

基于概率分析的非常规油气选区方法

谷 宁¹ 郭金瑞¹ 李 庆²

1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100083

摘 要:为有效筛选出具有开发潜力和经济效益的非常规油气区带,有必要在统一标准下建立非常规油气的选区模型。在研究非常规区带石油地质特征的基础上,分析了控制非常规油气资源成藏和开采的关键因素,建立了以地质条件和资源情况为评价对象的双因素半定量评价模型;通过分析北美23个非常规区带中每个评价参数的概率分布特征及有利区取值要求,确定模型中各参数评价的指标体系,并据此对待评价区带的地质条件和资源情况两个因素进行打分评价。通过对资源潜力较大和储层特性认识较深的已开发非常规油气区带的开发效果评价,验证了用地质条件和资源情况两个因素来描述非常规区带所建立的选区评价模型,可以清晰地揭示待评价非常规区带的开发潜力;采用概率分析的方法确定各参数的评价指标,有效解决了非常规油气评价中参数不确定性大的问题,更适合非常规油气资源的选区评价。

关键词:非常规油气;勘探选区;概率分布

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2016.03.015

0 前言

近年来,海外非常规油气项目逐渐增多,如何在众多海外非常规资源中选择具有良好开发潜力的项目成为石油公司在海外投资方面亟待解决的问题。

目前勘探开发关注的主要非常规资源包括致密油、致密气、页岩气、煤层气等。非常规油气藏在成藏特征、储层性质、油气赋存方式及油、气、水关系等多个方面与常规油气藏不同^[1-6]。在成藏特征方面,非常规油气成藏的重要标志是非浮力聚集^[2],表现为大面积广泛分布、局部富集的特点。非常规油气藏通常源储共生或近源,没有明显的圈闭边界,流体分异差,无统一油水界面。在储层性质方面,非常规油气储层通常物性较差^[7-10],以纳米级孔喉为主,孔喉结构复杂,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,非均质性强^[10-13]。在油气赋存方式方面,非常规油气可以游离态、吸附态和溶解方式存在于有机质、黏土颗粒及孔隙表面,流动机制复杂多样。这些特点使非常规油气藏的勘探选区评价方法也必然与

常规油气藏的勘探选区评价方法不同。非常规油气藏选择有利区主要取决于是否发育大规模优质成熟烃源岩、是否有利于开采以及可采资源的规模是否足够大。

从各石油机构和公司陆续公布的不同非常规油气藏有利区的界定标准来看,“优质成熟烃源岩”几乎是所有有利区界定标准中所关注的最重要的指标,代表参数包括非常规油气藏的总有机碳含量、成熟度等,在美国能源信息署(EIA)、美国地质调查局(USGS)等机构及各石油公司的有利区评价指标中都包含这两个参数。其次非常规油气藏发育的规模也是重要的有利区评价指标,代表参数为含油气储层的净厚度,在EIA、USGS、Exxon Mobil、BP和Chevron公司的评价指标中都包括这一参数^[14]。由于非常规油气藏通常渗透率较低,储层物性不好,需要采用水力压裂等特殊的开采技术进行开采^[15-17],其采收率受储层条件的影响很大,因此储层条件是否有利于油气开采也成为有利区评价指标中的重要参数^[18],如美国能源信息署(EIA)认为,海相沉积的

收稿日期:2016-02-29

作者简介:谷 宁(1972-),女,黑龙江大庆人,高级工程师,博士,主要从事海外油气资源评价工作。

页岩黏土含量低,脆性矿物含量高;非海相沉积(湖湘、冲积相)黏土含量高,可塑性强,不利于压裂,因此将海相沉积作为其有利区选择的标准;BP公司和Chevron公司的标准中则直接将储层岩石的矿物成分作为界定指标;考虑到随着储层埋深的增加,开采难度和开采成本也相应增加,BP公司和Exxon Mobil也将储层埋深作为有利区的界定指标。

因此,非常规油气藏有利区的评价标准具有如下特点:同时考虑油气赋存的地质条件和对油气开采有影响的储层条件;有利区选择的指标较常规油气有利区选择的影响参数明显增多;不同公司采用不同的指标,但目前尚不具备相对统一的评价标准。

本文以非常规油气藏有利区的主控因素为基础,在分析国内外非常规油气藏选区方法及评价特点的基础上,将非常规油气藏的勘探选区标准分为地质条件和资源情况两个因素,用11个评价参数来表征;在此基础上,提出了根据各参数的概率分布特点和取值要求确定非常规油气选区评价的指标体系,力图建立更客观的评价指标体系,在相对统一的标准下优选非常规油气有利区带,为进一步勘探开发提供依据。

1 评价体系的建立

1.1 评价参数的选取

非常规油气藏勘探选区的目的在于选择地质条件有利于油气生成、保存,还要易于开发的潜力区域,同时为了使未来项目开发能够具有经济性,潜力区域的资源量和资源丰度还要达到一定的规模。因此,本文考虑地质条件和资源情况两个因素,建立了双因素、3类、11个评价参数的非常规油气藏勘探选区体系(表1)。

地质条件中考虑非常规油气藏的烃源岩和储层两类评价指标,烃源岩类参数主要通过烃源岩质量参数来评价区带的油气生成能力,包括烃源岩的总有机碳含量和成熟度两个参数。总有机碳含量是衡量烃源岩生烃潜力的重要参数^[19],在其它条件相近的前提下,岩石中有机质的含量越高,其生烃能力越高;同时在页岩气等非常规资源中,有机质作为吸附气的重要载体,其丰度与储层内的油气资源量密切相关。有机质只有达到一定的热演化程度才能生成油气,因此热成熟度也是评价烃源岩质量的重要指标。储层类评价参数主要评价非常规区带对油气的储集能力及油气的开采潜力,包括储层的孔隙度、渗透率、黏土含量、埋藏深度和厚度。储层的孔隙度和厚度越大,储集的油气就越多;岩石的渗透率越大、埋藏深度越浅,油气开采就越容易;非常规油气储层通常为低孔低渗,需要采用水力压裂等增产措施来开发,因此其黏土含量越低,塑性越小,越有助于提高压

裂效果,进而提高非常规油气藏的采收效率。

资源情况主要考虑资源的富集,用油气资源量和资源丰度两种情况4个参数来表示。只有达到一定资源规模的非常规油气藏才具有开采价值,因此油气资源量是衡量一个油气藏资源潜力的重要指标;同时非常规油气藏虽然是大面积广泛分布,但其油气丰度分布很不均匀,在大面积低丰度的储层中只有找到油气丰度较高的甜点区,才能使其勘探开发具有经济效益。

表1 非常规油气藏选区体系

评价因素	指标分类	评价指标
地质条件	烃源岩	总有机碳
		成熟度
	储层	孔隙度
		渗透率
		黏土含量
		埋藏深度
资源情况	资源富集	厚度
		油可采资源丰度
		气可采资源丰度
		油可采资源量
		气可采资源量

1.2 评价模型的建立

将每个评价参数分为1~0.75、0.75~0.5、0.5~0.25、0.25~0等4个等级进行打分(表1),分别建立每个待评价非常规区带的地质条件和资源情况两个因素的定量化指标:

$$P_{\text{地质条件}} = (P_{\text{TOC}} \times P_{\text{Ro}} \times P_{\phi} \times P_K \times P_C \times P_{\text{depth}} \times P_h)^{\frac{1}{7}} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{地质条件}}$ 为地质条件得分, P_{TOC} 、 P_{Ro} 、 P_{ϕ} 、 P_K 、 P_C 、 P_{depth} 、 P_h 分别为总有机碳含量、镜质体反射率、孔隙度、渗透率、黏土含量、埋藏深度和厚度的得分。

$$P_{\text{资源情况}} = \sqrt{P_{\text{资源量}} \times P_{\text{资源丰度}}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{资源情况}}$ 是资源情况得分, $P_{\text{资源量}}$ 和 $P_{\text{资源丰度}}$ 分别是可采资源量和资源丰度得分。

$$P_{\text{资源量}} = P_{\text{油资源量}} + P_{\text{气资源量}} \quad (3)$$

$$P_{\text{资源丰度}} = P_{\text{油资源丰度}} + P_{\text{气资源丰度}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{油资源量}}$ 和 $P_{\text{气资源量}}$ 分别为油和气的可采资源量得分; $P_{\text{油资源丰度}}$ 和 $P_{\text{气资源丰度}}$ 分别为油和气的可采资源丰度得分。

根据式(1)和(2)分别计算待评价非常规区带地质条件和资源情况的得分,并将其点在地质条件得分和资源情况得分的双因素坐标图中(图1),将地质条件和资

源情况得分都不小于 0.5 的区带定为 I 类区带,代表其地质条件有利于对该区带油气藏成藏及进行开发,其资源规模也较大;将地质条件和资源情况得分都不小于 0.25,但地质条件或资源情况中任一项小于 0.5 的区带定为 II 类区带,这类区带地质条件或资源情况较一类区带差,但仍有潜力;其余为 III 类区带,代表其地质条件或资源状况较差,目前尚不具有开发的潜力。

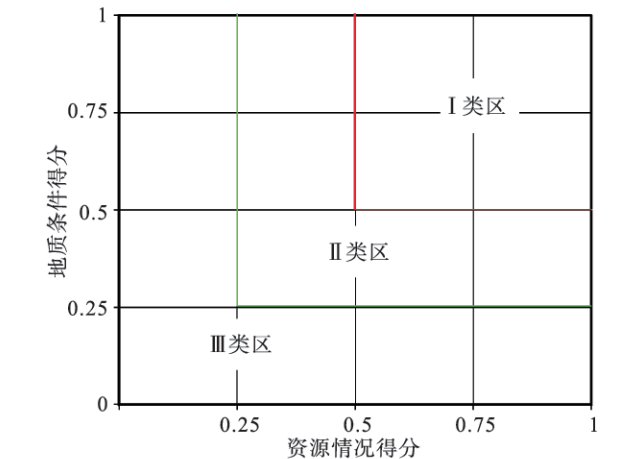


图 1 区带双因素选区评价模型

1.3 评价指标的确定

为了对 1.2 中地质条件和资源情况进行打分评价,需要首先建立表 1 中 11 个评价指标的打分指标。

1.3.1 数据的分布特征

分析北美西加拿大盆地、威利斯顿盆地、粉河盆地、二叠盆地、墨西哥湾盆地、密执安盆地和阿巴拉契亚盆地等盆地中非常规油气区带的油气藏特征参数,以总有机碳含量(图 2),气、油的成熟度(图 3、4)及储层孔隙度(图 5)等参数为例可以看出,不仅不同的非常规油气藏之间评价参数变化较大,同一非常规油气藏内部,各参数的变化范围也很大,反映非常规油气藏成藏的特征参数不确定性大、规律不明显。为在这些分散的数据中找出其规律,从而确定各参数的打分评价指标,本文对上述非常规油气藏参数进行了统计分析。

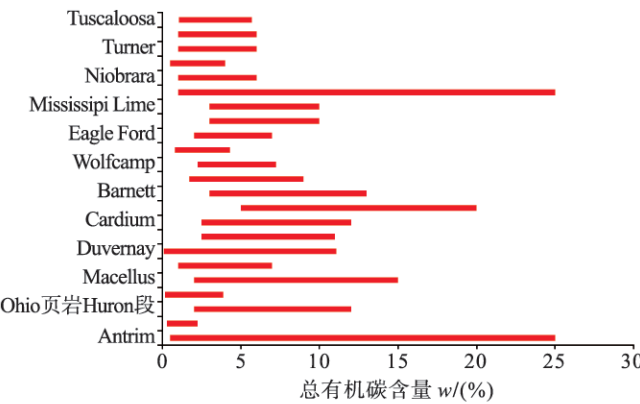


图 2 总有机碳含量分布范围

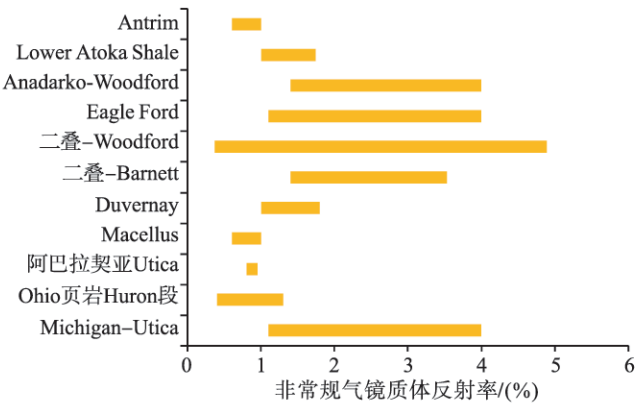


图 3 非常规气成熟度分布范围

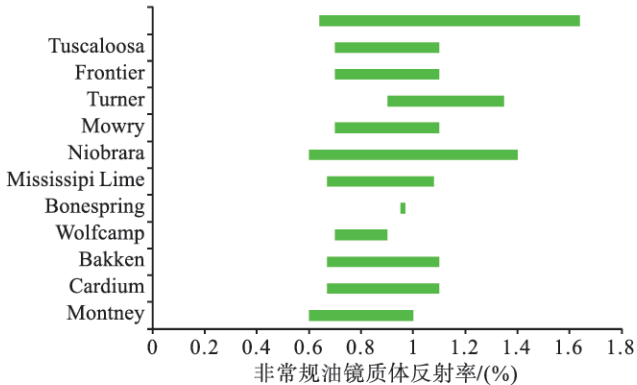


图 4 非常规油成熟度分布范围

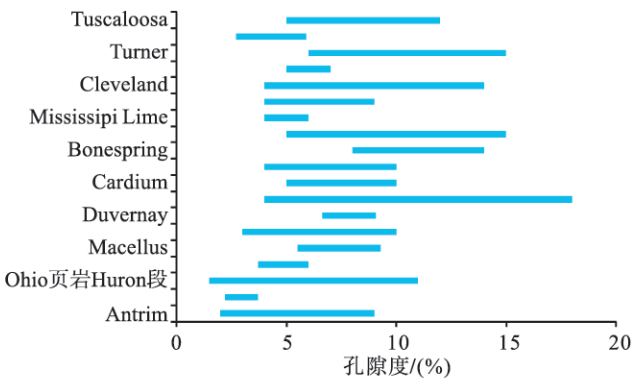


图 5 储层孔隙度分布范围

1.3.2 评价指标等级标准的确定

用概率分析的方法对北美 23 个非常规油气藏中各评价参数进行分析,根据数据分布特点和取值要求,大致可将表 1 中的 11 个评价参数分为 3 种类型来确定打分指标。

a) 数据分散、数值越大评价指标越好或越差。这类数据的评价指标可以采用累积概率分布来确定,如总有机碳含量、孔隙度、渗透率、黏土含量、埋藏深度、储层厚度和油可采资源量等参数。以总有机碳含量为例,总有机碳含量越大,烃源岩质量越好,越有利于油气生成。根据总有机碳含量累积概率分布的起始点、25 %、50 %、75 % 和最大值所对应的总有机碳含量值确定其得分在 0 ~ 0.25、0.25 ~ 0.5、0.5 ~ 0.75、0.75 ~ 1 等 4 个等级中所对应的数值(图 6),以此作为打分标准(表 2)。

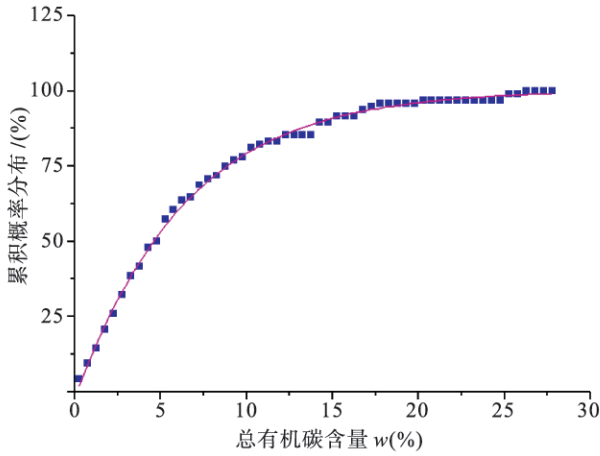


图6 总有机碳含量累积概率分布

b) 数据分散,在某一峰值区间数据取最佳值。这类数据的评价指标可以采用相对概率分布确定,如反映热成熟度的镜质体反射率,其只有在生油窗和生气窗内时

才最有利于油气生成,偏离生油窗和生气窗则不利于油气生成。以气源岩的镜质体反射率为例(图7),根据其相对概率分布曲线,取相对概率最大的区间为1~0.75

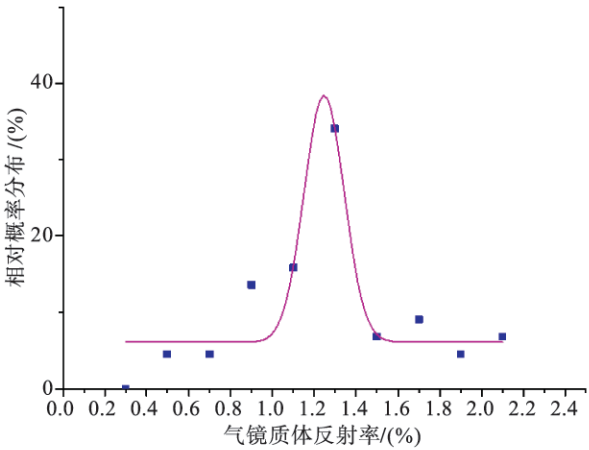


图7 气源岩成熟度的相对概率分布

表2 评价指标的等级标准

评价因素	评价指标	指标区间			
		1~0.75	0.75~0.5	0.5~0.25	0.25~0
地质条件	总有机碳 w /(%)	8.3~26.2	4.7~8.7	2.0~4.7	0.2~2.0
	油成熟度 I /(%)	0.85~0.96	0.8~0.85	0.7~0.8	<0.7
	气成熟度 I /(%)	1.05~1.49	0.9~1.05	0.6~0.9	<0.6
	孔隙度 I /(%)	8~15	6~8	4.9~6	0~4.9
	渗透率 I /($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	>7.37	0.67~7.37	0.01~0.67	0.005~0.01
	黏土含量 I /(%)	3.5~15	15~20	20~27.5	27.5~60
	埋藏深度 /m	550~1 680	1 680~2 360	2 360~3 250	3 250~4 950
	厚度 /m	>114	61~114	9~61	<9
资源情况	油可采资源丰度 I /($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)	0.084~0.111	0.056~0.084	0.003~0.056	0~0.003
	气可采资源丰度 I /($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)	37.9~50.7	25.2~37.9	12.6~25.2	0~12.6
	油可采资源量 I /($\times 10^6 \text{m}^3$)	>636	509~636	37~509	0~37
	气可采资源量 I /($\times 10^9 \text{m}^3$)	>2 832	283~2 832	28~283	0~28

分值的区间,以最佳区间为中心,向外扩一个区间为0.75~0.5分值区间,再向外扩一个区间为0.5~0.25区间,以此类推,作为气源岩成熟度的打分标准(表2)。

c) 如果所获得的数据少,不足以进行统计分析,取值要求越大越好,则采用阶梯分级的方法。这类数据包括油的可采资源丰度、气的可采资源丰度等数据。以天然气的可采资源丰度为例,其确定打分等级的方法采用阶梯分级的方法(图8),对应得到天然气可采资源丰度的打分标准(表2)。

根据上述方法确定的各指标的等级标准见表2。

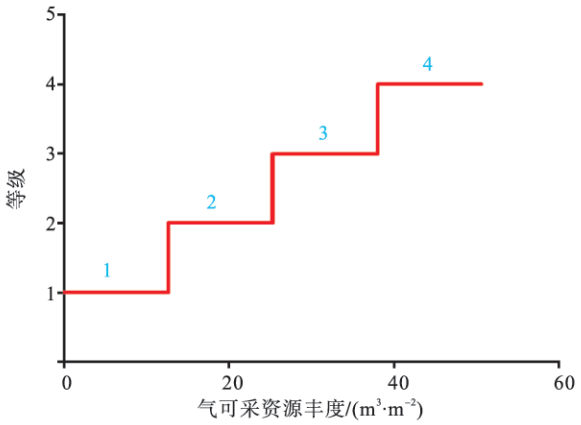


图8 天然气可采资源丰度等级的确定方法

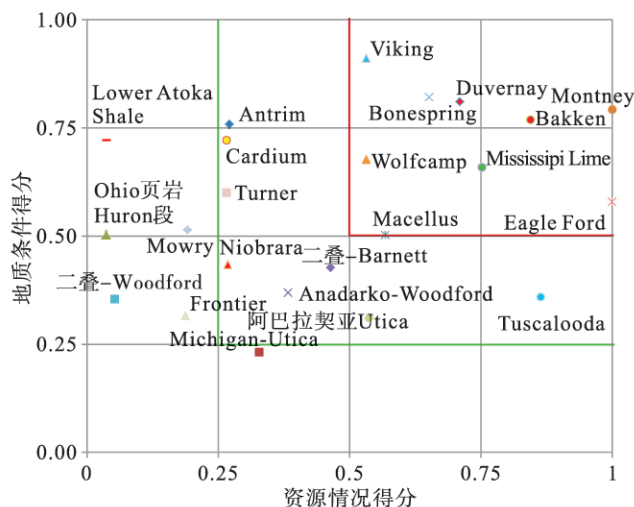


图 9 非常规油气区带打分评价结果

表 3 待评价的北美非常规油气区带

盆地	非常规区带
密执安盆地	Antrim
	Utica
阿巴拉契亚盆地	Ohio 页岩 Huron 段
	Utica
	Macellus
	Montney
西加拿大盆地	Duvernay
	Viking
	Cardium
威利斯頓盆地	Bakken
	Woodford
	Wolfcamp
	Barnett
二叠盆地	Eagle Ford
	Bonespring
阿纳达科盆地	Woodford
	Mississippi Lime
	Lower Atoka Shale
粉河盆地	Niobrara
	Mowry
	Turner
	Frontier
墨西哥湾盆地	Tuscaloosa

2 实例应用

北美非常规油气资源较丰富,也是最早进入非常规油气开发的地区。用上述评价体系,对北美 8 个重点盆地的 23 个非常规油气区带的地质条件和资源情况进行

打分评价,区带的分布见表 3,打分结果见图 9。可以看出一类区包括 Eagleford、Montney、Bakken、Mississippi Lime、Duvernay、Bonespring、Wolfcamp、Viking 和 Macellus 等油气区带,其中 Eagleford、Bakken 和 Macellus 是美国较成熟的非常规油气开发区带,从图 9 可以看出,其地质条件较有利,资源规模和资源丰度也较大,符合勘探开发中对这三个非常规油气区带的认识;二类区包括墨西哥湾盆地的 Tuscaloosa,阿纳达科盆地的 Woodford,二叠盆地的 Barnett,阿巴拉契亚盆地的 Utica,粉河盆地的 Niobrara、Turner,西加拿大盆地的 Cardium 和 Antrim 等非常规油气区带,其中 Tuscaloosa 和阿纳达科盆地的 Woodford 两个非常规油气区带资源量和资源丰度较大,但地质条件稍差,是未来开发的潜力区;Cardium、Turner 和 Antrim 三个区带的地质条件较好,但资源规模稍小;三类区带包括密执安盆地的 Utica,二叠盆地的 Woodford,粉河盆地的 Frontier、Mowry,阿巴拉契亚盆地的 Ohio 页岩 Huron 段和阿纳达科盆地的 Lower Atoka Shale 等油气区带,这些区带的地质条件较差或资源规模较小,目前没有开发潜力。

3 结论

1)非常规油气区带在勘探选区评价时具有评价参数多、评价数据分散、规律性不强等特点,本文建立了评价非常规油气区带的双因素半定量模型。模型将非常规油气区带的勘探开发潜力用地质条件和资源情况两个因素来描述,可以清晰地揭示待评价非常规区带的潜力和挑战,为合理选择潜力区提供依据。此外,本文用概率分析的方法确定各评价指标的打分标准,可以有效解决各评价参数数据分散、不确定性大等特点,给评价指标的确定提供理论基础。

2)根据本文的选区评价方法对北美 23 个非常规油气区带进行评价,结果显示该方法可有效区分出不同勘探潜力等级的非常规油气区带。同时通过目前已投入开发的非常规区带的评价结果可以看出,本文的评价方法是可靠的。

参考文献:

[1] 邹才能. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社,2011: 103 - 107.
Zou Caineng. Unconventional Petroleum Geology [M]. Beijing: Geological Press House, 2011: 103 - 107.
[2] 宋 岩,姜 林,马行陟,等. 非常规油气藏的形成及其分布特征[J]. 古地学报,2013,15(5):605 - 614.
Song Yan, Jiang Lin, Ma Xingzhi, et al. Formation and Distribution Characteristics of Unconventional Oil and Gas Reser-

- voirs [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15 (5): 605 - 614.
- [3] 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(自然科学版), 2011, 33 (2): 28 - 34.
- Li Yanjun, Liu Huan, Liu Jiaxia, et al. 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.
- [4] Burnaman M D, Xia Wenwu, Shelton J. Shale Gas Play Screening and Evaluation Criteria [J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14 (3): 51 - 64.
- [5] 郭秋麟, 周长迁, 陈宁生, 等. 非常规油气资源评价方法研究[J]. 岩性油气藏, 2011, 23 (4): 12 - 19.
- Guo Qiulin, Zhou Changqian, Chen Ningsheng, et al. Evaluation Methods for Unconventional Hydrocarbon Resources [J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23 (4): 12 - 19.
- [6] 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 Baijiang, Shi Liang, Pang Xiongqi. Accumulation Characteristics and Exploration Screening of Shale [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18 (6): 9 - 13.
- [7] 王朋岩, 刘凤轩, 马锋, 等. 致密砂岩气藏储层物性上限界定与分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35 (2): 238 - 243.
- Wang Pengyan, Liu Fengxuan, Ma Feng, et al. Upper Limit and Distribution of Physical Property of Tight Gas Sand Stones [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35 (2): 238 - 243.
- [8] 黄鑫, 董秀成, 肖春跃, 等. 非常规油气勘探开发现状及发展前景[J]. 天然气与石油, 2012, 30 (6): 38 - 42.
- Huang Xin, Dong Xiucheng, Xiao Chunyue, et al. Present Situation and Development Prospect of Unconventional Oil and Gas Exploration and Development [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (6): 38 - 42.
- [9] 朱如凯, 白斌, 崔景伟, 等. 非常规油气致密储集层微观结构研究进展[J]. 古地学报, 2013, 15 (5): 615 - 623.
- Zhu Rukai, Bai Bin, Cui Jingwei, et al. Research Advances of Microstructure in Unconventional Tight Oil and Gas Reservoirs [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15 (5): 615 - 623.
- [10] 谷宁, 朱学谦, 邢丽雯. 非常规气储量计算方法分析[J]. 天然气与石油, 2014, 32 (6): 45 - 49.
- Gu Ning, Zhu Xueqian, Xing Liwen. Analysis on Unconventional Gas Reserve Evaluation [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (6): 45 - 49.
- [11] 于荣泽, 卞亚南, 齐亚东, 等. 页岩气藏数值模拟研究现状[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35 (1): 131 - 137.
- Yu Rongze, Bian Yanan, Qi Yadong, et al. A Review of Numerical Simulation of Shale Gas Reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35 (1): 131 - 137.
- [12] 蒋佩, 王怒涛, 姚锋盛, 等. 非常规天然气产量递减分析新方法及其应用[J]. 天然气与石油, 2012, 30 (2): 52 - 55.
- Jiang Pei, Wang Nutao, Yao Fengsheng, et al. Foreign New Methods for Analysis on Unconventional Gas Production Rate Decline and Their Application [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (1): 52 - 55.
- [13] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40 (4): 385 - 399.
- Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological Concepts, Characteristics, Resource Potential and Key Techniques of Unconventional Hydrocarbon: About Unconventional Petroleum Geology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40 (4): 385 - 399.
- [14] 刘超英. 页岩气勘探选区评价方法探讨[J]. 石油实验地质, 2013, 35 (5): 564 - 569.
- Liu Chaoying. Discussion on Method of Shale Gas Exploration Evaluation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35 (5): 564 - 569.
- [15] 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.
- [16] 姚猛, 胡嘉, 李勇, 等. 页岩气藏生产井产量递减规律研究[J]. 天然气与石油, 2014, 32 (1): 63 - 66.
- Yao Meng, Hu Jia, Li Yong, et al. Research on Production Decline Regularity of Production Wells in Shale Gas Reservoir [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (1): 63 - 66.
- [17] 贾利春, 陈勉, 金衍. 国外页岩气井水力压裂裂缝监测技术进展[J]. 天然气与石油, 2012, 30 (1): 44 - 47.
- Jia Lichun, Chen Mian, Jin Yan. Technical Progress in Overseas Hydraulic Fracture Monitoring Techniques for Shale Gas Well [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (1): 44 - 47.
- [18] 王文霞, 李治平, 黄志文. 页岩气藏压裂技术及我国适应性分析[J]. 天然气与石油, 2011, 29 (1): 38 - 41.
- Wang Wenxia, Li Zhiping, Huang Zhiwen. Shale Gas Reservoir Fracturing Technology and Analysis on Adaptability in China [J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29 (1): 38 - 41.
- [19] 胡昌蓬, 徐大喜. 页岩气储层评价因素研究[J]. 天然气与石油, 2012, 30 (1): 38 - 42.
- Hu Changpeng, Xu Daxi. Study on Shale Reservoir Evaluation Factors [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30 (1): 38 - 42.