

# 页岩气选区评价指标筛选及其权重确定方法

## ——以四川盆地海相页岩为例

郭秀英<sup>1,2</sup> 陈义才<sup>3</sup> 张 鉴<sup>4</sup> 满 玲<sup>4</sup> 郑海桥<sup>3</sup> 童小俊<sup>3</sup> 任东超<sup>3</sup>

1.西南石油大学经济管理学院 2.四川石油天然气发展研究中心 3.成都理工大学 4.中国石油西南油气田公司

郭秀英等.页岩气选区评价指标筛选及其权重确定方法——以四川盆地海相页岩为例.天然气工业,2015,35(10):57-64.

**摘 要** 选择页岩气勘探有利区是一个多指标综合评价的过程,其中,评价指标权重的确定至关重要。针对四川盆地海相页岩具有埋藏生烃史复杂、热演化程度高、经历多期构造运动等特征,筛选出了页岩含气量、页岩有效厚度、有机碳含量等 12 项海相页岩气选区关键评价指标。鉴于该区海相页岩气选区评价指标多且相互之间关系复杂,不易分组分类,再加上评价指标间两两比较相对重要性的 9 等级判断矩阵缺乏一致性,导致评价指标权重难以精确确定。为此,根据改进层次分析法原理,在 3 等级的比较判断调查基础上,构造出评价指标两两比较相对重要性的一致性判断矩阵,同时提出了评价指标主观权重确定改进特征向量法;鉴于主、客观赋权法的不足,进一步提出了综合页岩气选区评价指标主、客观权重的综合权重确定法,并以四川盆地 5 个海相页岩气区块为例,分析了该方法的可行性与合理性。结论认为:改进的特征向量法克服了层次分析法、特征向量法中判断矩阵的不足,而采用综合权重确定法获得的评价指标权重更能准确体现各评价指标对页岩气选区的重要程度。

**关键词** 四川盆地 海相页岩 页岩气选区 评价指标 权重 改进特征向量法 综合权重确定法 改进层次分析法

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2015.10.007

## Assessment index selection and weight determination of shale gas plays:

### A case study of marine shale in the Sichuan Basin

Guo Xiuying<sup>1,2</sup>, Chen Yicai<sup>3</sup>, Zhang Jian<sup>4</sup>, Man Ling<sup>4</sup>, Zheng Haiqiao<sup>3</sup>, Tong Xiaojun<sup>3</sup>, Ren Dongchao<sup>3</sup>  
(1.College of Economics & Management, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2.Sichuan Oil and Gas Development Research Center, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3.Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4.PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 35, ISSUE 10, pp.57-64, 10/25/2015. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** It is a multi-index comprehensive evaluation process to select favorable shale gas plays, in which the determination of assessment index weights is crucial. Marine shale in the Sichuan Basin is characterized by complex burial and hydrocarbon generation histories, high thermal evolution degree, and multiphase tectonic movements. In view of all these characteristics, 12 key assessment indexes for marine shale gas play selection were selected, such as shale gas content, net shale thickness and TOC. Because there are so many assessment indexes that are related in a complicated manner, it is hard to realize index grouping and classifying. Besides, there is no consistency of the 9-grade judgment matrix which is used to evaluate relative importance between the assessment indexes. Therefore, it is difficult to determine the weights of assessment indexes accurately. According to the principle of the improved AHP, the consistency judgment matrix was constructed to evaluate the relative importance between the assessment indexes on the basis of 3-grade comparative judgment and investigation. Furthermore, an improved eigenvector method was proposed for subjective weights of the assessment indexes. Considering the disadvantages of objective and subjective weight determining methods, an integrated weighting method was put forward with subjective weights and objective weights of the assessment indexes combined. This method was analyzed in terms of its feasibility and rationality with five marine shale gas plays in the Sichuan Basin as examples. It is concluded that the defects of judgment matrix established by AHP and eigenvector method are eliminated by the improved eigenvector method, and the importance level of each assessment index for shale gas play selection can be accurately presented by the assessment index weights which are computed by the integrated weighting method.

**Keywords:** Sichuan Basin; Marine shale; Shale gas play selection; Assessment index; Weight; Improved eigenvector method; Integrated weighting method; Improved analytical hierarchy process (AHP)

**基金项目:**国家科技重大专项“页岩气勘探开发关键技术——南方海相页岩气开采试验”(编号:2012ZX05018-006)、四川省社会科学重点研究基地四川石油天然气发展研究中心 2015 年度资助项目“四川盆地及周缘海相页岩气有利目标区优选方法研究”(编号:川油气科 SKA15-01)。

**作者简介:**郭秀英,女,1962 年生,副教授,硕士生导师;现从事综合评价及优化决策研究工作。地址:(610500)四川省成都市新都新都区新都大道 8 号西南石油大学。E-mail:guoxiuying@swpu.edu.cn

**通信作者:**陈义才,1963 年生,副教授,硕士生导师;现从事非常规油气地质综合评价研究工作。地址:(610059)四川省成都市成华区二仙桥东三路 1 号成都理工大学。E-mail:cdlgcyc@126.com

开展页岩气勘探开发有利区的优选是能否获得页岩气商业性开发的重要前提,而选区评价指标的合理设置与权重的合理确定对选区评价结果的可靠性和正确性至关重要。近年来的勘探成果表明,我国海相页岩气的勘探前景明显优于陆相页岩气<sup>[1]</sup>,其中四川盆地是已取得页岩气勘探突破和商业开发的最现实区域。因此,深入研究海相页岩气选区评价指标的合理设置及其权重的确定方法,在四川盆地优选出可供商业开发的页岩气勘探开发有利区,具有重要的现实价值和理论意义。

迄今为止,我国南方海相页岩气选区评价指标的研究成果较多,主要采用了与美国页岩气选区评价指标进行类比的方法<sup>[2-6]</sup>。页岩气选区评价指标的权重确定方法主要有以下:①利用层次分析法确定<sup>[7-8]</sup>,但思路欠清晰,可操作性欠佳;②根据各评价指标对页岩气富集影响程度的大小,直接人为给定<sup>[9-10]</sup>,但其随意性和主观性较大;③专家打分法,以不同专家给出权重的平均值作为相应评价指标的权重<sup>[11]</sup>,但所获的各评价指标权重难以满足归一化条件,准确性较差。由于页岩气选区评价指标多而复杂,且各评价指标间相互影响、相互联系<sup>[12]</sup>,加之人为判断的局限性,所以往往难以直接准确地判定出各评价指标的重要程度权重值,或两评价指标间相对重要程度的多等级判断值。鉴于此,笔者在前人研究的基础上,针对四川盆地海相页岩气成藏特征,综合考虑页岩气富集成藏的地下地质因素,并结合地面因素,根据改进层次分析法和特征向量法的基本原理,提出一种更合理、更具可操作性的页岩气选区评价指标主观权重确定方法。针对主观权重受人为因素影响以及客观权重有时与实际相悖的情况,进一步提出一种综合主、客观权重的综合权重确定方法。

## 1 选区评价指标筛选

页岩气富集成藏是由多种地质因素共同作用的结果。合理、有效地优选页岩气勘探开发有利区,不仅要考虑页岩气成藏的地下地质条件,同时还要考虑页岩气开发的工程及地面因素。

### 1.1 页岩气成藏地质条件

页岩气作为典型的源内气,其成藏地质条件包括生烃、储集以及保存三个方面。页岩气的生成取决于页岩有机碳含量(TOC)、有机质类型、热演化成熟度( $R_o$ )和有效厚度等因素。页岩的 TOC 越高,不仅生气能力增强,而且有利于页岩有机孔的发育和吸附气

含量的增加。有机质类型既影响页岩的生气能力,也影响页岩的含气量<sup>[13]</sup>。页岩有机质热生烃演化经过生油高峰之后才有利于气态烃的大量生成。腐殖型干酪根和腐泥型干酪根液态烃生成高峰的  $R_o$  分别为 1.0%~1.3% 和 1.3%~1.5%<sup>[14]</sup>。页岩有效厚度一般是指  $TOC > 2\%$  的单层页岩厚度或含有少量砂岩等夹层的页岩连续厚度<sup>[15]</sup>。页岩有效厚度是影响页岩气藏储量丰度大小的重要因素之一,页岩有效厚度越大,单位面积页岩气储量丰度越高。

商业性开发的页岩气藏必须具有足够的含气量,而影响页岩储层含气量的因素主要包括:页岩基质与裂缝的储集空间、孔隙流体类型、地层压力与温度。页岩的孔隙是页岩气储集的主要空间,页岩孔隙度越大,含气饱和度越高,页岩储集的游离气越多。高一过成熟页岩的孔隙流体主要是气相(包括游离气、吸附气)和水相,油相所占比例很低。地层温度升高导致吸附气含量降低,而压力增加则使吸附气含量升高。页岩气在组成上以甲烷为主,重烃气体含量低,近似于理想气体。根据波马定律,理想气体在等容空间内,压力升高一倍,相当于该容积内的气体质量增加一倍。因此,在页岩储集空间大小保持不变的情况下,地层压力升高,可显著提升页岩对游离气的可容纳空间。

页岩气虽然具有自身封闭成藏的特征,即页岩有机质生成的天然气依靠自身的毛细管力、固体表面吸附力进行封闭成藏,但是页岩气的甲烷分子半径小、活动性强,页岩气在漫长的地质时期需要一定的保存条件才能形成具有工业价值的页岩气藏。页岩气的保存条件主要包括致密岩性的顶、底板盖层和埋深以及断层等。厚度大而岩性致密的顶、底盖层可以有效抑制页岩气散失,使页岩气得以更加有效保存,同时对页岩气目的层段的人工压裂具有良好的“阻隔”作用,有利于页岩气的开采。页岩储层的埋深是影响页岩气成藏和页岩气勘探开发成本的重要因素<sup>[3]</sup>。页岩储层的埋深较浅时,降低页岩气盖层的封闭性,不利于页岩气的保存,但是埋深过大时,会增大页岩气的开发成本。断层作为油气垂向运移的重要通道,不利于页岩气的保存<sup>[16-17]</sup>。在构造相对稳定地区,地层倾角较小,大—中型断层较少,有利于页岩气的保存,如 Barnett 页岩气藏高产井一般都分布在断层不发育区域<sup>[18]</sup>。四川盆地威远、长宁以及焦石坝地区页岩气高产井,均距离大、中型断层 2~3 km。因此,页岩气勘探开发选区时,应远离断层发育带,特别是

远离大型断层和通天断层发育带<sup>[19]</sup>。

1.2 页岩储层压裂工程条件

页岩气藏是典型的致密气藏,储层孔隙介质的渗透率低,裂缝对页岩气藏的商业开采至关重要。页岩气藏要进行长期稳定的商业化开采必须依靠人工压裂改造页岩的渗流条件。页岩人工压裂形成的裂缝发育程度与页岩矿物组成、力学性质关系密切,区域构造应力场也具有一定影响。页岩的石英、长石及碳酸盐类等矿物含量越大,黏土矿物中的膨胀性矿物如蒙脱石的含量越低,页岩脆性越好,人工压裂的裂缝越发育。国内外页岩气商业开发经验表明,静态泊松比低于 0.25,杨氏模量高于  $2.0 \times 10^4$  MPa,脆性矿物(硅质及碳酸盐类矿物)含量大于 40%的页岩气储层有利于压裂增产改造<sup>[6]</sup>。

1.3 页岩气开发地面条件

页岩气储层致密,直井产能较低,为了提高页岩气开发经济效益,必须采用水平钻井和水力压裂改造技术。根据文献报道<sup>[20]</sup>,当页岩气水平钻井的水平井段

长度约为 1 km 时,单井平均压裂施工用水量可达  $1.5 \times 10^4$  m<sup>3</sup>。因此,水资源、地形、道路交通和天然气管网设施等地面条件在一定程度上对页岩气的大规模商业性开发具有制约作用。四川盆地的页岩气资源主要分布在川东和川南地区,地表以丘陵为主,部分地区为低山。水资源、道路交通及天然气管网设施在不同地区也存在一定差异。

综上可知,页岩气选区评价涉及页岩气成藏、压裂工程以及地面条件共 20 多项评价指标,如表 1 所示。针对四川盆地页岩气勘探开发现状,页岩气选区评价的指标设置应侧重于反映页岩气成藏特征。因此,笔者在前人关于页岩气选区评价指标的相关研究成果基础上,按照系统性和可操作性原则,筛选出 12 项关键评价指标,其中页岩气成藏地质条件的评价指标共 9 项;有效厚度、TOC、R<sub>o</sub>、孔隙度、含气量、断层类型、压力系数、埋深、盖层厚度,压裂工程方面只考虑页岩脆性矿物含量,地面条件主要考虑地形坡度和天然气管网设施。

表 1 页岩气选区的基本条件与评价指标筛选表

| 基本条件   | 评价指标                                                                                                     | 关键指标                                                   |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 成藏地质条件 | 生烃:TOC;有机质类型;R <sub>o</sub> ;有效厚度<br>储集:孔隙度;渗透率;地层压力;地层温度;含气饱和度;含气量<br>保存:盖层岩性;盖层厚度;页岩气埋深;地层倾角;断层类型;压力系数 | TOC;R <sub>o</sub> ;有效厚度;孔隙度;含气量;<br>断层类型;压力系数;埋深;盖层厚度 |
| 压裂工程条件 | 地应力场;页岩矿物组成;泊松比;杨氏模量                                                                                     | 脆性矿物含量                                                 |
| 地面条件   | 水资源;地形坡度;道路交通;天然气管网设施                                                                                    | 地形坡度;天然气管网设施                                           |

2 选区评价指标权重确定方法

评价指标权重反映评价指标在页岩气选区中的重要程度,其取值的恰当与否,直接影响到被评价对象综合评价结果的可靠性和准确性。目前为止有两大类评价指标权重确定方法,即客观赋权法和主观赋权法。

客观赋权法是根据各评价个体在评价指标下的指标值差异的大小来确定评价指标的权重,各评价个体在某评价指标下指标值差异越大,该评价指标权重越大,反之,该评价指标权重越小。客观赋权法的特点是确定的评价指标权重具有绝对的客观性,无主观影响,但确定的权重有时与实际相悖。客观赋权法已有较多的研究,其中离差法、熵值法符合客观赋权法的基本思想和原理,是较好的客观赋权法<sup>[21-22]</sup>。主观赋权法是依据专家经验主观判断而获得各评价指标权重。常用

的成熟方法包括 Delphi 法、层次分析法、特征向量法等。主观赋权法的原理简单,确定的评价指标权重能反映评价指标实际重要程度大小,但主观随意性大,并且评价指标较多时,评价指标绝对重要程度或相对重要程度大小难以判定准确。

四川盆地海相页岩气选区评价指标较多,由于页岩气勘探程度低,积累的经验较少,难以对各评价指标的重要程度作出明确判定。因此,页岩气选区的各评价指标权重难以凭借人的主观判断直接准确地合理给出。另一方面,页岩气选区的各评价指标间又相互联系,相互影响与制约,难以恰当分组分类,建立起层次分析结构模型。此外,还难以准确给出评价指标间两两比较相对重要性的 9 等级判断及其标度值<sup>[23]</sup>,使得相应的判断矩阵难以具有满意的一致性。因此,页岩气选区评价指标的权重难以直

接用层次分析法或特征向量法准确确定。但当评价指标间两两比较相对重要性的等级划分数量较少时(比如 3 等级划分时),对其相对重要性的判断及其标度值准确性将大大提高。因此,笔者采用改进层次分析法的判断矩阵构造方法构造特征向量法中的一致性判断矩阵,提出以下页岩气选区评价指标主观权重确定的改进特征向量法。为避免客观赋权法与主观赋权法的不足,进一步给出一种综合页岩气选区评价指标主、客观权重的综合权重确定法,以使获得的评价指标权重更客观、合理。

## 2.1 改进特征向量法

### 2.1.1 改进特征向量法的原理

设四川盆地海相页岩气选区的 12 项评价指标:有效厚度、TOC、 $R_o$ 、孔隙度、含气量、断层类型、压力系数、埋深、盖层厚度、脆性矿物含量、地形坡度、天然气管网设施依次为: $G_1$ 、 $G_2$ 、 $\dots$ 、 $G_{12}$ ,各评价指标关于页岩气选区两两比较相对重要性的判断一致性矩阵为  $\mathbf{B} = (b_{ij})_{12 \times 12}$ 。其构造如下<sup>[23]</sup>:

1) 以 3 标度法构造评价指标的比较矩阵  $\mathbf{C}$

当  $G_i$ 、 $G_j$  两个评价指标关于页岩气选区比较时,若  $G_i$  比  $G_j$  重要,则以“2”标度。若与同等重要,则以“1”标度。若  $G_i$  没有  $G_j$  重要,则以“0”标度。设 12 项评价指标间关于页岩气选区两两比较相对重要性的比较矩阵为:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{112} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{212} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{121} & C_{122} & \dots & C_{1212} \end{pmatrix}$$

其中:

$$C_{ij} = \begin{cases} 2 & G_i \text{ 指标比 } G_j \text{ 指标重要} \\ 1 & G_i \text{ 指标与 } G_j \text{ 指标同等重要} \\ 0 & G_i \text{ 指标没有 } G_j \text{ 指标重要} \end{cases}$$

2) 构造初始判断矩阵  $\mathbf{B}'$

记:

$$r_i = \sum_{j=1}^{12} C_{ij} \quad (i=1,2,\dots,12) \quad (1)$$

则初始判断矩阵  $\mathbf{B}'$  的元素:

$$b'_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{t_{\max} - r_{\min}}(b'_m - 1) + 1 & (r_i > r_j) \\ 1 & (r_i = r_j) \\ \left[ \frac{r_j - r_i}{r_{\max} - r_{\min}}(b'_m - 1) + 1 \right]^{-1} & (r_i < r_j) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{其中, } b'_m = \frac{r_{\max}}{r_{\min}}, r_{\max} = \max_{1 \leq i \leq 12} r_i, r_{\min} = \min_{1 \leq i \leq 12} r_i。$$

$\mathbf{B}'$  往往不具判断一致性。为此对  $\mathbf{B}'$  进行改进,使之具判断一致性。

3) 构造满意一致性判断矩阵  $\mathbf{B}$

令:

$$a_{ij} = \lg b'_{ij} \quad i, j = 1, 2, \dots, 12 \quad (3)$$

$$G_{ij} = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} (a_{ik} - a_{jk}) \quad (4)$$

$$b_{ij} = 10^{G_{ij}} \quad (5)$$

则  $\mathbf{B} = (b_{ij})_{12 \times 12}$ , 具有判断一致性。

根据特征向量法的原理,  $\mathbf{B}$  的最大特征根对应的归一化特征向量的各分量,依次为各评价指标  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $\dots$ 、 $G_{12}$  的权重。 $\mathbf{B}$  的最大特征根对应的归一化特征向量可由近似算法和积法或方根法求得<sup>[23]</sup>。

比较矩阵  $\mathbf{C}$  的获得取决于人的主观判断。为获得客观合理的比较矩阵,采用问卷调查法:以 3 标度法将各评价指标相对于页岩气选区两两比较相对重要性判断标度拟定调查表,征询各位被调查者的意见,然后统计评价指标间两两比较相对重要性的各被调查者判断标度值,以各位被调查者判断标度值的众数作为其相对重要性比较判断标度值。这样便能更客观合理地代表各位被调查者的综合意见。

### 2.1.2 改进特征向量法确定权重的程序

1) 依据四川盆地海相页岩气选区评价指标,拟定各评价指标间关于页岩气选区两两比较相对重要性的调查问卷。若评价指标  $G_i$  比  $G_j$  重要,则判断标度值为 2;若评价指标  $G_i$  与  $G_j$  同等重要,则判断标度值为 1;若评价指标  $G_i$  没有  $G_j$  重要,则判断标度值为 0。

2) 选择熟悉页岩气评价区域,并有丰富经验或理论知识的页岩气勘探开发管理者、研发者和实践者 10 人及以上作为被调查者,咨询页岩气选区评价指标间关于页岩气选区两两比较的相对重要性,填写调查问卷。

3) 综合统计各位被调查者的意见。以各位被调查者意见的众数作为相应评价指标间关于页岩气选区两两比较相对重要性判断标度值,构造比较矩阵  $\mathbf{C}$ 。

4) 按式(1)~(5)变换比较矩阵  $\mathbf{C}$ , 获得评价指标间关于页岩气选区两两比较相对重要性的判断一致性矩阵  $\mathbf{B}$ 。

5) 用和积法或方根法求判断一致性矩阵  $\mathbf{B}$  的最大特征根对应的归一化特征向量,即得页岩气选区的

各评价指标主观权重。

2.2 综合权重确定法

设以本文参考文献[21]或[22]确定的四川盆地海相页岩气待评价区域评价指标的客观权重为  $w_{k1}$ 、 $w_{k2}$ 、 $\cdots$ 、 $w_{k12}$ ，以改进特征向量法确定的四川盆地海相页岩气待评价区域评价指标的主观权重为  $w_{z1}$ 、 $w_{z2}$ 、 $\cdots$ 、 $w_{z12}$ 。那么，四川盆地海相页岩气待评价区域评价指标的客观合理的综合权重为：

$$w_j = \frac{w_{kj}w_{zj}}{\sum_{j=1}^n w_{kj}w_{zj}} \quad (j=1,2,\cdots,12) \quad (6)$$

该权重能更客观、更合理地反映四川盆地海相页岩气待评价区域各评价指标的重要程度。

3 实例分析

通过调研收集了四川盆地 5 个海相页岩气区块  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$  的评价指标数据资料(表 2)。用笔者提出的权重确定方法进行该 5 个待评价页岩气区的评价指标权重确定分析。

3.1 客观权重确定

依据表2所示的待评价页岩气区的评价指标值，

利用本文参考文献[21]的客观权重确定熵值法，计算出待评价页岩气区的各评价指标的客观权重如表 3 所示。含气量指标权重最大，有机碳含量指标权重次大，是由于该 5 个页岩气区的含气量指标值差异最大、页岩有机碳含量指标值差异次大；成熟度指标权重最小，脆性矿物含量指标权重次小，是由于该 5 个页岩气区的成熟度指标值差异最小、脆性矿物含量指标值差异次小。符合客观赋权法的原理。但断层类型、盖层厚度、埋深等保存条件的重要程度权重相当或弱于天然气管网设施、地形坡度等地面条件的重要程度权重，与四川盆地海相页岩气选区要特别重视保存条件相悖。主要是由于该 5 个页岩气区的地面条件指标值的偏差 不弱于其保存条件指标值的偏差所致，可由主观赋权法弥补。

3.2 主观权重确定

为获得能反映四川盆地 5 个海相页岩气区评价指标实际重要程度大小的权重，依据改进特征向量法原理，将选区评价指标拟成调查问卷，咨询对该 5 个海相页岩气区勘探开发有丰富经验或理论知识的专家、学者意见。共发放调查问卷 20 份，收回有效调查问卷 15 份。以众数综合 15 位专家意见，获得该 5 个海相

表 2 待评价页岩气区的评价指标值表

| 评价指标                                   | $A_1$       | $A_2$       | $A_3$       | $A_4$       | $A_5$       |
|----------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 有效厚度/m                                 | 70~90       | 35~45       | 47~57       | 41~51       | 40~50       |
| 有机碳含量                                  | 1.5%~6.0%   | 2.0%~2.3%   | 1.9%~4.0%   | 2.0%~4.8%   | 3.0%~3.5%   |
| 成熟度                                    | 2.3%~3.0%   | 2.5%~3.2%   | 2.5%~3.0%   | 2.8%~3.2%   | 3.5%~4.0%   |
| 孔隙度                                    | 3.0%~6.0%   | 3.0%~5.0%   | 1.5%~3.5%   | 3.0%~6.0%   | 2.0%~4.0%   |
| 含气量/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> ) | 2.0~5.5     | 2.2~4.5     | 1.1~2.8     | 1.7~3.5     | 1.0~1.5     |
| 脆性矿物含量                                 | 34%~65%     | 45%~60%     | 35%~55%     | 40%~50%     | 30%~45%     |
| 断层类型                                   | 小型          | 小型          | 小型          | 小型          | 中型          |
| 压力系数                                   | 1.41~1.45   | 1.15~1.20   | 1.1~1.2     | 1.8~2.1     | 1.0~1.1     |
| 埋深/m                                   | 2 300~2 800 | 1 500~1 600 | 2 652~2 704 | 2 479~2 525 | 2 200~2 300 |
| 盖层厚度/m                                 | 140~160     | 90~110      | 120~150     | 160~190     | 80~110      |
| 地形坡度/(°)                               | 10~15       | 12~17       | 12~17       | 15~22       | 17~25       |
| 天然气管网设施                                | 较全          | 较全          | 较全          | 较全          | 较少          |

表 3 评价指标客观权重表

| 评价指标 | 有效厚度      | 有机碳含量     | 成熟度       | 孔隙度       | 含气量       | 脆性矿物含量    |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 权重   | 0.102 606 | 0.112 758 | 0.027 033 | 0.086 595 | 0.192 985 | 0.027 957 |
| 评价指标 | 断层类型      | 压力系数      | 埋深        | 盖层厚度      | 地形坡度      | 天然气管网设施   |
| 权重   | 0.087 057 | 0.083 64  | 0.052 45  | 0.084 945 | 0.054 917 | 0.087 057 |

页岩气区的 12 项评价指标间两两比较相对重要性的比较矩阵  $C$ ：

|          | $G_1$ | $G_2$ | $G_3$ | $G_4$ | $G_5$ | $G_6$ | $G_7$ | $G_8$ | $G_9$ | $G_{10}$ | $G_{11}$ | $G_{12}$ |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| $G_1$    | 1     | 0     | 1     | 2     | 0     | 2     | 1     | 2     | 2     | 2        | 2        | 2        |
| $G_2$    | 2     | 1     | 1     | 2     | 1     | 2     | 1     | 1     | 2     | 1        | 2        | 2        |
| $G_3$    | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 2     | 2        | 2        | 2        |
| $G_4$    | 0     | 0     | 2     | 1     | 0     | 2     | 1     | 1     | 2     | 2        | 2        | 2        |
| $G_5$    | 2     | 1     | 2     | 2     | 1     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2        | 2        | 2        |
| $G_6$    | 0     | 0     | 2     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 2     | 2        | 2        | 2        |
| $G_7$    | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 1     | 1     | 1     | 2     | 2        | 2        | 2        |
| $G_8$    | 0     | 1     | 1     | 1     | 0     | 1     | 1     | 1     | 2     | 2        | 2        | 2        |
| $G_9$    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1        | 2        | 2        |
| $G_{10}$ | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1        | 2        | 2        |
| $G_{11}$ | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 1        | 1        |
| $G_{12}$ | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        | 1        | 1        |

按式(1)~(5)变换比较矩阵  $C$ ，得到四川盆地该 5 个海相页岩气区的 12 项评价指标间两两比较相对重要性的判断一致性矩阵  $B$ ，如表 4 所示。

表 4 判断一致性矩阵  $B$  的各元素值表

|          | $G_1$       | $G_2$       | $G_3$       | $G_4$       | $G_5$       | $G_6$       | $G_7$       | $G_8$       | $G_9$     | $G_{10}$    | $G_{11}$  | $G_{12}$  |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|
| $G_1$    | 1           | 0.834 542 6 | 2.300 819 1 | 1.487 236 9 | 0.483 265 5 | 2.300 819 1 | 1.487 236 9 | 1.853 403   | 6.818 425 | 5.838 386 8 | 11.774 42 | 11.774 42 |
| $G_2$    | 1.198 261 2 | 1           | 2.756 982 3 | 1.782 098 3 | 0.579 078 3 | 2.756 982 3 | 1.782 098 3 | 2.220 861   | 8.170 254 | 6.995 912 6 | 14.108 84 | 14.108 84 |
| $G_3$    | 0.434 627 8 | 0.362 715 4 | 1           | 0.646 394 5 | 0.210 040 6 | 1           | 0.646 394 5 | 0.805 540 5 | 2.963 477 | 2.537 525 3 | 5.117 493 | 5.117 493 |
| $G_4$    | 0.672 387 9 | 0.561 136 3 | 1.547 042 8 | 1           | 0.324 941 8 | 1.547 042 8 | 1           | 1.246 205 7 | 4.584 626 | 3.925 660 3 | 7.916 98  | 7.916 98  |
| $G_5$    | 2.069 256 1 | 1.726 882 3 | 4.760 983 9 | 3.077 473 9 | 1           | 4.760 983 9 | 3.077 473 9 | 3.835 165 4 | 14.109 07 | 12.081 117  | 24.364 3  | 24.364 3  |
| $G_6$    | 0.434 627 8 | 0.362 715 4 | 1           | 0.646 394 5 | 0.210 040 6 | 1           | 0.646 394 5 | 0.805 540 5 | 2.963 477 | 2.537 525 3 | 5.117 493 | 5.117 493 |
| $G_7$    | 0.672 387 9 | 0.561 136 3 | 1.547 042 8 | 1           | 0.324 941 8 | 1.547 042 8 | 1           | 1.246 205 7 | 4.584 626 | 3.925 660 3 | 7.916 98  | 7.916 98  |
| $G_8$    | 0.539 548 1 | 0.450 275 8 | 1.241 402 5 | 0.802 435 8 | 0.260 744 9 | 1.241 402 5 | 0.802 435 8 | 1           | 3.678 868 | 3.150 090 3 | 6.352 868 | 6.352 868 |
| $G_9$    | 0.146 661 4 | 0.122 395 2 | 0.337 441 4 | 0.218 120 3 | 0.070 876 4 | 0.337 441 4 | 0.218 120 3 | 0.271 822 7 | 1         | 0.856 266 2 | 1.726 854 | 1.726 854 |
| $G_{10}$ | 0.171 280 2 | 0.142 940 6 | 0.394 084 7 | 0.254 734 2 | 0.082 773 8 | 0.394 084 7 | 0.254 734 2 | 0.317 451 2 | 1.167 861 | 1           | 2.016 726 | 2.016 726 |
| $G_{11}$ | 0.084 929 8 | 0.070 877 6 | 0.195 408 2 | 0.126 310 8 | 0.041 043 7 | 0.195 408 2 | 0.126 310 8 | 0.157 409 2 | 0.579 088 | 0.495 853 3 | 1         | 1         |
| $G_{12}$ | 0.084 929 8 | 0.070 877 6 | 0.195 408 2 | 0.126 310 8 | 0.041 043 7 | 0.195 408 2 | 0.126 310 8 | 0.157 409 2 | 0.579 088 | 0.495 853 3 | 1         | 1         |

表 5 评价指标主观权重表

| 评价指标 | 有效厚度      | 有机碳含量     | 成熟度       | 孔隙度       | 含气量       | 脆性矿物含量    |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 权重   | 0.133 175 | 0.159 579 | 0.057 882 | 0.089 545 | 0.275 574 | 0.057 882 |
| 评价指标 | 断层类型      | 压力系数      | 埋深        | 盖层厚度      | 地形坡度      | 天然气管网设施   |
| 权重   | 0.089 545 | 0.071 854 | 0.019 532 | 0.022 810 | 0.011 311 | 0.011 311 |

表 6 评价指标综合权重表

| 评价指标 | 有效厚度        | 有机碳含量       | 成熟度         | 孔隙度       | 含气量         | 脆性矿物含量      |
|------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| 权重   | 0.119 706 2 | 0.157 632   | 0.013 707 5 | 0.067 929 | 0.465 889 6 | 0.014 176 1 |
| 评价指标 | 断层类型        | 压力系数        | 埋深          | 盖层厚度      | 地形坡度        | 天然气管网设施     |
| 权重   | 0.068 291 4 | 0.052 651 7 | 0.008 975   | 0.016 974 | 0.005 442   | 0.008 626   |

用和积法求判断一致性矩阵  $B$  的最大特征根对应的归一化特征向量，即得该 5 个海相页岩气区评价指标的主观权重，如表 5 所示。含气量的权重最大，其次是气源物质基础的权重，再次是页岩气富集的保存因素和储集因素的权重，地面因素的权重最小。这与页岩气区是否商业勘探开发，首先要看其含气量和气源物质基础；其次要看页岩气富集的保存和储集因素，并特别重视四川盆地海相页岩气保存条件与实际相符。但所确定的权重受被咨询专家、学者的数量及其经验、知识等的影响。为避免该不足，常常采用客观赋权法弥补。

3.3 综合权重确定

综上分析，要获得既能反映该 5 个海相页岩气区评价指标实际重要程度，又能一定程度上避免专家、学者的主观随意性的合理权重，只有综合主、客观权重。因此，按式(6)综合 5 个页岩气区选区评价指标的客观权重(表 3)和主观权重(表 5)，得到这 5 个页岩气区选区评价指标的综合权重，如表 6 所示。该权重既体现

了对该5个页岩气区选区评价时,指标值差异越小的评价指标越不看重,又体现了评价指标对页岩气有利目标区优选的实际重要程度。因此,该权重更能体现对该5个页岩气区选区时,对各评价指标的实际看重程度。

值得指出的是,由于样本、资料的限制,实例分析得出的权重在一定程度上反映了该5个海相页岩气区评价指标的实际重要性。但随着样本、资料的增加,由笔者方法得出的评价指标权重更能反映这5个海相页岩气区评价指标的实际重要性。

## 4 结论

1)综合考虑四川盆地海相页岩气的地下地质条件、压裂工程条件和地面条件,筛选出了四川盆地海相页岩气选区的12项关键性评价指标。

2)基于能准确断定评价指标间两两比较相对重要或同等重要或不重要的改进特征向量法,能充分利用熟悉四川盆地海相页岩气勘探开发领域人员的丰富经验和知识,获得评价指标间相对重要性的恰当判断,克服了层次分析法、特征向量法中的判断矩阵难以满足满意一致性的不足。

4)综合权重确定法在一定程度上弥补了主、客观权重的不足,使评价指标权重更能体现各评价指标对待页岩气区选区的实际重要程度。

5)四川盆地海相页岩气选区评价指标主、客观权重确定分析,受资料收集的限制,样本量偏少。后续研究中需进一步调研收集更多资料数据,以获得更能体现评价区域页岩气选区各评价指标实际重要程度的权重。

致谢:王世谦教授级高级工程师在本文编写和修改过程中提供了宝贵建议,在此表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] 王世谦.中国页岩气勘探评价若干问题综述[J].天然气工业,2013,33(12):13-29.  
Wang Shiqian.Shale gas exploration and appraisal in China: Problems and discussion[J].Natural Gas Industry,2013,33(12):13-29.
- [2] 张金川,林腊梅,李玉喜,姜生玲,刘锦霞,姜文利,等.页岩气资源评价方法与技术:概率体积法[J].地学前缘,2012,19(2):184-191.  
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, Jiang Shengling, Liu Jinxia, Jiang Wenli, et al.The method of shale gas assessment: probability volume [J]. Earth Science Frontiers, 2012,19(2):184-191.
- [3] 李玉喜,张金川,姜生玲,韩双彪.页岩气地质综合评价和目标优选[J].地学前缘,2012,19(5):332-338.  
Li Yuxi, Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Han Shuangbiao.Geologic evaluation and targets optimization of shale gas [J].Earth Science Frontiers,2012,19(5):332-338.
- [4] 黄金亮,邹才能,李建忠,董大忠,王社教,王世谦,等.川南志留系龙马溪组页岩气形成条件与有利区分析[J].煤炭学报,2012,37(5):782-787.  
Huang Jinliang, Zou Caineng, Li Jianzhong, Dong Dazhong, Wang Shejiao, Wang Shiqian, et al.Shale gas accumulation conditions and favorable zones of Silurian Longmaxi Formation in South Sichuan Basin, China[J].Journal of China Coal Society,2012,37(5):782-787.
- [5] 梁兴,叶熙,张介辉,舒红林.滇黔北坳陷威信凹陷页岩气成藏条件分析与有利区优选[J].石油勘探与开发,2011,38(6):693-699.  
Liang Xing, Ye Xi, Zhang Jiehui, Shu Honglin.Reservoir forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in the Weixin Sag, Dianqianbei Depression[J].Petroleum Exploration and Development,2011,38(6):693-699.
- [6] 王世谦,王书彦,满玲,董大忠,王玉满.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.  
Wang Shiqian, Wang Shuyan, Man Ling, Dong Dazhong, Wang Yuman.Appraisal method and key parameters for screening shale gas play[J].Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2013, 40(6):609-620.
- [7] 李武广,杨胜来.页岩气开发目标区优选体系与评价方法[J].天然气工业,2011,31(4):59-62.  
LI Wuguang, Yang Shenglai. An optimal system and evaluation methods of ranking shale gas development prospective zones[J].Natural Gas Industry,2011,31(4):59-62.
- [8] 李武广,杨胜来,王珍珍,董谦,吴克柳,王海洋.基于模糊优化分析法的页岩气开发选区模型[J].煤炭学报,2013,38(2):264-270.  
Li Wuguang, Yang Shenglai, Wang Zhenzhen, Dong Qian, Wu Keliu, Wang Haiyang. Shale gas development evaluation model based on the fuzzy optimization analysis [J].Journal of China Coal Society,2013,38(2):264-270.
- [9] 李延钧,刘欢,刘佳霞,曹利春,贾学成.页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(2):28-34.  
LI Yanjun, Liu Huan, Liu Jiaxia, Cao Lichun, Jia Xuecheng. Geological regional selection and an evaluation method of resource potential of shale gas[J].Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011,33(2):28-34.

- [10] 李延钧,刘欢,张烈辉,吕宗刚,李其荣,黄勇斌.四川盆地南部下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):1088-1095.  
Li Yanjun, Liu Huan, Zhang Liehui, Lü Zonggang, Li Qirong, Huang Yongbin. Lower limits of evaluation parameters for the Lower Paleozoic Longmaxi shale gas in southern Sichuan Province[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(7): 1088-1095.
- [11] 任垒,窦斌,刘国良,朱珊珊.基于模糊综合评价法的四川盆地地下侏罗统陆相页岩气地质选区[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2012,34(9):177-180.  
Ren Lei, Dou Bin, Liu Guoliang, Zhu Shanshan. Geological and regional selection of shale-gas in Lower Jurassic of Sichuan basin based on comprehensive fuzzy evaluation [J]. Journal of Oil and Gas Technology—Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2012, 34(9): 177-180.
- [12] 范柏江,师良,庞雄奇.页岩气成藏特点及勘探选区条件[J].油气地质与采收率,2011,18(6):9-13.  
Fan Bojiang, Shi Liang, Pang Xiongqi. Accumulation characteristics and exploration screening of shale[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(6): 9-13.
- [13] 黄金亮,邹才能,李建忠,董大忠,王社教,王世谦,等.川南下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.  
Huang Jinliang, Zou Caineng, Li Jianzhong, Dong Dazhong, Wang Shejiao, Wang Shiqian, et al. Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Southern Sichuan Basin, China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 69-75.
- [14] Burnaman MD, Xia Wenwu, Shelton J. Shale gas play screening and evaluation criteria[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(3): 51-64.  
Burnaman MD, Xia Wenwu, Shelton J. Shale gas play screening and evaluation criteria[J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3): 51-64.
- [15] 王世谦,陈更生,董大忠,杨光,吕宗刚,徐云浩,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.  
Wang Shiqian, Chen Gengsheng, Dong Dazhong, Yang Guang, Lü Zonggang, Xu Yunhao, et al. Accumulation conditions and exploitation prospect of shale gas in the Lower Paleozoic Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 51-58.
- [16] 聂海宽,唐玄,边瑞康.页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J].石油学报,2009,30(4):484-491.  
Nie Haikuan, Tang Xuan, Bian Ruikang. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484-491.
- [17] 李建忠,李登华,董大忠,王社教.中美页岩气成藏条件、分布特征差异研究与启示[J].中国工程科学,2012,14(6):57-62.  
Li Jianzhong, Li Denghua, Dong Dazhong, Wang Shejiao. Comparison and enlightenment on formation condition and distribution characteristics of shale gas between China and U. S. [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(6): 57-62.
- [18] Bowker KA. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [19] 聂海宽,包书景,高波,边瑞康,张培先,武晓玲,等.四川盆地及其周缘下古生界页岩气保存条件研究[J].地学前缘,2012,19(3):280-294.  
Nie Haikuan, Bao Shujing, Gao Bo, Bian Ruikang, Zhang Peixian, Wu Xiaoling, et al. A study of shale gas preservation conditions for the Lower Paleozoic in Sichuan Basin and its periphery[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 280-294.
- [20] 崔永强,张玉玮.页岩气工业前景取决于储层[J].天然气工业,2013,33(12):60-65.  
Cui Yongqiang, Zhang Yuwei. An industrial prospect of shale gas depends on reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 60-65.
- [21] 郭秀英.区间数指标权重确定的熵值法改进[J].统计与决策,2012,365(17):32-34.  
Guo Xiuying. Studying the entropy method for determining the attribute weight with interval numbers[J]. Statistics & Decision, 2012, 365(17): 32-34.
- [22] 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,2013,392(20):61-63.  
Guo Xiuying, Chen Yicai. An deviation method for determining weights of the interval number attributes[J]. Statistics & Decision, 2013, 392(20): 61-63.
- [23] 郭秀英.预测决策的理论与方法[M].北京:化学工业出版社,2010.  
Guo Xiuying. The theory and method of forecast and decision[M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2010.

(修改回稿日期 2015-08-17 编辑 罗冬梅)