

文章编号:0253-9993(2013)01-0021-06

# 煤层底板突水评价的新型实用方法 V: 基于 GIS 的 ANN 型、证据权型、Logistic 回归型脆弱性指数法的比较

武 强<sup>1</sup>,张 波<sup>1</sup>,赵文德<sup>2</sup>,刘守强<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 水害防治与水资源研究所,北京 100083;2. 环保部环境发展中心 环境影响评价研究中心,北京 100029)

**摘 要:**为解决煤层底板突水预测预报评价难题,在煤层底板突水主控指标体系和脆弱性指数法提出的基础上,以峰峰九龙矿煤层底板突水为研究对象,分别应用新提出的基于 GIS 的 ANN 型、证据权型、Logistic 回归型脆弱性指数法对该矿煤层底板突水进行了预测评价,并分别生成煤层底板突水脆弱性分区图,并对 3 种预测评价结果进行了详细对比和拟合分析,总结提出了 3 种预测评价方法的适用条件和他们各自的特点及优劣。

**关键词:**煤层底板突水;脆弱性指数法;ANN;证据权;加权逻辑回归

**中图分类号:**TD745 **文献标志码:**A

## A new practical methodology of coal seam floor water burst evaluation: the comparison study among ANN, the weight of evidence and the logistic regression vulnerable index method based on GIS

WU Qiang<sup>1</sup>,ZHANG Bo<sup>1</sup>,ZHAO Wen-de<sup>2</sup>,LIU Shou-qiang<sup>1</sup>

(1. Institute of Water Hazard Prevention and Water Resources, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. Environmental Impact Assessment Research Center, Environmental Development Center of Ministry of Environment Protection, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to solve the difficult evaluation problems of coal seam floor water burst, based on the vulnerable index method and main controlling index system for floor water burst, the coal seam floor water burst in the whole area of Jiulong Coal Mine in Fengfeng was studied. Through applying ANN, weight of evidence and logistic regression, as well as the new styles of the vulnerable index method, the coal seam floor of the mine was evaluated and pictures were produced as the vulnerable zone of the coal seam floor water burst. Finally, three evaluated results were compared and analyzed, and the applicable conditions, the advantages and weaknesses of each method were also presented.

**Key words:** floor water bursting; vulnerable index method; ANN; weight of evidence; logistic regression

我国煤炭资源的开发受水害威胁严重,底板突水问题在我国煤矿中非常突出和普遍,涉及到我国的大部分煤田,煤矿突水事故频繁发生,严重威胁着煤炭的安全开采,并已造成了巨大的经济损失和不良后果<sup>[1-5]</sup>。针对这些难题,笔者在以往发表的序列文章中,详细介绍了煤层底板突水预测评价的脆弱性指数法的基本理论和工作方法以及工程应用效果等<sup>[6-12]</sup>。本文应用不同的数学理论与方法,进一步补充完善了脆弱性指数法的基本数学模型,分析了不同数学模型

的评价预测特点,对比研究了基于不同数学模型的脆弱性指数法的底板突水评价预测效果和精度,为煤层底板突水脆弱性预测评价奠定了坚实的理论基础,提供了可行的技术方法支撑。

### 1 研究区概况

#### 1.1 自然地理

九龙矿位于河北省邯郸市西南部,地理坐标:东经 114. 23° ~ 114. 29° 和北纬 36. 39° ~ 36. 47°,井田南

收稿日期:2012-02-24 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174289,41102180);教育部创新团队联合资助项目(IRT1085)

作者简介:武 强(1959—),男,内蒙古呼和浩特人,教授,博士生导师。E-mail: wuq@cumb. edu. cn

北走向长约为 8 km,东西倾斜宽约为 2.5 km,面积约为 20 km<sup>2</sup>。井田内地势西低东高,南低北高,虽发育有较多的冲沟,但一般切割不深。在井田中部有滏阳河穿过,井田内总体地形为四周高而中间低的盆地地形。本区历年最高气温为 42.5 ℃,最低气温为-21 ℃,年降水量在 300 ~ 600 mm。

### 1.2 地质条件

九龙矿井田北以 F<sub>9</sub> 断层为界,南以 F<sub>26</sub> 断层为界,西以 F<sub>8</sub> 断层为界,东以 2 号煤层-900 m 等高线为人为边界。该矿总体构造形态为一单斜构造,次级褶曲及北东、北北东向断裂比较发育,构造复杂程度中等(图 1)。区内主要含煤地层为太原组和山西组,2,4,7,9 煤为全区稳定可采煤层。笔者研究的 9 号煤层开采所涉及的充水含水层主要为奥陶系灰岩含水层。奥灰顶面距 9 煤底板平均为 16.15 ~ 23.18 m,是威胁 9 煤安全开采的主要充水含水层(图 2)。

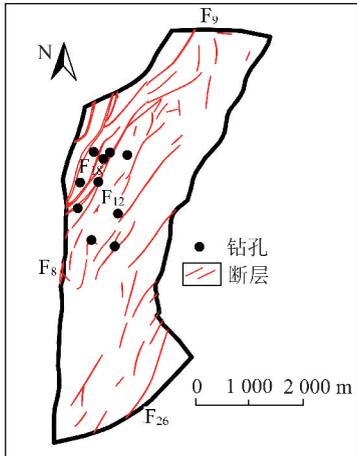


图 1 矿区构造

Fig. 1 Structure chart of Jiulong mine area

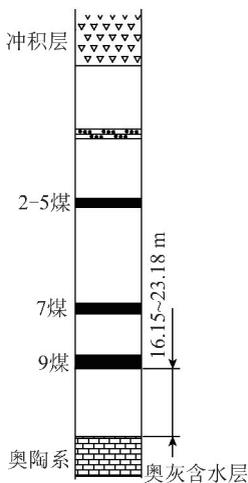


图 2 煤层与含水层结构关系简图

Fig. 2 The structural diagram of the coal seams and aquifers

### 1.3 水文地质条件

九龙矿井北起 F<sub>9</sub> 断层,南至 F<sub>26</sub> 断层,西自 F<sub>8</sub> 断层,东为深部边界,整个井田形成四周下降中间隆起的地垒构造,使矿井内各主要含水层与外围含水层基本失去水力联系,大大减少了地下水的补给来源,形成了地下水以静储量为主要的水文地质特征,为一封闭较好的水文地质块段。

## 2 基于 GIS 的 ANN 型、证据权型、Logistic 回归型脆弱性指数法概述

地理信息系统(GIS)强大的空间信息处理和分析功能可以处理影响因素多、条件不精确、信息量巨大的空间信息。利用 GIS 的空间复合叠加功能对输出进行处理,以可视化地图的形式给出煤层底板突水脆弱性的空间分布结果<sup>[6-7,10-12]</sup>。

脆弱性指数法是可以考虑煤层底板突水众多主控因素相互复杂作用关系和相对“权重”比例并具有多级分区特点的一种评价方法。该方法以多源信息集成理论为指导,以 GIS 为操作平台,在煤层底板突水主控因素分析确定基础上,经过数据采集、分析和处理,建立各主控因素的子专题层图;应用多源地学数据复合叠加原理,采用现代线性或非线性数学方法(ANN、证据权重法、Logistic 回归、AHP 等),通过模型的反演识别或学习训练,确定出煤层底板突水的各主控因素对复杂突水过程的“贡献”或“权重”,建立煤层底板突水预测预报评价模型<sup>[6,8-11]</sup>;然后根据研究区各单元计算的突水脆弱性指数频率直方图分析,合理确定突水脆弱性分区阈值,最终对煤层底板突水脆弱性作出科学的区划和预测预报评价。

脆弱性指数法突破了煤层底板突水评价传统的突水系数法仅能考虑两个控制因素且无影响“权重”概念等重大缺陷的束缚,采用 GIS 与 ANN 或证据权重法或 Logistic 回归等现代非线性数学的耦合方法,能够真实地刻画煤层底板突水这种受控于多因素且具有非常复杂形成机理的非线性动力过程<sup>[4-6,8-11]</sup>。

## 3 脆弱性指数法评价模型的建立和应用实例

### 3.1 底板突水主控因素的确定

根据九龙矿矿井水文地质条件和充水特征,并结合矿井已有钻探、物探和化探等地质和水文地质资料,特别在地质构造资料齐全完整的情况下,综合分析确定了以下 6 个方面为影响煤层底板突水的主要控制因素:① 奥灰含水层的富水性;② 奥灰含水层的水压;③ 断层线密度;④ 断层端点和交点密度;⑤ 断层规模密度;⑥ 有效隔水层的等效厚度。

### 3.2 主控因素的数据采集、量化及子专题图的建立

(1) 奥灰富水性专题图。一般在富水区,岩溶裂隙发育,冲洗液消耗量较大,放(供)水孔单位涌水量

较大,根据这一特点,在对富水性进行量化时,以单位涌水量为量化指标,生成奥灰富水性专题图(图3(a))。

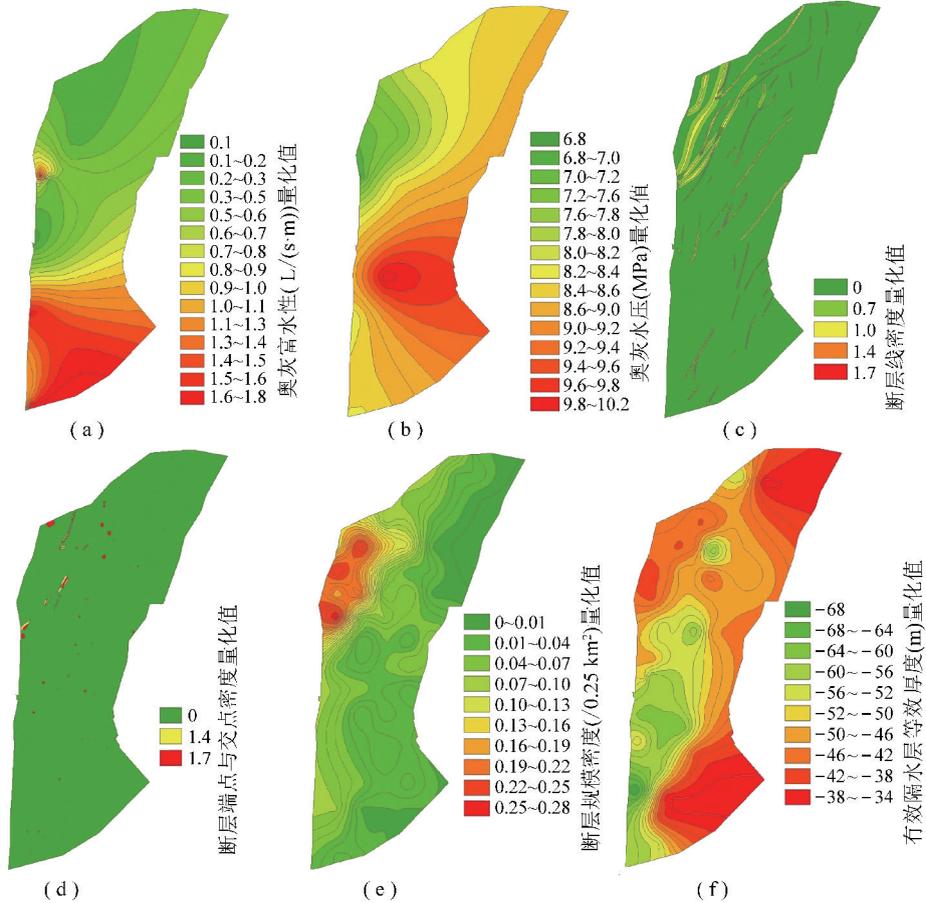


图3 底板突水的各主控因素专题图

Fig. 3 The thematic maps of each main factor influencing the floor water bursting

(2) 奥灰水压专题图。煤层底板突水的实质是水头压力超过了隔水层的隔水强度而产生的破坏性结果。由于水压随时间呈动态变化,在建立水压等值线图时,采用近几年水文孔水位的最大观测值作为水压专题图的生成依据(图3(b))。

(3) 断层线密度专题图。断层、裂隙结构面是承压水从煤层底板突出的薄弱面,这些构造带破坏了岩体本身的完整性,易成为导水通道。笔者在作断层线密度专题图时,不仅考虑断层破碎带,也考虑了断层影响带,也可称之为断层的缓冲区(图3(c))。

(4) 断层交点和端点密度专题图。断层在空间和平面上的展布交叉形成了具有一定发育规律的尖灭点和交叉点,是地应力较为集中的地带。在断层相交与断层的端点处,岩体裂隙发育,导水的可能性增强。在建立断层交点和端点的分布专题图时,考虑了断层影响带的影响(图3(d))。

(5) 断层规模密度专题图。断层规模指数综合

反映断层的规模和发育程度,是影响煤层底板突水脆弱性的又一指标。断层规模指数越大表明断层的规模越大,发育程度越好,发生突水的可能性也就越大(图3(e))。

(6) 有效隔水层的等效厚度专题图。隔水层的厚度对煤层底板突水起到抑制作用,而隔水层的隔水能力与隔水层的厚度、强度和岩性组合有关。根据煤层底板突水的“下三带”,真正起到阻水作用的是有效隔水层,所以首先应确定有效隔水层厚度。在考虑不同岩性的隔水强度时,将有效隔水层中不同岩性岩层厚度折算成相应的等效厚度,再累加生成有效隔水层等效厚度,生成煤层底板隔水层等效厚度专题图(图3(f))。

### 3.3 基于GIS的ANN型脆弱性指数法评价模型

#### 3.3.1 人工神经网络模型的设计

根据煤层底板突水脆弱性与其主控因素之间复杂的非线性关系,应用3层BP网络进行预

测<sup>[6-7,9-10,13]</sup>。利用前面生成的奥灰富水性、奥灰水压、断层线密度、断层交点及端点密度、断层规模密度、有效隔水层的等效厚度等 6 个主控因素作为 ANN 模型的输入层,设计 13 个隐含层,最终得出 1 个脆弱性指数  $V_1$  作为输出层。期间设计 25 个样本点对模型进行训练,用已知的 8 个突水点对模型加以验证,从而得出适合本研究区的 ANN 网络模型。

### 3.3.2 底板突水脆弱性分区的确定

应用 Arc Info 的叠加功能,首先将 6 个主控因素的专题图层进行复合叠加,从复合后的信息存储层属性表中读取所需的数据输入到训练好的 ANN 模型中

运算,可分别计算出研究区复合叠加后形成的 10 493 个大小和形状规则不等的单元的脆弱性指数  $V_1$ ,脆弱性指数越大,煤层底板突水的可能性也就越大。笔者把网络模型计算出的脆弱性指数进行统计分析,确定分区阈值,再根据分区阈值将所研究的井田区域按照脆弱性大小划分为 5 个等级:① 安全区,  $V_1 \leq 0.1$ ; ② 较安全区,  $0.1 < V_1 \leq 0.25$ ; ③ 过渡区,  $0.25 < V_1 \leq 0.5$ ; ④ 较脆弱区,  $0.5 < V_1 \leq 0.75$ ; ⑤ 脆弱区:  $0.75 < V_1 \leq 1$ 。根据分区阈值,应用 Arc Info 生成研究区煤层底板突水脆弱性指数法的评价分区图(图 4(a))。

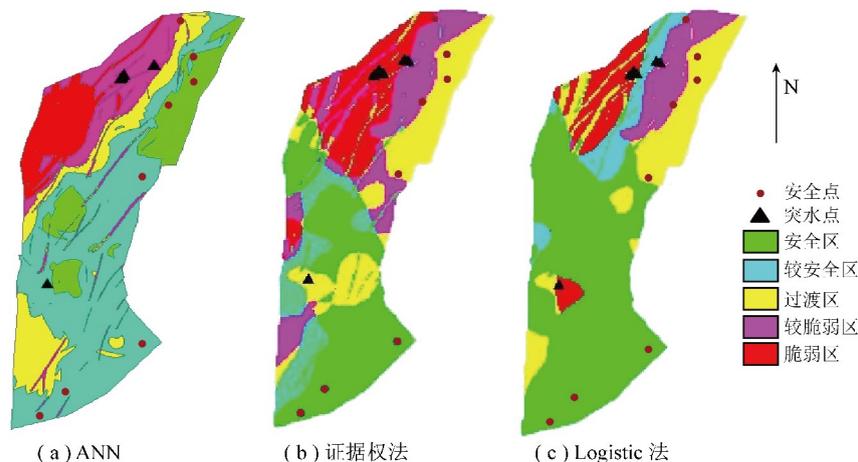


图 4 评价模型拟合比较

Fig. 4 Compare of evaluation models fitting

## 3.4 基于 GIS 的证据权型脆弱性指数法评价模型

### 3.4.1 证据权模型的建立

证据权法模型在应用于煤层底板突水评价过程中,首先将研究区内已知突水点根据证据权方法按照一定面积将研究区进行网格划分,生成具有面积属性的训练图层或底板突水网格图层,然后分析煤层底板突水的主控因素,将前面生成的 6 个主控因素作为证据层,并对这些证据层进行预处理,将其转化为分类数据,形成证据专题图层,将各证据因子的专题图层分别与训练图层进行叠加,计算每个证据图层的先验概率及权重,并对证据图层关于煤层底板突水条件的独立性进行检验,根据前验概率及权重,筛选出最合理的证据因子专题图层,进行后验概率计算,最后根据后验概率计算的结果确定煤层底板危险突水区<sup>[8-9,14]</sup>。

### 3.4.2 底板突水脆弱性分区的确定

根据不同区域的后验概率值生成煤层底板突水后验概率评价分区图,然后将后验概率按照 1 倍的标准差进行重新分类,得到煤层底板突水脆弱性分区图。大于 3 倍标准差的后验概率值大于 0.83,8 个突

水点中的 6 个落在此区域内,可被认为是突水发生的高危险区,即脆弱区;在 2~3 倍标准差之间的后验概率是 0.591~0.830,该区域可被认为是较脆弱区;在 1~2 倍标准差之间的后验概率是 0.352~0.591,该区域可看作是过渡区;在 0~1 倍标准差之间的后验概率是 0.112~0.352,该区域是较安全区;后验概率小于 0.112 的区域可看作是安全区(图 4(b))。

### 3.5 基于 GIS 的 Logistic 回归型脆弱性指数法评价模型

为了应用加权逻辑回归方法预测煤层底板突水,仍然以影响煤层底板突水的 6 个因素作为影响变量,以 ArcView GIS 作为平台,应用 ARCSDM 系统的加权逻辑回归模块进行计算<sup>[8-9,15]</sup>。

根据以上计算的结果,得出各个证据层各个分类值的统计量和后验概率值,以及显著性水平和相应的  $T$  检验值。最后根据不同区域的后验概率值生成煤层底板突水后验概率评价分区图,然后根据其频率累计直方图和标准差将后验概率图分区,得到煤层底板突水脆弱性分区图(图 4(c))。后验概率值大于 0.273 的区域,8 个突水点中的 7 个落在此区域内,可

被认为是突水发生的高危险地区,即脆弱区;后验概率值在 0.233~0.273 的区域,该区域出现一个突水点,可被认为是较脆弱区;后验概率值在 0.015~0.233 的区域,可被看作是过渡区;后验概率值在 0.005~0.015,该区域是较安全区;后验概率值小于 0.005 的区域可看作是安全区(图 4(c))。

#### 4 脆弱性指数法比较分析

通过对 3 种脆弱性指数法进行分析比较(图 4),可以得出:

(1)脆弱区基本都分布在井田的西北部,在图中都以红色显示;较脆弱区分布也基本一致,都在井田的北部偏中地区,在图中以紫色显示;但是从过渡区到安全区的分区范围,3 种评价模型得出的结果有一定的差异。

(2)ANN 模型对于断层对底板突水影响的描述较其他两种方法准确,断层线、端点及交点的位置和断层规模较大的区域都判定为脆弱区,显示了断层对底板突水影响较大;而证据权模型对发育规模较大的断层和缓冲区划定为较危险区;Logistic 回归模型对于断层的刻画不太准确,它将断层线及缓冲区划定为较安全区,明显与实际情况不符。因此,从对于断层对底板突水的影响方面分析,ANN 模型评价结果最为理想,证据权模型次之,而 Logistic 回归模型与实际不符,对断层的影响判断不够准确。

(3)从图 4 可以看出,ANN 模型对于突水危险点与安全点的拟合要比证据权法和 Logistic 回归方法准确。在 ANN 模型中,16 个拟合点中有 15 个落在了目标区域,拟合率达到了 93.75%;而证据权模型中,16 个拟合点中有 13 个落在了目标区域,拟合率为 81.25%;Logistic 回归模型中 16 个拟合点中有 14 个落在了目标区域,拟合率为 87.5%。因此,从突水点对于突水的验证角度来看,ANN 模型要优于证据权模型和 Logistic 回归模型。

(4)从总体评价结果来看,ANN 模型对于各个主控因素的综合考虑要优于证据权模型和 Logistic 回归模型。ANN 模型通过多级映射,将各个主控因素中的点、线、面对于研究区域的影响全部分析处理,最终得出各因素的影响权重;而证据权模型和 Logistic 回归模型在考虑各因素的影响权重时,更多地考虑了面积元素,对断层线密度和断层交点及端点密度等点线状要素对目标值的影响考虑较少。因此,ANN 模型对于煤层底板突水的评价预测更为全面客观,而证据权模型和 Logistic 回归模型更适合应用在构造不是特别发育、各主控因素都是面积元素控制并且有较多的

验证突水点的地区。

#### 5 结 论

(1)本次研究从分析九龙矿的突水规律入手,对导致九龙矿煤层底板突水的主要控制因素进行综合分析,确定了奥陶系灰岩含水层水压、奥陶系灰岩含水层富水性、底板有效隔水层等效厚度、断层线分布、断层交点和端点分布、断层规模指数 6 个因素是影响九龙矿煤层底板突水的主要因素。这些因素相互作用,共同影响煤层底板突水的发展过程。

(2)应用了 ANN 神经网络模型、证据权模型和 Logistic 回归模型分别对九龙矿底板突水进行了预测评价,并最终得出预测分区评价图。通过用已知突水点和安全点的拟合分析,拟合结果分别为 93.75%、81.25% 和 87.5%,拟合结果较为理想,证明 3 种方法应用于底板突水评价是切实可行的。

(3)最后经过比较分析,ANN 神经网络预测模型对综合因素考虑最为全面,预测结果最为理想;证据权模型和加权逻辑回归模型虽然对断层的刻画并不是很理想,但对于面积元单因素的考虑要更加充分,预测结果也比较符合实际情况。

#### 参考文献:

- [1] 武强,金玉洁.华北型煤矿矿井防治水决策系统[M].北京:煤炭工业出版社,1995.
- [2] 中国煤田地质总局.中国煤田水文地质学[M].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [3] 武强,董书宁,张志龙.矿井水害防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,2007.
- [4] 国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程释义(防治水部分)[M].徐州:中国矿业大学出版社,2011.
- [5] 国家煤矿安全监察局.煤矿防治水规定释义[M].徐州:中国矿业大学出版社,2009.
- [6] 武强,庞伟,戴迎春,等.煤层底板突水脆弱性评价的 GIS 与 ANN 耦合技术[J].煤炭学报,2006,31(3):314-319.  
Wu Qiang, Pang Wei, Dai Yingchun, et al. Vulnerability forecasting model based on coupling technique of GIS and ANN in floor groundwater bursting[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(3): 314-319.
- [7] 武强,陈佩佩,董东林,等.基于 GIS 与 ANN 耦合技术的地裂缝灾情非线性模拟预测系统[J].地震地质,2001,2(2):249-257.  
Wu Qiang, Chen Peipei, Dong Donglin, et al. Hazard assessment system for ground fissure based on coupling of ANN and GIS[J]. Seismology and Geology, 2001, 2(2):249-257.
- [8] 武强,张志龙,马积福.煤层底板突水评价的新型实用方法 I——主控指标体系的建设[J].煤炭学报,2007,32(1):42-47.  
Wu Qiang, Zhang Zhilong, Ma Jifu. A new practical methodology of

- the coal floor water bursting evaluating I—the master controlling index system construction[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1):42-47.
- [9] 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.
- Wu Qiang, Zhang Zhilong, Zhang Shengyuan, et al. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating II: the vulnerable index method [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11):1121-1126.
- [10] 武 强,谢淑寒,裴振江,等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 III——基于 GIS 的 ANN 型脆弱性指数法应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12):1301-1306.
- Wu Qiang, Xie Shuhan, Pei Zhenjiang, et al. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating III: the application of ANN vulnerable index method based on GIS[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12):1301-1306.
- [11] 武 强,王金华,刘东海,等. 煤层底板突水评价的新型实用方法 IV——基于 GIS 的 AHP 型脆弱性指数法应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2):233-238.
- Wu Qiang, Wang Jinhua, Liu Donghai, et al. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating IV: the application of AHP vulnerable index method based on GIS[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2):233-238.
- [12] 武 强,徐建芳,董东林,等. 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.
- [13] 张德丰. MATLAB 神经网络仿真与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [14] 孙 岩,王训练,陈建平. 基于证据权重法的沱沱河地区铅锌银矿成矿预测[J]. 地质通报, 2010, 29(4):556-564.
- Sun Yan, Wang Xunlian, Chen Jianping, et al. Lead-zinc-silver metallogenic prediction based on GIS in Tuotuo River region, Qinghai, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(4):556-564.
- [15] 王济川,郭志刚. Logistic 回归模型——方法与应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.

## 《煤炭学报》荣获“2012 中国最具国际影响力学术期刊”称号

2012年12月26日,2012年《中国学术期刊影响因子年报 & 国际引证报告》暨“中国最具国际影响力学术期刊”发布会在国家会议中心举行。《煤炭学报》影响因子继续位居矿山工程技术类首位,并荣获“2012 中国最具国际影响力学术期刊”称号,这也是矿业工程技术类唯一入选的期刊。

此次评选活动是由清华大学图书馆、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、中国科学文献计量评价研究中心发起,旨在客观地反映我国学术期刊国际影响力水平。中国科学文献计量研究中心、清华大学图书馆以 Web of Science(包括 SCI 等三大引文数据库)为统计源,研制了《中国学术期刊国际引证报告》,并按 TOP5%、TOP5%~10% 遴选,结合专家意见,评出了“中国最具国际影响力学术期刊”、“中国国际影响力优秀学术期刊”各 209 种,其中当选“中国最具国际影响力学术期刊”的科技期刊有 175 种,《煤炭学报》凭借自身在国际上的影响力获此殊荣。

本刊编辑部