

地下矿山突水通道脆弱性的模糊层次评价^{*}

胡建华, 林阳帆, 周科平, 邓红卫, 何川

(中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 在综合分析矿山水害通道的形成和工程影响因素等基础上, 以突水通道脆弱性为评价对象, 综合选取断层倾角、断层地质特征、裂隙规模、裂隙张开量、裂隙填充成分、隔水关键层抗压强度、渗透系数、厚度、水压、水量、开采强度等11个指标, 采用AHP和模糊数学的方法, 构建矿山突水通道脆弱性的5级评价体系。研究结果表明: ①选取的各因素指标能够体现突水通道的特性, 评价方法能够获得地下矿山突水通道脆弱性等级的判定。②以某矿山采场的工程实例评价, 其结果与突水系数法一致, 证实该指标体系合理可行, 能够为矿山的突水灾害进行前期的预警分析。

关键词: 矿山水害; 突水通道; 脆弱性; AHP; 模糊综合评判

中图分类号: X43; P64 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)04-0016-06

近年来矿山水害事故不断增加, 为达到本质化安全, 将灾害减到最小, 对矿山灾害链中致灾环^[1]的导水构造的研究, 已经成为断链减灾的首要问题, 受到越来越多学者的关注。以刘天泉院士为代表的一批学者, 在研究岩层裂隙发展规律中总结出的“三带”划分理论、零位破坏理论、关键层理论等在学术界得到普遍认可及广泛应用, 为导水裂隙发育规律的研究奠定理论基础和实践经验。随着复杂难采矿体开采力度加大, 地下水文地质条件更加复杂^[2], 一方面传统的矿山水害控制技术不能适应新的开采环境, 偏离工程实践, 必须寻求新的探测技术及方法; 另一方面以往的研究着重于灾害源本身, 未能将防治难易程度纳入研究范畴, 矿山开采引起的一系列工程灾害链及环境问题未得到充分重视。

为了使突水通道的探测结果更快捷、可靠、全面, 引入脆弱性评估概念, 脆弱性作为衡量风险性能的重要指标, 表征系统抵御灾害维持自身稳定的能力, 包含的适应力、风险性以及恢复力三个维度。国外对脆弱性的研究起步早、涉及领域广^[3], 如灾害学、生态环境学、工程学等^[4-5]。1987年Aller等提出的地下水脆弱性DRASTIC评估方法被美国环保局采用^[6], 随后被欧美、加拿大等国家和地区推广应用用于评估地下水的易污染性^[7], 并研发出多套成熟的评价方法^[8]。借鉴地下水脆弱性的研究, 通过对矿山突水通道脆弱性

指标的确定, 建立脆弱性评价指标体系, 运用层次分析法得出影响因子权重, 结合模糊数学评判脆弱性等级。

1 突水通道脆弱性指标体系

1.1 突水通道脆弱性的内涵

矿山突水通道的脆弱性是指, 将突水通道作为承载体, 在矿山采掘工作面接近地下水(包括老窿区水体、含水层、岩溶等), 岩层内导水构造的地质物理环境、工程响应特征灾害活化的可能性, 以及其灾变后系统恢复的难易程度。结合了突水通道发育规律和灾变后对地下工程的影响程度、治理技术的难易程度, 即矿山突水通道的脆弱性包括, 突水通道自身结构的灾变性、突水通道发育的可能性及灾变防治难易程度。建立矿山突水通道脆弱性指标体系, 脆弱性等级越高, 表明其越容易发生灾变, 需采取针对性防御措施。

1.2 评价指标的确定

分析国内外学者对突水形成的渗流规律的研究及工程实践经验^[9-10], 总结矿山突水通道脆弱性影响因子, 分为自然因素和人为因素。自然因素即天然状态下系统地质特征, 主要包括地质构造、隔水关键层、补给水源; 人为因素为开采强

* 收稿日期: 2013-01-18 修改日期: 2013-03-18

基金资助: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAC09B02); 湖南省科技重大专项计划(2011FJ1003-3)

通讯作者: 胡建华(1975-), 男, 湖南衡南人, 博士, 副教授, 主要从事高效安全采矿技术与岩土工程的稳定性分析研究。

E-mail: hujh21@csu.edu.cn

度, 即外界破坏能量的大小和扰动范围等。

(1) 地质构造

地质构造是影响突水通道物理特性的重要因素, 而断层作为主要突水通道, 通过总结各种断层突水模型^[11]得出, 断层地质特征(岩体抗拉强度)和断层倾角占主要因素。断层倾角对导水裂隙发育起到关键作用, 在采动矿压的影响下, 倾角越小, 断层面上的剪应力正负交替变化剧烈, 迅速萌生新的导水裂隙, 更容易引发突水危险; 大倾角的断层承受水压力大, 不易发生突水, 但裂隙高度比较高, 岩层破坏范围和深度更大^[12]。其次, 表征原始岩层破坏程度的裂隙特征(裂隙张开量和裂隙规模)以及通道内填充物结胶程度不同, 将导致其承载性及导水性各有差异。

(2) 隔水关键层

隔水关键层对突水通道脆弱性由三个影响因子组成, 即抗压强度、渗透系数、厚度。早在 20 世纪中叶, 匈牙利韦格沸伦斯就指出底板突水与有效隔水层厚度和水压力有关。缪协兴^[13]提出复合隔水关键层理论, 将地下水与顶(底)板之间的岩层统称为隔水关键层, 包括坚硬层结构隔水、软弱岩层隔水和裂隙通道弥合隔水, 并证明软岩的存在一定程度上抑制了导水裂隙的发育。实践证明隔水关键层越厚, 突水频率少, 突水量少, 防突水效果越明显。

(3) 补给水源

补给水源的水量和水压直接关系到水力梯度、渗流场分布, 地下水对导水裂隙的软化腐蚀作用, 加剧了导水裂隙的破坏速度和破坏范围。黄存捍^[14]利用断裂力学模型的 D-M 模型, 得出水压与裂隙顶端张开位移成正比, 水压越大, 裂隙张开位移越大。

(4) 开采强度

采矿工程响应对地下突水灾害、通道形成的具有诱导作用。杨建立^[15]在结合现场试验, 研究综采放顶条件下的导水裂隙发育规律, 同采厚的最大导水裂隙高度比分层综采增大 1.37 倍; 黄阳^[16]在总结不同的开采工艺对导水裂隙高度发育的规律中, 证实采矿方法产生不同的采裂比、采冒比。一般认为, 随着采掘工作面推进, 采场参数及采矿工艺直接影响导水裂隙的发育。

2 AHP 和模糊数学综合评判

2.1 AHP 确定评价指标权重

AHP 通过构造成对矩阵、计算权重向量并一致检验和权重排序, 将半定性、半定量的问题转

化为定量计算, 综合评判突水通道评价指标的权重。选取评价指标时, 应以尽量少的指标反映最主要、最全面的信息为原则, 利用层次分析法的原理^[17], 构建地下突水通道脆弱性指标体系: 一是地质构造(P_1), 可以从断层构造(P_{11})、裂隙特征(P_{12})、填充成分(P_{13}), 其中断层构造包括: 断层地质特征(X_1)、断层倾角(X_2), 裂隙主要由裂隙张开量(X_3)和裂隙规模(X_4)组成; 二是隔水关键层(P_2), 主要以隔水岩层抗压强度(X_6)、渗透系数(X_7)、厚度(X_8); 三是补给水源(P_3), 由水压(X_9)和水量(X_{10})测定得到; 四是开采强度(P_4), 主要由生产能力、工程影响严重程度、防治难易程度三个指标组成。

表 1 因素比较标度表

因素比较	量化值	因素比较	量化值
同等重要	1	强烈重要	7
稍微重要	3	极端重要	9
较强重要	5	两相邻判读中间值	2, 4, 6, 8

(1) 分析各因素之间的关系, 对同一层次各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较, 参照表 1 构造比较的判断矩阵 E 。

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ e_{m1} & \cdots & e_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e_1}{e_1} & \cdots & \frac{e_1}{e_n} \\ \frac{e_1}{e_1} & \cdots & \frac{e_1}{e_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{e_m}{e_1} & \cdots & \frac{e_m}{e_n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

如将 P_1 , P_2 , P_3 , P_4 根据式(1)两两比较得到评判矩阵 E :

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 5 & 6 \\ 1/5 & 1 & 3 & 4 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/6 & 1/4 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

解特征根问题: $EW = \lambda \max W$, 非零特征值对应的特征向量归一化后, 即得到因素的权重向量, 归一化后作为权值。

(2) 由判断矩阵计算被比较元素对于该准则的相对权重, 并进行一致性检验。

$$C_R = C_I / R_I, \quad (3)$$

$$C_I = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (4)$$

式中: 当矩阵阶数为 1 或 2 时, $R_I = 0$, 阶数为 3 时, $R_I = 0.58$, 阶数为 4 时, $R_I = 0.90$; 当 $C_R < 0.1$ 时, 认为矩阵的一致是可以接受的, 否则, 需要重新调整判断矩阵, 直到满足一致性检验为止。

(3) 运用 MATLAB 程序运行以上的计算, 得出权重为 [0.6121, 0.2147, 0.1139, 0.0593], 同理计算各影响因子的权重并排序, 得到的结果为 q_i , 见表 2。

表2

影响因子权重计算表

X	P				权重 q_i	权重 排序		
	P_1 (0.612 1)			P_2 (0.214 7)				
	P_{11} (0.640 6)	P_{12} (0.292 6)	P_{13} (0.066 8)					
X_1	0.250 0				0.130 7	2		
X_2	0.750 0				0.261 4	1		
X_3		0.666 7			0.119 4	4		
X_4		0.333 3			0.059 7	7		
X_5			1		0.040 9	9		
X_6				0.319 6	0.068 6	6		
X_7				0.122 0	0.026 2	11		
X_8				0.558 4	0.119 9	3		
X_9				0.666 7	0.075 9	5		
X_{10}				0.333 3	0.037 9	10		
X_{11}					1	0.059 3	8	

2.2 评价指标的量化

突水通道脆弱性的影响因子既相互联系又相互制约,有的可定量分析,有的却只能定性描述,其中包括断层结构特征、填充物成分和开采强度。

实践证明正断层相对其他断层更容易诱发矿山突水,断层地质特征对突水通道脆弱性的影响分级见表3。

表3 断层地质特征影响度分级

影响度	断层地质特征
9	大量正断层
7	正断层显著
5	少量正断层
3	逆断层或平断层
1	微小逆断层或无断层构造

突水通道中填充成分的矿化度、粒径、孔隙度、渗透系数不同,渗(隔)水性能也不同,实验数据得出,其结胶程度对突水通道脆弱性的影响等级见表4。

表4 填充物结胶程度影响度分级

影响度	粒径/mm	渗透系数/(m/d)	岩层
9	>1	>50	极粗砂、砾石夹砂、漂砾砂、圆砾大漂砂
7	0.5~1.0	25~50	粗砂
5	0.25~0.5	10~25	中砂
3	0.1~0.25	5~10	细砂
1	<0.1	<5	亚粘土、重亚粘土、黄土、粉土、粉砂

依据《矿井水文地质规程》中的相关规定对矿山开采强度标定,结果见表5。

表5

开采强度影响度分级

影响度	生产能力	开采强度	
			影响程度
9	产量极大,采场参数极大,导水裂隙发育快。	水文地质极复杂,影响范围大,防治水工程量大、难度高,治水技术效果极差,经济损失大。	
7	产量大,采场参数大,导水裂隙发育较快。	水文地质复杂,影响周围数十个采场,防治水工程量较大,难度较高,防治水的经济技术效果一般。	
5	产量中等,采场参数中等,导水裂隙发育超出控制范围。	水文地质中等,影响局部几个采场,防治技术、设施达标。	
3	产量较小,采场参数中等,导水裂隙发育在控制范围。	水文地质一般,影响范围可控制,防治水工作简单。	
1	产量小,采场参数小,开采安全。	水文地质简单,影响范围小,只需采取简单的防护措施。	

表 6

矿山突水通道脆弱性各指标分级标准

等级因子	I	II	III	IV	V
断层地质特征	1	3	5	7	9
倾角/(°)	<5	5~10	10~30	30~70	>70
裂隙张开量/m	<0.01	0.01~0.5	0.5~2	2~8	>8
裂隙规模/(条/m ²)	<0.05	0.05~1	1~3	3~5	>5
填充成分	1	3	5	7	9
抗压强度/MPa	>250	100~250	50~100	25~50	<25
渗透系数/(m/d)	<0.02	0.02~0.1	0.1~0.35	0.35~0.6	>0.6
隔水层关键厚度/(m/Mpa)	>15	15~10	10~5	5~1	<1
水压/MPa	<0.5	0.5~1	1~2	2~4	>4
单位水量/(L/(s·m))	<0.05	0.05~0.1	0.1~2	2~10	>10
开采强度	1	3	5	7	9

综上, 根据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》、《采矿设计手册》以及《矿井水文地质规程》中的相关规定, 可以对脆弱性指标体系中各影响因子进行定量标定得表 6。

2.3 模糊数学脆弱性等级评判

应用模糊数学最大隶属度原则来评估突水通道脆弱性, 将模糊不定的问题具体化、清晰化, 构造了综合评判模糊数学模型。在模糊数学评价模型中, 其计算步骤如下:

(1) 根据指标体系及指标定额, 对指标按 5 个级别的指标标准特征值进行识别, 得标准特征值矩阵 A , 则突水通道脆弱性评价的特征矩阵为 $A = (A_{ij})$, 式中: A_{ij} 为指标 i 的第 j 级别的特征值。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ 2 & 8 & 22 & 55 & 80 \\ 0.05 & 0.3 & 1.5 & 6 & 10 \\ 0.02 & 0.9 & 2.5 & 4.3 & 6.5 \\ 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \\ 240 & 160 & 70 & 35 & 13 \\ 0.001 & 0.07 & 0.25 & 0.5 & 0.8 \\ 2.0 & 1.2 & 0.7 & 0.25 & 0.05 \\ 0.3 & 0.8 & 1.7 & 3.3 & 6 \\ 0.04 & 0.9 & 1.3 & 6.5 & 13 \\ 1 & 3 & 5 & 7 & 9 \end{bmatrix}。 \quad (5)$$

(2) 计算集合隶属度函数 $U_{m \times n}$, 确定各指标的隶属矩阵 R , $R = (U_{m \times n})$, 运用降半梯形分布图^[18]确定函数即:

$$U_{1n} = \begin{cases} 1, & x \leq a_{1i}; \\ \frac{a_{2i} - x}{a_{2i} - a_{1i}}, & a_{1i} \leq x \leq a_{2i}; \\ 0, & x \geq a_{2i}. \end{cases} \quad (6)$$

$$U_{2n} = \begin{cases} 0, & x \leq a_{1i}, x \geq a_{3i}; \\ \frac{x - a_{1i}}{a_{2i} - a_{1i}}, & a_{1i} \leq x \leq a_{2i}; \\ \frac{a_{3i} - x}{a_{3i} - a_{2i}}, & a_{2i} \leq x \leq a_{3i}. \end{cases} \quad (7)$$

$$U_{5n} = \begin{cases} 0, & x \leq a_{4i}; \\ \frac{a_{4i} - x}{a_{5i} - a_{4i}}, & a_{4i} \leq x \leq a_{5i}; \\ 1, & x \geq a_{5i}. \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_{3n} , U_{4n} 与 U_{2n} 相类似, x 为实测数据。

(3) 进行模糊评判, 利用 AHP 得到的权重, 结合隶属矩阵对模糊子集 $B = QR$ 进行评判。应用乘积取大(•, V)法则, 进行归一化处理后, 根据模糊数学最大隶属度原则, 取其最大者为突水通道脆弱性的评定等级。

3 实证分析

某矿断层突水明显^[18], 由九里山断层、东部冯营断层控制的单斜构造, 倾角 $9^\circ \sim 70^\circ$, 倾向 SE, 井田内褶皱构造发育, 以断裂构造为主, 岩溶裂隙发育、含水性强、受水域广, 灰岩系 L8 岩溶承压水含水层, 平均厚度 6.5 m, 是矿井主要的含水层, 隔水层为页岩、粉砂岩。研究区域内探测到数据如表 7, 以 25031 回采工作面为例, 应用矿山突水通道脆弱性指标体系, 对其脆弱性等级进行模糊评判, 验证评判指标的准确性。

由隶属度函数计算 25031 回采面的隶属度矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.6 \\ 0 & 0.333 & 0.667 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.864 & 0.136 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.069 & 0.931 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.14 & 0.86 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.731 & 0.269 & 0 \\ 0 & 0 & 0.712 & 0.288 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}。 \quad (9)$$

表7 巷道工作面实测数据表

名称	25031 回采	1413 回采	22回 风巷	24轨道 运输
断层结构特征	9	9	7	5
倾角/(°)	70	70	56	37
裂隙张开量/m	1.1	0.62	0.45	0.01
裂隙规模/ (条/m ²)	4.6	3.5	2.7	2.3
填充成分	5	3	3	1
抗压强度/MPa	37.4	35.6	28.4	32.7
渗透系数/(m/d)	0.052	0.483	0.221	0.068
厚度/(m/MPa)	0.77	1.12	1.41	1.36
水压/MPa	2.13	0.27	1.25	0.83
水量/(L/(s·m))	2.76	0.98	1.45	0.67
开采强度	7	7	5	3
脆弱性级别	V	V	IV	III

由 AHP 得到的权重矩阵 Q :

$$\begin{aligned} Q = & [0.1307, 0.2614, 0.1194, 0.0594, 0.0409, 0.0686, \\ & 0.0262, 0.1199, 0.0759, 0.0379, 0.0593], \end{aligned} \quad (10)$$

$$B = QR = [0, 0.0620, 0.1029, 0.1046, 0.1568]。 \quad (11)$$

进行归一化处理最终得:

$$B = [0, 0.1454, 0.2414, 0.2454, 0.3678]。 \quad (12)$$

故 25031 回采工作面突水通道的脆弱性评定为 V 级, 与其用突水系数法计算出来值为 1.6 MPa/m, 其远远超出临界突水系数 0.6 MPa/m, 是突水极严重的工作面^[19], 结合其灾变的工程响应及实际的防治水平, 探测结果更切合实际。

同理, 计算其他工作面突水通道的脆弱性评估可得, 1413 回采工作面, 模糊评判集 [0.1754, 0.2327, 0.0737, 0.1558, 0.3624], 22 回风巷道模糊评判集 [0, 0.4950, 0.1390, 0.0933, 0.3946, 0.3236], 24 运输巷道模糊评判集 [0.2503, 0.2010, 0.2987, 0.2499, 0]。

4 结论

(1) 借鉴地下水脆弱性指标体系, 将矿山突水通道作为承灾体引入脆弱性概念, 综合选取断层倾角、断层地质特征、裂隙规模、裂隙张开量、裂隙填充成分、隔水关键层抗压强度、渗透系数、厚度、水压、水量、开采强度 11 个指标, 构建矿山突水通道脆弱性评价指标体系, 不仅体现突水通道的自身结构的稳定性和发育规律的可能性,

还结合了工程响应的严重程度及实际防治水平。

(2) 运用 AHP 构建指标体系的权重, 得出影响因子权重高低排列, 主要因子有断层结构特征、裂隙张开量、隔水岩层厚度、地下水压、裂隙规模、开采强度等。将矿山突水通道脆弱性影响因子划分为 5 个级别, 根据模糊数学最大隶属度原则, 判定矿山突水通道脆弱性等级。

(3) 以某矿山采场的工程实例评价, 结果与传统的突水系数法一致, 证实该指标体系合理可行, 能够为矿山的突水灾害进行前期的预警分析。

参考文献:

- [1] 张瑞, 邓红卫, 黄永红, 等. 矿山水害链构建及孕源断链减灾途径研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(3): 218-221.
- [2] 刘金涛, 冯文凯, 胥良, 等. 矿山地质环境质量评价数学模型研究概述[J]. 灾害学, 2011, 26(4): 110-115.
- [3] Janssena M A, Schoon M L, Ke W, et al. Scholarly networks on resilience, vulnerability and adaptation within the human dimensions of global environmental change[J]. Global Environmental Change, 2006, 16(3): 240-252.
- [4] Rupert M G. Biophysical of the DRASTIC ground water vulnerability mapping method[J]. Ground Water, 2001, 39(4): 625-630.
- [5] Todd G Frith, Cleavy L McKnight, Joe C Yelderman. An aquifer vulnerability assessment of the Paluxy aquifer, central Texas, USA, using GIS and modified DRASTIC approach[J]. Environmental Management, 2000, 25(3): 337-345.
- [6] 董姝娜, 姜鳌鹏, 张继权, 等. 基于“3S”技术的村镇住宅洪灾脆弱性曲线研究[J]. 灾害学, 2012, 27(2): 34-38.
- [7] IbeK M, Nwankwor G I, Onyekuru S O. Assessment of groundwater vulnerability and its application to the development of protection strategy for the water supply aquifer in Owerri Southeastern Nigeria [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2001, 67(3): 323-360.
- [8] 郭晓静, 周金龙, 靳孟贵, 等. 地下水脆弱性研究综述[J]. 地下水, 2010, 32(3): 1-5.
- [9] TANG C A, THAM L G, LEE P K K, et al. Coupling analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4): 477-489.
- [10] 武强, 张志成, 马积福. 煤层底板突水评价的新型实用方法 I[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 42-47.
- [11] 李常文, 柳峰, 郭好新, 等. 基于采动和承压水作用下断层突水关键路径的力学分析[J]. 煤炭工程, 2011(5): 70-73.
- [12] 卜万奎, 茅献标. 断层倾角对断层活化及底板突水的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 386-394.
- [13] 缪协兴, 陈荣华, 白海波. 保水开采隔水关键层的基本概念及力学分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(6): 561-564.

- [14] 黄存捍. 采动断层突水机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010: 3–6.
- [15] 杨建立, 左建平, 孙凯, 等. 大采高多断层工作面综放诱发地表沉陷观测及数值分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1216–1224.
- [16] 黄阳, 刘宁, 王智华. 彬长矿区导水裂隙带高度的确定方法 [J]. 陕西煤炭, 2010, 29(6): 40–43.
- [17] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 153–156.
- [18] 徐向阳, 高学平. 模糊数学在海水入侵地下水水质评价中的应用 [J]. 水力学报, 2003(8): 64–69.
- [19] 李新新, 郑继东, 李智勇, 等. 冯营矿井突水机理分析 [J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 28(4): 414–417.

Assessment on Vulnerability of the Water-conducting Based on Fuzzy Analytical Hierarchy Process in Underground Mine Water-disaster

Hu Jianhua, Lin Yangfan, Zhou Keping, Deng Hongwei and He Chuan

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: On the basis of comprehensive analysis on the developing law and engineering factors that influence water-conducting, water-conducting vulnerability assessment index system of five levels is established based on the principles of AHP (Analytical Hierarchy Process) and fuzzy mathematics, which considering fault structural features, fault dip, the scale and the opening volume of fissure, ingredient of fillings in fissure opening, compressive strength, permeability and thickness of impermeable critical layer, the pressure and total amount of water and mining intensity. It is shown that: ① The factor index selected to reflect the characteristics of the water-conducting evaluation method is available to obtain the level of vulnerability of water-conducting determination in underground mining. ② The result received from this assessment system based on engineering cases is as same as the water inrush coefficient method, proving that the assessment system is reasonable and practicable. The assessment system is able to provide a method for early warning analysis of mine water disasters.

Key words: mine water-disaster; water-conducting; vulnerability; AHP; fuzzy synthetic judge

(上接第 15 页)

- [3] 陈仕鸿, 隋广军, 阳爱民. 广东台风灾情预测系统研究 [J]. 自然灾害学报, 2010, 25(2): 64–67.
- [4] 中国气象局. 热带气旋年鉴 [M]. 北京: 气象出版社, 2000–2009.
- [5] 沈花玉, 王兆霞, 高成耀, 等. BP 神经网络隐含层单元数的确定 [J]. 天津理工大学学报, 2008, 24(5): 13–15.

Typhoon Disaster Loss Forecasting Model Based on Particle Swarm Optimization and BP Neural Network

Ye Xiaoling, Shi Pei and Kuang Liang

(Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the research of typhoon disaster condition of Zhejiang province, the average error of typhoon track forecasting and pre-warning index, etc are used as inputs of model. Applying the particle swarm optimization algorithm to BP neural network is to avoid local minimum problem of BP and initial parameter problem and to improve precision of BP neural network and the convergence speed. The PSO-BP is established to forecast the typhoon disaster. The training results between PSO-BP and common BP are compared. Predicting outcomes of three typhoons showed PSO-BP had higher forecasting accuracy, and displayed the basic trend of typhoon of disaster better.

Key words: typhoon preventing and reducing disaster; typhoon condition; particle swarm optimization algorithm; BP neural network; Zhejiang