

非常规天然气

页岩储层含气性评价及影响因素分析

——以长宁—威远国家级试验区为例

李武广, 钟兵, 杨洪志, 冯曦

(中国石油西南油气田勘探开发研究院, 四川 成都 610041)

摘要:页岩储层含气性评价及影响因素分析是对页岩气井进行科学管理、提高页岩气田开发效果的一项重要研究工作。依据长宁—威远国家级页岩气试验区实际资料,建立了一套直接利用特征属性参数数据定量的进行页岩储层含气性评价及页岩含气量的影响因素分析的技术方法,实现了多口井多个层位的气层自动划分和影响因素的定量分析。采用聚合聚类法和多组判别法,把页岩气层划分为Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类,对这3个类别的气层建立了判别函数,并利用多元统计复相关原理进行了影响因素分析。分析认为:Ⅰ类气层属于基质性页岩气层,Ⅱ类气层属于裂缝比较发育性气层,Ⅲ类气层属于裂缝一般发育性气层,判别函数可对新未知类型页岩气层自动进行识别。影响页岩含气量的最主要因素包括游离气含量、孔隙度、有机碳含量、渗透率和吸附气含量,而脆性矿物含量、埋深和厚度对页岩含气量有比较小的影响。

关键词:页岩气;含气性评价;裂缝性气层;有机碳含量;影响因素

中图分类号:TE132.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2014)10-1653-08

引用格式:Li Wuguang, Zhong Bing, Yang Hongzhi, *et al.* Evaluation of gas-bearing property for shale reservoir and its influence factors analysis: Taking Changning-Weiyuan national experimental zone as an example[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(10): 1653-1660. [李武广, 钟兵, 杨洪志, 等. 页岩储层含气性评价及影响因素分析——以长宁—威远国家级试验区为例[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(10): 1653-1660.]

0 引言

全球石油资源日趋紧张,随着非常规油气勘探和开发程度的不断提高,页岩气越来越受重视,被视为油气资源接替的主要方向之一^[1-3]。页岩气含量是指页岩储层内游离气含量和吸附气含量的总和^[4-5]。不同页岩气层,特征属性不同,开发方式也不同,这些特征属性参数对页岩含气量的影响大小也不同,在页岩气开发生产每个环节都需要评价这些页岩气层特征属性参数^[6-9]。对于页岩含气性评价的研究,国内外学者^[10-11]都是从定性的角度进行研究,都未进行定量的研究。本文以长宁—威远国家级页岩气试验区实际资料结合多元统计学理论为

基础,建立了一套直接利用特征属性参数数据定量的进行页岩储层含气性评价及页岩含气量的影响因素分析的技术方法,可对多个页岩气层进行评价和判别,也可定量的分析页岩含气量的影响因素的重要程度。

1 页岩储层含气性评价

1.1 页岩储层含气性评价方法

依据页岩气层的特征属性参数,根据页岩气层特征相似关系的远近进行分类,定量的判断页岩气层的类型。对于分类后的页岩气层类别的属性值,建立各个类别的判别函数,引用多组判别法来计算一些新发现页岩气层的类型。同一地区的页岩气层

有很多个,而能代表页岩气层特征属性的参数也比较多,因此,有必要建立页岩气层特征属性参数集,结合多元聚类分析方法和多组判别方法定量的评价页岩储层含气性。

1.1.1 页岩气层分类方法

相似程度:页岩气层含气性优良与否可根据特征属性参数的综合相似程度来评价,相似程度可用定量的距离系数和相似系数形成参数之间亲疏关系的分类统计量。在实际研究中,距离系数用的最多,与通常习惯上的空间距离概念完全一致。给定正交坐标系中的 2 个样品 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ 和 $x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm})$, 它们之间的距离系数定义为式(1)。其中, d_{ij} 越小, 样品 x_i 与 x_j 的性质越相近, 所以, 应把 d_{ij} 相对小的样品分为一类。

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (1)$$

具体的步骤:首先使每个样品自成一类,共有 n 类;其次,计算样品间的亲疏关系,将最亲近的 2 个样品合并成一类,形成一个新类;最后计算新类与其余各类之间的亲疏关系,再将最亲近的 2 个合并。重复步骤,直到所有类归为一类。

1.1.2 页岩含气性判别方法

根据分类评价的结果,已经确定出了页岩气层分类标准体系。按照页岩气藏开发要求,要对新发现的页岩气层类型进行判断。那么,对于这种新发现的未知类型页岩气层到底属于哪一类,也要有一定的判断依据,这就属于多种类型归属问题,而多组判别分析方法能更好地解决多种类型归属这一问题。多组判别分析方法是利用分类结果中每一类型气层的属性参数建立判别函数,并把新未知类型页岩气层的特征参数代入判别函数,求出其函数值大小,函数值大小反映了新未知类型页岩气层归属于这几类气层的概率值大小,新的气层归属于概率值大的那一类气层。具体的计算方法如下:

计算各类的变量平均值:

$$\bar{x}_{j \times i} = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} x_{jki} \quad (2)$$

式(2)中: j 是样品变量的个数; n_i 是第 i 类的样品数。

计算各类离差矩阵:矩阵 s_i 中的 a 行 b 列元素 s_{ab}^i 为:

$$s_{ab}^i = \sum_{k=1}^{n_i} (x_{aki} - \bar{x}_{ai})(x_{bki} - \bar{x}_{bi}) \quad (3)$$

式(3)中: s_i 为一个 $m \times m$ 的矩阵; m 为样品的变量数。

计算总协方差矩阵:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^h S_i}{\sum_{i=1}^{n_i} n_i - h} = \frac{\sum_{i=1}^h S_i}{n - h} \quad (4)$$

计算 D 的逆矩阵:

$$D^{-1} = [d_{ab}^{-1}] \quad (5)$$

计算各组的判别函数:

$$c_{oi} = \sum_{b=1}^m d_{ab}^{-1} x_{bi} \quad (6)$$

$$c_{ai} = - \frac{1}{2 \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^m d_{ab}^{-1} x_{ai} x_{bi}} \quad (7)$$

由 c_{oi} 、 c_{ai} 确定第 i 组的判别函数为:

$$f_i = c_{oi} + \sum_{a=1}^m y_a c_{ai} \quad (8)$$

计算新样品属于第 i 组的概率:

$$p_i = \frac{\exp(f_i)}{\sum_{i=1}^h \exp(f_i)} \quad (9)$$

由式(9)可知,使 f_i 最大其 p_i 也最大,所以,只要把样品 $y(y_1, y_2, \dots, y_m)$ 代入贝叶斯判别函数中,分别计算出 f_1, f_2, \dots, f_h 。当 $f_s(y_1, \dots, y_m) = \max_{1 \leq i \leq h} [f_i(y_1, \dots, y_m)]$ 时,则把样品 y 划归为第 s 类。

1.2 页岩储层含气性评价实例分析

页岩特征属性参数是含气性评价的主要参数,包括孔隙度、渗透率、含水饱和度和脆性矿物含量、有机质碳含量、吸附气含量、游离气含量、埋深和厚度等^[12]。统计了长宁—威远页岩气区块 15 口井在龙马溪组和筇竹寺组 26 个层位的 9 个评价参数数据(表 1),对页岩储层进行含气性评价分析。

以页岩气评价井为依据,利用标准欧式距离下的离差平方和方法,以能够反映页岩气层特征属性参数为基本参数,通过聚类计算并分析,其中前 20 个页岩气层明显可划分为 3 类,通过对比分析,认为这 3 类页岩气层可分为差等页岩气层、中等页岩气层和优质页岩气层(图 1)。

第 I 类气层裂缝不是很发育,属于中等页岩气层,只是有比较少量的微裂缝。此类页岩气层含水饱和度较小,在 17%~36% 之间;渗透率也相对较小,平均渗透率为 $0.000\ 024 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;孔隙度比较小,分布在 1.1%~1.8% 之间;脆性矿物含量比较高,都达到 73% 以上;有机碳含量为 0.8%~1.2%;吸附气含量偏低,最大的为 $0.617\text{m}^3/\text{t}$;游离气含量相对也比较低,最大达到 $1\text{m}^3/\text{t}$ 。由此可以

说明此类气层有很少微裂缝,也基本上属于基质性气层。

第Ⅱ类页岩储层裂缝比较发育。从数据可以看出,含水饱和度在 35%~46%之间,含水饱和度不大不小;相比之下渗透率属于比较大的,基本分布在 $(0.000\ 5 \sim 0.000\ 9) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均为 $0.000\ 08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;孔隙度都达到 2%以上;脆性矿物含量不大不小,属于中等,大致分布在 50%~60%之间;有机碳含量比较高,最小的都达到 2.3%,最大的达到将近 4%;吸附气含量相对也偏高,平均可达到 $1\text{m}^3/\text{t}$ 以上;游离气含量基本都大于 $2\text{m}^3/\text{t}$,这也充分说明了Ⅱ类气层的裂缝比较发育,含气性

比较好,属于优质气层^[13-14]。

第Ⅲ类页岩储层属于基质性页岩气层。对于第Ⅲ类气层,含水饱和度比较高,都高达 60%;渗透率相比前 2 类气层偏小,平均渗透率仅为 $0.000\ 018 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;脆性矿物含量介于第Ⅰ类和第Ⅱ类渗透率气层之间,分布在 44%~54%之间;有机碳含量在 1%~1.7%之间;吸附气含量和游离气含量平均值分别为 $0.7\text{m}^3/\text{t}$ 和 $0.87\text{m}^3/\text{t}$,总含气量只有 $1.58\text{m}^3/\text{t}$,相比第Ⅰ类和第Ⅱ类页岩气层都偏小。这也充分说明此类气层裂缝不发育,属于差等页岩气层。将利用此方法的评价结果和实际解释结果对比分析,准确率达 100%。

表 1 页岩储层含气性评价参数数据

Table 1 The gas-bearing evaluation parameter data of shale gas reservoir

气层 个数	埋深 /m	厚度 /m	含水饱 和度/%	渗透率 / $(\times 10^{-3} \mu\text{m}^2)$	孔隙度 /%	脆性矿物 含量/%	有机碳 含量/%	吸附气含量 / (m^3/t)	游离气含量 / (m^3/t)	总含气量 / (m^3/t)
1	2 442.4	37.88	68.5	0.000 012 66	1.3	54.3	1.017	0.547	0.768	1.315
2	2 510.3	32.1	35.9	0.000 053 56	2.7	61.2	3.262	1.102	2.836	3.938
3	2 296.4	9.1	60.6	0.000 005 61	2.4	55.1	1.044	0.573	1.573	2.146
4	2 313.1	16.8	65.6	0.000 019 99	2.2	49.9	1.292	0.695	1.214	1.909
5	2 380	32.8	40.6	0.000 070 63	3.2	59.4	3.112	1.104	2.609	3.713
6	1 226	1.07	65.5	0.000 039 46	1.8	52.7	1.376	0.638	0.693	1.331
7	1 306.5	32.3	24.5	0.000 035 39	1.2	73.5	1.149	0.553	0.916	1.469
8	2 341.5	30	42.1	0.000 083 74	3.1	61.3	3.727	1.205	2.886	4.091
9	2 003.5	7.4	72.504	0.000 014 19	1.071	52.639	1.327	0.706	0.553	1.259
10	2 056	9.75	66.531	0.000 023 19	1.378	49.589	1.726	0.862	0.746	1.608
11	2 089	45.09	46.626	0.000 063 21	2.589	60.391	3.243	1.14	1.907	3.047
12	1 521.2	45.6	36.1	0.000 041 24	1.4	75.8	1.166 2	0.577	0.591	1.168
13	3 143.5	10.34	63.081	0.000 013 05	1.602	44.427	1.474	0.881	0.576	1.457
14	3 165.9	28.1	39.496	0.000 088 8	4.066	55.372	3.258	1.221	2.504	3.725
15	1 809.5	46.56	48.409	0.000 092 51	2.987	52.88	2.698	0.995	2.189	3.184
16	1 528.5	48.94	40.513	0.000 116 3	3.602	59.064	2.367	0.903	2.32	3.223
17	3 514.5	39.49	40.811	0.000 097 02	3.332	50.8	3.429	1.24	2.695	3.935
18	2 877.9	47.52	17.7	0.000 023 54	1.8	77.4	1.05	0.478	1.026	1.504
19	2 966	71.46	28.1	0.000 003 84	1.1	76.4	0.819	0.403	0.944	1.347
20	3 047.7	58.35	25.1	0.000 015 8	1.6	75.5	1.231	0.617	1.05	1.667
21	1 233.5	8.45	72.4	0.000 007 1	0.7	51.9	1.55	0.69	0.15	0.84
22	3 069.4	23.88	58.43	0.000 023 3	2.78	49.04	0.82	0.62	1.34	1.96
23	3 137.5	35.69	48.9	0.000 081 3	3.51	56.28	3.28	1.08	1.58	2.66
24	2 214	24.52	50.29	0.000 053 2	2.84	70.79	3.73	1.17	1.29	2.46
25	2 240	52.09	53.2	0.000 008 2	0.8	55.2	1.37	0.72	0.54	1.26
26	3 663	21.64	66.44	0.000 000 6	0.6	50	1.07	0.7	0.15	0.85

根据前面的分类评价结果,在与贝叶斯准则下的多组判别分析方法相结合下,通过式(2)~(8)计算获得了这 3 类页岩气层的判别函数:

$$F_1 = 263 + 0.63s_w - 83.606.91k +$$

$$12.696\varphi + 6.46p_i + 7.67TOC -$$

$$8.97v_1 + 0.41v_2 \quad (10)$$

$$F_1 = -215.06 + 0.66s_w + 36.217.57k +$$

$$17.05\varphi + 5.12p_i + 11.51TOC -$$

$$7.46v_1 + 8.94v_2 \tag{11}$$

$$F_1 = -197.15 + 2.42s_w - 203.424k +$$

$$14.21\varphi + 4.31\rho_1 + 3.21TOC +$$

$$4.71v_1 - 15.984v_2 \tag{12}$$

通过建立起来的判别函数对新未知类型的(表1中后6个)页岩气层进行含气性评价,利用式(9)计算属于这3类页岩气层的概率大小,哪一类型的概率值大就属于哪一个类型(表2)。

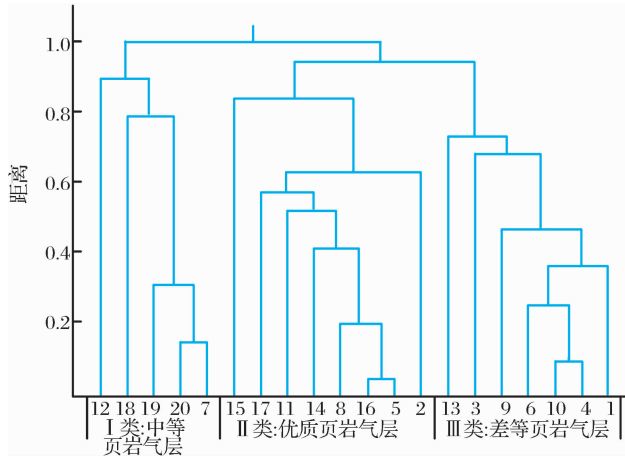


图1 页岩气层评价结果

Fig. 1 The evaluation results of shale gas reservoir

表2 页岩气层判别结果

Table 2 The discriminant result of shale gas reservoir

气层个数	所属类别	实际解释类型	气层个数	所属类别	实际解释类型
21	III	差等气层	24	II	优质气层
22	I	中等气层	25	I	中等气层
23	II	优质气层	26	III	差等气层

综上所述,并与页岩气藏实际资料对比分析,该方法应用结果与实际情况相符合,具有比较好的应用价值。

2 页岩含气量影响因素分析

2.1 影响因素模型建立

为了研究页岩含气量影响参数与页岩含气量的相互关系和联系程度,揭示其变化的具体形式和变化规律,既要定性分析,也要定量分析。将页岩气层特征属性参数作为基本参数,利用统计学中复相关性原理分析这些参数与页岩含气量的复相关性,并研究它们对页岩含气量的影响程度。具体的原理见式(13)–(20)。

给定 m 个自变量的评价指标体系 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 和因变量 y 。其中, X 为 9 个评价参数数据

集; y 为页岩含气量数据集。

则 m 个自变量评价指标 $\{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 的 n 组数据矩阵 A :

$$A = (x_{ij})_{n \times m} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{pmatrix}_{n \times m} \tag{13}$$

1 个因变量 y 的 n 组数据矩阵 C :

$$C = (y_{i1})_{n \times 1} = \begin{pmatrix} y_{11} \\ y_{21} \\ \vdots \\ y_{n1} \end{pmatrix}_{n \times 1} \tag{14}$$

对于已经给定的样本矩阵 A 和 C ,计算样本指标的基本统计量:对矩阵 A 的第 k ($k = 1, 2, \dots, m$) 项指标,其均值 \bar{x}_k 用式(15)求得,方差 s_{kk} 用式(16)计算。由于矩阵 C 中只有 1 个参数,则其均质 \bar{y} 为这 n 组数据的求和平均值,方差 s_{yy} 同理可用式(16)求得。则指标 x_i 与 x_j 之间的协方差利用式(17)求得,指标 x_i 与 y 之间的协方差利用式(18)求得:

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jk}, k = 1, 2, \dots, m \tag{15}$$

$$s_{kk} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_k)^2, k = 1, 2, \dots, m \tag{16}$$

$$s_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j) \tag{17}$$

$$s_{iy} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(y_{k1} - \bar{y}) \tag{18}$$

将利用式(15)–(18)计算的数据带入多元方程式中可求得多元方程的回归系数,利用回归系数最终可求得页岩含气量的计算值 y'_{n1} ,计算值与实际值误差为 0。利用式(19)计算回归平方和值 U ,因变量与自变量的复相关系数 R 按照式(20)计算,如果因变量与自变量的复相关系数越大,说明它们对因变量的影响程度也就越大。

$$U = \sum_{k=1}^n (y'_{i1} - \bar{y})^2 \tag{19}$$

$$R = \sqrt{U/s_{yy}} \tag{20}$$

2.2 影响因素分析

通过式(13)–(20)计算,得到的页岩含气量与各个参数的回归系数以及复相关系数结果如表3所示。

根据复相关系数的意义可知,页岩储层特征参数与页岩含气量之间的复相关系数越大,影响程度就越大^[15]。从表2可以看出,对页岩含气量影响最

大的参数是游离气含量,最小的参数是厚度,从大到小依次是游离气含量、有机碳含量、孔隙度、吸附气含量、渗透率、埋深、含水饱和度、脆性矿物含量和厚度。由于游离气与吸附气本来就是页岩气的2种赋存状态,游离气含量越高,含气量越大;吸附气含量

越高,含气量越大,复相关系数正好体现了这一点。结合分类结果将所有气层分为2部分,因中等气层和差等气层裂缝都不发育,可合并为一部分,即为裂缝性气层和基质性气层。其中,这些影响因素与页岩含气量的关系曲线如图2—图10所示。

表3 评价参数与页岩含气量的相关系数

Table 3 The correlation coefficient between evaluation parameters and shale gas

相关系数	埋深	厚度	含水饱和度	渗透率	孔隙度	脆性矿物含量	有机碳含量	吸附气含量	游离气含量
回归系数	-6.21×10^{19}	-8.23×10^{18}	2.14×10^{-16}	2.92×10^{-11}	-3.49×10^{-15}	5.29×10^{-16}	-1.93×10^{-14}	1	1
复相关系数	0.23	0.13	0.22	0.82	0.91	0.22	0.95	0.89	0.99

从图2、图6及表2可以看出,游离气含量、孔隙度、有机碳含量、渗透率和吸附气含量对页岩含气量相关系数比较大,都达到0.82以上,其中游离气含量与页岩含气量的复相关系数高达0.99,这5个参数是影响页岩含气量的主要因素。其中游离气含量、孔隙度、有机碳含量和吸附气含量与页岩含气量正相关,页岩含气量随它们增大而增大^[16]。从图2、图4和图6可以知道裂缝性页岩含气量比基质性页岩含气量随游离气含量、有机碳含量和吸附气含量增大而增大的更多^[17]。从图3可以看出随孔隙度的增大裂缝性页岩含气量比基质性页岩含气量增大的稍微平缓一点^[18]。相对于图6,页岩含气量对于渗透率的敏感性不是很强,但是可以肯定的是裂缝性页岩含气量主要贡献来自于游离气含量。

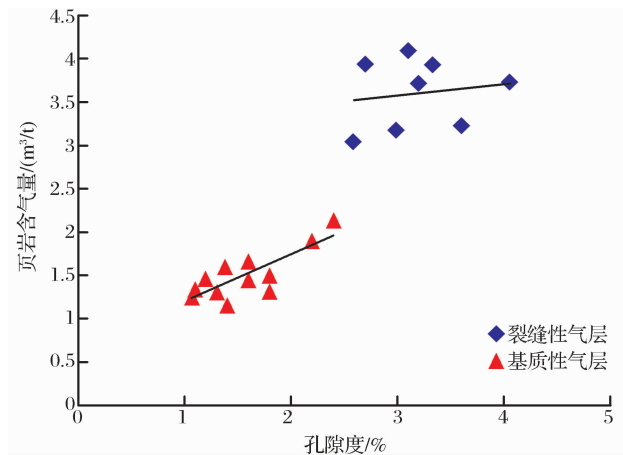


图3 孔隙度与页岩含气量的关系

Fig. 3 The relationship between porosity and the shale gas content

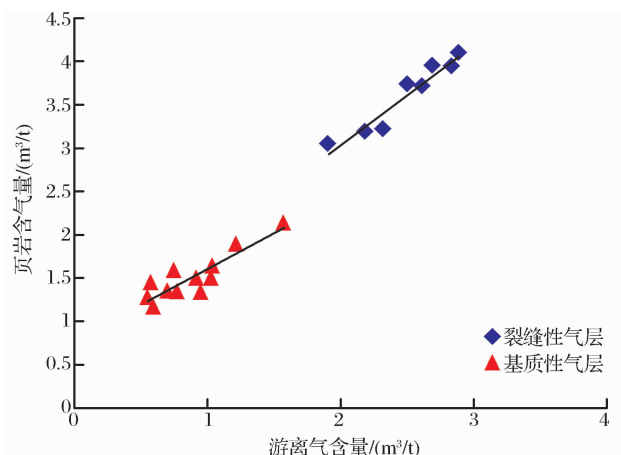


图2 游离气含量与页岩含气量的关系

Fig. 2 The relationship between free gas content and the shale gas content

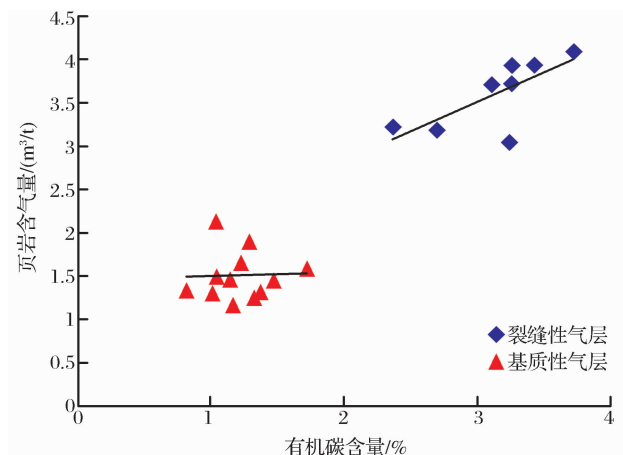


图4 有机碳含量与页岩含气量的关系

Fig. 4 The relationship between organic carbon content and the shale gas content

从图7—图10可以看出,由于含水饱和度、脆性矿物含量、埋深和页岩厚度与页岩含气量的相关系数都比较小,低于0.25,因此,对页岩含气量的影

响也比较小^[19-20]。它们之间的关系曲线也没有明显的规律,可以肯定的是裂缝对页岩含气量的影响比

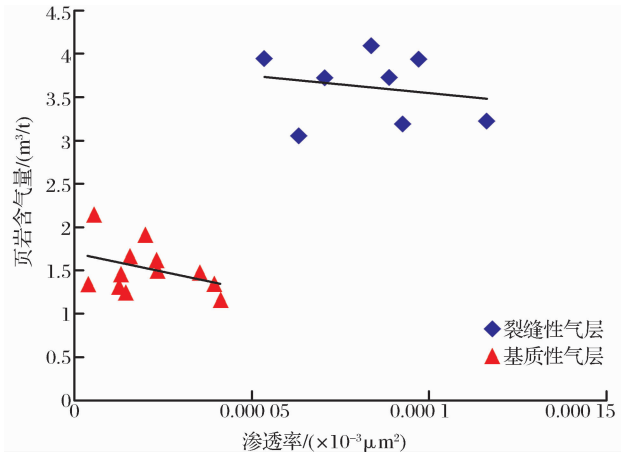


图 5 渗透率与页岩含气量的关系

Fig. 5 The relationship between permeability and the shale gas content

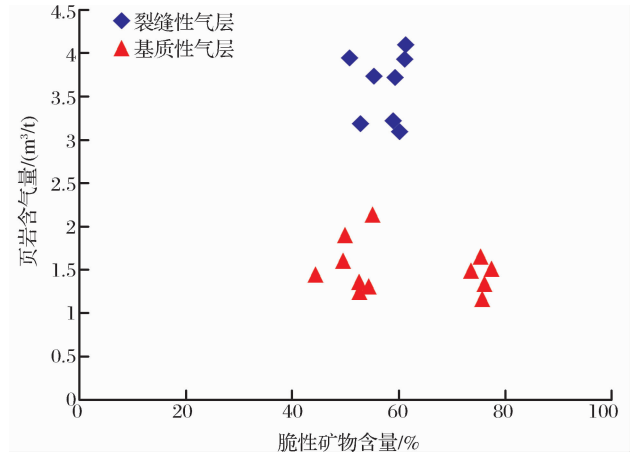


图 8 脆性矿物含量与页岩含气量的关系

Fig. 8 The relationship between brittle mineral content and the shale gas content

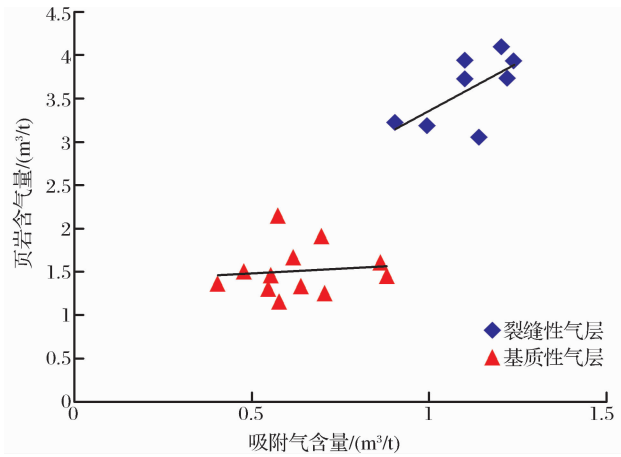


图 6 吸附气含量与页岩含气量的关系

Fig. 6 The relationship between adsorption gas content and the shale gas content

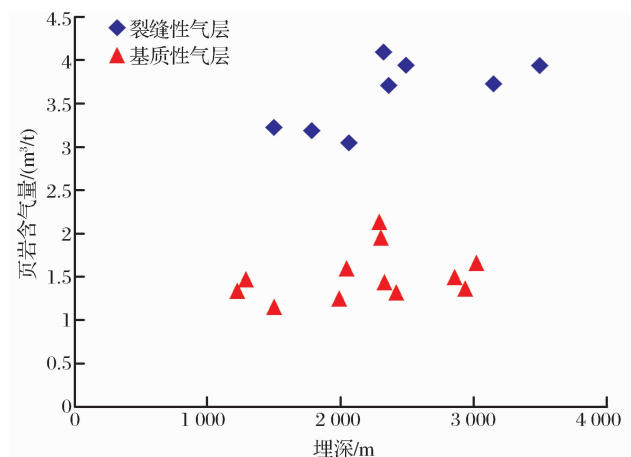


图 9 埋深与页岩含气量的关系

Fig. 9 The relationship buried depth and the shale gas content

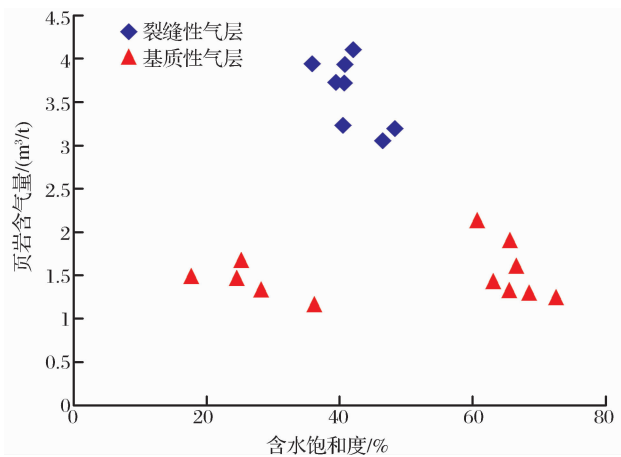


图 7 含水饱和度与页岩含气量的关系

Fig. 7 The relationship between water saturation and the shale gas content

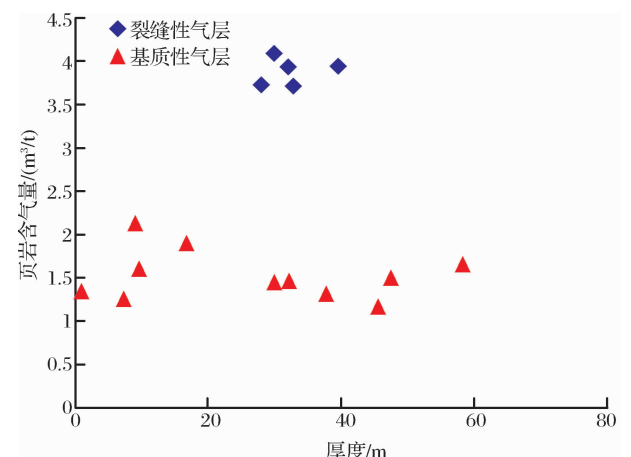


图 10 厚度与页岩含气量的关系

Fig. 10 The relationship between thickness and the shale gas content

较大,裂缝性页岩储层比基质性页岩储层含气量要大的多。

这些评价参数之间的关系比较复杂,其中一个评价参数受其他多个评价参数的制约,但是评价参数之间又没有确定的函数关系,这种情况下,也可根据复相关原理计算两两评价参数之间的相关性,它们之间的相关性不能太大,也不能重复,确保评价参数之间的独立性。页岩含气量影响因素的分析能够有效指导页岩含气性评价研究,提高页岩气田开发效果。

3 结论

(1)通过对长宁—威远页岩气国家级试验区页岩储层特征参数之间的关系研究,建立了以页岩储层资料为依据进行页岩含气性评价的方法,实现了页岩气层的分类,并可自动识别未知新页岩气层划分解释。

(2)通过评价结果的对比分析,长宁—威远试验区气层明显可以划分为基质性页岩气层、裂缝一般发育性页岩气层和裂缝比较发育性页岩气层,这与实际解释结果相一致,应用效果好。

(3)通过复相关分析,定量的获得页岩气层主要影响因素,并与页岩含气量成正相关,而且裂缝性页岩储层含气量主要贡献者是游离气含量。为该方法编制了软件,计算方便、灵活,实用性强。

参考文献(References):

- [1] Yan Cunzhang, Huang Yuzhen, Ge Chunmei, *et al.* Shale gas: Enormous potential of unconventional natural gas resources [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 35(5): 79-83. [闫存章, 黄玉珍, 葛春梅, 等. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J]. *天然气工业*, 2009, 35(5): 79-83.]
- [2] Macquaker J, Davies S. Lithofacies Variability in Finegrained Mixed Clastic Carbonate Successions: Implications for Identifying Shale Gas Reservoirs [C]. San Antonio, Texas: AAPG Annual Convention, 2008; 20-23.
- [3] Zhu Yanming, Chen Shangbin, Fang Junhua, *et al.* The geologic background of the Siluric shale-gas reservoiring in Szechwan, China [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(7): 1160-1164. [朱炎铭, 陈尚斌, 方俊华, 等. 四川地区志留系页岩气成藏的地质背景[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(7): 1160-1164.]
- [4] Li Wuguang, Yang Shenglai, Yin Dandan, *et al.* Development technology and strategy of shale gas [J]. *Natural Gas and Oil*, 2011, 29(1): 34-37. [李武广, 杨胜来, 殷丹丹, 等. 页岩气开发技术与策略综述[J]. *天然气与石油*, 2011, 29(1): 34-37.]
- [5] Li Yanjun, Liu Huan, Liu Jiaxia, *et al.* Geological regional se-

- lection and an evaluation method of resource potential of shale gas [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2011, 33(2): 28-34. [李延均, 刘欢, 刘家霞, 等. 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.]
- [6] Xiong Wei, Guo Wei, Liu Honglin, *et al.* Shale reservoir characteristics and isothermal adsorption properties [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 32(1): 1-4. [熊伟, 郭为, 刘洪林, 等. 页岩的储层特征以及等温吸附特征[J]. *天然气工业*, 2010, 32(1): 1-4.]
- [7] Javadpour F, Fisher D, Unsworth M. Nanoscale gas flow in shale gas sediments [J]. *JCPT*, 2007, 46(10): 55-61.
- [8] Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, *et al.* Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 641-653. [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.]
- [9] Wang Pengwan, Chen Ziliao, He Xunyun, *et al.* Accumulation of Lower Cambrian Niutitang shale gas and prediction of potential area in Qiannan Sag [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 518-523. [王鹏万, 陈子焯, 贺训云, 等. 黔南坳陷下寒武统页岩气成藏条件与有利区带评价[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 518-523.]
- [10] Li Wuguang, Yang Shenglai, Xu Jing, *et al.* A new calculation model of shale adsorptive gas content with considering the formation temperature and pressure [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 791-796. [李武广, 杨胜来, 徐晶, 等. 考虑地层温度和压力的页岩吸附气含量计算新模型[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 791-796.]
- [11] Zhang Jinchuan, Jin Zhiyun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(7): 15-18. [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.]
- [12] Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, *et al.* Structure characteristics and accumulation significance of nanopores in Longmaxi shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 438-444. [陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(3): 438-444.]
- [13] Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Shiqian, *et al.* An evaluation method of shale gas resource and its application in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 33-40. [董大忠, 程克明, 王世谦, 等. 页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J]. *天然气工业*, 2009, 29(5): 33-40.]
- [14] Wang Feiyu, He Zhiyong, Meng Xiaohui, *et al.* Occurrence of shale gas and prediction of original gas In-place (OGIP) [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 501-510. [王飞宇, 贺志勇, 孟晓辉, 等. 页岩气赋存形式和初始原地气量 (OGIP) 预测技术[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 501-510.]
- [15] Scott L, Daniel M, Kent A, *et al.* Mississippian barnett shale,

- Fort worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2):155-175.
- [16] Bowker K A. Barnett shale gas production Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 55(1): 523-533.
- [17] 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. [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.]
- [18] 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. [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.]
- [19] Zhang Haiquan, Yu Qian, Li Yuxi, *et al.* Explorative prospect of shale gas of Lower Silurian in Middle-Upper Yangtze area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(4):353-355. [张海全, 余谦, 李玉喜, 等. 中上扬子区下志留统页岩气勘探潜力[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(4):353-355.]
- [20] Long Pengpu, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, *et al.* Feature of muddy shale fissure and its effect for shale gas exploration and development[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 525-531. [龙鹏宇, 张金川, 唐玄, 等. 泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3):525-531.]

Evaluation of Gas-bearing Property for Shale Reservoir and Its Influence Factors Analysis: Taking Changning-Weiyuan National Experimental Zone as an Example

LI Wu-guang, ZHONG Bing, YANG Hong-zhi, FENG Xi

(Exploration and Development Institute of Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610041, China)

Abstract: Evaluation of gas-bearing property for shale reservoir and its influence factors analysis were important research. It helps to manage the shale gas wells scientifically and to improve the effect of shale gas field development. With field data of Changning-Weiyuan national experimental area, a new technique was constructed to evaluate the gas-bearing property of shale reservoir and to analyze its influence factors. We launched quantitative analysis by using the feature attributes data. The technique could automatically divide the gas formation into different layers for multiple gas wells and launch the quantitative analysis of influencing factors. By using the aggregation clustering method and multiple discriminant method, the shale gas reservoirs were divided into three types, type I, II and III. Discriminant functions were established for these three class gas reservoirs. The influencing factors were analyzed by using multivariate statistical multiple-principle. The analysis results showed that the gas reservoirs of type I were matrix-based shale gas layers, the gas reservoirs of type II were fracture-based shale gas layers, the gas reservoirs of type III had less fractures than type II. The discriminant functions could automatically identify the unknown types of shale gas reservoirs. The main factors influencing the gas content of shale included content of free gas, porosity, content of organic carbon, permeability and content of absorbed gas. The brittle mineral content, burial depth and thickness had a relatively small effect on the gas content of shale.

Key words: Shale gas; Evaluation of gas-bearing property; Fracture-based gas layers; The content of organic carbon; Influencing factors