

引用格式:周桦,魏力民,王同,等.威荣深层页岩气储层精细评价方法及应用[J].油气藏评价与开发,2021,11(2):176-183.

ZHOU Hua, WEI Limin, WANG Tong, et al. Evaluation method of Weirong deep shale gas reservoir and its application[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 176-183.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.02.005

威荣深层页岩气储层精细评价方法及应用

周桦,魏力民,王同,王岩,庞河清,张天操

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,四川成都610041)

摘要:针对威荣页岩气田五峰组—龙马溪组一段页岩储层纵向非均质性强、精细评价难度大的问题,在深入研究威荣深层页岩气储层特征及主要影响因素的基础上,优选 TOC (总有机碳含量)、含气量、有机孔占比、脆性矿物含量、黏土矿物含量、脆性指数及水平应力差异系数作为储层评价的关键参数,采用灰色关联分析法对储层品质进行定量化表征。研究结果表明:①通过计算评价参数与储层品质的关联度,明确含气量是指示优质储层的首要参数;②通过计算储层品质综合评价指标(Q),可将储层划分为4个等级,A级储层主要为生物硅质页岩和含钙-黏土质-硅质页岩,与目前水平井靶窗位置一致,研究成果与开发实践具有较高吻合度。该方法实现了多因素影响下储层品质的精细评价,为明确优质页岩储层提供了依据,对同类型气藏的评价与开发具有借鉴意义。

关键词:威荣页岩气田;深层页岩气;储层评价;灰色关联分析;综合评价指标

中图分类号:TE121

文献标识码:A

Evaluation method of Weirong deep shale gas reservoir and its application

ZHOU Hua, WEI Limin, WANG Tong, WANG Yan, PANG Heqing, ZHANG Tiancao

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec Southwest Oil and Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The problems of strong longitudinal heterogeneity and difficulties in fine evaluation exist in shale reservoirs from the Wufeng Formation to the first member of Longmaxi Formation in Weirong Shale Gas Field. Therefore, TOC content, gas content, proportion of organic pores, brittle mineral content, clay mineral content, brittleness index and horizontal stress difference coefficient are selected as the key parameters for the shale gas reservoir evaluation, and the gray correlation analysis method is applied to quantitatively characterize reservoir quality based on the characteristics of Weirong deep shale gas reservoirs and their main influencing factors. The results show that: ① By calculating the correlation between evaluation parameters and reservoir quality, it is clear that gas content is the primary parameter to indicate high-quality reservoir. ② By calculating the comprehensive evaluation index of reservoir quality(Q), the reservoir can be divided into four levels, among which the A-level one is mainly bio-siliceous shale and calcium-bearing-clay-siliceous shale, consisting with the target window position of the current horizontal wells, and the research results are in good agreement with development practices. This method realizes the fine evaluation of reservoir quality under the influence of multiple factors, provides the basis for the objective evaluation of high-quality shale reservoirs, and has reference significance for the evaluation and development of similar gas reservoirs.

Key words: Weirong Shale Gas Field, deep shale gas, reservoir evaluation, grey correlation analysis, comprehensive evaluation index

储层精细评价是勘探与开发、宏观与微观、基础研究与工程工艺相结合的系统工程^[1],旨在储层特征研究的基础上,对储层品质进行分级分类,从而深刻认识储层、寻找优质储层,为气藏评价与开发提供科

学依据。常规储层评价的核心参数是孔隙度和渗透率^[2],而页岩气藏是典型的“自生自储”型气藏,其特殊的成藏机理与成藏特征决定了其评价思路和方法明显区别于常规气藏,除了研究岩石学、物性等储层

收稿日期:2020-10-20。

第一作者简介:周桦(1987—),女,硕士,工程师,从事页岩气地质综合研究。地址:四川省成都市高新区吉泰路688号,邮政编码:610041。E-mail:130964863@qq.com

基本特征外,还需综合考虑页岩储层改造难易程度等要素^[2-5]。因此,页岩气储层评价的核心在于综合研究储层地化特征、矿物组成、孔渗条件、储集空间特征、含气性及岩石力学性质,充分利用关键参数探索储层精细评价新方法显得尤为重要。

威荣页岩气田位于四川盆地中南部,大地构造隶属川西南低陡褶皱带,埋深介于3 550~3 880 m,构造平缓,总体呈“两凹一凸”的构造特征。奥陶系五峰组—志留系龙马溪组一段为暗色富有机质富硅质泥页岩,厚度80~85 m,分布稳定。地层压力系数1.94~2.13,地温梯度2.8~3.3 °C/hm,甲烷含量95.75%~97.67%,属深层、常温、超压、弹性气驱、超低渗、干气、自生自储式连续型页岩气藏^[6-7]。页岩储层纵向上非均质性强、评价难度大,前期中国石油、中国石化分别建立起相应的分类评价标准^[8-10],一致认为TOC、含气量、孔隙度、脆性矿物及黏土矿物含量可作为储层评价的关键参数,并对各个评价参数赋予范围值(表1),然而缺乏反映岩石力学性质的参数,导致储层在地质参数相似的情况下,压裂改造效果可能存在较大差距,难以实现储层评价的目的。另外,当多个参数无法同时满足某一类标准时,评价结果容易出现交叉、矛盾的现象,难以客观判断储层的优劣。

随着页岩气储层研究技术的不断进步,储层定量表征方法得到大力发展,利用量化的综合评价指标客观判断储层品质,逐步成为储层精细评价技术的新趋势^[11-14]。目前针对多因素的定量评价方法包括神经网络、A.古林法、多元统计分析、模糊数学、灰色关联分析等方法,鉴于储层评价具有部分信息明确、部分信息不明确的特性,与灰色系统的“灰”含义一致^[15],因此,采用灰色关联理论可以更有效地综合已有研究成果,弥补其它“白色”系统定性评价储层的不足,具有较强的探索意义与价值^[16-17]。为此,本文尝试引入灰色关联分析法对页岩气储层进行定量

化表征,以期实现多因素影响下储层品质的精细评价,为明确优质页岩储层提供依据。

1 岩石相及储层分类

前期熊亮(2019)、魏力民(2019)等^[6-7]针对威荣地区五峰组—龙马溪组一段页岩储层开展了岩石相精细划分,在深入对比TOC含量和矿物组成差异的基础上,参照沉积岩命名方案,以改进的岩石三角分类图版为依据,按照TOC分类结合黏土矿物、硅质矿物、碳酸盐矿物含量“三端元”分类的方法,划分出七种岩石相类型。从图1可以明显看出,以富有机质生物硅质页岩相为界,向上TOC含量降低、黏土矿物含量升高,向下TOC含量降低、碳酸盐矿物含量升高,该方法突出了TOC和矿物组成的纵向变化,使③号层的岩石相分类精度由前期的20 m以上精确到1 m以内,实现了数量级的提升。在岩石相精细划分的基础上,结合纹层、物性、电性、含气性及成烃生物组合等参数,将储层划分为硅质类、混合类、黏土类等三类7种类型,底部的生物硅质页岩储层具有高TOC、高含气量、高有机孔占比、高脆性矿物含量、高脆性指数、低黏土矿物含量和低水平应力差异系数的特点,是目前的核心优质储层^[6-7]。储层类型的划分实现了定性描述,为储层精细定量评价奠定了重要基础。

2 储层精细评价

2.1 评价思路

储层精细评价的实质是对影响储层品质的多个因素进行综合评定,进而判断储层的优劣^[18-19]。在储层定性描述的基础上,结合威荣深层页岩气形成条件和富集规律,优选与储层品质密切相关的评价参数,采用灰色关联分析法计算多参数之间的关联程

表1 龙马溪组页岩气储层评价标准^[8-10]
Table 1 Evaluation criteria for shale gas reservoir of Longmaxi Formation^[8-10]

评价 分类	评价参数										
	TOC(%)		含气量(m ³ /t)		孔隙度(%)		脆性矿物含量(%)		黏土矿物含量(%)		层理缝
	中国石化	中国石油	中国石化	中国石油	中国石化	中国石油	中国石化	中国石油	中国石化	中国石油	中国石化
I类	≥4	≥3	≥4	≥3	≥6	≥5	≥50	≥55	≤30	≤30	发育—极发育
II类	2~4	2~3	2~4	2~3	4~6	3~5	40~50	45~55	30~50	30~40	较发育
III类	<2	1~2	<2	1~2	2~4	2~3	<40	30~45	>50	40~60	欠发育

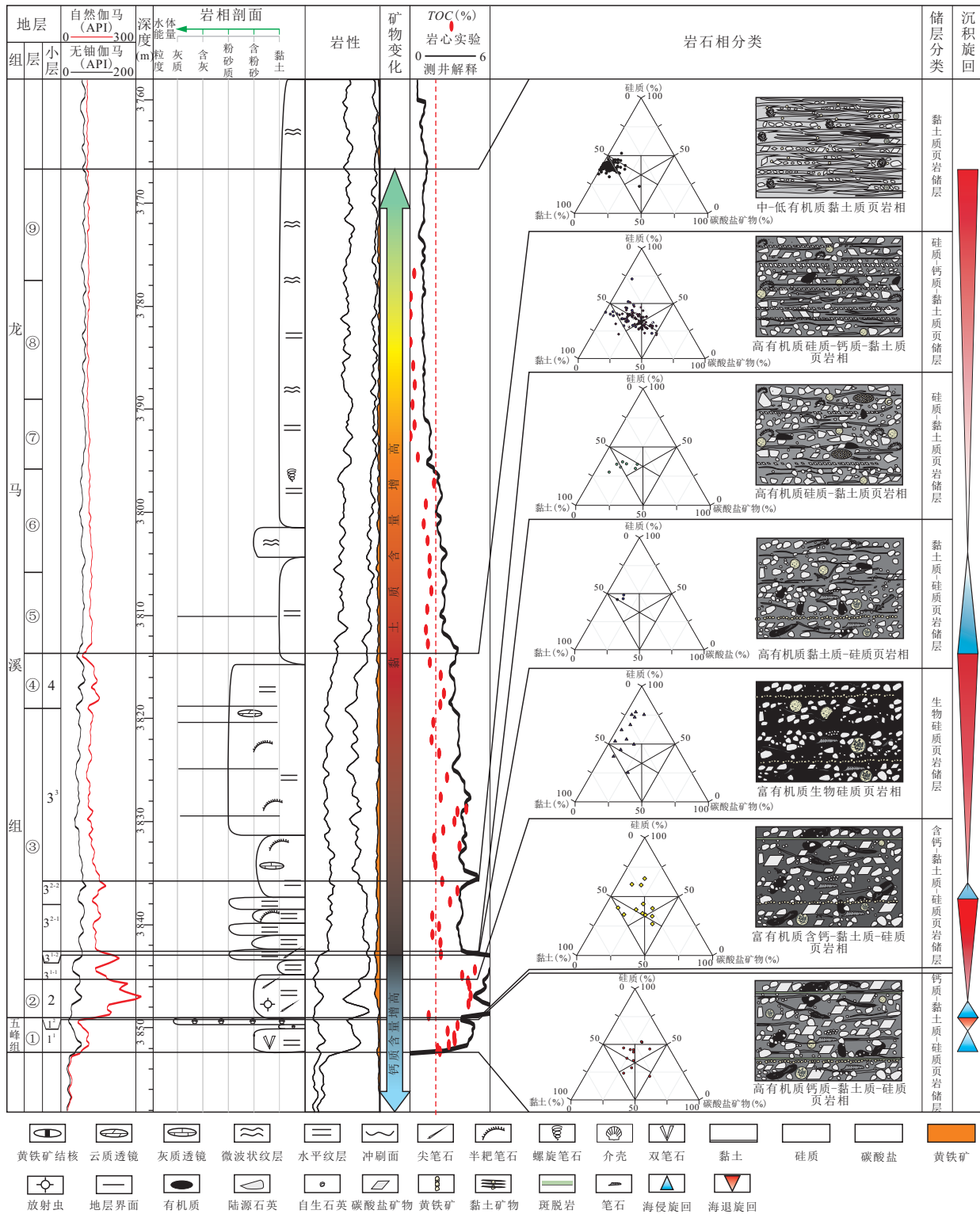


图1 威荣页岩气田岩石相精细划分及储层分类

Fig.1 Fine division of lithofacies and reservoir classification in Weirong Shale Gas Field

度,以加权平均法确定各参数在储层评价中的权重分配后^[11,13,20-22],计算出不同类型储层的综合评价指标,并利用该值划分储层等级,从而实现储层评价由定性向定量的转变,为客观评价优质储层提供依据(图2)。

2.2 评价流程

2.2.1 评价参数优选

页岩气储层的评价参数通常包括表征生气能

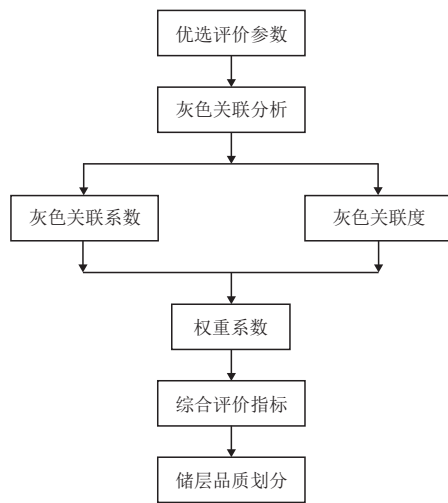


图2 储层品质定量评价思路

Fig.2 Thoughts on quantitative evaluation of reservoir

力、储集能力、含气能力和开采能力的参数,其中有有机质丰度、有机质成熟度、富有机质页岩厚度、含气量、孔隙度、埋深、地层压力、脆性矿物及黏土矿物含量、裂缝发育程度等因素与储层品质密切相关^[2,18-19]。

储层定量评价的前提是储层特征参数的优选,在综合评价过程中需要结合评价目的,有针对性地选择评价参数^[15-17]。为提高评价结果的准确性,在勘探开发实践的基础上,通过单因素分析,优选了TOC、有机孔占比、含气量、脆性矿物含量、黏土矿物含量、脆性指数和水平应力差异系数等7个参数,其中,TOC、含气量、有机孔占比、脆性矿物含量及脆性指数与储层品质呈正相关,而黏土矿物含量、水平应力差异系数则与储层品质呈负相关^[18-19],以此形成威

荣深层页岩气储层精细评价的关键参数系列。由于有机孔隙是游离气的主要赋存空间,也为吸附气的赋存提供吸附剂,其值可以更加直观地反映储层的储集能力^[23-24],故将原标准中的孔隙度更改为有机孔占比。

根据储层类型分别统计威荣页岩气田5口取心井各项评价参数并求取平均值,从而得到威荣地区不同类型储层的评价参数值(表2)。

2.2.2 灰色关联分析法

灰色关联分析是一种量化预测分析,通过计算研究对象与影响因素之间的关联度来分析影响程度^[15,25-26]。根据灰色系统理论和方法,首先确定反映系统行为特征的参考序列和影响系统行为的比较序列,即母、子序列;其次对母、子序列进行无量纲化处理,消除原始数据物理意义以及量纲间的差异;然后计算出两者间的灰色关联度,该值越大证实两者的相关性越好。具体的计算方法见文献^[11,13,15-17,20-22,25]。

前人研究认为,有机质是页岩气生产的物质基础,TOC越高,生烃潜力就越大,其值大小可直接判别储层的优劣,应当作为储层评价的母序列,其它参数为子序列^[11,21]。由于影响储层品质的参数之间有着非常复杂的关系,为消除主观经验,本文尝试将优选的各项评价参数依次作为母序列,其余参数作为子序列,分别求取两者的关联程度,即循环关联分析。

设母序列为 X_i ,

$$X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k), x_i(n)\}, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, 3 \dots m, \quad k = 1, 2, 3 \dots n$$

表2 威荣深层页岩气储层评价参数

Table 2 Evaluation parameters of deep shale reservoir in Weirong Deep Shale Gas Field

储层类型	TOC(N=5) (%)	含气量(N=5) (m ³ /t)	有机孔占比 (N=5)(%)	脆性矿物含量 (N=5)(%)	黏土矿物含量 (N=5)(%)	脆性指数 (N=4)(%)	水平应力差异 (N=4)系数
黏土质	范围 1.05 ~ 1.47	2.32 ~ 2.98	8.7 ~ 11.6	42.37 ~ 46.89	50.97 ~ 52.49	20.7 ~ 28.5	0.15 ~ 0.28
页岩储层	平均 1.20	2.65	10.00	43.70	51.80	25.90	0.20
硅质-钙质-	范围 2.62 ~ 3.52	6.98 ~ 7.99	13.2 ~ 20.6	61.39 ~ 64.59	33.03 ~ 33.76	41.5 ~ 46.5	0.08 ~ 0.23
黏土质页岩储层	平均 2.90	7.35	15.00	62.40	33.50	44.30	0.17
硅质-黏土质	范围 2.41 ~ 3.61	6.34 ~ 7.78	17.9 ~ 25.6	47.40 ~ 60.16	32.22 ~ 47.95	33.9 ~ 42.0	0.07 ~ 0.20
页岩储层	平均 3.00	7.18	20.30	52.35	42.10	38.90	0.15
黏土质-硅质	范围 1.20 ~ 5.29	8.51 ~ 13.31	20.7 ~ 61.6	55.94 ~ 60.71	32.59 ~ 38.45	43.6 ~ 59.1	0.10 ~ 0.28
页岩储层	平均 3.40	12.18	38.80	59.20	35.60	51.10	0.19
生物硅质	范围 3.23 ~ 5.31	9.11 ~ 12.76	42.6 ~ 78.8	71.73 ~ 76.39	14.59 ~ 20.43	32.3 ~ 50.5	0.05 ~ 0.25
页岩储层	平均 4.60	11.48	69.70	74.20	18.30	42.05	0.16
含钙-黏土质-	范围 2.98 ~ 5.55	6.74 ~ 11.31	35.67 ~ 62.15	60.76 ~ 69.61	27.38 ~ 34.28	39.4 ~ 54.8	0.09 ~ 0.24
硅质页岩储层	平均 4.80	10.00	59.80	64.70	30.00	49.95	0.17
钙质-黏土质-	范围 1.74 ~ 5.10	4.61 ~ 10.29	27.36 ~ 57.29	62.69 ~ 72.67	25.19 ~ 31.73	44.9 ~ 51.6	0.07 ~ 0.21
硅质页岩储层	平均 3.90	7.79	49.80	67.10	28.70	47.40	0.15

注:N为样本数量。

式中: m 表示评价参数个数, n 表示序列长度。

设子序列为 X_j ,

$$X_j = \{x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(k), x_j(n)\}, \quad (2)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, m, j \neq i, k = 1, 2, 3, \dots, n$$

式中: X_j 表示除去第 i 项参数序列的其余参数序列。

采用极大值标准化法对母、子序列进行无量纲化处理后,通过灰色关联分析法计算出母、子序列之间的关联系数 ($\xi_{ji}(k)$) 和关联度 (r_{ji}),从而得到不同母序列条件下各子序列与其的关联度矩阵(表3),考虑到数据分析的精确性及评价效果的明显性,分辨系数取值为0.5。

$$\xi_{ji}(k) = \frac{\Delta_{j\min} + \rho\Delta_{j\max}}{\Delta_{ji}(k) + \rho\Delta_{j\max}} \quad (3)$$

$$r_{ji} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{ji}(k) \quad (4)$$

式中: $\Delta_{ji}(k)$ 表示两个比较序列的绝对差, $X_i'(k)$ 和 $X_j'(k)$ 为第 k 个参数点无量纲化处理后的数值, $\Delta_{j\max}$ 和 $\Delta_{j\min}$ 分别表示所有绝对差中的最大值和最小值。

$$\Delta_{ji}(k) = |X_j'(k) - X_i'(k)| \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta_{j\max} = \max_k \max_i (X_j'(k) - X_i'(k)) \\ \Delta_{j\min} = \min_k \min_i (X_j'(k) - X_i'(k)) \end{cases} \quad (6)$$

关联度大小既能反映各项评价参数本身与储层品质的相关性,也能反映不同评价参数之间隐含的内在联系。当 TOC 为母序列时,其余评价参数与 TOC 的关联度依次为含气量 > 脆性矿物含量 > 有机孔占比 > 脆性指数 > 黏土矿物含量 > 水平应力差异系数;同理可得其余评价参数为母序列时与子序列的关联度。计算各项评价参数在不同母序列条件下关联程度的平均值,即可得到其与储层品质的关联度:含气量 > TOC > 有机孔占比 > 脆性矿物 > 脆性指数 > 黏土矿物含量 > 水平应力差异系数,表明含气

量是指示优质储层的首要参数,深层页岩气储层评价的核心是寻找富气层。

2.2.3 权重及指标的确定

在关联度矩阵的基础上,采用加权平均法分别计算在不同母序列条件下各子序列的权重值,每个评价参数作为母序列时将得到1个权重系数序列,7个评价参数则获得7个权重系数序列(表4),例如,当 TOC 为母序列时, TOC 的权重为0.195 2,含气量的权重为0.164 8,有机孔占比的权重为0.145 9,脆性矿物的权重为0.153 2,黏土矿物的权重为0.111 5,脆性指数的权重为0.141 1,水平应力差异系数的权重为0.088 3。

将无量纲化后的各项评价参数依次与其权重系数相乘,得到该项参数的权衡值(q)。将所有评价参数的权衡值相加,可得到储层的综合评价价值,即储层品质综合评价指标(Q)。

$$Q = \sum_{i=1}^m q_i \quad (7)$$

其中, Q 和 q 的取值范围均介于0到1之间。由于7个评价参数获得7个权重系数序列,则不同类型储层相应获得不同权重系数序列下的储层品质综合评价指标(表5)。 Q 越接近1,表明储层品质越好,反之越差。

3 储层品质划分及其应用

计算结果表明(表5),不同类型储层的品质差异较大,其中生物硅质页岩最优, Q 值为0.68 ~ 0.85,中值为0.8;其次为含钙-黏土质-硅质页岩, Q 值为0.6 ~ 0.77,中值为0.72;黏土质页岩最差, Q 值为0.23 ~ 0.34,中

表3 不同母序列条件下的灰色关联度矩阵
Table 3 Gray incidence matrix under different parent sequence conditions

母序列	子序列的灰色关联度						
	TOC	含气量	有机孔占比	脆性矿物含量	黏土矿物含量	脆性指数	水平应力差异系数
TOC	1.000 0	0.844 4	0.747 7	0.785 1	0.571 3	0.722 8	0.452 7
含气量	0.849 8	1.000 0	0.755 3	0.747 3	0.606 4	0.757 7	0.477 6
有机孔占比	0.747 3	0.747 2	1.000 0	0.690 2	0.679 7	0.624 8	0.563 3
脆性矿物含量	0.784 8	0.738 4	0.690 2	1.000 0	0.501 3	0.853 0	0.390 6
黏土矿物含量	0.491 8	0.518 0	0.609 4	0.421 3	1.000 0	0.414 1	0.548 9
可压裂指数	0.731 7	0.757 7	0.634 9	0.858 9	0.504 1	1.000 0	0.388 3
水平应力差异系数	0.463 8	0.477 6	0.573 5	0.402 5	0.633 3	0.388 3	1.000 0
平均值	0.724 2	0.726 2	0.715 9	0.700 8	0.642 3	0.680 1	0.545 9

表4 威荣深层页岩气储层评价参数的权重系数

Table 4 Weight coefficients of reservoir evaluation parameters in Weirong Deep Shale Gas Field

母序列	子序列的权重系数						
	TOC	含气量	有机孔占比	脆性矿物含量	黏土矿物含量	脆性指数	水平应力差异系数
TOC	0.195 2	0.164 8	0.145 9	0.153 2	0.111 5	0.141 1	0.088 3
含气量	0.163 6	0.192 5	0.145 4	0.143 9	0.116 7	0.145 9	0.092 0
有机孔占比	0.147 9	0.147 9	0.197 9	0.136 6	0.134 5	0.123 7	0.111 5
脆性矿物含量	0.158 3	0.148 9	0.139 2	0.201 7	0.101 1	0.172 0	0.078 8
黏土矿物含量	0.122 8	0.129 4	0.152 2	0.105 2	0.249 8	0.103 4	0.137 1
可压裂指数	0.150 1	0.155 4	0.130 2	0.176 2	0.103 4	0.205 1	0.079 6
水平应力差异系数	0.117 7	0.121 2	0.145 6	0.102 2	0.160 8	0.098 6	0.253 9

表5 威荣深层页岩气储层品质综合评价指标

Table 5 Comprehensive evaluation index of deep shale reservoir in Weirong Deep Shale Gas Field

储层类型	不同母序列条件下的储层品质综合评价指标						
	TOC	含气量	有机孔占比	脆性矿物含量	黏土矿物含量	脆性指数	水平应力差异系数
黏土质页岩储层	0.300 0	0.296 2	0.273 4	0.334 3	0.227 7	0.339 4	0.232 7
硅质-钙质-黏土质页岩储层	0.546 3	0.542 3	0.498 2	0.577 4	0.459 2	0.583 3	0.415 7
硅质-黏土质页岩储层	0.510 1	0.505 1	0.465 9	0.532 3	0.411 0	0.537 4	0.386 3
黏土质-硅质页岩储层	0.682 4	0.686 5	0.637 6	0.703 1	0.566 6	0.712 2	0.516 1
生物硅质页岩储层	0.840 9	0.834 7	0.816 0	0.852 2	0.755 6	0.846 3	0.677 3
含钙-黏土质-硅质页岩储层	0.765 6	0.754 9	0.729 9	0.774 9	0.654 9	0.772 4	0.598 5
钙质-黏土质-硅质页岩储层	0.683 7	0.673 7	0.653 2	0.704 2	0.595 3	0.701 9	0.541 4

值为0.29。根据不同类型储层综合评价指标的定量特征,可以明确威荣深层页岩气储层的优劣顺序为:生物硅质页岩—含钙黏土质硅质页岩>钙质黏土质硅质页岩—黏土质硅质页岩>硅质钙质黏土质页岩—硅质黏土质页岩>黏土质页岩,因此,参照前述评价标准,可将储层划分为4个等级: $Q > 0.7$ 为A级, $0.5 < Q < 0.7$ 为B级, $0.3 < Q < 0.5$ 为C级, $Q < 0.3$ 为D级(表6)。A级储层主要为生物硅质页岩和含钙黏土质硅质页岩;B级储层主要为钙质黏土质硅质页岩和黏土质硅质页岩,在硅质钙质黏土质页岩和硅质黏土质页岩中也有分布;C级储层主要为硅质钙质黏土质页岩和硅质黏土质页岩;D级储层主要为黏土质页岩。

采用上述评价方法,应用于威荣气田W1井五峰组—龙马溪组一段页岩储层,计算出的 Q 值在纵向上呈现出明显的分级特征(图3),与储层品质划分结果较为吻合,A级储层集中分布在生物硅质页岩顶部和含钙黏土质硅质页岩底部,与目前水平井的靶窗位置一致,证实量化的综合评价指标可准确反映储层的优劣,实现了多因素影响下储层品质的精细定量评价,为明确威荣地区优质页岩储层提供了依据,对同类型气藏评价与开发具有借鉴意义。

值得注意的是,图3显示W1井黏土质储层的品质呈现明显的二分性,上部为D级储层、下部为C级储层,这是因为该方法的建立是基于储层类型的划分结果,依据储层类型分别统计各项评价参数的数

表6 威荣深层页岩气储层品质评价

Table 6 Quality classification of deep shale reservoir in Weirong Deep Shale Gas Field

储层类型	分布	综合评价指标		储层品质等级
		区间值	中值	
黏土质页岩储层	⑤—⑨	0.23 ~ 0.34	0.29	D
硅质-钙质-黏土质页岩储层	3 ³ —4	0.42 ~ 0.58	0.52	B—C
硅质-黏土质页岩储层	3 ²	0.39 ~ 0.54	0.48	B—C
黏土质-硅质页岩储层	3 ¹⁻²	0.52 ~ 0.71	0.64	B
生物硅质页岩储层	3 ¹⁻¹	0.68 ~ 0.85	0.80	A
含钙-黏土质-硅质页岩储层	2	0.60 ~ 0.77	0.72	A
钙质-黏土质-硅质页岩储层	1 ¹	0.54 ~ 0.70	0.65	B

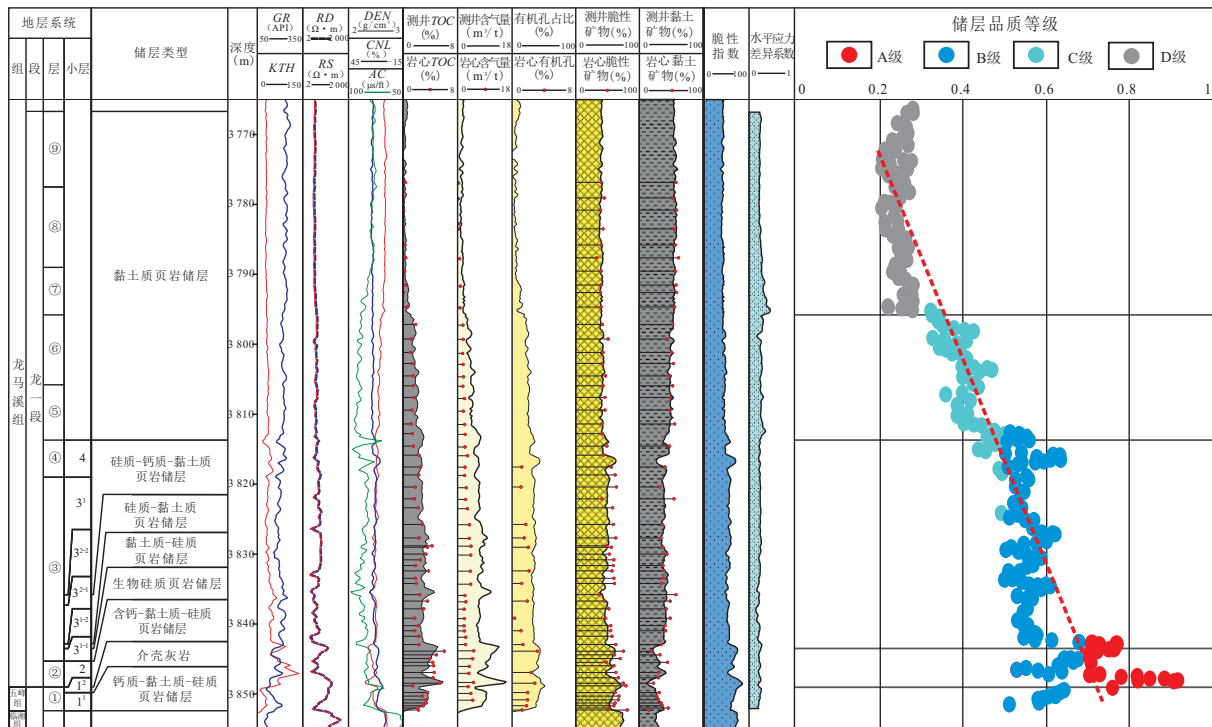


图3 W1井储层品质综合评价效果

Fig. 3 Comprehensive evaluation effect of reservoir in Well-W1

值,评价结果表明W1井的⑤—⑨号层并非全为黏土质储层,有必要进一步细分,从侧面反映出该方法对于提高储层分类精度具有一定的指导作用。

4 结论

1) 优选TOC、含气量、有机孔占比、脆性矿物含量、黏土矿物含量、脆性指数及水平应力差异系数作为深层页岩气储层评价的关键参数,能有效反映储层品质的差异。

2) 以灰色系统理论为指导,通过计算评价参数与储层品质的关联度,明确含气量是指示优质储层的首要参数,表明威荣深层页岩气储层评价的核心是寻找富气层。

3) 通过计算储层品质综合评价指标(Q),可将储层划分为4个等级,A级储层主要为生物硅质页岩和含钙-黏土质-硅质页岩,与目前水平井靶窗位置一致,研究成果与开发实践具有较高吻合度,该方法实现了多因素影响下储层品质的精细定量评价,为明确威荣地区优质页岩储层提供了依据。

参考文献

[1] 纪友亮.油气储层地质学[M].青岛:中国石油大学出版社,2019.
JI Youliang. Petroleum reservoir geology[M]. Qingdao: China University of Petroleum Press, 2019.

[2] 于炳松.页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J].地学前缘,2012,19(3):252-258.
YU Bingsong. Particularity of shale gas reservoir and its evaluation[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 252-258.

[3] 朱华,姜文利,边瑞康,等.页岩气资源评价方法体系及其应用——以川西坳陷为例[J].天然气工业,2009,29(12):130-134.
ZHU Hua, JIANG Wenli, BIAN Ruikang, et al. Shale gas assessment methodology and its application: A case study of the western Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 130-134.

[4] 唐颖,邢云,李乐忠,等.页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J].地学前缘,2012,19(5):356-363.
TANG Ying, XING Yun, LI Lezhong, et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 356-363.

[5] 郭少斌,黄磊.页岩气储层含气性影响因素及储层评价——以上扬子古生界页岩气储层为例[J].石油实验地质,2013,35(6):601-606.
GUO Shaobin, HUANG Lei. Gas-bearing influential factors and evaluation of shale gas reservoir: A case study of Paleozoic shale gas reservoir in Upper Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6): 601-606.

[6] 熊亮,魏力民,史洪亮.川南龙马溪组储层分级综合评价技术及应用——以四川盆地威荣页岩气田为例[J].天然气工业,2019,39(S1):60-65.
XIONG Liang, WEI Limin, SHI Hongliang. Comprehensive evaluation technology and application of shale gas reservoir in Longmaxi Formation in Southern Sichuan: A case study of Weirong Shale Gas Field in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 60-65.

- [7] 魏力民,王岩,张天操,等.四川盆地南部深层页岩储层地质模型的建立[J].天然气工业,2019,39(S1):66-70.
WEI Limin, WANG Yan, ZHANG Tiancao, et al. Establishment of geological model of deep shale reservoirs in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(S1): 66-70.
- [8] 焦方正.页岩气“体积开发”理论认识.核心技术与实践[J].天然气工业,2019,39(5):1-14.
JIAO Fangzheng. Theoretical insights, core technologies and practices concerning “volume development” of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(5): 1-14.
- [9] 武恒志,熊亮,葛忠伟,等.四川盆地威远地区页岩气优质储层精细刻画与靶窗优选[J].天然气工业,2019,39(3):11-20.
WU Hengzhi, XIONG Liang, GE Zhongwei, et al. Fine characterization and target window optimization of high-quality shale gas reservoirs in the Weiyuan area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(3): 11-20.
- [10] 中华人民共和国国家能源局.NB/T 14001-2015 页岩气藏描述技术规范[S].北京:中国电力出版社,2016.
National Energy Administration of the People's Republic of China. NB/T 14001—2015 Technical Specification for Shale Gas Reservoir Description[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [11] 涂乙,邹海燕,孟海平,等.页岩气评价标准与储层分类[J].石油与天然气地质,2014,35(1):153-158.
TU Yi, ZOU Haiyan, MENG Haiping, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 153-158.
- [12] 郭英海,赵迪斐.微观尺度海相页岩储层微观非均质性研究[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):300-307.
GUO Yinghai, ZHAO Difei. Analysis of micro-scale heterogeneity characteristics in marine shale gas reservoir[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 300-307.
- [13] 蒋廷学,卞晓冰.页岩气储层评价新技术——甜度评价方法[J].石油勘探技术,2016,44(4):1-6.
JIANG Tingxue, BIAN Xiaobing. The novel technology of shale gas play evaluation: sweetness calculation method[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(4): 1-6.
- [14] 乔辉,贾爱林,贾成业,等.页岩气储层关键参数评价及进展[J].地质科技情报,2018,37(2):157-164.
QIAO Hui, JIA Ailin, JIA Chengye, et al. Research progress in key parameters of shale gas reservoir evaluation[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(2): 157-164.
- [15] 赵云胜,龙昱,赵钦球,等.灰色系统理论在地质学中的应用研究[M].武汉:华中理工大学出版社,1997.
ZHAO Yunsheng, LONG Yi, ZHAO Qinqiu, et al. Research on application of grey system theory in earth science[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1997.
- [16] 詹泽东,郭科,李祖友,等.灰色系统在构造建模中的应用[J].成都理工大学学报(自然科学版),2015,42(1):98-103.
ZHAN Zedong, GUO Ke, LI Zuyou, et al. Application of grey system in structure modeling[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Sci & Technol Ed, 2015, 42(1): 98-103.
- [17] 詹泽东,周桦,郭莉霞,等.基于灰色关联度的气井主控因素定量描述[J].工业安全与环保,2015,41(9):55-57.
ZHAN Zedong, ZHOU Hua, GUO Lixia, et al. The modeling and application of the key factors of controlling production of gas well based on gray correlation[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(9): 55-57.
- [18] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等.页岩气储层的基本特征及其评价[J].天然气工业,2010,30(10):7-12.
JIANG Yuqiang, DONG Dazhong, QI Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 7-12.
- [19] 姜在兴,张文昭,梁超,等.页岩油储层基本特征及评价要素[J].石油学报,2014,35(1):184-196.
JIANG Zaixing, ZHANG Wenzhao, LIANG chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196.
- [20] 王汉青,陈军斌,张杰,等.基于权重分配的页岩气储层可压性评价新方法[J].石油勘探技术,2016,44(3):88-94.
WANG Hanqing, CHEN Junbin, ZHANG Jie, et al. A new method of fracability evaluation of shale gas reservoir based on weight allocation[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3): 88-94.
- [21] 方辉煌,汪吉林,宫云鹏,等.基于灰色模糊理论的页岩气储层评价——以重庆南川地区龙马溪组页岩为例[J].岩性油气藏,2016,28(5):76-81.
FANG Huihuang, WANG Jilin, GONG Yunpeng, et al. Evaluation of shale gas reservoirs based on gray fuzzy theory: A case study from Longmaxi Formation in Nanchuan area, Chongqing[J]. Lithologic reservoirs, 2016, 28(5): 76-81.
- [22] 沈骋,任岚,赵金洲,等.页岩储集层综合评价指标及其应用——以四川盆地东南缘焦石坝地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组为例[J].石油勘探与开发,2017,44(4):649-658.
SHEN Cheng, REN Lan, ZHAO Jinzhou, et al. A comprehensive evaluation index for shale reservoirs and its application: A case study of the Ordovician Wufeng Formation to Silurian Longmaxi Formation in southeastern margin of Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 649-658.
- [23] TIAN H, PAN L, XIAO X, et al. A preliminary study on the pore characterization of Lower Silurian black shales in the Chuandong Thrust Fold Belt, southwestern China using low pressure N₂ adsorption and FE-SEM methods[J]. Marine & Petroleum Geology, 2013, 48: 8-19.
- [24] LÖHR S C, BARUCH E T, HALL P A, et al. Is organic pore development in gas shales influenced by the primary porosity and structure of thermally immature organic matter?[J]. Organic Geochemistry, 2015, 87(3): 119-132.
- [25] 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用(第五版)[M].北京:科学出版社,2010:62-104.
LIU Sifeng, DANG Yaoguo, FANG Zhigeng, et al. Grey system theory and its application[M]. 5th edition. Beijing: Science Press, 2010: 62-104.
- [26] ROSS D J K, BUSTIN R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: application of an integrated formation evaluation[J]. AAPG Bulletin, 2009, 92(1): 87-125.

(编辑 尹淑容)