

# 模糊相似法对页岩气选区评价的应用

## ——以四川盆地海相页岩气为例

王思航<sup>1</sup>, 田小林<sup>2</sup>, 王楚柯<sup>3</sup>, 冯永光<sup>2</sup>, 吴得强<sup>2</sup>, 白家全<sup>2</sup>, 李辉<sup>1</sup>, 孔德才<sup>2</sup>

(1. 四川中江经济开发区管委会, 四川 德阳 618100; 2. 四川省地质矿产勘查开发局一〇六地质队, 四川 成都 611130;  
3. 贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**针对已有的页岩气有利目标区优选评价指标不全面、评价方法未充分利用不确定信息评价指标值等问题,分析了页岩气富集成藏的生烃、储集、保存和实施勘探开发的地面条件。在此基础上,结合国外页岩气勘探开发成功经验和我国海相页岩气成藏特点,筛选了页岩有效厚度、有机碳含量等13项页岩气有利目标区优选的全面评价指标,并建立了相应的分级分类评价标准。针对页岩气的储层厚度大、非均质性以及勘探早期对评价参数的地质认识程度较低,以评价指标分布的区间值代替不确定信息评价指标的平均值,应用模糊相似理论建立了页岩气有利目标区模糊相似评价方法。实例计算结果表明,与综合信息叠合法相比,该方法合理有效,简单实用,能够为页岩气有利目标区优选提供可靠依据。

**关键词:**模糊相似法;模糊相似系数;海相页岩气;页岩气目标区

中图分类号:P618 文献标识码:A

### Application of fuzzy similarity methods for evaluating the district of shale gas: A case of marine shale gas in Sichuan Basin

Wang Sihang<sup>1</sup>, Tian Xiaolin<sup>2</sup>, Wang Chuke<sup>3</sup>, Feng Yongguang<sup>2</sup>, Wu Deqiang<sup>2</sup>, Bai Jiaquan<sup>2</sup>, Li Hui<sup>1</sup> and Kong Decai<sup>1</sup>

(1. Management Committee of Zhongjiang Economic Development Zone, Sichuan, Deyang, Sichuan 618100, China;  
2. 106 Geological Team of Sichuan Geology and Mineral Resources Exploration Bureau, Chengdu, Sichuan 611130, China;  
3. Large Data and Information Engineering College of Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** At present, the optimizing evaluation indexes of the existing favorable target areas of shale gas, is not comprehensive, and the evaluation methods are not taking full advantage of the uncertain information indexes. Therefore, the enrichment, accumulate, and storage of the shale gas, and the surface condition of the exploration and development are analyzed. On this base, by combining the successful exploring experience of the shale gas aboard with the characteristics of the domestic marine shale gas accumulation, we selected 13 comprehensive evaluation indexes, including the netshale thickness and the organic carbon content of the shale gas favorable target areas, and proposed the corresponding classified evaluation standards. Because of the thick shale gas reservoir, the heterogeneity and the lack of the geological awareness of the evaluation parameters, the interval value of the evaluation indexes replaced the average value of the uncertain information evaluation index, and the fuzzy similarity evaluation method based on the fuzzy similar theory was established. The calculation results show that, compared with the comprehensive information superposition method, this method is more reasonable, effective, simple and useful. It can provide reliable evidences for the optimal of the favorable target areas of shale gas.

**Key words:** fuzzy similarity method, fuzzy similarity coefficient, marine shale gas, target area of shale gas

页岩气属于典型的非常规气藏,具有连续分布的成藏特征,但是页岩气有利区的分布受到多种因

素的控制。合理选择页岩气勘探目标区不仅有利于提高勘探效益,降低勘探风险,而且对页岩气的

收稿日期:2016-11-15。

第一作者简介:王思航(1990—),男,助理工程师,矿产普查与勘探。

后续有效开发也至关重要。页岩气区块评价涉及多方面的因素。具体评价区块的不同类型评价指标取值的代表性、评价指标之间的互补性以及评价指标权重取值等受到人为因素的影响较大,往往给评价结果带来较大误差。该文应用模糊相似法对四川盆地典型井区龙马溪组和筇竹寺组页岩气进行评价,印证模糊相似法的可靠性。

## 1 页岩气评价指标及评价标准

页岩气是自生自储的非常规天然气,主要以吸附态赋存于有机质颗粒与黏土矿物表面和游离态赋存于基质孔隙与天然裂缝中<sup>[1]</sup>。我国海相页岩气勘探前景好,特别是四川盆地及其周缘地区,其成藏条

件与美国商业开发的页岩气藏具有相似性,但成熟度普遍较高,埋深较大,后期抬升构造运动强烈,保存条件较差<sup>[2-6]</sup>。页岩气有利目标区是页岩气成藏地质因素条件与地面因素条件达到一定条件的有效组合区。

综合前人研究成果<sup>[7-9]</sup>,从页岩气的生成、储集、保存地质特点及其勘探开发地质、地面条件,筛选出13个评价指标,并且按照有利区、较有利区、不利区进行分级评价(表1)<sup>[7]</sup>。页岩气有利区是指页岩气成藏地质条件优越并且天然气资源丰度高,商业开发价值高的区块;较有利区具有页岩气成藏的基本地质条件,但商业开发价值较低;不利区具有页岩气成藏的部分地质条件,资源丰度低,现今技术条件下缺乏商业开发价值。

表1 四川盆地海相页岩气选区评价指标及分级标准

Table 1 Evaluation indexes and grading standard of marine shale gas district in Sichuan Basin

评价等级	有效厚度/m	有机碳含量,%	有机质类型	成熟度,%	孔隙度,%	含气量/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	脆性矿物含量,%	断层类型	压力系数	埋深/m	封盖层	地表条件	地面设施
有利区	≥30	≥3	I ~ II <sub>1</sub>	1.6 ~ 2.5	≥4	≥2	40 ~ 60	微型 ~ 小型	≥1.3	1 500 ~ 3 000	膏盐岩	平原、丘陵	管网、设施齐全
较有利区	10 ~ 30	1 ~ 3	II <sub>2</sub> ~ III <sub>2</sub>	1.0 ~ 1.6 或2.5 ~ 5	2 ~ 4	1 ~ 2	30 ~ 40	中型	0.7 ~ 1.3	500 ~ 1 500 或3 000 ~ 4 000	致密砂岩、灰岩、泥岩	高原、低山	有一定管网、设施
不利区	≤10	≤0.5	III <sub>3</sub>	≥5 或 ≤1.0	≤2	≤1	≤30	大型	≤0.7	200 ~ 500 或 4 000 ~ 5 000	一般砂岩	高山、戈壁、湖沼	少有管网、设施或无

## 2 评价指标的取值方法

页岩气有利目标区优选是一个多指标综合决策过程,评价指标取值合理与否对选区评价结果具有重要影响。页岩气选区评价指标取值的合理性与评价区块的地质认识程度、页岩非均质性具有密切关系。对于钻井及页岩相关实验分析的数据评价区块较少,确定页岩有效厚度、有机碳含量、孔隙度等定量指标具体数值的难度较大,而通过区域资料以及邻近露头或邻区的钻井实测资料可以类比分析各评价指标变化的区间范围。

当评价区块内页岩的相关实测资料较多时,由于页岩气水平钻井的开发层段厚度较大,页岩纵向

的非均质性对评价指标的取值也有较大的影响。如川东地区JY1井龙马溪组下段的优质页岩厚度约45 m,页岩的有机碳含量、孔隙度、含气量等变化大(图1)。

对于厚度较大,非均质性较强的页岩储层,即使去掉少数样品的异常值,以平均值或众数值也难以合理地反映评价指标的实际情况。因此,为了尽量避免评价指标平均值带来的偏差,需要对具体数据进行统计分析,以合理的区间值代替平均值。区间值的大小与指标分析结果的分布特征有关。当评价指标的实测数据呈正态函数分布时,区间值的取值范围可以相对较小;如果评价指标的实测数据的分布特征不太明确,区间值的取值范围要适当放宽。

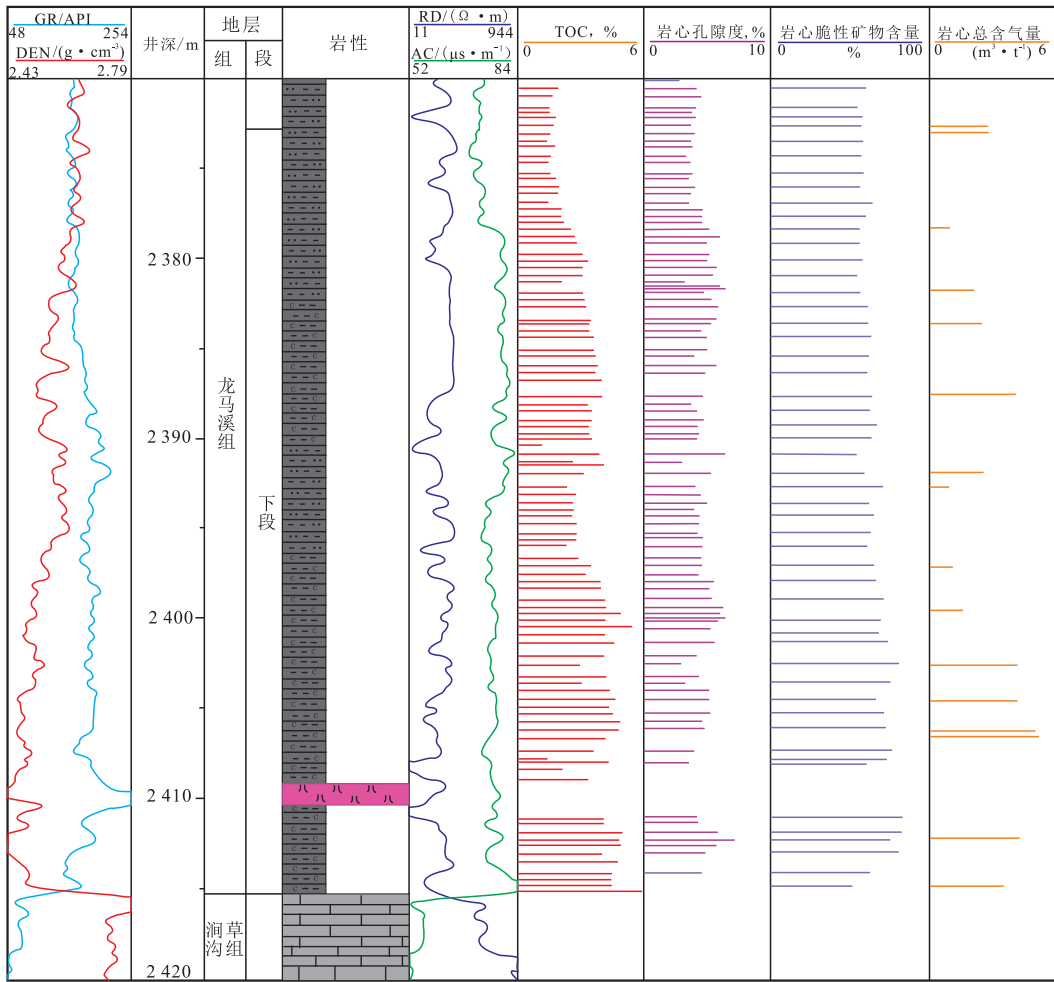


图1 四川盆地东部JY1井龙马溪组下段页岩气评价指标纵向分布特征

Fig. 1 Vertical distribution feature of shale gas evaluation index for well-JY1 in the lower Longmaxi district of east Sichuan Basin

### 3 有利区优选的模糊相似法

#### 3.1 方法原理

根据表1的评价标准,人们能够直观地评价某些典型区块的优劣,如,当评价区块的每个评价指标均达到I级标准时,那么该评价区块属于理想典型有利区,如果每个评价指标均为II级时,则属于理想典型较有利区。对于理想典型不利区而言,多数关键评价指标都具有一票否决权,如,当页岩有效厚度、有机碳含量、含气量等任一指标值为III级即可评价为不利区。在实际选区评价时,一般已把不利区排除在外,评价区块中往往有些指标值好一些,有些指标值差一些。由于指标间具一定的互补

性,即使某一指标值较差,可由其它较好的指标值补偿。因此,页岩气区的优劣取决于各评价指标综合作用的结果。模糊相似法正是针对页岩气选区评价诸多因素信息分布的随机性,采用模糊相似理论计算评价区块指标值与理想典型区块指标值的相似程度系数,然后根据相似程度系数对各区块进行优劣评价<sup>[10]</sup>。

以页岩有效厚度和有机碳含量为例,假设某地区有4个页岩气评价区块的页岩有效厚度和有机碳含量在二维直角坐标图上的分布如图2,A区块和B区块分别属于理想典型有利区和理想典型较有利区,而C、D区块不属于任何理想典型区,但是它们对不同理想典型区块的接近程度有所不同。当综合考虑页岩气的13项指标时,评价区块与理想典型区块的接近程度能够综合反映评价区块的相对优劣。

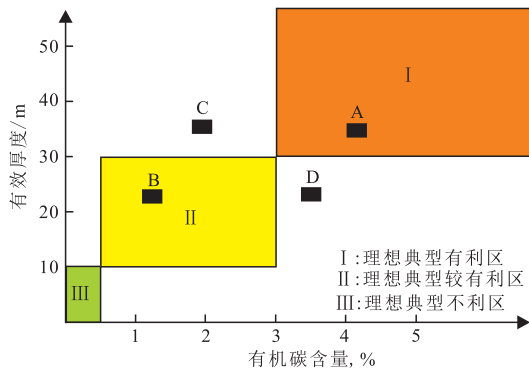


图2 页岩气选区模糊相似评价法示意图

Fig. 2 Fuzzy similarity evaluation methods for shale gas districts

### 3.2 公式推导

为讨论方便,先定义实数与区间数的乘积、区间数的距离:

定义1 实数  $k > 0$  与区间数  $a = [a^-, a^+]$  ( $0 \leq a^- \leq a^+$ ) 的乘积为:

$$ka = [ka^-, ka^+] \quad (1)$$

定义2 区间数  $a = [a^-, a^+]$  与区间数  $b = [b^-, b^+]$  的距离为:

$$d(a, b) = \frac{1}{2} (|a^- - b^-| + |a^+ - b^+|) \quad (2)$$

当区间数  $a, b$  为精确实数,即  $a^- = a^+, b^- = b^+$  时,  $d(a, b) = |a - b|$ 。因此,区间数的距离是准确实数距离的推广。

研究对象的相似程度分析中,信息为精确实数时,对象  $x_i = (x_{i1} x_{i2} \cdots x_{in})$  与对象  $x_j = (x_{j1} x_{j2} \cdots x_{jn})$  的相似系数:

$$s_{ij} = 1 - c \sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}| \quad (3)$$

其中,  $c$  取适当值,使  $0 \leq s_{ij} \leq 1$ ;  $|x_{ik} - x_{jk}|$  是  $x_i$  与  $x_j$  的第  $k$  指标值间的距离。由此,由定义2推广定义对象信息为不确定信息即区间数的相似系数。

定义3 研究对象  $x_i = (x_{i1} x_{i2} \cdots x_{in}) = ([x_{i1}^-, x_{i1}^+][x_{i2}^-, x_{i2}^+] \cdots [x_{in}^-, x_{in}^+])$  与对象  $x_j = (x_{j1} x_{j2} \cdots x_{jn}) = ([x_{j1}^-, x_{j1}^+][x_{j2}^-, x_{j2}^+] \cdots [x_{jn}^-, x_{jn}^+])$  的相似系数:

$$s_{ij} = 1 - c \sum_{k=1}^n d(x_{ik}, x_{jk}) \quad (4)$$

其中,  $d(x_{ik}, x_{jk})$  由定义2的式(2)计算而得,  $c$  取适当值,使  $0 \leq s_{ij} \leq 1$ 。  $s_{ij}$  越大,  $x_i$  与  $x_j$  越相似相近。

假设有  $m$  个待评价优选页岩气区  $A_1, A_2, \cdots, A_m$ , 评价指标  $G_j$  的权重为  $w_j$  ( $0 \leq w_j \leq 1$ ),  $j=1, 2, \cdots, 13$ , 待评

价优选的页岩气区  $A_i$  在评价指标  $G_j$  下的指标值为非负区间数  $a_{ij} \in [a_{ij}^-, a_{ij}^+]$  ( $0 \leq a_{ij}^- \leq a_{ij}^+$ ),  $i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, 13$ 。待评价页岩气区  $A_i$  的评价指标值向量记为:  $a_i = (a_{i1} a_{i2} \cdots a_{i13}) = ([a_{i1}^-, a_{i1}^+][a_{i2}^-, a_{i2}^+] \cdots [a_{i13}^-, a_{i13}^+])$ 。

为消除页岩气区各评价指标值间存在的数量级和量纲差异,采用式(5)标准化各指标值:

$$r_{ij}^- = \frac{a_{ij}^-}{\max_i a_{ij}^+} \quad r_{ij}^+ = \frac{a_{ij}^+}{\max_i a_{ij}^+} \quad (i=1, 2, \cdots, m+9; j=1, 2, \cdots, 13) \quad (5)$$

各评价指标对页岩气有利目标区优选的贡献和重要程度不一样,应分别对待,因此,由定义1构造反映评价指标重要性的加权标准化指标值矩阵:

$$Z = (w_j r_{ij})_{(m+9) \times 13} = \begin{pmatrix} [w_1 r_{11}^-, w_1 r_{11}^+] & [w_2 r_{12}^-, w_2 r_{12}^+] & \cdots & [w_{13} r_{113}^-, w_{13} r_{113}^+] \\ [w_1 r_{21}^-, w_1 r_{21}^+] & [w_2 r_{22}^-, w_2 r_{22}^+] & \cdots & [w_{13} r_{213}^-, w_{13} r_{213}^+] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ [w_1 r_{(m+9)1}^-, w_1 r_{(m+9)1}^+] & [w_2 r_{(m+9)2}^-, w_2 r_{(m+9)2}^+] & \cdots & [w_{13} r_{(m+9)13}^-, w_{13} r_{(m+9)13}^+] \end{pmatrix} \quad (6)$$

理想有利页岩气区、理想较有利页岩气区、理想不利页岩气区在实际中一般不存在,是假想的,实际待评价页岩气区常常是与这三种类型的理想页岩气区更相近、相似,待评价页岩气区  $A_i$  ( $i=1, 2, \cdots, m$ ) 与理想有利页岩气区、理想较有利页岩气区、理想不利页岩气区的相似系数分别由定义3的式(4)衡量,其中与  $A_i$  ( $i=1, 2, \cdots, m$ ) 相似系数最大的理想页岩气区即为页岩气区  $A_i$  ( $i=1, 2, \cdots, m$ ) 的所属类型,同时,每种类型页岩气区中,相似系数越大的页岩气区在该种类型的页岩气区中越优。

## 4 实例计算

四川盆地及周缘发育海相页岩气,通过调研收集了JY1井区龙马溪组、W201井区筇竹寺组、N201井区筇竹寺组、N203井区筇竹寺组和Y1井区龙马溪组等共5个页岩气区块作为实例评价对象,各区块的评价指标数据见表2。根据上述计算公式,利用Excel软件便可快速计算各区块的相似程度系数(表3)。

计算结果表明,JY1井区龙马溪组、N203井区筇竹寺组与理想有利区的相似系数最大,分别为0.9863和0.9787,所以这两个井区为有利区块,且JY1井区优于N203井区;W201井区筇竹寺组、N201井区筇竹寺组与理想较有利区的相似系数最大,分别为

表2 四川盆地典型井区龙马溪组和筇竹寺组页岩气的评价指标取值

Table 2 Evaluation index value of typical district in Sichuan Basin such as Longmaxi district and Qiongzhusi district

评价指标	有效厚度/m	有机碳含量,%	有机质类型	成熟度,%	孔隙度,%	含气量/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	脆性矿物含量,%	裂缝发育程度	压力系数	埋深/m	盖层	地表条件
JY1井区	90~100	1.5~5.89	I	2.3~3.13	3~7.89	2~5.5	33.9~60	小型	1.41~1.45	2300~2800	泥岩	平原、丘陵
页岩气评价区	W201井区	47~57	1.9~3.9	I	2.5~4.5	1.1~2.8	40~50	小型	1.1~1.2	2652~2704	泥岩	丘陵
	N201井区	41~51	2~4.5	I	2.8~3.2	1.7~3.5	40~50	小型	1.18~2.1	2479~2525	泥岩	丘陵
	N203井区	60~70	2.5~4.2	I	2.8~3.2	3.5~6.5	35~45	小型	1.3~1.5	2230~2293	泥岩	丘陵
	Y1井区	30~40	1.5~2.2	II <sub>1</sub>	1.7~1.9	0.8~1.8	42~50	小型	1.1~1.2	2000~2500	泥质砂岩	丘陵

表3 页岩气评价区块的相似程度系数

Table 3 Similarity coefficient of shale gas evaluation block

评价区	理想有利区		理想较有利区				不利区			
	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>	S <sub>14</sub>	S <sub>15</sub>	
JY1井区龙马溪组	0.986 3	0.963 8	0.964 3	0.964 7	0.965 2	0.945 4	0.945 6	0.945 3	0.945 5	
W201井区筇竹寺组	0.968 1	0.984 1	0.984 5	0.986 2	0.986 9	0.971 3	0.971 8	0.969 4	0.969 8	
N201井区筇竹寺组	0.967 8	0.978 8	0.979 2	0.979 9	0.980 4	0.961 1	0.961 2	0.960 3	0.960 4	
N203井区筇竹寺组	0.978 7	0.967 7	0.967 7	0.968 8	0.968 9	0.949 9	0.949 7	0.949 2	0.948 9	
Y1井区龙马溪组	0.961 1	0.989 1	0.979 1	0.987 8	0.987 8	0.981 1	0.980 8	0.983 2	0.982 9	

0.981 8,0.986 9,0.980 4和0.979 1,所以它们属于为较有利区块。以上评价结果与实际页岩气产能特征基本相符,说明该方法有效。

## 5 结论

针对页岩气选区评价诸多因素的不确定性和特殊复杂性,采用模糊相似理论计算评价区块指标值与有利区、较有利区或不利区指标值的相似程度系数。实例计算表明,模糊相似评价法克服了常规方法的不足之处,计算过程的操作性强,能够提高页岩气选区评价结果的可信度。与综合信息叠合法相比,该方法合理有效,简单实用,能够为页岩气有利目标区优选提供可靠依据。

### 参考文献

[1] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.  
 [2] 王世谦,陈更生,董大忠,等.四川盆地地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J].天然气工业,2009,29(5):51-58.

[3] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.  
 [4] 王玉满,董大忠,李建忠,等.川南志留统龙马溪组页岩气储层特征[J].石油学报,2012,33(4):551-561.  
 [5] 黄金亮,邹才能,李建忠,等.川南寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J].石油勘探与开发,2012,39(1):69-75.  
 [6] David G Hill, Tracy E Lombardi, John P Martin. Fractured shale gas potential in New York[J]. Northeastern Geology and Environmental Sciences, 2004, 26(1/2): 57-78.  
 [7] 王世谦,王书彦,满玲,等.页岩气选区评价方法与关键参数[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(6):609-620.  
 [8] 李延钧,刘欢,张烈辉,等.四川盆地南部古生界龙马溪组页岩气评价指标下限[J].中国科学:地球科学,2013,43(7):1 087-1 095.  
 [9] 聂海宽,张金川.页岩气聚集条件及含气量计算——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J].地质学报,2012,86(2):349-361.  
 [10] 郭秀英,陈义才.区间数指标权重确定的一种离差方法[J].统计与决策,2013,29(20):61-63.

(编辑 尹淑容)