监测工作的基础上,综合已有文献,充分考虑断裂构造、水文条件、采矿活动及矿井突水三要素(充水水源、充水通道和充水强度)等,确定断层、巷道围岩防突性能、断层带充水含水分布性、充水含水水压和采动应力这 5 种因素为现场巷道突水的主要影响因素.

但是,这些突水主控因素的性质差异较大,量化指标不同,量纲不同,所以在数据处理分析时先将数据进行标准化处理.将主控影响因素的取值按式(1)和式(2)进行归一化处理,式(1)和式(2)分别是正、负相关的归一化处理公式.将归一化后的数据导入 ArcGIS,可以生成各个主控因素的归一化预测专题图.

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}; \quad (1)$$

$$x_i^* = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: x_i, x_i^* 为数据归一化前和数据归一化后的值; x_{\max}, x_{\min} 为样本数据中的最大值和最小值。

2.2.1 巷道围岩防突性能

金属矿中巷道围岩防突性能指的是阻止各种水源突入巷道的能力,巷道围岩防突性能采用修正的岩体质量分类指标 Q' ^[20] 来衡量.以西山分矿-765 m 中段为例,对该中段进行非接触摄影测量,并对岩体内节理裂隙的发育情况及含水层的赋存情况进行调查.建立的巷道围岩防突性能专题图如图 4 所示,图 4 中数值越大表示岩体质量越差,岩石破碎,发生突水危险的可能性越大.图 4 中编号 1~12 的数据为结构面几何特征测点位置。

由图 4 可以看出:-765 m 中段巷道围岩岩体距离 F3 断裂越近,巷道围岩岩体的质量越差,巷道围岩的防突性能越差。

2.2.2 距断层距离

F3 断裂是三山岛金矿西山分矿主要的导水构造,断层带附近的岩体破碎,岩体质量差,受其影响曾多次发生事故.对断层影响距离进行统一量化赋值,主要以距离断层的远近为依据。

根据矿山的以往资料,充分考虑安全性,对断层影响距离进行统一量化赋值,距离断层 80 m 内赋值 1,距离断层 80~160 m 赋值 0.6,距离断层大于 160 m 赋值 0.图 5 是-765 m 中段断层的影响分区图。

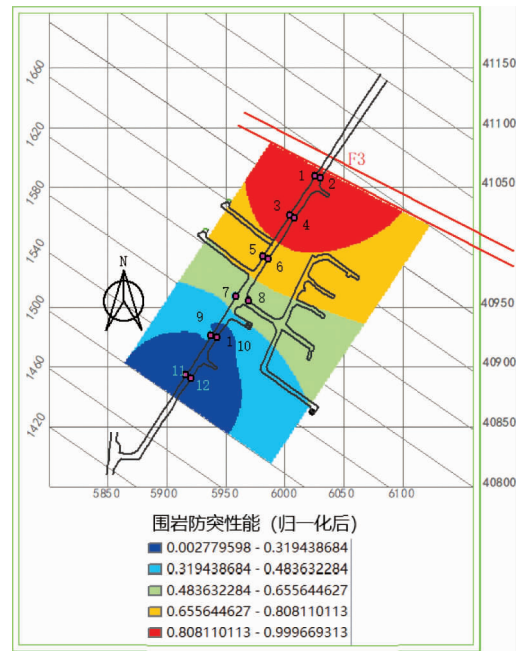


图 4 西山分矿-765 m 中段巷道围岩防突性能专题

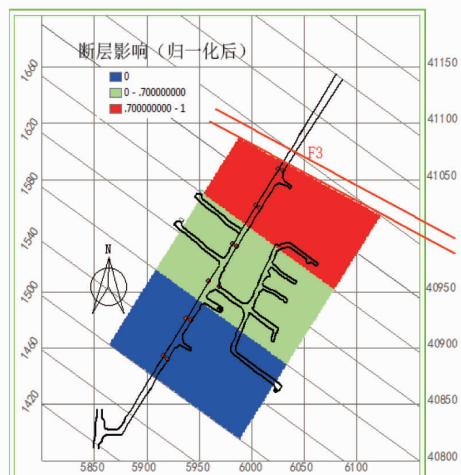


图 5 西山分矿-765 m 中段断层影响专题

2.2.3 充水含水分布性

利用瞬变电磁法探测视电阻率等值线剖面结果,并结合现场钻探结果进行综合分析,可以描述巷道围岩的充水含水分布性.视电阻率越大,表明该区域的含水性越弱.监测点视电阻率与含水分布性的关系如表 1 所示。

表 1 监测点视电阻率与含水分布性和分级关系

视电阻率/($\Omega \cdot m$)	>700	500~700	300~500	100~300	0~100
分布性	极弱	弱	一般	较强	强
分级	I	II	III	IV	V

对各中段巷道的侧帮和底板进行瞬变电磁探测,可以大致得到各个中段巷道周围岩体的充水含水分布情况.图6为-765 m中段的充水含水层分布性专题图,图6中的数据越大表示含水分布性越强.

从-765 m中段的充水含水分布性来看,含水丰富的区域主要集中在1600勘探线靠近采场的位置和1500勘探线巷道入口位置,这与瞬变电磁探测的结果一致,F3断裂附近含水性不丰富的主要原因是由于该区域的岩石破碎,水源难以汇集集中,水源会经破碎的巷道围岩流到更深的中段.

2.2.4 充水含水水压

充水含水水压是影响金属矿山巷道突水危险的主要控制因素之一,充水含水水压越大,突水灾害的危险性和破坏性也越大.从目前监测结果和已有资料分析可知:采深越大,井下单点孔隙水压有增大的趋势,即随着深度的增加,发生矿井突水的概率逐渐加大.水压专题图的制作采用反距离权重插值的方法.图7为-765 m中段的含水水压专题图,图7中的数值越大代表水压越高,发生突水危险的可能性越大.由图7可以看出:距离F3断裂越近,水压值越小,这是因为F3断裂附近巷道围岩的岩体破碎,水源无法汇集集中,导致水压较小;而1500勘探线周围巷道围岩的岩体质量好,水源可以汇集,且靠近采场,水压值较大.

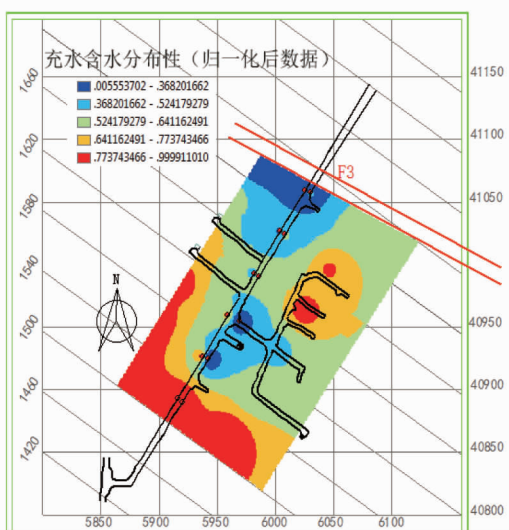


图6 西山分矿-765 m中段充水含水层专题

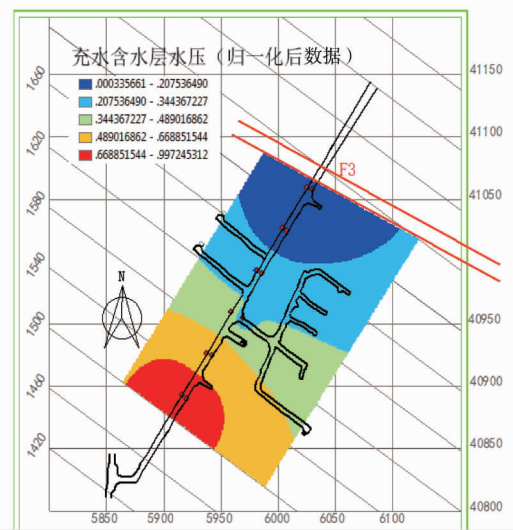


图7 西山分矿-765 m中段充水含水水压专题

2.2.5 采动应力

掘进及采矿活动中,巷道揭穿导水断裂是多数金属矿井发生涌水突水的主要原因,用采动应力中的最大主应力作为量化采动扰动的指标.图8是采矿活动对-765 m中段巷道的影晌程度分布.由图8可以看出:1580勘探线和1660勘探线之间的位置由于距离采场近,受采动的影晌最大,其两侧由于距离采场相对较远,受采动的影晌也较小.

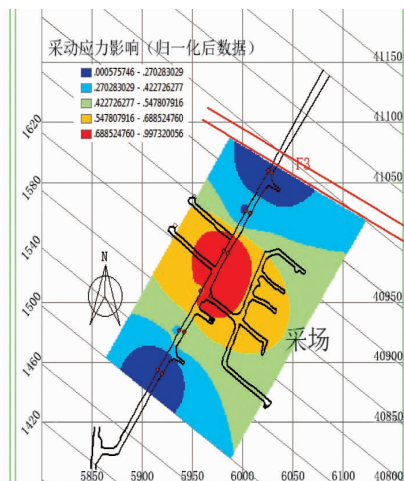


图8 西山分矿-765 m中段采动应力影响专题

3 突水预测模型与工程应用

3.1 影响因素权重的确定

因为突水是多因素影响的结果,而不同因素的影响也不同,因此,采用 MATLAB 神经网络工具箱确定各影响因素的权重.用三山岛金矿西山分矿多个中段巷道的监测数据结合三山岛金矿记录的巷道突水案例构建训练网络,为了使结果能够 20 步显示一次,将训练步数间隔设置为 20,学习速率设置为 0.01,最大训练步数取 1 000,最小误差为 0.001.采用试凑法经验式(3)来确定隐含层节点数的大致范围,反复试验后最终确定隐含层节点数为 12,得出神经网络各神经元权值系数见表 2.

$$m = \sqrt{n + l} + a. \quad (3)$$

式中: m 为隐含层节点数; n 为输入层节点数; l 为输出层节点数; a 为正整数, $1 \leq a \leq 10$.

表 2 BP 神经网络各神经元权值系数

隐含层单元	输入层单元					输出层单元
	1	2	3	4	5	
1	0.628	0.569	0.026	0.846	0.854	0.846
2	0.273	0.317	0.803	0.647	0.663	-0.036
3	0.465	0.437	0.723	0.439	0.696	0.673
4	0.214	0.728	0.903	0.138	0.433	0.804
5	0.871	-0.027	0.167	0.462	0.714	0.347
6	0.638	0.376	0.546	0.369	0.401	0.291
7	0.004	0.912	0.632	0.487	0.603	0.539
8	0.412	0.248	0.702	0.698	0.741	0.426
9	0.349	0.341	-0.033	0.761	0.087	0.331
10	0.214	0.273	0.147	0.103	0.509	0.845
11	0.473	0.687	0.263	0.692	0.697	0.412
12	0.173	0.741	0.419	0.735	0.335	-0.301

将各个神经元之间的权重加以分析和处理,几个关键的指标可以由式(4)~式(6)得到.

1) 相关显著性系数:

$$r_{ij} = \sum_{i=1}^n \omega_{ki} (1 - e^{-p}) / (1 + e^{-p}); \quad (4)$$

$$p = \omega_{jk}.$$

2) 相关指数:

$$R_{ij} = | (1 - e^{-q}) / (1 + e^{-q}) |; \quad (5)$$

$$q = r_{ij}.$$

3) 绝对影响系数:

$$S_{ij} = R_{ij} / \sum_{i=1}^m R_{ij}. \quad (6)$$

式中: i 为神经网络输入单元, $i=1, 2, \dots, n$; j 为神经网络输出单元, $j=1, 2, \dots, l$; k 为网络隐含单元, $k=1, 2, \dots, t$; ω_{ki} 为输入层神经元 i 和隐含层神经元 k 间的连接权重; ω_{jk} 为输出层神经元 j 和隐含层神经元 k 间的连接权重; S_{ij} 为绝对影响系数,是最终所求的主控影响因子的贡献率.

由式(4)~式(6)并结合表 2 进行计算,得到各个主控因素的权重:巷道围岩防突性能占比 0.141 5,断层影响占比 0.253 3,充水含水分布占比 0.074 3,充水含水水压占比 0.153 5,采动应力影响占比 0.377 4.因此,对突水影响的程度由大到小依次是采动应力、断层、围岩防突性能、充水含水水压和充水含水分布.

影响巷道突水的各主控因素权重的合理性将通过后续实例分析结果与实际突水情况进行验证.

3.2 基于 BP 神经网络脆弱性指数预测模型的建立

BP 神经网络具有复杂的动态特性、较高的鲁棒性和容错性,对任意非线性函数都有较为强大的拟合

能力和泛化能力,是处理非线性预测及分类复杂系统问题最有效的方法之一,因此,基于BP神经网络建立突水预测模型。

以5个主控因素量化指标作为模型输入层节点,以实际监测的对应涌水量作为输出节点,引入脆弱性指数 K 对突水危险性进行预测,模型如下:

$$K = \sum_{u=1}^n W_u f_k(x, y) . \tag{7}$$

式中: u 为主控因子个数; W_u 为突水主控因素权重; $f_k(x, y)$ 为第 k 个影响因素数据归一化后的影响值函数; x, y 为地理位置坐标。

结合 3.1 节,基于 BP 神经网络的脆弱性指数预测模型为

$$K = \sum_{u=1}^n W_u f_k(x, y) = 0.141 5f_1(x, y) + 0.253 3f_2(x, y) + 0.074 3f_3(x, y) + 0.153 5f_4(x, y) + 0.377 4f_5(x, y) . \tag{8}$$

以此模型为基础,利用 ArcGIS 将各主控因素归一化专题图进行复合叠加,统计各栅格内的脆弱性指数,运用自然分级法并结合矿井已有的突水点信息以及矿井实际条件,将突水危险性划分为 5 个不同的等级区域(表 3).图 9 是-765 m 中段巷道突水危险性等级预测分区图。

表 3 突水危险性预测分区

脆弱性指数取值范围	突水危险性预测分区
$0.22 < K \leq 0.31$	安全区
$0.31 < K \leq 0.44$	较安全区
$0.44 < K \leq 0.56$	过渡区
$0.56 < K \leq 0.68$	较危险区
$K > 0.68$	危险区

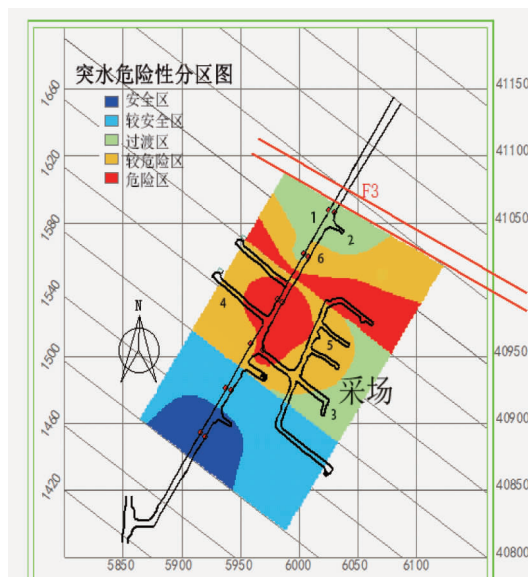


图 9 -765 m 中段巷道突水危险性综合分区

由图 9 可以看出:(1)矿区-765 m 中段在工程地质、水文地质和开采条件的共同作用下,突水危险性程度由巷道两端向中间逐渐加剧,中型及中型以上突水事故(巷道突水危险区域)易发于 1620 勘探线和 1660 勘探线附近,其原因是这 2 条勘探线附近的岩石质量较差且岩石破碎程度与断层处较为接近,同时该区域为汇水区域,水压监测值较大,距离采场很近,受采矿扰动的影响很强,应加强支护和突水防护;(2)突水等级较危险区分布在 F3 断裂附近 40~60 m 内,小型突水威胁存在,需加强防范,关注突水征兆;(3)突水等级安全区和较安全区分布在巷道入口附近,虽然该区域的含水分布性较强,但由于水压值小,

距离 F3 断裂较远且岩体完整,发生突水的可能性较小,属于较安全区。

根据矿区近3年的涌水记录,-765 m中段于2017年8月、2018年4月和2018年9月分别发生过涌水量为1.2, 1.1和1.5 m³/min的小型突水事故,均发生于较危险区的1620勘探线和1660勘探线附近;同时,在巷道开拓和采矿活动下,过渡区于2016年5月、2017年4月和2018年12月发生过涌水量为0.58, 0.26和0.37 m³/min的涌水事故(点1、点2、点3),与基于BP神经网络脆弱性指数预测模型的预测结果相吻合,这也进一步说明利用BP神经网络确定的影响矿井巷道突水主控因素的权重是合理的。

3.3 西山分矿-915 m中段巷道突水预测

为了预测-915 m中段巷道的突水情况,在西山分矿-915 m中段1540勘探线~1620勘探线设立了22个监测点进行数据采集。研究区域离F3断裂远,主要考虑F1断裂的影响。用建立的基于BP神经网络的脆弱性指数预测模型进行分析,得到如图10所示的-915 m中段巷道突水预测分区图。

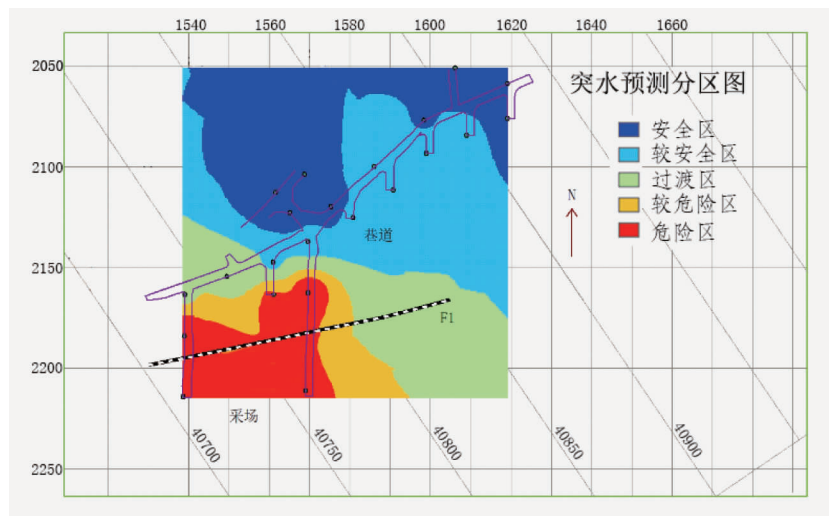


图10 -915 m中段巷道突水预测分区

由图10可以看出:图10中的危险区(图10中的左下方区域)因受F1断裂和开采扰动的影响严重,且巷道围岩破碎,岩体质量差,容易发生中型及中型以上突水灾害,需要特别防范;较危险区与危险区相比,虽然距离采场稍远一些,但由于F1断裂的存在以及比较差的岩体质量,是小型突水的多发地,也需要重点监察和防范;过渡区、较安全区和安全区呈层状过渡分布,主要原因一是巷道围岩岩体质量由图10中的左下向右上逐渐变好,而且运输巷的岩体质量与斜连巷和开采巷相比也要好很多,二是与F1断裂的距离也是按照左下-右上逐渐增加的,三是在充水含水探查上,-765, -780, -825, -855, -870 m这5个中段的水沿着F1断裂一直下流到-915 m中段的F1断裂附近,-915 m中段也曾多次发生过排水紧张的情况,所以大量水源储存在F1断裂,增加了此区域发生突水的危险性;而在图10的右上侧,瞬变电磁探测结果显示该区域的视电阻率很高,含水分布性差,属于安全区和较安全区。

4 结论

1) 通过现场探查及监测,确定断层、巷道围岩防突性能、断层带充水含水分布性、充水含水水压和采动应力5种因素为影响矿井巷道突水的主要控制因素。

2) 对金属矿巷道突水危险性的影响程度由大到小的因素依次是采动影响、断层、充水含水水压、巷道围岩防突性能和充水含水分布特性。

3) 建立基于GIS和BP神经网络的脆弱性指数突水预测模型并将其应用于三山岛西山分矿巷道进行突水验证与预测,获得了各突水单因素影响分区图和综合突水预测分区图,可为矿区的安全开采提供参考。

参考文献:

- [1] 申建忠.煤层底板突水预测及防治技术的研究[J].山东煤炭科技,2017(12):107-108.
- [2] 王连国,宋扬.煤层底板突水突变模型[J].工程地质学报,2000,8(2):160-163.
- [3] LIU W T, LI Q, ZHAO J Y, et al. Assessment of water inrush risk using the principal component logistic regression model in the Pandao coal mine, China[J].Arabian Journal of Geosciences,2018,11(16):1-12.
- [4] LI Q, MENG X X, LIU Y B, et al. Risk assessment of floor water inrush using entropy weight and variation coefficient model[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2019,37(3):1493-1501.
- [5] 韦韬,李博,王中美,等.基于尖点突变模型的煤层底板突水危险性评价[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(1):23-29.
- [6] 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.
- [7] 张杰,杨涛,王斌.浅埋煤层沟谷径流下开采顶板突水预测分析[J].采矿与安全工程学报,2017,34(5):868-875.
- [8] LI S C, HE P, LI L P, et al. Gaussian process model of water inflow prediction in tunnel construction and its engineering applications[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2017,69:155-161.
- [9] PENG Y X, WU L, SU Y. Risk prediction of tunnel water or mud inrush based on disaster forewarning grading[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2016,34(6):1923-1932.
- [10] QIU M, HAN J, ZHOU Y, et al. Prediction reliability of water inrush through the coal mine floor[J].Mine Water and the Environment,2017,36(2):217-225.
- [11] QIU M, HUANG F J, WANG Y, et al. Prediction model of water yield property based on GRA, FAHP and TOPSIS methods for Ordovician top aquifer in the Xinwen coalfield of China[J].Environmental Earth Sciences,2020,79(22):83-93.
- [12] HUANG P H, YANG Z Y, WANG X Y, et al. Research on Piper-PCA-Bayes-LOOCV discrimination model of water inrush source in mines[J].Arabian Journal of Geosciences,2019,12(11):1-14.
- [13] XUE Y G, WANG D, LI S C, et al. A risk prediction method for water or mud inrush from water-bearing faults in subsea tunnel based on cusp catastrophe model[J].KSCE Journal of Civil Engineering,2017,21(7):2607-2614.
- [14] SHI S S, BU L, LI S C, et al. Application of comprehensive prediction method of water inrush hazards induced by unfavourable geological body in high risk karst tunnel: a case study[J].Geomatics, Natural Hazards and Risk,2017,8(2):1407-1423.
- [15] HU F, ZHOU M R, YAN P C, et al. Selection of characteristic wavelengths using SPA for laser induced fluorescence spectroscopy of mine water inrush[J].Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,2019,219:367-374.
- [16] LI G Q, MENG Z P, WANG X Q, et al. Hydrochemical prediction of mine water inrush at the Xinli Mine, China[J].Mine Water and the Environment,2017,36(1):78-86.
- [17] FAN K F, LI W P, WANG Q Q, et al. Formation mechanism and prediction method of water inrush from separated layers within coal seam mining: A case study in the Shilawusu mining area, China[J].Engineering Failure Analysis,2019,103:158-172.
- [18] 王鹏飞.渗压作用下断层带岩体断裂导渗演化机制研究[D].北京:北京科技大学,2019.
- [19] 武强.基于GIS的地质灾害和水资源研究理论与方法[M].北京:地质出版社,2001.
- [20] 谭文辉,武洋帆,刘景军,等.深部岩体质量分级Q系统的改进[J].中国矿业,2020,29(2):161-165.