

页岩气勘探选区评价方法探讨

刘超英

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:通过调研国内外相关油公司及地区的页岩气勘探选区评价方法及参数,在分析页岩气勘探选区评价关键问题的基础上,突出页岩气的富集性和可采性,建立了页岩气“富集概率—资源价值”评价模型及数值化计算公式,并对评价结果进行了分类,应用该方法针对中国石化川东南部分区块进行了选区评价。

关键词:富集概率;资源价值;选区评价;页岩气

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Discussion on methods of shale gas exploration evaluation

Liu Chaoying

(SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The methods and parameters for shale gas exploration evaluation of petroleum companies at home and abroad are discussed. The key elements for shale gas exploration evaluation are studied, focusing on enrichment and admissibility. An evaluation model of “enrichment probability—resource value” is established and some calculation formulas are proposed. The evaluation results are classified. Some blocks of SINOPEC in southeastern Sichuan Basin are evaluated by means of this method.

Key words: enrichment probability; resource value; exploration evaluation; shale gas

近年来,随着页岩气地质认识的不断提高,配套钻井工程、工艺技术的不断发展,页岩气勘探逐渐成为全球非常规能源勘探开发的热点^[1-5]。我国页岩气勘探前景广阔,具有较好的页岩气成藏条件^[6-15]。从这些众多勘探目标中如何进行勘探选区?如何进一步明确勘探的方向和次序?这成为众多勘探者研究的热点和难点。国外油公司虽均有自身的评价方法,但由于中国盆地的差异性、复杂性,决定了我国页岩气勘探选区评价方法的独特性,因此需要建立一套具有针对性的选区评价方法及参数。

本文在总结国内外页岩气选区评价方法的基础上,结合我国页岩气勘探情况,分析了影响页岩气勘探选区评价的关键因素,通过大量数据统计,建立了页岩气选区评价方法及指标体系,并在实际勘探中得以应用。

1 页岩气选区评价研究现状

国内外油公司根据自身所在探区的地质条件和勘探、开发技术的不同,采用了不同的选区评价

方法和指标体系^[16-18],归纳总结主要有3种:即以BP公司、新田公司为代表的综合风险分析法(CCRS)、以埃克森美孚为代表的边界网络节点法(BNN—Boundary Network Node)和以雪佛龙、HESS、哈丁—歇尔顿等能源公司为代表的地质参数图件综合分析法,这些选区评价方法及参数因每个公司侧重点不同而有所差异(表1),并且很多相关参数及赋值标准并未公开。

从公开报道来看,BP公司的页岩气综合风险分析法主要考虑9个参数(表1),主要适用于高勘探成熟区域,评价的门槛值为 $R_o > 1.2\%$ 、目标层段总有机碳含量大于4%、目标层段厚度75~150 m、分布面积大、基质孔隙度为4%~6%、地层超压、存在有利于压裂措施的硅酸盐岩石等。

埃克森美孚公司在页岩气选区的参数大致可分为2类,其边界网络节点法主要以气井的经济极限产量为目标函数,以影响目标函数的各层次展开的控制参数为边界函数,利用节点网络分析方法进行预测分析。

哈丁—歇尔顿能源公司页岩气选区评价参数

表1 国外部分油公司页岩气评价参数

Table 1 Parameters for shale gas evaluation in some foreign petroleum companies

序号	公司	评价参数	个数
1	哈丁-歌尔顿	地质因素:页岩净厚度、有机质丰度、热演化程度、岩石脆性、孔隙度、页岩矿物质组成、三维地震资料质量、构造背景、页岩的连续性、渗透率、压力梯度 钻井因素:钻井现场条件、天然气管网等 环境因素:水源、水处理、环保	16
2	埃克森美孚	热成熟度(R_o)、页岩总有机碳含量、气藏压力、页岩净厚度、页岩空间展布、页岩碎裂性(可压裂性) 裂缝及其类型、吸附气及游离气量高低、基质孔隙类型及大小、深度、有机质含量平均值、岩性、非烃气体分布	13
3	BP	构造格局和盆地演化、有机相、厚度、原始总有机碳、镜质体反射率、脆性矿物含量、现今深度和构造、地温梯度、温度	9
4	雪佛龙	总有机碳含量、热成熟度、黑色页岩厚度、脆性物质含量、深度、压力、沉积环境、构造复杂性	8

多达16项,内容涵盖地质因素、环境因素、钻井因素3大类。

此外,国内也由国土资源部油气资源战略研究中心出台了“页岩气资源潜力评价方法与有利区优选”工作指南,将页岩气分布区划分为远景区、有利区和目标区(核心区)等3级^[19],并分成海相、海陆过渡相和陆相3类,在选区评价过程中按照不同的参考指标进行优选,但该方法主要是针对单一目标区内的“有利区”进行预测。

综上所述,国外各大油公司所采用的评价参数及标准存在差异,主要针对高勘探程度的单一地质单元内的有利区优选。针对我国叠合盆地的特点,以多种类型、多时代富有机质页岩气的选区评价刚刚起步,相关的评价方法及标准有待建立。

2 页岩气勘探选区评价方法

2.1 勘探选区评价模型及参数

页岩气勘探选区评价是以勘探区块地质条件为基础,以勘探区块内富含有机质泥页岩为目标,以泥页岩的分布特征(厚度、连续性、面积等)、有机地化特征、岩石矿物特征、储集性能、保存条件、页岩气显示及测试、经济技术条件(地表地貌、埋深等)等资料为依据,进行页岩气勘探区块评价及优选,为页岩气整体勘探开发部署提供依据。

页岩气藏与常规天然气藏生成、运移、赋存、聚集、保存等方面存在差异^[20],其特点表现在:①早期成藏,边形成、边赋存、聚集,不需要构造背景;②自

生自储,泥页岩既是气源岩层,又是储气层,多种方式赋存、普遍含气;③具有“原地”成藏特征,成藏运移距离较短;④对盖层条件要求没有常规天然气高;⑤赋存方式及赋存空间多样,存在吸附(有机质、粘土颗粒表面微孔隙)、游离(天然裂缝和孔隙)或溶解(在干酪根和沥青质中)等多种方式;⑥气、水关系复杂;⑦储层孔隙度较低(通常小于5%)、孔隙半径小(以微孔隙为主),含气量较低,裂缝发育程度不但控制游离状页岩气的含量,而且影响页岩气的运移、聚集和单井产量;⑧开发过程中,页岩气井日产量较低,但生产年限较长。

根据页岩气与常规油气在成因和开采方式上存在的差异,勘探选区评价中应反映页岩气自身成因及开发特点,强调地质风险的不确定性,突出页岩气的可采性和经济性,研究以国内外通用的“风险—价值”评价模板为基础,按照我国页岩气不同沉积背景下的演化特点,采用“富集概率—资源价值”评价模型(图1),对页岩气进行统一评价。

从生烃、赋存、可采性分析研究发现,控制页岩气富集性的主要因素为有机碳含量、面积、厚度、类型、成熟度、保存条件(断裂发育程度、顶底板)、含气量及地质认识等^[21-23]。控制其资源价值及经济可采性指标主要集中在工程技术条件上,主要包括脆性矿物含量、有机质丰度、地层压力、埋藏深度、地表地貌条件、水源、市场管网、道路交通、其他等参数。

结合评价模型从页岩气富集概率及资源价值两方面进行参数筛选,从生烃、赋存、可采三方面因素入手,优选影响页岩气富集、体现资源价值的有效参数组合,并结合勘探程度、地质认识的不同,针对评价对象优选参数,尽量简单、实用,以此建立页岩气勘探选区评价指标参数(表2)。

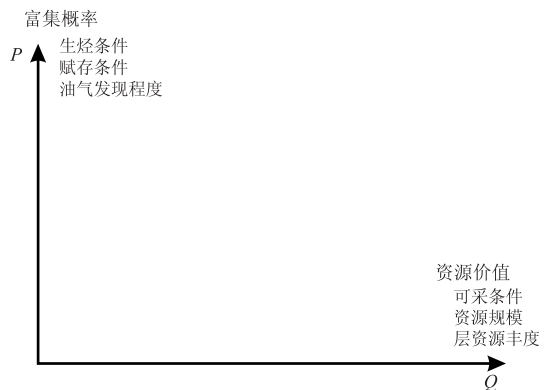


图1 页岩气“富集概率—资源价值”评价模型示意

Fig. 1 Evaluation model of “enrichment probability—resource value” for shale gas

表2 页岩气勘探选区评价指标体系参数

Table 2 Parameters for shale gas exploration evaluation

类别	参数	
页岩气富集概率	生烃条件	有机碳含量($w(\text{TOC})$),成熟度(R_o)
	赋存条件	储层裂隙发育、孔隙度、保存条件
	资料可靠程度	资料可靠程度指数
资源战略价值	可采条件	埋深、压力系数、地面条件、技术适用性(含单层厚度)、脆性物质含量、泊松比
	资源规模、丰度	资源量(面积、厚度、含气量)、(层)资源丰度

对比分析北美主要含页岩气盆地 Barnett 页岩、Haynesville 页岩、Eagle Ford 页岩等典型已开发页岩气藏的地质参数特征^[24-27](表3),北美成功页岩气开发区的有利生烃条件是含气页岩有机碳含量一般在1%以上,有的高达25%;含气页岩的厚度一般为30~60 m。有利的赋存条件是储集层孔隙度3%~8%,微裂隙发育,岩性为纹层状灰质泥岩相、层状—纹层状泥质灰岩相。有利开发条件为脆性矿物含量大于40%,粘土含量小于30%。此外,埋深、吸附气含量、页岩矿物组成和地层压力等地质参数也直接影响着页岩气藏开发方案、产量变化趋势和压裂改造工程技术。

近年来,在川东南涪陵大安寨、川东北元坝大安寨、川东南彭水志留系页岩气勘探均取得重要突破,这些地区既有与北美地区的相似性,也具有其独特性。如,川东南彭水地区彭页 HF-1 井下志留统埋藏较浅(2 263 ~ 2 526.7 m),地层压力系数1.15,储层为富有机质页岩夹砂岩层,矿物组成以

硅质为主(30.8%~61.1%),钙质含量低,属于低超压层状硅质页岩型,与福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏相似。而川东南涪陵和川东北元坝大安寨段泥页岩虽在气藏压力上与 Haynesville、Eagle Ford 页岩气藏具有超压的相似性,但在页岩矿物组成上存在着一定的差异,勘探选区评价的参数取值标准应体现国内地质的特点。

类比国外页岩气评价参数的取值范围,参照南方的寒武系及二叠系泥页岩、华北地区石炭—二叠系煤系地层泥页岩、西北地区的侏罗系煤系地层泥页岩、鄂尔多斯盆地的中—古生界泥页岩等15个盆地及地区的面积、厚度、有机碳、成熟度等地质参数进行统计分析,划分这些参数的取值范围,建立评价的数学模型及赋值标准(表4~7)。

2.2 选区评价方法数学模型和参数计算

分别建立“富集概率”及“资源价值”的数值化计算公式,页岩气富集概率需从生烃条件、赋存条

表4 页岩气生烃条件概率赋值

Table 4 Probability assignment of generation conditions for shale gas

概率区间	$P_{\text{生烃条件}}$		
	$P_{\text{有机碳}/\%}$	$P_{\text{成熟度}/\%}$	
		I-II型干酪根	II ₂ -III型干酪根
[0.75,1.0]	≥4	[1.3,2.0]	[1.0,1.6]
[0.5,0.75]	[2,4)	[0.7,1.3)或(2.0,3.0]	[0.7,1.0)或(1.6,2.0]
[0.25,0.5)	[1,2)	[0.5,0.7)或(3.0,4.0)	[0.5,0.7)或(2.0,2.5)
[0,0.25)	<1	<0.5 或 >4.0	<0.5 或 >2.5

表3 北美典型页岩气藏类型及地质特征参数对比

Table 3 Types and geologic features of shale gas reservoirs in North America

盆地名称	福特沃斯	Sabine 隆起	马沃里克盆地	
页岩名称	Barnett 页岩	Haynesville 页岩	Eagle Ford 页岩	
层位	石炭系	上侏罗统	上白垩统	
埋藏深度/m	1 981 ~ 2 591	3 048 ~ 4 115	1 200 ~ 4 270	
泥页岩有效厚度/m	15 ~ 61	61 ~ 91.44	30 ~ 90	
有机地化参数	$w(\text{TOC})/\%$	2.0 ~ 7.0/4.5	0.5 ~ 4	2.8 ~ 6.5/4.7
	类型	I-II型	I-II型	I-II型
	$R_o/\%$	1.1 ~ 2.2	2.2 ~ 3.2	1 ~ 1.7
	成因类型	热成因	热成因	热成因
孔隙度/%	4.0 ~ 5.0	8 ~ 9	2 ~ 10	
含气量/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	8.5 ~ 9.91	2.83 ~ 9.36	2.8 ~ 5.7	
吸附气含量/%	40 ~ 60	10	10 ~ 20	
矿物组成/%	硅质	35 ~ 50/45	14 ~ 35	15 ~ 20
	钙质	8.5 ~ 12.0	30 ~ 50	55 ~ 60
	粘土矿物	25 ~ 32/27		20
压力系数	0.99 ~ 1.01	1.6 ~ 2.07	1.35 ~ 1.8	
单井日产气量/ 10^4 m^3	5.4 ~ 6.2	27.6 ~ 54.5	14.2 ~ 28.7/12.7	

注:表中分式含义为最小值~最大值/平均值

表5 页岩气赋存条件概率赋值
Table 5 Probability assignment of preservation conditions for shale gas

概率区间	$P_{\text{赋存条件}}$		
	$P_{\text{孔隙度}}/\%$	$P_{\text{裂缝发育}}$	$P_{\text{保存条件}}$
[0.75,1.0]	≥ 6	发育垂直、水平两组微裂缝,密度大于等于10条/米	位于凹陷中心及邻近凹陷斜坡区,地震及钻井资料证实泥岩层系在优质盖层,泥岩层系无晚期构造运动、侵蚀作用、断层活动破坏
[0.5,0.75]	[4,6]	一组微裂缝发育,密度(6,10)条/米	已有资料证实可能存在区域盖层,无晚期构造运动、侵蚀作用、断层活动破坏
[0.25,0.5]	[2,4]	微裂缝发育一般,密度(2,6)条/米	无确切资料证实是否存在区域盖层,可能存在有油气破坏作用
[0,0.25)	< 2	微裂缝不发育,密度小于2条/米	已有资料证实不存在盖层或者存在后期油气破坏作用

件和油气发现程度等条件进行分析,可用生烃条件、赋存条件和油气发现程度3种因素概率的乘积表示(公式1),其中 $P_{\text{生烃条件}}$ 、 $P_{\text{赋存条件}}$ 、 $P_{\text{油气发现程度}}$ 考虑各自参数的影响,根据蒙特卡洛加权平均计算。

$$P_{\text{富集概率}} = P_{\text{生烃条件}} \times P_{\text{赋存条件}} \times P_{\text{油气发现程度}} \quad (1)$$

$$P_{\text{生烃条件}} = \frac{\sqrt{P_{\text{有机碳}}^2 + P_{\text{成熟度}}^2}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$$P_{\text{赋存条件}} = \frac{\sqrt{P_{\text{裂缝发育}}^2 + P_{\text{孔隙度}}^2 + P_{\text{保存条件}}^2}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

其中 $P_{\text{有机碳}}$ 和 $P_{\text{成熟度}}$ 依据表4进行赋值; $P_{\text{裂缝发育}}$ 、 $P_{\text{孔隙度}}$ 和 $P_{\text{保存条件}}$ 依据表5进行赋值; $P_{\text{油气发现程度}}$ 是不同地质认识程度下的资料的置信度

表6 页岩气可采条件赋值

Table 6 Assignment of recoverable conditions for shale gas

概率区间	$Q_{\text{可采条件}}$			
	$Q_{\text{埋深}}/m$	$Q_{\text{压力系数}}$	$Q_{\text{脆性矿物含量}}/\%$ (石英、方解石、长石等硅质、钙质矿物含量)	$Q_{\text{泊松比}}$
[0.75,1.0]	$\leq 2\ 500$	≥ 1.6	≥ 40	≤ 0.2
[0.5,0.75]	(2 500,3 500]	[1.2,16)	[30,40)	(0.2,0.3]
[0.25,0.5]	(3 500,4 000]	[0.8,1.2)	[15,30)	(0.3,0.4]
[0,0.25)	$> 4\ 000$	< 0.8	< 15	> 0.4

差异,结合钻井、测井、试验资料进行给定。

页岩气资源战略价值是根据可采条件、资源规模及资源丰度(层)的类比值加权平均计算得出的,公式如下:

$$Q_{\text{资源价值}} = \frac{\sqrt{Q_{\text{可采条件}}^2 + Q_{\text{资源规模}}^2 + Q_{\text{层资源丰度}}^2}}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

$$Q_{\text{可采条件}} = \frac{Q_{\text{埋深}} + Q_{\text{压力系数}} + Q_{\text{脆性矿物含量}} + Q_{\text{泊松比}} + Q_{\text{地面条件}}}{5} \quad (5)$$

$$Q_{\text{资源规模}} = \frac{Q_{\text{单元规模}}}{\text{Max}(Q_{\text{单元规模}})} \quad (6)$$

$$Q_{\text{层资源丰度}} = \frac{Q_{\text{层单元丰度}}}{\text{Max}(Q_{\text{层单元丰度}})} \quad (7)$$

其中 $Q_{\text{埋深}}$ 、 $Q_{\text{压力系数}}$ 、 $Q_{\text{脆性矿物含量}}$ 、 $Q_{\text{泊松比}}$ 和 $Q_{\text{地面条件}}$ 依据表6进行赋值; $Q_{\text{资源规模}}$ 和 $Q_{\text{层资源丰度}}$ 依据表7进行赋值。

分别计算页岩气评价单元的富集概率及资源价值,在页岩气选区评价分类结果图上做点(图2),根据“选优剔差”的原则,按照所处区域得出选区的评价结果,考虑页岩气富集概率 P 和资源价值 Q 的关系,将分类结果分为3大类,4个小类(I、II、III3个

表7 页岩气资源规模、层资源丰度赋值

Table 7 Assignment of resource scale and abundance of shale gas

概率区间	$Q_{\text{资源规模}}/10^8\ m^3$	$Q_{\text{层资源丰度}}/(10^8\ m^3 \cdot km^{-2})$
[0.75,1.0]	≥ 500	≥ 5
[0.5,0.75]	[100,500)	[2,5)
[0.25,0.5]	[50,100)	[1,2)
[0,0.25)	< 50	< 1

具备良好的地表条件,地形高差小,有利开采(如平原、丘陵等),满足环保要求、交通良好,附近具有充足的水源

地形高差小,地表条件较差(山区、沙漠、高原),需要改进交通条件,附近有充足水源

地形高差小,地表条件差(山区、沙漠、高原),交通条件较差,附近有水源

坡度大于45°,现有条件不能适应地面和环保要求、交通困难,无水源

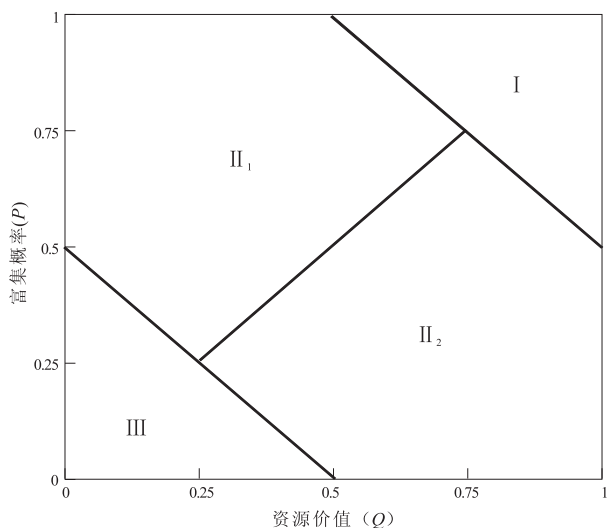


图2 页岩气勘探选区评价结果分类

Fig. 2 Classification of exploration evaluation for shale gas

大类,其中II又分为II₁和II₂小类),结合雪佛龙公司风险分类原则,以I、II₁、II₂、III类面积分别为1:3:3:1的比例,确定I、III富集概率及资源价值分别为0.5的界限,建立结果的划分标准。

I类区块:该类区块不但页岩气资源富集概率较高,而且资源规模较大,技术的适用性较好,为具有较好页岩气勘探开发潜力和勘探前景的区块,是最有利的勘探区块或开发目标,可以列为近期重点勘探评价或开发试验地区,近期需要开展勘探工作。

II₁类区块:该类区块油气富集概率高,但技术难度较大或资源规模较小、经济可采性有限,仍需要加强技术攻关或经济可采性研究。

II₂类区块:该类区块油气富集概率一般,但具有适应的技术和可采条件,或具有较大的资源规模,仍需要加强地质条件研究。

III类区块:该类区块资源潜力小或不具备经济价值,为可考虑退出页岩气勘探的区块。

3 实例分析

中国南方的寒武系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系和四川盆地侏罗系广泛发育富有机质泥页岩,尤其是下寒武统、上奥陶统和下志留统泥页岩,具有面积大、时代老、有机质丰富、成熟度高等特点^[27-28],与美国东部地区盆地页岩气成藏条件极为相似,潜力较大。但南方海相页岩气也存在着多期构造运动叠加改造、热演化程度高、保存条件复杂的缺点,陆相泥页岩存在有机碳含量、孔隙度相对较低等缺点,在这些目标中哪些将是页岩气优先投入勘探的区块?研究中以中国石化四川

盆地川东南部分区块为例进行评价优选,选择桑植石门、湘鄂西、涪陵、綦江南、彭水为例进行评价。针对平面上区块的划分,结合纵向上的勘探层系,可以划分为10个评价单元,分别为:桑植石门—五峰龙马溪;桑植石门—水井沱;湘鄂西I—五峰龙马溪;湘鄂西I—水井沱;涪陵—大安寨段;涪陵—东岳庙段;涪陵—五峰龙马溪;綦江南—牛蹄塘;綦江南—五峰龙马溪;彭水—五峰龙马溪。

以彭水—五峰龙马溪评价单元为例,从生烃条件看,彭水地区在晚奥陶世五峰期—早志留世龙马溪期位于深水—半深水陆棚的沉积中心。结合露头、钻探揭示,通过研究认为,该区五峰—龙马溪期彭水地区沉积的暗色泥页岩厚度在60~110m之间,有机碳含量高, $w(\text{TOC})$ 多在1.5%~4.2%之间,平均为3.5%,有机质 R_o 值约为2.0%~2.8%,处于过成熟早期阶段,热演化程度适中,有利于页岩气成藏。该区彭页HF-1井已获工业气流,单井日产气量在近 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,资料可靠程度高。

从赋存条件看,丰富的有机质为页岩气的形成提供了充足的物质基础,增大了页岩的吸附能力。该区断裂发育较少,具有封闭的水文地质条件,利于页岩气保存。

从可采性看,该区下志留统埋藏较浅(1000~3000m),地层压力系数1.15,从彭页1井深水—半深水陆棚相泥页岩矿物分析表明,泥页岩的石英含量为24%~44.2%,其中深水陆棚相段石英含量平均为44.2%,粘土矿物含量为29.8%~51.1%,碳酸盐矿物含量为8%~12%,深泥页岩脆性矿物含量高,具有进行大规模压裂改造的条件。该区各项分析测试资料齐全,利用体积法初步计算资源量为 $9.715 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[20]。

分析相应区块的评价因素,结合赋值标准(表4~7)对评价参数进行赋值(表8)和计算(公式1~7),得出其油气富集概率及资源战略价值,并投射到评价结果分类图中(图3)。

从图3中可以看出,评价的5个区块10个评价单元,属于I类的有涪陵(五峰龙马溪、大安寨)、彭水(五峰龙马溪),应进一步加大工作量;处于II₂类的綦江南—五峰龙马溪、涪陵—东岳庙等,均属于有资源规模,应进一步加强研究;属于III类的有桑植—石门龙马溪、綦江南—牛蹄塘,应暂缓该区或层系的页岩气勘探。此外,从评价结果整体看,该区海相层系优于陆相层系。

经过近期实际勘探,川东南涪陵地区兴隆101井、福石1井大一段获得突破,分别日产气 $11 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $12.66 \times 10^4 \text{ m}^3$;涪陵JY1井在下志留统龙马溪组

表8 川东南页岩气选区评价单元富集概率及资源价值赋值

编号	评价单元名称	油气富集概率(P)	资源价值(Q)
1	桑植石门—五峰龙马溪	0.098 7	0.396 9
2	桑植石门—水井沱	0.069 5	0.769 3
3	湘鄂西 I—五峰龙马溪	0.254 8	0.510 1
4	湘鄂西 I—水井沱	0.116 8	0.845 6
5	涪陵—大安寨段	0.661 9	0.892 2
6	涪陵—东岳庙段	0.530 0	0.582 6
7	涪陵—五峰龙马溪	0.760 5	0.967 8
8	綦江南—牛蹄塘	0.084 1	0.338 6
9	綦江南—五峰龙马溪	0.566 1	0.814 1
10	彭水—五峰龙马溪	0.667 0	0.874 9

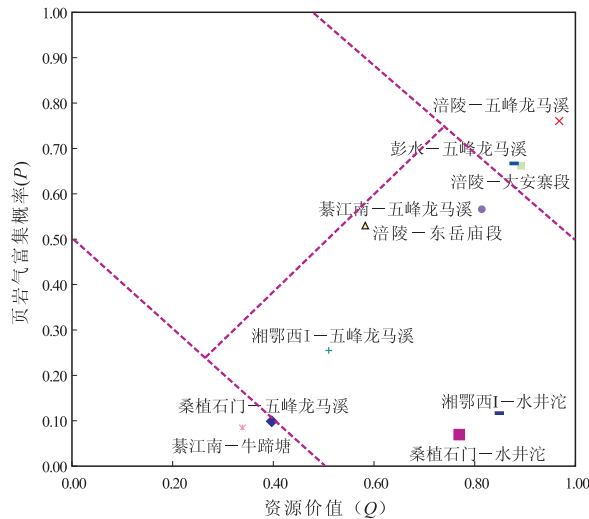


图3 川东南部分页岩气选区评价结果分类

Fig. 3 Classification of exploration evaluation for shale gas in southeastern Sichuan Basin

获得突破,日产气量稳定在 $11 \times 10^4 \text{ m}^3$,这些成果不仅展示了四川盆地周缘复杂构造区相对稳定的负向构造古生界海相页岩气具有良好的勘探前景,也进一步说明了勘探选区评价方法的可行性。

4 结语

1)页岩气选区评价必须直接支持、跟踪日常的勘探业务。选区评价是在大量区域研究成果的基础上,对特定区域背景下的评价单元的页岩气富集概率程度、含油气规模及整体经济价值所进行的预测与评估。因此,大量的、多方面的基础地质参数的准确获取,是评价工作的基础与前提,同时也是评价结果可信度的必要保证。

2)页岩气勘探选区评价方法及参数研究刚刚起步,随着勘探不断深入以及地质认识的不断深

化,对页岩气评价单元的认识也是不断提高的。因此,根据实际资料的变化或新理论的提出和应用,应对页岩气勘探选区评价目标进行多轮次的动态评价,针对选区评价的指标体系的标准及分类也需要在实际过程中不断完善和修正。

致谢:本研究得到了中国石油化工股份有限公司蔡希源总地质师、马永生副总地质师、中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院何治亮副院长、郑和荣副院长、徐旭辉副总地质师、龙胜祥首席专家的指导帮助,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 李新景,胡素云,程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发,2007,34(4):392-400.

[2] Kuuskraa V A. Unconventional natural gas industry: Savoir or bridge[C]. Washington D C;EIA Energy Outlook and Modeling Conference,2006.

[3] 张抗,谭云冬. 世界页岩气资源潜力和开发现状及中国页岩气发展前景[J]. 当代石油石化,2009(3):9-12.

[4] 许长春. 国内页岩气地质理论研究进展[J]. 特种油气藏,2012,19(1):9-16.

[5] 邵晓州,余川,付勋勋,等. 页岩气研究新进展及开发瓶颈分析[J]. 断块油气田,2012,19(6):764-766.

[6] 马永生,冯建辉,牟泽辉,等. 中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J]. 中国工程科学,2012,14(6):22-30.

[7] 徐波,李敬含,谢东,等. 中石油探区主要盆地页岩气资源分布特征研究[J]. 特种油气藏,2011,18(4):1-6.

[8] 张大伟. 加速我国页岩气资源调查和勘探开发战略构想[J]. 石油与天然气地质,2010,31(2):135-139.

[9] 董大忠,程克明,王玉满,等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质,2010,31(3):288-299.

[10] 聂海宽,包书景,高波,等. 四川盆地及其周缘上奥陶统一下志留统页岩气成藏体系研究[J]. 石油实验地质,2012,34(2):115-119.

[11] 聂海宽,张金川,包书景,等. 四川盆地及其周缘上奥陶统一下志留统页岩气聚集条件[J]. 石油与天然气地质,2012,33(3):335-345.

[12] 朱定伟,丁文龙,邓礼华,等. 中扬子及江汉盆地泥页岩发育特征与页岩气形成条件分析[J]. 特种油气藏,2012,19(1):34-37.

[13] 王鹏万,陈子焯,贺训云,等. 桂中拗陷泥盆系页岩气成藏条件与有利区带评价[J]. 石油与天然气地质,2012,33(3):353-363.

[14] 陈祥,王敏,严永新,等. 泌阳凹陷陆相页岩油气成藏条件[J]. 石油与天然气地质,2011,32(4):568-576.

[15] 杨一鸣,毛俊莉,李晶晶. 页岩气藏地质特征及地质选区评价方法:以辽河拗陷东部凸起为例[J]. 特种油气藏,2012,19(2):46-49.

[16] Daniel M J, Ronald J H, Tim E R, et al. Unconventional shale gas systems: The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin,2007,91(4):475-499.

作了类似于南堡1-32断块NgⅣ①油藏三层储层的地质特征和注采井网(13口注采井,其中5口注水直井、5口采油水平井和3口采油直井)的三维物理模型。第1、2、3层大岩心平板模型的平均渗透率分别为 102×10^{-3} 、 270.4×10^{-3} 、 $183.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

实验压力为17.1 MPa,实验温度为82℃。

3.3.3 实验结果分析

利用该实验装置,对原注采井网组合模型在实验压力17.1 MPa和实验温度82℃下进行水驱油实验,在累计采油量为418 mL、采出程度为35.47%、平均含水率为85.4%时,采用2 000 mg/L交联聚合物以1.5 mL/min的注入速度注入孔隙,注入0.2 HPV聚合物,累计采出原油增量为57 mL,采出程度增量为4.84%;注完聚合物0.2 HPV后水驱,累计采出原油增量为85 mL,采出程度增量为7.22%。因此,聚合物驱油增加累计采油量为142 mL,提高原油驱替程度达12.06%,使得最终驱油效率增大。

4 结论

1) 本文研制的三维物理模型驱油实验装置是一套大型的室内物理模拟实验系统,该系统主要由新型岩心夹持器以及大尺度三维物理模型组成。

2) 该实验装置应用领域广泛,能进行多层、多井、三维物理模型在高温、高压下不同驱替介质驱替实验和二氧化碳单井吞吐模拟实验。

3) 该实验模型比其他填砂三维物理模型、全直径岩心模型以及小岩心模型具有更突出的优点,它可以利用相似原理,制作与油田相似的人造岩心和天然露头岩心三维物理模型,此模型可以真实地模拟油藏地质特征和注采井网分布情况。

4) 利用该实验装置已成功地开展了纵向多层和平面多区域的非均质性对高温、高压下水驱油效果影响的驱替实验研究,直井和水平井的多井型三维物理模型在高温、高压下的水驱油和聚合物驱油等驱替实验研究,得到了令人满意的实验结果,为开发方案调整提供了一定的基础。

参考文献:

- [1] 关文龙,万仲谋,陈永忠. 三维物理模拟试验装备及试验技术[J]. 石油仪器,1997,11(5):27-30.
 - [2] 刘其成,张勇,张鹰. 多功能高温高压三维比例物理模拟试验装置[J]. 石油仪器,2006,20(1):17-20.
 - [3] 刘喆,崔英怀,杨传宏. 非均质组合模型水驱油实验研究[J]. 吐哈油气,2009,14(1):60-62.
 - [4] 彭彩珍,易敏,于雪琳,等. 一种多层平板模型岩心夹持器:中国,ZL200920243673.4[P]. 2010-08-18.
 - [5] 赵清明. 水平井二元复合驱三维油藏物理模拟研究[J]. 石油钻采工艺,2010,32(5):90-93.
 - [6] 喻高明,李建雄,朱杰. 韵律性砂岩油藏不同部位注水开发效果研究[J]. 河南石油,1998,12(6):17-20.
 - [7] 李劲峰,曲志浩. 用模型组合实验研究注水油层驱油效率的变化[J]. 西北大学学报:自然科学版,2000,30(3):247-250.
 - [8] 邓瑞健. 储层平面非均质性对水驱油效果影响的实验研究[J]. 大庆石油地质与开发,2002,21(4):16-19.
 - [9] 李宜强,隋新光,李洁,等. 纵向非均质大型平面模型聚合物驱油波及系数室内实验研究[J]. 石油学报,2005,26(2):77-79.
 - [10] 彭彩珍,易敏,孙雷,等. 一种纵向和平面非均质平板模型水驱油效率实验方法:中国,ZL201010102946.0[P]. 2013-01-03.
 - [11] David P Y, Steven W M, Sergio A L, et al. Large-scale laboratory testing of petroleum reservoir processes [R]. SPE 134313-MS, 2010.
 - [12] David P Y, Gina M J, Arnold P K, et al. Large-scale laboratory testing of the geomechanics of petroleum reservoirs [C]. 44th U. S. Rock Mechanics Symposium and 5th U. S.-Canada Rock Mechanics Symposium, June 27 - 30, 2010, Salt Lake City, Utah.
- (编辑 徐文明)
-
- (上接第569页)
- [17] Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
 - [18] 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.
 - [19] 国土资源部油气资源战略研究中心. 页岩气资源潜力评价与有利区优选方法 [R]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
 - [20] 包书景, 陈新军, 刘超英, 等. 中国石化页岩油气资源评价与选区专项 [R]. 北京: 中国石化石油勘探开发研究院, 2012.
 - [21] 侯杰杰, 包书景, 毛小平, 等. 页岩气资源潜力评价的几个关键问题讨论 [J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(3): 7-16.
 - [22] 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.
 - [23] 李廷钧, 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, 2011, 33(2): 28-34.
 - [24] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会. 北美地区页岩气勘探开发新进展 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
 - [25] Bowker K A. Recent development of the Barnett Shale play, Fort Worth Basin [J]. West Texas Geological Society Bulletin, 2003, 42(6): 4-11.
 - [26] Bowker K A. Barnett Shale gas production. Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
 - [27] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究: 以四川盆地及其周缘下古生界为例 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 219-225.
 - [28] 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析 [J]. 石油学报, 2010, 31(2): 225-230.
- (编辑 徐文明)