

页岩气评价标准与储层分类

涂乙¹, 邹海燕², 孟海平³, 夏志远³, 李楠⁴

[1. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院, 广东 广州 510240; 2. 中国石油青海油田分公司勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202; 3. 中国石油新疆油田分公司百口泉采油厂, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 中国石油青海油田分公司采油一厂, 青海 茫崖 816499]

摘要:随着中国页岩气勘探开发的迅猛发展,页岩气评价标准和储层分类方法的建立显得尤为重要。在调研国内外页岩气地质特点、生气能力、储气能力和易开采性等资料的基础上,结合中国四川盆地具体地质情况,筛选出10个储层评价参数,并界定了评价参数分级分值。随后,采用灰色关联分析法定量化各因子之间的大小关系,计算出了各主、次因子的权重和页岩气储层质量综合评价因子,从而进行了储层分类。分析发现,我国四川盆地页岩气储层与美国五大页岩气盆地地质特点极为相似,并且龙马溪组和筇竹寺组储层综合评价因子分别为0.48和0.45,与美国New Albany页岩气盆地储层评价因子相差不大,开发潜力巨大。实例证明,储层分类结果与实际生产情况吻合度非常高。该评价方法可为我国页岩气储层评价和选区提供依据。

关键词:指标分值;主因子;权重系数;评价指标;综合评价因子;储层分类;页岩气

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs

Tu Yi¹, Zou Haiyan², Meng Haiping³, Xia Zhiyuan³, Li Nan⁴

(1. Shenzhen Branch of CNOOC, Guangzhou, Guangdong 510240, China; 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, Gansu 736202, China; 3. Baikouquan Oil Production Plant, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China; 4. The 1st Oil Production Plant, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Mangya, Qinghai 816499, China)

Abstract: Establishment of shale gas evaluation criteria and reservoir classification methods is important for shale gas exploration and development. Based on investigation and survey of geological features, gas generating capacities, gas storage capacity and recoverability of typical shale gas plays in the world, 10 parameters for shale gas reservoir evaluation were selected in combination with the specific geological conditions of Sichuan Basin and their scores for shale gas reservoir classification were also determined. Grey relational analysis method was used to define the relationship between these factors and to calculate the weights of the principle and secondary factors and the comprehensive evaluation factors of shale gas reservoir quality. Shale gas reservoir classification was further performed on the calculation results. Shale gas reservoirs in Sichuan Basin are similar with that in the 5 major shale gas basins in the America. The comprehensive evaluation factors of shale gas reservoirs in the Longmaxi Formation and Qiongzhusi Formation are 0.48 and 0.45 respectively, which are very close to that of New Albany shale gas basin. Case study shows that the reservoir classification results accord well with the practical production situation. This evaluation method can be applied to shale gas reservoir evaluation and selection in China.

Key words: index score, main factor, weight coefficient, evaluation index, comprehensive evaluation factor, reservoir classification, shale gas

据勘探资料显示,我国页岩气主要盆地的可采资源量约为 $23.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,资源量十分丰富,略小于美国的 $28 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。在美国,页岩气商业性开采早已实现,2009年美国页岩气产量为 $889 \times 10^8 \text{ m}^3$,高于中国当年的常规天然气产量 $830 \times 10^8 \text{ m}^3$,美国页岩气2010年超过了 $1\,200 \times 10^8 \text{ m}^3$,占据13%~15%的天然气产量^[1-2]。我国四川盆地地下古生界泥页岩分布厚度大,有

机质含量丰富,且演化程度高、生烃量大,尤其地质特征与美国页岩气盆地极为相似。近年来,中国对页岩气的勘探开发投入力度加大,特别是四川盆地威201井,经过直井压裂测试,日产气量上万方,达到工业气流,这给后续页岩气资源的勘探开发提供了基础和信心^[1]。

本文主要内容“页岩气储层评价”,是页岩气后续开发评价的基础,在分析国外页岩气勘探开发资料的基础

收稿日期:2013-08-08;修订日期:2013-12-20。

第一作者简介:涂乙(1986—),男,硕士、助理工程师,开发地质储量评价及储层建模。E-mail:tuyi200605156@126.com。

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX05038-002)。

上,结合中国页岩气地质背景和成藏特征的实际情况,给出参数等级指标,采用灰色关联分析法,定量各参数权重,得出了页岩气储层综合评价因子,评价结果符合实际情况,为合理优选页岩气有利勘探开发区提供依据。

1 页岩气地质特点

页岩气是典型的非常规天然气资源,主要以吸附或游离状态,储存在暗色泥页岩、高碳泥页岩中。页岩气具有自生自储自保,无气水边界,低孔渗,低产或无自然产能等特点,广泛分布在盆地内厚度较大的页岩烃源岩中,一般要进行压裂改造,才能实现工业气流,但开采寿命和生产周期较长^[1-5]。页岩气成藏的主要因素,包括岩石矿物成分、吸附气含量、总有机碳含量、含气量、渗透率、有机质成熟度、埋藏深度、有效厚度、孔隙度、地层压力、温度等,因此,在页岩气储层评价中,需要定量地考虑这些因素的影响。总结页岩气评价,主要分为生气能力、储气能力和易开采性三方面^[4]。页岩气影响因素关系如图 1 所示。

2 页岩气储层评价

页岩气储层评价方法有很多,本文采用灰色关联分析法进行页岩气储层划分与评价,主要是利用北美东部地区和四川盆地各影响储层质量的参数,进行整体上页岩气储层的评价,分析我国四川盆地页岩气储层开采潜力,参数对比数据见表 1 所示。

根据张金川等人编写的《页岩气资源潜力评价方法和有利区优选标准研究》手册以及调研国内外勘探开发资料显示^[6-8],页岩气选区准则应具有一定的储量丰度、经济性和可采性。总结为以下基本评价标准:①有机碳含量 > 0.3%;②成熟度(R_o) ≥ 0.4%;③埋藏深度 < 4 500 m;④富有机质泥页岩集中发育,有效厚度 > 9 m;⑤含气量 > 0.5 m³/t;⑥粘土矿物含量 > 30%,脆性矿物含量 > 45%;⑦孔隙度 > 1%;⑧渗透率 > 0.001 × 10⁻³ μm²。

2.1 灰色关联分析法

该方法是一种预测算法,根据灰色系统理论和方法,对各子系统之间的关联度进行定量分析,近年在储层的评价方面多有应用^[9-10]。在实例应用过程中,首先选定母序列,其次是子序列,随后计算关联系数、关联度、权重系数,最后确定综合评价因子。

2.2 评价指标

总结页岩气地质特点和影响因素的基础上,归纳筛选出有机碳含量(TOC)、有机质成熟度(R_o)、有效厚度(H)、储量丰度(M)、孔隙度(Φ)、含气量(V)、吸附气含量(N)、储层压力(p)、埋藏深度(D)和粘土矿物含量(S)10 个因素作为综合评价页岩气储层的指标^[11-12]。通过统计国内外页岩气各指标取值范围,结合实际页岩气勘探情况,建立了页岩气选区评价参数指标,指标参数越多越能综合考虑各项因子对选区的影响,页岩气的选区应该围绕如下 9 个参数来展开(表 2)。

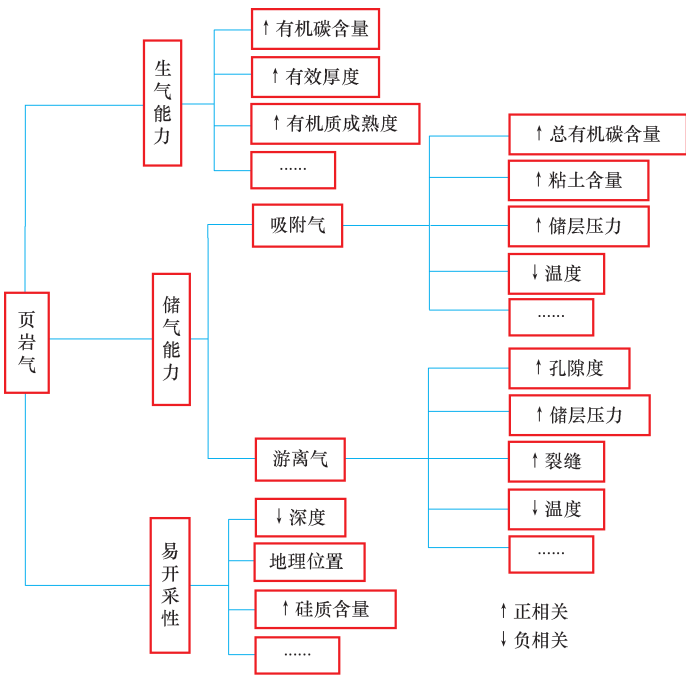


图 1 页岩气各影响因素之间的关系

Fig. 1 Relationship among factors influencing shale gas development
(地理位置包括平原、丘陵、高原、高山、沙漠、戈壁、湖沼等,依次开采难度变大。)

表 1 北美东部地区和四川盆地参数对比 (Curtis,2002 有修改)

Table 1 Parameter comparison between eastern North America and Sichuan Basin

盆地名称	密执安地盆	阿巴拉契亚地盆	伊利诺斯地盆	福特沃斯地盆	圣胡安地盆	四川地盆	
盆地类型	克拉通地盆	前陆地盆	克拉通地盆	前陆地盆	前陆地盆	前陆地盆	
页岩名称	Antrim	Ohio	New Albany	Barnett	Lewis	龙马溪组	筇竹寺组
TOC/%	0.30~24.00	0~4.70	1.00~25.00	4.50	0.45~2.50	2.48	0.34~2.80
R _o /%	0.40~0.60	0.40~1.30	0.40~1.00	1.00~1.30	1.60~1.88	1.20~2.88	1.83~3.23
有效厚度/m	21~37	9~31	15~30	15~60	61~91	35~80	50~200
储量丰度/(10 ⁸ m ³ ·km ⁻²)	0.66~1.64	0.55~1.09	0.76~1.09	3.28~4.37	0.87~5.46	0.87~2.45	0.74~1.52
孔隙度/%	9.0	4.7	10.0~14.0	4.0~5.0	3.0~5.5	2.0~4.5	2.0~4.5
含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	1.13~2.83	1.69~2.83	1.13~2.26	8.50~9.91	0.42~1.27	1.92~3.45	0.43~0.86
吸附气含量/%	70	50	40~60	20	60~85	27~60	38~64
储层压力/psi	400	500~2 000	300~600	3 000~4 000	1 000~1 500	5 000~8 000	3 000~6 000
埋藏深度/m	180~720	600~1 500	180~1 470	1 950~2 550	900~1 800	2 300~4 100	2 700~3 600
气体成因类型	热解气、生物气	热解气	生物气	热解气	热解气	热解气	热解气
粘土矿物含量/%	30~42	35~50	41	35~44	28~55	53	25~36
产水量/(m ³ ·d ⁻¹)	0.79~79.49	0	0.79~79.49	0	0	—	—
产气量/(10 ³ m ³ ·d ⁻¹)	1.13~14.16	0.85~14.16	0.28~1.42	2.83~28.32	2.83~5.66	—	—
采收率/%	20~60	10~20	10~20	8~15	5~15	—	—
单井储量/(10 ⁴ m ³)	566~3 398	425~1 699	425~1 699	1 416~4 248	1 699~5 663	—	—

注:1 psi=6 894.76 Pa(以下同)。

表 2 页岩气选区评价参数

Table 2 Parameters for identification of shale gas play fairway

评价指标	指标特征分类 (分值)			
	100~75	75~50	50~25	25~0
TOC/%	>2.0	2.0~1.0	1.0~0.5	0.5~0.3
R _o /%	>2.0	2.0~1.2	1.2~0.6	<0.6
有效厚度/m	>80	80~55	55~30	35~10
储量丰度/ (10 ⁸ m ³ ·km ⁻²)	>1.5	1.5~1.0	1.0~0.5	<0.5
孔隙度/%	>8	8~4	4~1	<1
含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	>10	10~5	5~1	<1
吸附气含量/%	>70	70~45	45~20	<20
储层压力/psi	>3 500	3 500~1 500	1 500~500	<500
埋藏深度/m	<1 000	1 000~2 000	2 000~3 000	>3 000
粘土矿物含量/%	>40	40~30	30~15	<15

1) 有机质丰度是原始有机碳含量与原始岩石质量的比值。有机质丰度高低与页岩气含量成正比,直接影响页岩气含量的大小。对北美地区页岩气储层研究后,认为有商业价值的页岩气藏一般应该具备 TOC 大于 2.0%。在中国高演化地区,原始有机碳含量和残余有机碳含量存在很大差异。针对 I 型有机质页岩气藏,成为有效页岩的条件是残余有机碳含量≥1.0%。

2) 成熟度是判断有机质是否进入热成熟生气阶段的指标。有机质进入生气阶段(生气窗)后,气体含量将迅速增加。美国最大的页岩气田 Barnett Shale 绝大多数页岩气井选择在 R_o≥1.1% 地区打井,可以有效地降低页岩气勘探开发风险。

3) 有机质页岩厚度与页岩气藏富集程度成正比,是页岩气生成和赋存的载体,也是保证有充足的储渗空间的重要条件。对于直井,页岩有效厚度应大于 30 m,对于水平井,由于分段压裂等技术的使用,页岩

有效厚度可能低于 30 m。除此之外,泥页岩厚度的大小也直接影响着压裂改造和页岩气资源量。

4) 储量丰度是探明地质储量与含气面积的比值,直接决定页岩气平面上含气量密度大小。

5) 页岩储层一般为特低孔特低渗——致密储层。孔隙孔径大小为微米—纳米级,页岩储层具有脆性强、构造裂缝及微裂缝发育等特点,因此,孔隙度和相对渗透率相应较高,我国的页岩气藏孔隙度一般在 4%~6%,渗透率小于 0.001×10⁻³ μm²,考虑到获取物性参数的难易程度,在生产中的贡献大小,将孔隙度作为物性参数的代表较为合理。

6) 相对页岩中的石英和方解石成分,粘土矿物及其他无机成分具有更强的吸附能力,粘土矿物往往具有较高的微孔隙体积和比表面积,吸附性能较强,而且是吸附气赋存的场所。

7) 储层压力、温度的大小影响着吸附气和游离气的含量,随着压力增加,吸附气和游离气含量都会随之增大,但是相同压力下,随着地层温度的增加,吸附气和游离气含量均会降低。

8) 就易开采性来说,埋深浅更具经济价值。随着开采技术的提高,该参数的影响又带来一定的变化。我国页岩气勘探开发刚刚起步,开发技术和保存条件还不成熟,认为埋藏深度 1 000~3 000 m 可作为有利富集区,大于 3 000 m 以上的作为资源潜力区。随着水平井技术的提高,国外对 4 000~5 000 m 的页岩气开采已不成问题,因此,结合中国页岩气开采实践,认为资源潜力区的界线可加深到 4 000 m 左右。

9) 按赋存形式划分,含气量包括游离气、吸附气和溶解气,按测定过程划分,含气量包括损失气、解吸气和

残余气。吸附是页岩气赋存的主要方式之一,储集层页岩气含量的高低直接决定页岩气井稳产期长短。据统计,吸附气含量范围约为 20%~85%,对于可采储层丰富的页岩气储集层,吸附气含量至少占天然气总产量的 40%左右,是预测页岩储集层产能的关键因素。

2.3 评价矩阵

将某一个能够定量地反映被评判事物的性质的指标按一定顺序排列,从而能从数据信息分析被评判事物与其影响因素之间的关系,称为关联分析的母序列^[9]。则母序列为:

$$\{X_t^{(0)}(0)\}, \quad t = 1, 2, \cdots, n \tag{1}$$

子序列是从一定程度上影响被评判事物性质的的各子因素数据的有序排列。则有子序列:

$$\{X_t^{(0)}(i)\}, \quad i = 1, 2, \cdots, m; \quad t = 1, 2, \cdots, n \tag{2}$$

根据的母、子序列,可构成如下的原始数据矩阵

$$X^{(0)} = \begin{bmatrix} X_1^{(0)}(0) & X_1^{(0)}(1) & \cdots & X_1^{(0)}(m) \\ X_2^{(0)}(0) & X_2^{(0)}(1) & \cdots & X_2^{(0)}(m) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ X_n^{(0)}(0) & X_n^{(0)}(1) & \cdots & X_n^{(0)}(m) \end{bmatrix} \tag{3}$$

本次研究中将有机碳含量确定为主因素,而其余的 9 个指标分别从某一侧面反映被评价样品质量好坏,可以看作是子因素(表 3)。

2.4 评价指标定量化

原始数据变换处理方法有初值化处理、均值化处

理、极大值标准化及归一化等^[9]。目的是消除原始数据物理意义以及量纲间的差异,本部分将采用极大值标准化法,使每项评价分数成为无量纲、标准化的数据^[13-14]。极大值标准化根据参数意义不同,处理方法也有所差异,本文研究过程中分 3 种情况(表 4)。

① 对于正指标,即评价数据值越大,储层质量越好,如有机碳含量(*TOC*)、有机质成熟度(*R_o*)、有效厚度(*H*)、储量丰度(*G*)、孔隙度(*Φ*),含气量(*V*)、吸附气含量(*N*)和储层压力(*p*)等,用单个参数数据除以本指标的最大值;

② 对于负指标,即评价数据值越小,储层质量越好,先用本参数的极大值减去单项参数数据,用其差值再除以极大值;

③ 对于中值指标,即评价数据越靠近中值区间,储层质量越好,如埋藏深度(*D*),求取单个参数数据与中间值之差的绝对值,再用最大绝对值与各项指标的差值除以最大绝对值。

2.5 求取灰关联度

用标准化后的评价指标,通过下式计算出有机碳含量(*TOC*)与各子因素之间的灰关联系数,从而求得各子因素指标与主因素指标的灰关联度^[9]。

1)求取灰关联系数

$$\xi_{i,0} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(i,0) + \rho \Delta_{\max}}, \quad i = 1, 2, \cdots, m \tag{4}$$

表 3 主因子和子因子评价参数
Table 3 Principle and secondary evaluating factors

页岩名称	<i>TOC</i> /%	<i>R_o</i> /%	有效厚度/ m	储量丰度/ (10 ⁸ m ³ · km ⁻²)	孔隙度/ %	含气量/ (m ³ · t ⁻¹)	吸附气含量/ %	储层压力/ psi	粘土矿物含量/ %	埋藏深度/ m
Antrim	0.30~24.00	0.40~0.60	21~37	0.66~1.64	9.0	1.13~2.83	70	400	30~42	180~720
Ohio	0~4.70	0.40~1.30	9~31	0.55~1.09	4.7	1.69~2.83	50	500~2 000	35~50	600~1 500
New Albany	1.00~25.00	0.40~1.00	15~30	0.76~1.09	10.0~14.0	1.13~2.26	40~60	300~600	41	180~1 470
Barnett	4.50	1.00~1.30	15~60	3.28~4.37	4.0~5.0	8.50~9.91	20	3 000~4 000	35~44	1 950~2 550
Lewis	0.45~2.50	1.60~1.88	61~91	0.87~5.46	3.0~5.5	0.42~1.27	60~85	1 000~1 500	28~55	900~1 800
龙马溪组	2.48	1.20~2.88	35~80	0.87~2.45	2.0~4.5	1.92~3.45	27~60	5 000~8 000	53	2 300~4 100
筇竹寺组	0.34~2.80	1.83~3.23	50~200	0.74~1.52	2.0~4.5	0.43~0.86	38~64	3 000~6 000	25~36	2 700~3 600

表 4 评价参数标准化数据
Table 4 Standardized data of evaluating parameters

页岩名称	<i>TOC</i>	<i>R_o</i>	有效厚度	储量丰度	孔隙度	含气量	吸附气含量	储层压力	粘土矿物含量	埋藏深度
Antrim	1.00	0.20	0.33	0.39	0.75	0.22	0.96	0.08	0.68	0.19
Ohio	0.30	0.34	0.31	0.24	0.39	0.28	0.88	0.40	0.79	0.94
New Albany	0.80	0.28	0.26	0.25	1.00	0.18	0.68	0.09	0.67	0.27
Barnett	0.30	0.53	0.37	1.00	0.42	1.00	0.27	0.70	0.75	1.00
Lewis	0.13	0.67	0.84	0.83	0.35	0.09	1.00	0.25	0.77	0.86
龙马溪组	0.17	0.81	0.72	0.43	0.27	0.28	0.55	1.00	1.00	0.00
筇竹寺组	0.13	1.00	1.00	0.23	0.27	0.07	0.68	0.90	0.57	0.04

式中:

$$\Delta_i(i,0) = |X_i^{(1)}(i) - X_i^{(1)}(0)| \tag{5}$$

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_i |X_i^{(1)}(i) - X_i^{(1)}(0)| \tag{6}$$

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_i |X_i^{(1)}(i) - X_i^{(1)}(0)| \tag{7}$$

为了避免灰关联系数之间的差异不明显,和最大绝对差数值太大而导致数据失真的影响,式中引入分辨系数 ρ ,通常 $\rho \in [0.1, 1]$,本文取值 $0.5^{[9-11]}$ 。

2) 计算灰关联度

关联度 $r_{i,0}$ 定义为:

$$r_{i,0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_{i,0} \tag{8}$$

10 个指标的关联度分别为 $r = (1.000\ 0, 0.509\ 7, 0.567\ 1, 0.599\ 2, 0.745\ 4, 0.555\ 2, 0.656\ 7, 0.538\ 2, 0.549\ 1, 0.689\ 3)$ 。

关联度的取值范围在 0.1 ~ 1。关联度越接近于 1,表明子因素对主因素的影响越显著,反之亦然。

2.6 权重系数的确定

衡量各评价指标对储层质量的影响程度,就是计算它们相对于有机碳含量(TOC)的权重值。归一化处理处理的结果,即为各评价指标在储层质量评价中的权重大小^[9]。归一化表达式为:

$$a_i = r_{i,0} / \sum_{i=1}^m r_{i,0} \tag{9}$$

10 个指标的权重系数分别为 $a = (0.156\ 0, 0.079\ 5, 0.088\ 5, 0.093\ 5, 0.116\ 3, 0.086\ 6, 0.102\ 5, 0.084\ 0, 0.085\ 7, 0.107\ 5)$ 。

2.7 确定综合权衡评价分数和分类标准

将标准化后的单项评价指标,与本类的“权重”相乘,即为单项指标的权衡大小^[9-11]。将各个评价指标的单项权衡分数相加,即得到各页岩气储集层的综合评价分数,命名为“储层质量综合评价 Q 因子”,如表 5 所示。

在区域地质调查基础上,综合考虑地质、地球化学

指标、地球物理、页岩发育规模、深度、钻井天然气显示以及少量含气性参数等参数^[6-7],再结合页岩气储集层综合评价因子 Q 大小情况确定分类标准,大致分为四类:当 $Q > 0.60$ 时,为 I 类储层,占研究单元总数的 14%; $0.51 < Q \leq 0.60$ 时,为 II 类储层,占研究单元总数的 43%; $0.48 < Q \leq 0.51$ 时,为 III 类储层,占研究单元总数的 14%; $0.40 < Q \leq 0.48$ 时,为 IV 类储层,占研究单元总数的 29%。I 类页岩气储层主要参数;有机碳含量、有机质成熟度、有效厚度、储量丰度、孔隙度、含气量和吸附气含量等平均值相对较大,表明该储集层质量好,Barnett 盆地被评为 I 类储层,其储层物性、经济条件和可采性均极佳,据统计该盆地单井产气量为 $(2.83 \sim 28.32) \times 10^3\ \text{m}^3/\text{d}$,年产量为 $315 \times 10^8\ \text{m}^3$,居美国五大页岩气盆地之首。II 类、III 类次之,IV 类储层在多数评价参数较好的情况下,另有制约勘探开发缺陷,使之开采技术要求高,投入成本不菲,如我国四川盆地龙马溪组和筇竹寺组页岩气储层,埋藏深度均在 3 000 m 以上,勘探开发技术要求高,成本投入相对较大,但是开采潜力大。据调研四川盆地龙马溪组,九奎山阳 63 井页岩产层 3 505.0 ~ 3 518.5 m,产气量为 $3.5 \times 10^3\ \text{m}^3/\text{d}$,隆 32 井页岩气产层 3 164.2 ~ 3 175.2 m,产气量为 $1.95 \times 10^3\ \text{m}^3/\text{d}$ 。开采潜力可与美国五大页岩气盆地相媲美,我国页岩气勘探开发前景巨大。

3 结论

1) 在美国五大页岩气盆地和我国四川盆地勘探开发地质条件、相关参数基础上,选出了影响页岩气储层评价的主要因素,对 10 项评价参数作了界定,给出评价参数分级分数。

2) 灰关联分析法在综合考虑多因子对储层的影响的基础上,能建立各评价因子之间的定量关系,能有效避免单因素评价储层时出现评价结果相互矛盾、存

表 5 页岩气储层质量综合评价分类

Table 5 Comprehensive evaluation and classification of shale gas reservoirs

页岩名称	TOC	R_0	有效厚度	储量丰度	孔隙度	含气量	吸附气含量	储层压力	粘土矿物含量	埋藏深度	综合评价因子 Q	储层分类
Antrim	1.00	0.20	0.33	0.39	0.75	0.22	0.96	0.08	0.68	0.19	0.529 5	II
Ohio	0.30	0.34	0.31	0.24	0.39	0.28	0.88	0.40	0.79	0.94	0.515 2	II
New Albany	0.80	0.28	0.26	0.25	1.00	0.18	0.68	0.09	0.67	0.27	0.493 2	III
Barnett	0.30	0.53	0.37	1.00	0.42	1.00	0.27	0.70	0.75	1.00	0.609 3	I
Lewis	0.13	0.67	0.84	0.83	0.35	0.09	1.00	0.25	0.77	0.86	0.557 8	II
龙马溪组	0.17	0.81	0.72	0.43	0.27	0.28	0.55	1.00	1.00	0.00	0.475 6	IV
筇竹寺组	0.13	1.00	1.00	0.23	0.27	0.07	0.68	0.90	0.57	0.04	0.445 3	IV
权重系数	0.156 0	0.079 5	0.088 5	0.093 5	0.116 3	0.086 6	0.102 5	0.084 0	0.085 7	0.107 5		

在分歧等问题,能定量地反映各指标在储层评价中的权重大小,进而给出综合评价因子 Q 。

3) 我国四川盆地龙马溪组和筇竹寺组页岩气储层开发潜力喜人,其综合评价因子 Q 与 New Albany 盆地相差不大,除埋藏深度和储层压力外,其余评价指标与美国五大页岩气盆地参数基本一致。评价结果符合实际生产情况,准确度和可信度高。

符号注释

- t ——同一评价指标不同页岩盆地个数;
 n ——页岩盆地个数;
 i ——不同评价指标个数, $i=0$ 时为母系列;
 m ——评价指标个数;
 $X_i^{(0)}(i)$ ——评价参数数值;
 $X_i^{(1)}(i)$ ——标准化评价指标;
 $\xi_{i,0}$ ——不同指标灰关联系数;
 ρ ——分辨系数,削弱数据失真的影响,通常 $\rho \in [0.1, 1]$, 本文取值 0.5;
 $r_{i,0}$ ——子序列 i 与母序列 0 的灰关联度;
 a_i ——不同指标权重。

参 考 文 献

- [1] 李延钧,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.
Li Yanjun, Liu Huan, Liu Jiaxia, et al. Geologic selection and method of resource potential evaluation of shale gas[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Natural Science Edition, 2011, 33(2): 28-34.
- [2] 李胜利,于兴河,高兴军,等. 剩余油分布研究新方法——灰色关联法[J]. 石油与天然气地质,2003,24(2):175-179.
Li Shengli, Yu Xinghe, Gao Xingjun, et al. New method of residual oil distribution study—grey correlation method[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 175-179.
- [3] 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):33-39.
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): 33-39.
- [4] 杨振恒,李志明,沈宝剑,等. 页岩气成藏条件及我国黔南坳陷页岩气勘探前景浅析[J]. 中国石油勘探,2009,14(3):24-28.
Yang Zhenheng, Li Zhiming, Shen Baojian, et al. Shale gas accumulation conditions and exploration prospect in southern Guizhou Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3): 24-28.
- [5] 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.
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [6] 聂海宽,唐玄,边瑞康,等. 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, et al. 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.
- [7] 张金川,林腊梅,姜生玲,等. 页岩气资源潜力评价方法与有利区优选标准操作手册[M]. 北京:中国地质大学,2011:1-19.
Zhang Jinchuan, Lin Namei, Jiang Shengling, et al. Shale gas resource potential evaluation method and the optimization of benefit standard operating manual[M]. Beijing: China University of Geosciences, 2011: 1-19.
- [8] 范柏江,师良,庞雄奇,等. 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 Baijiang, Shi Liang, Pang Xiongqi, et al. Shale gas accumulation characteristics and exploration district condition[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(6): 9-13.
- [9] 涂乙,谢传礼,刘超,等. 灰色关联分析法在青东凹陷储层评价中的应用[J]. 天然气地球科学,2012,23(2):381-386.
Tu Yi, Xie Chuanli, Liu Chao, et al. Application of grey correlation analysis method in Qing-Dong Sag reservoir evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(2): 381-386.
- [10] 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, 2008, 92(1): 87-125.
- [11] Aman B A, Nichols T W, Snyder R L, et al. Integrated reservoir evaluation revives nearly abandoned Illinois Basin Field[J]. SPE 57437, 1999.
- [12] 张旭,颜其彬,李祖兵. 陆相碎屑岩储层定量评价的新方法——以河南某油田为例[J]. 天然气地球科学,2007,18(1):141-148.
Zhang Xiu, Yang Qibin, Li Zhubing. Quantitative assessment of reservoirs in super-highly watered cut fields[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(1): 141-148.
- [13] 刘吉余,彭志春,郭晓博. 灰色关联分析法在储层评价中的应用——以大庆萨尔图油田北二区为例[J]. 油气地质与采收率,2005,12(2):13-15.
Liu Giyu, Peng Zhichun, Guo Xiaobo. The application of grey correlation analysis method in reservoir evaluation: take N2 area of Saertu oil field of Daqing for example[J]. Oil-Gas Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(2): 13-15.
- [14] 赵加凡,陈小宏,张勤. 灰关联分析在储层评价中的应用[J]. 勘探地球物理进展,2003,26(4):282-286.
Zhao Jiafan, Chen Xiaohong, Zhang Qing. Application of grey correlation analysis in reservoir evaluation[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2003, 26(4): 282-286.

(编辑 董 立)