

文章编号:0253-9993(2011)07-1124-05

# 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

武 强<sup>1</sup> 樊振丽<sup>1,2</sup> 刘守强<sup>1</sup> 张耀文<sup>1</sup> 孙文洁<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 煤炭科学研究总院, 北京 100013)

**摘 要:**为了查明矿井充水含水层富水性分布规律,以平朔井工一矿4煤顶板含水层为例,在分析确定影响含水层富水性主控因素基础上,充分挖掘矿井基础地质资料,采集各主控因素数据信息,应用地理信息系统(GIS)建立各自专题层图,并对多源地质信息进行复合叠加处理,运用非线性(如人工神经网络等)或线性(如层次分析法等)信息融合方法,确定影响含水层富水性的各主控因素“权重”系数,建立基于GIS的信息融合型的含水层富水性分布规律评价模型,计算确定富水性指数,最终实现对充水含水层富水性评价,提出其分区划分方案。

**关键词:**富水性; 评价方法; GIS; 层次分析法

**中图分类号:**P641.8 **文献标志码:**A

## Water-richness evaluation method of water-filled aquifer based on the principle of information fusion with GIS: Water-richness index method

WU Qiang<sup>1</sup>, FAN Zhen-li<sup>1,2</sup>, LIU Shou-qiang<sup>1</sup>, ZHANG Yao-wen<sup>1</sup>, SUN Wen-jie<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology (Beijing) 100083, China; 2. China Coal Research Institute Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to identify the distribution of the water-richness in water-filled mine aquifer, the aquifers overlying the No. 4 coal seam in Pingshuo No. 1 underground Coal Mine was studied. After establishing the main controlling factors, the GIS was used to establish the thematic map layers on the basis of making the best of geological data and collecting the information of each main factors and to stack the multi-source of geological information. Then the “weight” coefficients of each main factors impacting the water-richness of aquifer were established using the non-linear (such as artificial neural networks, etc.) or linear (e. g. AHP Method, etc.) information fusion methods. According to the use of GIS, the evaluation model of the water-richness distribution was established. Then, the water-richness index was calculated. Finally, the distribution of the aquifer water-richness overlying the No. 4 coal seam was put forward and the water-richness evaluation was accomplished.

**Key words:** water-richness; evaluation method; GIS; AHP method

从剖面上看,煤系地层顶底板和其间往往沉积分布多个充水含水层(组),煤层与含水层(组)相互沉积、相间赋存。矿井在建设和煤层开采过程中必然要揭露、破坏或扰动顶、底板这些含水层,故矿井出现涌(突)水现象是正常且不可避免的。不可避免的涌(突)水问题是否会引发矿井水灾、甚至诱发恶性突

水事故主要取决于两大方面: 其一是矿井排水系统的能力建设; 其二是矿井充水条件的认知程度。充水条件的首要问题就是充水水源,特别是地下水作为充水水源和其富水性分布规律,是造成矿井水害频发的一个重要因素。我国煤系地层的充水含水层类型多,条件复杂,特别是半胶结孔隙裂隙、砂(砾)岩裂隙和碳

收稿日期:2010-10-09 责任编辑:韩晋平

基金项目:“十二五”国家科技重大专项资助项目(201105060-06);中央高校基本科研业务资助项目(2010YD02);煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题

作者简介:武 强(1959—),男,内蒙古呼和浩特人,教授,博士生导师。Tel:010-62314681 E-mail:wuq@cumt.edu.cn

酸盐岩薄层、巨厚层岩溶裂隙等充水含水层, 由于其渗透性的高度非均质、各向异性和非连续性等特点, 造成含水层富水性极不均匀, 具有不连续的块段分布特征, 甚至在一个含水层不能形成统一的地下水水头面。在矿井建设和开采过程中, 如采掘和扰动工程揭露或触及的充水含水层是富水性较弱部位, 一般不会诱发水灾事故; 但如揭露或触及的是充水含水层富水或强富水部位, 瞬时巨大的突水极有可能造成突水甚至淹井事故<sup>[1]</sup>。因此, 根据矿井已有勘探资料和认识, 进行充水含水层富水性规律的研究和对极不均匀的富水性分布作出合理预测预报评价, 总结并提出一套完整的充水含水层富水性评价方法和体系, 对矿井安全生产具有极其重要的理论指导意义和实用价值。

## 1 研究区概况

平朔井工一矿位于宁武煤田北端, 属于黄土半掩区, 行政隶属于山西省朔州市平鲁区, 该矿主采煤层为 4 号煤层, 其顶板为中厚砂岩裂隙承压含水层组, 同时在隐伏露头处为松散冲积含水层, 顶板涌(突)水问题直接关系着该矿的正常安全开采。

## 2 富水性指数法基本原理

由于含水层富水性规律和分布受控因素多, 控制机理复杂, 组合类型和影响条件多样, 就目前数学理论与方法发展水平而言, 很难提出一个描述含水层富水性与多种主控因素相互关系在时空域的确定性定量数学方程和模型。因此, 如想确定含水层富水性规律和分布特点, 就必须根据其自身特点寻找新的方法和模型。虽然含水层富水性受控因素多, 但这些因素具有两个共同的明显特点: 其一是随空间域的变化, 控制因素在不同的空间坐标点, 其影响程度不一样; 其二是各个控制因素在不同水文地质条件下对含水层富水性的影响控制程度不同, 也就是说, 各个因素对含水层富水性规律的控制“权重”或“贡献”是不同的。

针对上述特点, 选择具有强大空间信息分析处理功能的 GIS 来描述主控因素随空间域的变化特点, 选择现代信息融合方法, 依据一定的已知样本来定量确定不同主控因素对含水层富水性影响控制的“权重”比例; 然后耦合两种方法, 得出了含水层富水性指数的定量评价模型; 根据频率直方图的分析方法, 确定分区阈值, 最后对矿井充水含水层富水性作出量化分区。依据信息融合的不同数学方法, 可将充水含水层富水性评价新方法划分为非线性性和线性两大类: 非线性评价方法有基于 GIS 的 ANN 型富水性评价法、基于 GIS 的证据权重法型富水性评价法和基于 GIS 的

贝叶斯法型富水性评价法等; 线性评价方法有基于 GIS 的 AHP 型富水性评价法等。含水层富水性评价新方法是一种将可确定充水含水层富水性多种主控因素权重系数的信息融合方法与具有强大空间信息分析处理功能的 GIS 耦合在一体的预测评价方法, 它不仅可以考虑影响充水含水层富水性的众多主控因素, 而且可以刻画多因素之间复杂的作用关系以及对富水性贡献的相对“权重”比例, 并可实施富水性的多级分区。

本文运用基于 GIS 的 AHP 型富水性评价法对平朔井工一矿 4 煤顶板含水层富水性进行评价。首先, 利用 GIS 强大的空间信息处理能力, 对各地质要素图形信息进行量化; 其次, 运用层次分析法(AHP) 对各定性的地质因素进行定量化处理, 计算出各因素对富水性的影响权重; 最后, 应用 GIS 的空间复合叠加功能并结合 AHP 的计算结果进行富水性评价, 并以直观的图件形式给出评价分区结果。该方法不仅充分利用了大量繁杂的空间信息, 运用定性定量相结合的思维来研究地学问题, 深入剖析问题的本质, 而且其评价结果较单一的文字评价更为直观、准确<sup>[2]</sup>。

## 3 充水含水层富水性的主控因素分析

分别从含水层厚度、脆塑性岩厚度比、单位涌水量、岩石质量指标、渗透系数、冲洗液消耗量、断层、陷落柱、褶皱枢纽轴共 9 个方面分析各主控要素对煤层含水层富水性的影响<sup>[3-7]</sup>。

(1) 含水层厚度。通常在其它因素一定的情况下, 含水层越厚, 单位厚度的含水层含水量就越大。根据研究区目标含水层厚度统计数据绘制含水层厚度等值线图。

(2) 脆塑性岩厚度比。在构造应力的破坏下, 不同力学性质的岩性所反映出的破裂特征大不相同, 脆性的砂岩层受力作用后以破裂形式释放应力, 其释放应力的形式主要以剪破坏和张破坏为主, 因而砂岩层内裂隙、节理较为发育, 渗透能力大大增强; 塑性的黏土岩在受力载荷作用下以塑性变形形式释放应力, 使得塑性黏土岩受力后透水性能变化不大。因此, 用脆性岩厚度与塑性岩厚度的比值作为定性判断砂岩裂隙含水层渗透性能的一个指标。一般情况下, 比值越大, 含水层渗透性能越好, 反之其渗透性能越差。根据其值大小绘制等值线图。

(3) 单位涌水量。单位涌水量是井抽水水位降深换算为 1 m 时的单井出水量, 是反映含水层富水性的参数, 其值越大, 含水层的富水性及各含水层的相互补给关系就越好。根据矿区抽水试验结果绘制单

位涌水量等值线图。

(4) 岩石质量指标。岩石质量指标是将钻孔中直接获取的岩芯总长度,扣除破碎岩芯和软弱夹泥的长度后,与钻孔进尺之比。方法规定在计算岩芯长度时,只计算大于 10 cm 坚硬的和完整的岩芯。它是用来表示岩体完整性的一种岩石质量指标,取芯率越低说明岩石越破碎,连通性越好。据此绘制钻孔取芯率等值线图。

(5) 渗透系数。渗透系数是表示岩层透水性的常数。渗透系数不仅取决于岩石的性质(如粒度成分、颗粒排列、充填情况、裂隙性质和发育程度等),而且与流体的物理性质(容重、黏滞性等)有关。根据渗透系数的大小绘制等值线图。

(6) 冲洗液消耗量。作为一项能够反映岩层透水性能的标志。钻探冲洗液的水位和稠度变化,是代表钻孔所穿岩层水力性质的重要指标。冲洗液漏失量大通常表明该层段渗透系数大,并且水头可能很低。统计全区钻孔冲洗液消耗量绘制等值线图。

(7) 断层影响带。该带是受断层影响而形成的两盘岩石的裂隙发育带,分布在构造岩带的两侧,母岩受断层影响而强烈破坏,产生大量张裂隙、扭裂隙及分支断层,形成裂隙发育带,也称为断层裂隙带。靠近构造岩带的岩石受断层影响最大,裂隙最发育。但母岩的成分、结构、性质都没有重大变化;越远离断层,裂隙发育程度越弱,它与未受断层影响的完整母岩之间没有明显的分界线,是逐渐过渡的。总体上断层影响带中裂隙比较发育,导水性较强,为断层水的运动提供了良好的通道,常成为断层的富水带。据此绘制断层影响带图。

(8) 陷落柱。陷落柱在形成过程中,周边围岩因卸载、松动、撞击形成了一个以陷落柱柱体为中心的、不规则环状破碎裂隙带,这里可以称之为陷落柱周边缓冲区,并绘制陷落柱缓冲区图。

(9) 褶皱枢纽轴。褶皱轴部受力集中,裂隙比较发育,背斜通常表现为拉张力作用,向斜轴部通常表现为挤压作用,因此,在同样的外围环境下,背斜较向斜裂隙发育。仿照断层影响带绘制褶皱枢纽轴影响带。

#### 4 富水性主控因素权重系数的确定——以层次分析法为例

##### 4.1 层次模型的建立

根据对影响含水层富水性的主要控制因素的分析,将研究对象划分为 3 个层次<sup>[8-12]</sup>。平朔井工一矿 4 号煤层顶板充水含水层富水性是最高层次的研究目标,将其作为模型的目标层(A 层次);岩性、水

力特性、构造因素决定了富水性的强弱,但其影响方式还需通过与其相关的具体因素来体现,这是解决问题的中间环节,亦即模型的准则层(B 层次);各个具体的主控因素指标构成了本模型的决策层(C 层次),通过对该层次问题的决策,即可最终达到所要求解的目标(图 1)。

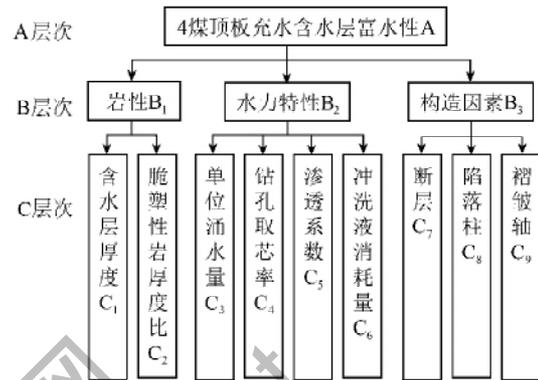


图 1 含水层富水性分析层次结构模型

Fig. 1 Hierarchy structure model of water-richness of water-filled aquifer

##### 4.2 AHP 判断矩阵的构建及权重值的确定

根据对影响平朔井工一矿煤层直接充水含水层各地质要素的分析,运用“征集专家评分”的方法,征集和咨询现场专家、高校及科研单位研究学者的意见,根据他们在现场生产实践和科学研究中的亲身体会和经历以及处理问题的具体方法,来对影响富水性的众多因素进行评分。打分标准是依照 T. L. SAATY 创立的 1~9 标度方法<sup>[8]</sup>,具体做法是把拟定的影响突水的因素罗列成表,请各领域专家根据众多的突水事故中各个因素所起作用的大小,以及他们在生产实践和科学研究中的亲身体会,依据自己的认识和观点,对每个因素所起作用的大小进行相对重要性评价,给出每个因素的量化分值,根据最后的累计得分情况,进行各因素间的总分比较,形成专家对各影响因素的评判集,由此构建该区煤层顶板突水 AHP 评价的判断矩阵(表 1~4)。根据判断矩阵计算出各层单排序的权值,见表 1~4 中 W 列,表中  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值;CI 为判断矩阵一致性指标;CR 为判断矩阵平均随机一致性指标。

表 1 判断矩阵  $A \sim B_i (i=1 \sim 3)$

Table 1 Judging matrix  $A \sim B_i (i=1 \sim 3)$

A	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$W(A/B)$
$B_1$	1	1/3	1/2	0.209 84
$B_2$	3	1	2	0.549 95
$B_3$	2	1/2	1	0.240 21

注:  $\lambda_{\max} = 3.01$ ,  $CI_1 = 0.009 15$ ,  $CR_1 = 0.015 77 < 0.1$ 。

表 2 判断矩阵  $B_1 \sim C_i (i=1 \sim 2)$

Table 2 Judging matrix  $B_1 \sim C_i (i=1 \sim 2)$

$B_1$	$C_1$	$C_2$	$W$
$C_1$	1	3	0.75
$C_2$	1/3	1	0.25

注:  $\lambda_{\max} = 2$ ,  $CI_{21} = 0$ ,  $CR_{21}$  不存在。

表 3 判断矩阵  $B_2 \sim C_i (i=3 \sim 6)$

Table 3 Judging matrix  $B_2 \sim C_i (i=3 \sim 6)$

$B_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$W$
$C_3$	1	4	3	2	0.467 30
$C_4$	1/4	1	1/2	1/3	0.095 43
$C_5$	1/3	2	1	1/2	0.160 09
$C_6$	1/2	3	2	1	0.277 18

注:  $\lambda_{\max} = 4.030 98$ ,  $CI_{22} = 0.103 3$ ,  $CR_{22} = 0.011 48 < 0.1$ 。

表 4 判断矩阵  $B_3 \sim C_i (i=7 \sim 9)$

Table 4 Judging matrix  $B_3 \sim C_i (i=7 \sim 9)$

$B_3$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$W$
$C_7$	1	1	1	0.333 33
$C_8$	1	1	1	0.333 33
$C_9$	1	1	1	0.333 33

注:  $\lambda_{\max} = 3$ ,  $CI_{23} = 0$ ,  $CR_{23} = 0$ 。

以上各组矩阵计算出  $\lambda_{\max}$ ,  $CI$  与  $CR$ , 存在的  $CR$  值都小于 0.1, 判断矩阵具有令人满意的一致性, 可以通过一致性检验, 最终各因素对  $A$  的影响权重见表 5。

### 5 煤层顶板含水层富水性分区

利用层次分析法计算出权重后, 还要对权重值作

表 5 层次总排序

Table 5 Overall hierarchy arrangement

影响因素	含水层厚度 $W_1$	脆塑性岩厚度比 $W_2$	单位涌水量 $W_3$	钻孔取芯率 $W_4$	渗透系数 $W_5$	冲洗液消耗量 $W_6$	断层 $W_7$	陷落柱 $W_8$	褶皱轴 $W_9$
权重 / %	12.3	4.1	25.2	5.1	8.6	15.0	9.9	9.9	9.9

归一化处理, 最终确定富水性分区指标, 并根据分区指标进行富水性分区<sup>[12-14]</sup>。

(1) 数据归一化<sup>[12]</sup>。为了消除各个地质因素不同量纲数据对评价结果的影响, 需要对数据进行归一化处理(式(1)), 其目的是相对化, 使数据具有可比性和统计意义, 便于系统分析。

$$A_i = a + (b - a) \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (1)$$

式中,  $A_i$  为归一化处理后的数据;  $a$ 、 $b$  分别为归一化范围的下限和上限,  $a$ 、 $b$  分别取 0 和 1;  $x_i$  为归一化前的原始数据;  $\min x_i$  和  $\max x_i$  分别为各主控因素量化值的最小值和最大值。

在绘制各个地质因素等值线专题图的基础上, 经过数据归一化, 进而作出各个地质因素归一化等值线图。

(2) 富水性指数的确定。利用 GIS 的空间信息叠加功能将前文讨论的反映含水层富水性的 9 个地质因素综合成一个富水性量化指标(式(2)), 即富水性指数  $W_i$ , 并据此进行富水性分区。

$$W_i = \sum_{i=1}^n W_i A_i \quad (2)$$

式中,  $i$  为因素序号;  $n$  为因素个数, 本文取 9;  $W_i$  为第  $i$  个因素的权重值;  $A_i$  为第  $i$  个因素的归一化值。

GIS 的复合叠加过程其实质是将各个地质因素归一化等值线图中所反映的富水性影响程度信息统筹考虑的过程, 其叠加结果  $W_i$  恰好反应了各个地质因素对含水层富水性的综合影响。

(3) 富水性评价分区。利用 GIS 对富水性指数  $W_i$  值进行分区确定富水性等级区间。

(4) 分区结果分析。研究区地下径流主要是由西北向东南流动, 从图 2 可见, 评价结果符合这一规律; 另外, 井田主要的富水区受构造因素影响较大, 在构造发育区段较富水。

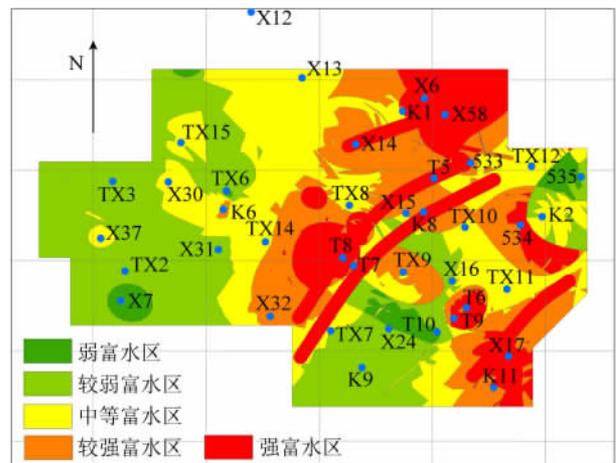


图 2 4 煤顶板含水层富水性分区

Fig. 2 Evaluation zoning of No. 4 roof aquifer watery

## 6 结 论

(1) 讨论了含水层厚度、脆塑性岩厚度比、单位涌水量、岩石质量指标、渗透系数、冲洗液消耗量、断层、陷落柱、褶皱枢纽轴 9 个地质因素对煤层顶板含水层富水性的影响。

(2) 建立了平朔井工一矿 4 煤层顶板富水性 AHP 结构模型, 得出了影响 4 煤顶板富水性的 9 个因素的权值。

(3) 通过 GIS 对各个因素专题图的叠加, 计算了富水性指标  $W_i$ , 最终对平朔井工一矿 4 煤顶板富水性进行了分区。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈述彭. 地理信息系统概论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [3] 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, 2000.
- [4] 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.
- [5] 武 强,张志龙,张生元. 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. 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.
- [6] 武 强,解淑寒,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.
- [7] 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): 60-65.  
Wu Qiang, Huang Xiaoling, Dong Donglin, et al. “Three maps-two predictions” method to evaluate water bursting conditions on roof coal[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(1): 60-65.
- [8] Saaty T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [9] Saaty T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977(1): 234-281.
- [10] 潘寒尽,张多林. AHP 方法存在的问题及改进方法[J]. 航空兵器, 2003(6): 16-17.  
Pan Hanjin, Zhang Duolin. Problems and improving methods in AHP[J]. Aero Weapons, 2003(6): 16-17.
- [11] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998.
- [12] 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.
- [13] Nico Goldscheider. Karst ground water vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany[J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13(4): 555-564.
- [14] Star J, Estes J. Geographic information systems: an introduction[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hal, 1990.