文章编号: 1001-1986(2010)04-0030-04

基于证据理论的煤层气储层评价方法

徐 刚[1]，杜文凤[1]，冀超辉[2]

(1. 中国矿业大学资源与安全工程学院，北京 100083;
2. 煤炭科学研究总院重庆研究院，重庆 400037)

摘要: 针对我国煤层气储层非均质性强，储层评价中存在着储层参数的随机性、模糊性以及数据缺乏等许多不确定性问题，将 D-S 证据理论引入煤层气储层的评价中，以解决评价过程中的不确性问题。应用 D-S 证据理论建立了煤层气储层评价模型，提出了具体的证据理论算法，并根据一定的决策规则对沁水盆地南部进行了煤储层评价，并优选出了煤层气开发的最有利区。应用结果表明，该模型较好地解决了评价中的不确定性问题，使评价结果更为可靠和精确。

关 键 词: 煤层气; D-S 证据理论; 储层评价

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.007

Evaluation method of coalbed methane reservoirs based on evidence theory

XU Gang[1], DU Wenfeng[1], JI Chaohui[2]

(1. *College of Resources and Safety Engineer*, *China University of Mining and Technology*, *Beijing* 100083, *China*;
2. *Chongqing Branch*, *China Coal Research Institute*, *Chongqing* 400037, *China)*

Abstract: This paper introduced D-S evidence theory in evaluation of coalbed methane reservoirs to solve the uncertainty problem due to randomness, faintness and data lacking of reservoirs parameters in evaluation of CBM reservoirs. The evaluation model of CBM reservoirs is set up based on evidence theory and the detailed arithmetic of evidence theory is brought forward, and according to some decision making rule the coal reservoir in south of Qinshui Basin has been evaluated, and the best favorable area for CBM development has been affirmed. The results show that the model can solve the problem of uncertainty and make evaluation results more reliable and precise.

Key words: coal bed methane; D-S evidence theory; reservoir evaluation

煤层气储层评价对于指导煤层气战略选区和勘探开发具有重要意义。我国的煤层气储层评价选区理论与方法经历了从引进国外经验到针对我国特点考虑问题、从单因素机械叠加到多因素分级综合评价的认识深化过程。前人主要是从资源评价的角度，以较大的区域或盆地为评价单元，采用层次分析法、风险概率法、综合排队系数法和模糊综合评判法等对我国的煤层气聚气带和目标区进行评价优选[1-3]。也有部分学者(苏付义，1998；王生维，2004；胡宝林，2003)对煤储层进行过单独评价，提出了煤层气储层的评价参数组合及基本原则，并将多层次模糊综合评价和 GIS 相结合的方法应用于煤储层评价，取得了一定的研究进展[4-6]。

然而，由于我国含煤盆地多具有复杂的演化史和构造变形史[7-9]，煤储层构造变形强烈，非均质性强，即使是同一评价单元测试的储层参数也存在较大差别，煤层气储层评价中存在着储层参数的随机性、模糊性以及数据缺乏等许多不确定性问题。证据理论则是研究不确定性问题的一种重要工具，它既能处理随机性所导致的不确定性，也能处理模糊性导致的不确定性。因此，本文将证据理论应用于煤层气储层评价中，以解决煤层气储层评价的不确定性问题。

1 煤层气储层评价指标体系

由于影响煤层气储层产能的因素众多，不同地区、不同煤层和不同构造部位其对煤层气高产的主控因素是不相同的，即使是同一地质因素，其影响程度也存在差异。因此，煤储层评价参数的选取比较困难。许多研究者选取的煤储层评价参数由于研究角度和研究对象的不同也存在着巨大差异。煤层气的产出过程是通过排水降压、解吸、扩散、渗流

收稿日期: 2009-07-19
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB219600)
作者简介: 徐 刚(1981—), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 从事煤层气地质方面的研究工作.

方式流入到井筒而进行的。因此，煤层气储层评价应包括煤层气资源和可采性两方面因素。基于上述思路，选择基本地质特征(构造条件、水文地质条件)、煤储层地质特征(煤层厚度、煤级、煤体结构)、煤储层物性特征(裂隙发育情况、渗透率)和煤储层储集特征(含气量、储层压力、含气饱和度)等 4 方面对煤储层进行评价。

2　煤层气储层评价模型

D-S 证据理论是 Dempster[10]于 1967 年提出的，随后 Shafer[11]在证据理论中引入信任函数概念，形成了一套基于“证据”和“组合”来处理不确定性推理问题的数学方法，并于 1976 年出版了《证据的数学理论》，这标志着证据理论正式成为一种处理不确定性问题的完整理论。D-S 证据理论可以综合不同专家或数据源的知识或数据，这使得证据理论在许多领域中得到了广泛应用。

2.1　D-S 证据理论合成规则

在证据理论中，通常将一个样本空间称为一个“识别框架”，记做 Θ，将一个基本命题记做 $H_l(l=1,2,\cdots,z)$，且 $H_l\subseteq\Theta$，$H_l(l=1,2,\cdots,z)$ 之间是相互独立的。以下引入基本可信度分配、信度函数、似真函数、焦元等定义，在此基础上给出证据合成规则，据此对煤层气储层进行评价。

a. 设 Θ 为识别框架，如果集函数 $m:2^{\Theta}\to[0,1]$(2^{Θ} 为 Θ 的幂集)，且满足 $m(\varnothing)=0$ 和 $\sum_{X\subseteq\Theta}m(X)=1$，则称函数 m 为 Θ 上的基本概率分配(BPA)；$\forall X\subseteq\Theta$，$m(X)$称为 X 的基本可信度或 Mass 函数。$m(X)$表示证据支持命题 X 发生的程度。若 $X\subseteq\Theta$，且 $m(X)>0$，则称 X 为证据的焦元(Focal Element)，所有焦元的集合称为核(Core)。

b. 设 Θ 为识别框架，如果集函数 $m:2^{\Theta}\to[0,1]$ 为框架 Θ 上的 BPA，则称由式(1)定义的函数 $Bel:2^{\Theta}\to[0,1]$ 为 Θ 上的信度函数，由式(2)定义的函数 $Pl:2^{\Theta}\to[0,1]$ 为 Θ 上的似真函数。

$$Bel(X)=\sum_{Y\subseteq X}m(Y),\ \forall X,Y\subseteq\Theta\quad；\tag{1}$$

$$Pl(X)=\sum_{X\cap Y\neq\varnothing}m(Y),\ \forall X,Y\subseteq\Theta\quad。\tag{2}$$

Bel 和 Pl 即是 Dempster 所说的上限概率和下限概率，信任区间[$Bel(X)$，$Pl(X)$]就是事件 X 的概率变化范围。其中 $Bel(X)$表示对命题“X 为真”的支持程度；$Pl(X)$表示证据不能否定“X 为真”的程度；$Bel(X)-Pl(X)$则反映了对事件 X 的未知程度，如图 1 所示。信任区间[0，1]表示没有相关事件的任何知识，即对事件一无所知；[0，0]表示一假事件；[1，1]表示一真事件。

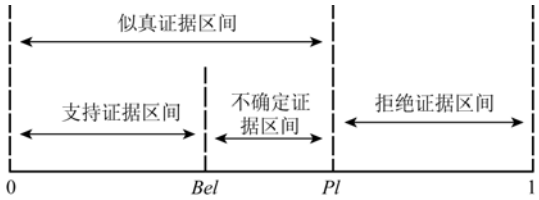


图 1　证据理论区间和不确定性

Fig. 1　Evidence theory interval and its uncertainty

c. 设 Bel_1、Bel_2 都是同一识别框架 Θ 上的信度函数；m_1、m_2 分别是其对应的 Mass 函数；m_1、m_2 的焦元分别为 $X_1,X_2,\cdots,X_k$ 和 $Y_1,Y_2,\cdots,Y_l$。如果 $m_1\oplus m_2:2^{\Theta}\to[0,1]$，$m(E)>0$ 则：

$$[m_1\oplus m_2][E]=\begin{cases}0 & ,\ E=\varnothing\\ \dfrac{\sum_{X\cap Y=E}m_1(X_i)m_2(Y_j)}{1-k} & ,\ E\neq\varnothing\end{cases},\tag{3}$$

$$k=\sum_{X_i\cap Y_j=\varnothing}m_1(X_i)m_2(Y_j)。$$

其中　$\oplus$ 表示直和；k 表示证据冲突的程度，k 值越大，说明证据冲突程度也越大。式(3)称为合成 m_1 和 m_2 的 D-S 证据合成规则，简记为 $m_{12}=m_1\oplus m_2$。

2.2　煤层气储层评价的证据理论算法

对煤层气储层进行评价，首先是根据煤层气盆地的实际地质情况得到各个区域的模型评价值和底层因素层各个因素对应评语集的确信度表示，然后由 D-S 证据合成法则逐层合成，最后得到煤层气储层的综合评价值。基本算法步骤如下：

第 1 步　确定各层指标因素的权重及底层因素层关于 $H_l(l=1,2,\cdots,z)$ 的确信度 $\beta_{H_l}(e^i_{jk})$，各层指标因素的权重可以通过层次分析法得出，而底层因素的确信度值一般是由专家根据实际地质情况和经验给出。

第 2 步　确定各层指标因素的基本概率赋值(集函数值)。对各指标因素集称权重最大的指标为关键指标，其他为非关键指标。若专家对底层元素 e^i_{jk} 关于 H_l 的确信度为 $\beta_{H_l}(e^i_{jk})$，那么，对于关键指标 e^i_{jk} 的基本概率赋值为：

$$m(H_l\,|\,e^i_{jk})=\alpha_{jk}\beta_{H_l}(e^i_{jk}),\ l=1,2,\cdots,z\ ；$$

$$m(H\,|\,e^i_{jk})=1-\sum_{l=1}^{z}m(H_l\,|\,e^i_{jk})。$$

这里，$m(H\,|\,e^i_{jk})$ 表示完全不确知的基本概率赋值；α_{jk} 表示专家对于关键指标 e^i_{jk} 的偏好系数，一般取值为 $0.9\leqslant\alpha_{jk}\leqslant1$，它反映了关键指标的重要程度，

α_{jk} 越大，关键指标越重要。若 e_{jk}^{i} 是非关键指标，其基本概率赋值构造为：

$$m(H_l \left| e_{jk}^{i}\right.) = \left(\frac{w_{jk}}{w_{jm}}\right)\alpha_{jk}\beta_{H_l}(e_{jk}^{i})\ ；$$

$$m(H \left| e_{jk}^{i}\right.) = 1-\sum_{l=1}^{z} m(H_l \left| e_{jk}^{i}\right.)。$$

其中 w_{jm} 为关键指标的权重；$\left(\frac{w_{jk}}{w_{jm}}\right)\alpha_{jk}$ 称为因素 e_{jk}^{i} 在 E_i 中的权重规范化值。

第 3 步 对于子系统因素 $e_i(i=1,2,3)$ 中假设包含有因素集 $I(n)=\{e_{i1},e_{i2},\cdots,e_{in}\}$，则用证据理论结合准则产生的集函数记为:

$$m_{I(n)}^{l} = m(H_l \left| I(n)\right.),\ l=1,2,\cdots,z\ ；$$

$$m_{I(n)}^{\Theta} = m(H \left| I(n)\right.)。$$

其中 $m_{I(n)}^{l}$ 表示因素集中所有因素关于 H_l 的基本概率值；$m_{I(n)}^{\Theta}$ 表示因素集 $I(n)$中所有因素完全不确知的基本概率赋值。

对于 $I(2)=\{e_{i1},e_{i2}\}$ 的综合，由证据理论的结合准则式(3)可以得到以下公式：

$$m_{I(2)}^{l} = k_{I(2)}\left[m_1^l m_2^l + m_1^l m_2^{\Theta} + m_1^{\Theta} m_2^l\right],\ l=1,2,\cdots,z\ ；$$

$$m_{I(2)}^{\Theta} = k_{I(2)} m_1^{\Theta} m_2^{\Theta}\ ；$$

$$k_{I(2)} = \left(1-\sum_{t=1}^{z}\sum_{l\neq t} m_1^t m_2^l\right)^{-1}。$$

由于 $m_{I(1)}^{l}=m_1^l$ 及 $m_{I(1)}^{\Theta}=m_1^{\Theta}$，所以利用类似方法综合 $I(p+1)=\{e_{i1},e_{i2},\cdots,e_{ip},e_{ip+1}\}$，得到如下递推公式：

$$m_{I(p+1)}^{l} = k_{I(p+1)}\left[m_{I(p)}^{l} m_{p+1}^{l} + m_{I(p)}^{l} m_{p+1}^{\Theta} + m_{I(p)}^{\Theta} m_{p+1}^{l}\right],$$
$$l=1,2,\cdots,z\ ;$$

$$m_{I(p+1)}^{\Theta} = k_{I(p+1)} m_{I(p)}^{\Theta} m_{p+1}^{\Theta}\ ；$$

$$k_{I(p+1)} = \left(1-\sum_{t=1}^{z}\sum_{l\neq t} m_{I(p)}^{t} m_{p+1}^{l}\right)^{-1}。$$

上式中，当 $p=n-1$ 时就得到子系统因素 $e_i(i=1,2,3)$ 中所有底层因素集函数的综合集函数，记此集函数为 m，则有 $m(\{H_l\})=m_{I(n)}^{l},\ l=1,2,\cdots,z$；$m(H)=m_{I(n)}^{\Theta}$，且有 $m(E)=0$，$\forall E\neq\{H_l\}$，l=1,2,$\cdots$,z; $E\neq H$。

第 4 步 同理可由第 3 步的公式综合第 1 层指标因素 $e_i(i=1,2,3)$ 的集函数，得到煤层气储层评价的综合集函数，即煤层气储层评价子系统在评价集 $H=\{H_1,H_2,\cdots,H_l,\cdots,H_z\}$ $(l=1,2,\cdots,z)$ 上的可信度分配为 $m^l(l=1,2,\cdots,z)$。

第 5 步 最后由公式 $S=\sum_{l=1}^{z} m^l p(H_l)$ 得出煤层气储层评价量化值，该值即为证据推理算法的输出结果。

3 煤层气储层评价模型应用

论文选择我国煤层气开发的热点地区沁水盆地南部为例进行应用。沁水盆地南部主要包括郑庄区块，潘庄区块，樊庄区块等。这里选取的模糊评语集是 H={H_1(差)，H_2(较差)，H_3(一般)，H_4(较好)，H_5(好)}，其模糊评价值为 $p(H)$= {$p(H_1)$，$p(H_2)$，$p(H_3)$，$p(H_4)$，$p(H_5)$}＝$\{0.2,0.4,0.6,0.8,1\}$。

重要性系数，即各指标的权重是指每个指标对总目标的贡献程度，它反映了各指标在评价对象中价值地位的系数。科学合理地对各指标赋予重要性系数是评价煤层气资源的关键。采用层次分析法即可得到各指标的权重(表 1)。

算法中的偏好系数α取 0.9，由算法中的第 2 步可得各关键因素指标和非关键因素指标权重的规范化值：子系统因素权重规范化值为 $\lambda=\{0.6,0.6,0.9,0.9\}$；基本地质特征因素下的第 2 层因素的权重规范化值为 $\lambda_1=\{0.9,0.6\}$；煤储层地质特征因素下的第 2 层因素的权重规范化值为 $\lambda_2=\{0.675,0.9,0.675\}$；煤储层物性特征因素下的第 2 层因素的权重规范化值为 $\lambda_3=\{0.6,0.9\}$；煤储层储集特征因素下的第 2 层因素的权重规范化值为 $\lambda_4=\{0.9,0.56,0.8\}$。

根据建立的沁水盆地煤层气可采性评价指标体系(表 1)，结合郑庄区块、潘庄区块、樊庄区块的实际地质情况和勘探期间取得的地质参数，得到底层各子因素的初始确信度(表 2)。

利用算法第 3 步和第 4 步，可得到沁水盆地南部郑庄区块、潘庄区块、樊庄区块煤储层评价综合可信度分配(表 3)。由此可得到沁水盆地南部各区块煤储层评价结果：

$$S_{郑}=\sum_{l=1}^{5} m^l p(H_l)=1\times0.82+0.8\times0.05+0.6\times0.008=0.86；$$

$$S_{潘}=\sum_{l=1}^{5} m^l p(H_l)=1\times0.9+0.8\times0.044+0.6\times0.006=0.935；$$

$$S_{樊}=\sum_{l=1}^{5} m^l p(H_l)=1\times0.94+0.8\times0.04+0.6\times0.006=0.97。$$

由上面计算结果可知，沁水盆地南部煤储层的评价结果处于较好和好之间，以樊庄区块的评价结果最好，潘庄区块和郑庄区块次之。

表 1　沁水盆地煤层气可采性评价指标体系
Table 1　The evaluation index of CBM recoverability in Qinshui basin

评价指标	权重	评价因素	权重	评价标准				
				好	较好	一般	较差	差
基本地质特征 m_1	0.2	构造地质条件 m_{11}	0.6	地质构造简单	地质构造较简单	地质构造中等	地质构造较复杂	地质构造复杂
		水文地质条件 m_{12}	0.4	滞流区	缓流区	弱交替区	强交替区	供水区、泄水区
煤储层地质特征 m_2	0.2	煤层厚度 m_{21}/m	0.3	>6	5~6	4~5	3~4	<3
		煤级(R_{max})m_{22}/%	0.4	>2.5	1.9~2.5	1.2~1.9	0.9~1.2	<0.9
		煤体结构 m_{23}	0.3	原生结构煤	碎裂煤	中煤级碎粒煤	高煤级碎粒煤	中、高煤级糜棱
煤储层物性特征 m_3	0.3	裂隙发育情况 m_{31}	0.4	发育	较发育	一般	较不发育	不发育
		渗透率 m_{32}/$10^{-3}\mu m^{-2}$	0.6	>5	1~5	0.5~1	0.1~0.5	<0.1
煤储层储集特征 m_4	0.3	含气量 m_{41}/$m^3\cdot t^{-1}$	0.4	>15	12~15	9~12	6~9	<6
		储层压力梯度 m_{42}/$kPa\cdot m^{-1}$	0.25	>10	8~10	6~8	4~6	<4
		含气饱和度 m_{43}/%	0.35	>90	80~90	70~80	60~70	<60

表 2　底层子因素的初始确信度分配表
Table 2　Certainty distribution of bottom factors

第 1 层指标因素	第 2 层指标因素	郑庄区块					潘庄区块					樊庄区块				
		H_5	H_4	H_3	H_2	H_1	H_5	H_4	H_3	H_2	H_1	H_5	H_4	H_3	H_2	H_1
基本地质特征 m_1	构造地质条件 m_{11}	0.8	0.1	0.1	0	0	0.8	0.1	0.1	0	0	0.7	0.2	0.1	0	0
	水文地质条件 m_{12}	0.8	0.1	0.1	0	0	0.8	0.1	0.1	0	0	0.7	0.1	0.2	0	0
煤储层地质特征 m_2	煤层厚度 m_{21}	0.1	0.7	0.2	0	0	0.1	0.8	0.1	0	0	0.1	0.8	0.1	0	0
	煤级 m_{22}	0.8	0.1	0.1	0	0	0.8	0.1	0.1	0	0	0.8	0.1	0.1	0	0
	煤体结构 m_{23}	0.8	0.1	0.1	0	0	0.8	0.1	0.1	0	0	0.8	0.1	0.1	0	0
煤储层物性特征 m_3	裂隙发育情况 m_{31}	0.8	0.1	0.1	0	0	0.9	0.1	0	0	0	0.8	0.1	0.1	0	0
	渗透率 m_{32}	0.6	0.2	0.2	0	0	0.7	0.2	0.1	0	0	0.6	0.3	0.1	0	0
煤储层储集特征 m_4	含气量 m_{41}	0.8	0.1	0.1	0	0	0.9	0.1	0	0	0	0.8	0.1	0.1	0	0
	储层压力 m_{42}	0.7	0.2	0.1	0	0	0.8	0.1	0.1	0	0	0.7	0.2	0.1	0	0
	含气饱和度 m_{43}	0.6	0.2	0.2	0	0	0.7	0.2	0.1	0	0	0.6	0.2	0.2	0	0

表 3　煤储层评价综合可信度分配表
Table 3　Creditability distribution of CBM reservoir assessment

第 1 层指标因素	郑庄区块						潘庄区块						樊庄区块					
	H_5	H_4	H_3	H_2	H_1	不确定	H_5	H_4	H_3	H_2	H_1	不确定	H_5	H_4	H_3	H_2	H_1	不确定
基本地质特征 m_1	0.25	0.015	0.015	0	0	0.72	0.25	0.015	0.015	0	0	0.72	0.2	0.03	0.03	0	0	0.74
煤储层地质特征 m_2	0.08	0.005	0.002	0	0	0.913	0.07	0.01	0.001 5	0	0	0.92	0.07	0.01	0.001 5	0	0	0.92
煤储层物性特征 m_3	0.45	0.05	0.04	0	0	0.46	0.46	0.066	0.024	0	0	0.45	0.65	0.08	0.02	0	0	0.25
煤储层储集特征 m_4	0.78	0.053	0.008	0	0	0.159	0.812	0.056 8	0.006 5	0	0	0.125	0.88	0.053	0.008	0	0	0.059
合成的可信度 m	0.82	0.05	0.008	0	0	0.122	0.9	0.044	0.006	0	0	0.051	0.94	0.04	0.006	0	0	0.014

根据研究区内煤层气的开发实践，樊庄区块内的晋试 2、晋试 3、晋试 4、晋试 5 和晋试 6 井的产气效果都比较理想，产气量多在 3 000 m^3/d 以上，TL-006 井最高产气量达 10 364 m^3/d，且长时间维持在 3 000~5 000 m^3/d；而潘庄区块 PZ-1、PZ-4 井排采时的产气量基本都维持在 l 000 m^3/d 以上，PZ-2、PZ-3 井的高峰产量分别达到 9 428 m^3/d 和 8 500 m^3/d，但产量降低较快。这说明樊庄区块的煤层气产能好于潘庄区块和郑庄区块，与证据理论的评价结果一致。

4　结　语

应用 D-S 证据理建立了煤层气储层评价模型，并提出了具体的证据理论算法。利用该模型对沁水盆地南部进行了储层评价，并对有利区进行了优选。结果表明，沁水盆地南部煤储层的评价结果处于较好和好之间，且以樊庄区块的评价结果最好，潘庄区块和郑庄区块次之。经过验证，该评价结果正确可靠，与煤层气开发的实际情况相吻合，反映了沁水盆地南部煤层气的开发潜力。

用 D-S 证据理论进行煤层气储层评价的优点在于：D-S 证据理论能处理(因煤储层的非均质性和模糊性而导致的)不确定性问题，且评价结果与实际

(下转第 37 页)

表 4　顾桥煤矿突水水源快速判别准确率对比表
Table 4　Comparative accuracy of discriminating the water-bursting source quickly of Guqiao coal

模型	模糊综合评判		Bayes 模型		神经网络	
	回判	预测	回判	预测	回判	预测
结果	87.50%	86.60%	91.60%	93.30%	91.60%	93.30%

数据导入之前要进行归一化处理，且必须进行样本的训练，所需运行时间长，训练样本的数量不能太少，这样导致神经网络模型在判别矿井突水水源方面存在一定局限性。而 Bayes 模型是基于统计学原理，可对大量数据进行快速分析。在判别准确率以及判别速度上有明显的优势。

3　结　论

本文选取各含水层具有普遍意义的 6 大离子指标，结合 SPSS 统计软件，建立了适合不同水质类型的矿井突水水源快速判别模型。在顾桥矿的实例中证明其模型能够有效地判别突水水源，准确率要高于模糊综合评判模型，而与神经网络模型的判别准确率相同，且 Bayes 多类线性判别模型又以其计算过程简单、模型结构稳定而优于神经网络模型。

由于 Bayes 判别法既没有考虑决定样品 X 特性的各个指标(即 X 各分量) 与总体 Gi 相应指标的“贴近”程度，也没有考虑样品的各个具体指标对样品总体特性影响的大小，而实际问题中各指标对样品 X 的总体特性影响的大小往往是不同的[12]。因此在实践运用中仍存在一定缺陷。在今后的研究中应当从两方面对其进行改进，一是对指标的选取上，可以增加地下水化学指标，如 pH 值、TDS、碱度、硬度；二是改进克服其缺点，如可以和可拓模型相结合，建立 Bayes-可拓模型，增加判别准确率。

参考文献

[1] 杨武洋，王文祥，智建水，等. 监测采动岩层地应力变化预测矿井出水情况[J]. 采矿与安全工程学报，2007，24(1)：101–104.

[2] 袁智，郭德勇，宋建成. 超化煤矿矿井突水特征及防治对策[J]. 煤炭科学技术，2007，35(1)：29–32.

[3] CLARK I D, FRITZ P. Environmental isotopes in hydrogeology[M]. New York：Lewis Publishers, 1997：35–37.

[4] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133：1702–1703.

[5] 高卫东，何元东，李新社. 水化学法在矿井突水水源判断中的应用[J]. 矿业安全与环保，2001，28(5)：44–45.

[6] 徐忠杰，杨永国，汤琳. 神经网络在矿井水源判别中的应用[J]. 煤矿安全，2007，38(2)：4–7.

[7] 贲旭东，郭英海，任印国，等. 模糊综合评判在水源判别应用中对权重确定的探讨[J]. 中国煤田地质，2005，17(5)：58–60.

[8] 张瑞钢，钱家忠，马雷，等. 可拓识别方法在矿井突水水源判别中的应用[J]. 煤炭学报，2009，34(1)：33–38.

[9] 张宏刚. 灰色局势综合评判法在突水水源判别中的应用[J]. 水利科技与经济，2007，13(12)：887–888.

[10] 张文彤，董伟. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京：高等教育出版社，2004.

[11] 韩金炎. 数学地质[M]. 北京：煤炭工业出版社，1987.

[12] 李日华，毛凯，周刚. Bayes-可拓判别[J]. 系统工程理论与实践，2005，25(7)：131–135.

(上接第 **33** 页)

情况相符。因此，将 D-S 证据理论用于煤层气储层评价是可行的，为煤层气开发的战略选区评价提供了一条新的有效途径。

参考文献

[1] 赵庆波. 煤层气区评价参数及勘探方向[J]. 石油勘探探与开发，1997，24(1)：6–10.

[2] 叶建平，秦勇，林大扬, 等. 中国煤层气资源[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，1998.

[3] QIN Yong, YE Jianping，LIN Dayang. Geological seeking for potential CBM-accumulationing zones and districts in China[C]// Proceeding of the 2000 Int Symposium on Mining and Science and Technology, Xie Heping and Golosinski T S(ed).Rotterdam：Balkema Publishers，2001：243–246.

[4] 苏付义. 煤层气储集层评价参数及其组合[J]. 天然气工业，1998，18(4)：16–21.

[5] 王生维，段连秀，陈钟惠, 等. 煤层气勘探开发中的煤储层评价[J]. 天然气工业，2004，24(5)：82–84.

[6] 胡宝林，杨起，刘大锰，等. 鄂尔多斯盆地煤层气资源多层次模糊综合评价[J]. 中国煤田地质，2003(2)：16–19.

[7] 杨起，吴冲龙，汤达祯. 中国煤变质作用[J]. 地球科学–中国地质大学学报，1996，23(3)：311–319.

[8] 汤达祯. 煤变质演化与煤成气生成条件[M]. 北京：地质出版社，1998.

[9] 闰宝珍，王延斌，丰庆泰, 等. 基于地质主控因素的沁水盆地煤层气富集划分[J]. 煤炭学报，2008，33(10)：1102–1106.

[10] DEMPSTER A P. Upper and lower probability introduced by multi-valued mapping[J]. Annals of Mathematical Statistical, 1967, 38：325–329.

[11] SHAFER G A. Mathematical theory of evidence[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1976.