

页岩气资源潜力评价方法

马宁^{1,2}, 侯读杰^{1,2}, 包书景³, 毛小平^{1,2}, 杨光庆^{1,2}

(1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2.中国地质大学(北京)海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室,北京 100083; 3.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:页岩气作为非常规资源,其烃源岩和储集特征均不同于常规天然气藏,因此,页岩气资源量计算方法应有别于传统常规气藏的资源评价方法。根据中国页岩气发育的地质条件和资料的完善程度,提出了适用于中国页岩气资源的评价方法,主要包括体积法和类比法。高勘探程度区主要采用体积法,低勘探程度区采用类比法。总结归纳了体积法中有效厚度、含气量、含气饱和度和孔隙度4个关键参数的确定方法;建立了类比法计算页岩气总地质资源量中类比参数的取值标准,将有机碳含量、干酪根类型、成熟度、泥页岩单层厚度、脆性指数、孔隙度和埋深7项指标作为页岩气地质条件类比的主要参数。体积法和类比法各有优缺点,在计算页岩气总地质资源量时,需要结合评价区的实际情况,选取合适的资源量评价方法。

关键词:页岩气资源评价 体积法 类比法 含气量

中图分类号: TE313.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2012)06-0025-05

页岩气是指以吸附、游离或溶解状态赋存于泥页岩中的天然气^[1-4],页岩气系统是非常规的天然气系统,该系统中泥页岩既是烃源岩,又是储层,气体在不同存储空间中的分配主要取决于孔隙系统、有机质含量、成熟度、储层压力和温度^[5]。全世界页岩气资源量十分丰富,大约为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要分布在北美、中亚、中国、拉美、中东、北非和前苏联^[6]。1821年美国对阿巴拉契亚盆地中富有机质的泥盆系泥页岩中的天然气进行了商业开采,目前已有页岩气井40 000余口,年产量达 $168 \times 10^8 \sim 204 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7],美国已进入页岩气开发的快速发展阶段。中国页岩气也有很大的勘探开发潜力,四川盆地威远地区和泸州地区的页岩气资源潜力达 $6.8 \times 10^{12} \sim 8.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[8],2009年中国第1口页岩气井威201井成功开钻,证实了页岩气藏的存在及较好的勘探前景。

美国页岩气资源评价方法主要包括:类比法、体积法、物质平衡法、递减曲线分析法和FORSPAN模型法。中国页岩气区块的地质特征差异较大,沉积类型多样,目前对页岩气总地质资源量的计算方法尚不统一,导致计算结果差异较大。为此,笔者通过调研和总结中外页岩气的地质特征,结合中国页岩气发育的地质条件和资料的完善程度,提出了适用于中国页岩气资源的评价方法,以期页岩气

的勘探开发提供依据。

1 体积法

页岩气资源是指泥页岩层系中赋存的天然气总量。体积法估算的是泥页岩孔隙和裂缝系统中存在的游离气以及有机物和粘土颗粒表面的吸附气体积的总和。

1.1 计算原理

页岩气总地质资源量的计算式为

$$Q_{\text{总}} = Ah(\rho q_{\text{吸}} + \frac{\phi S_g}{Z}) \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{总}}$ 为页岩气总地质资源量, 10^6 m^3 ; A 为泥页岩有效面积, km^2 ; h 为泥页岩有效厚度, m ; ρ 为泥页岩密度, t/m^3 ; $q_{\text{吸}}$ 为吸附气含量, m^3/t ; ϕ 为孔隙度,%; S_g 为含气饱和度,%; Z 为天然气压缩因子。

已知总含气量时,页岩气总地质资源量的计算式为

$$Q_{\text{总}} = Ah\rho q_{\text{总}} \quad (2)$$

式中: $q_{\text{总}}$ 为总含气量, m^3/t 。

1.2 关键参数的获取

1.2.1 有效厚度

纵向上以含气泥页岩层段为基本评价单元,依

收稿日期:2012-09-21。

作者简介:马宁,女,在读博士研究生,从事油气成因机理与分布预测方面的研究。联系电话:13717834071, E-mail: mndd2007@163.com。
基金项目:中国石化页岩油气资源评价与选区专项“页岩气资源潜力及可采资源量评价方法”(YYYQ-ZP-01)。

据测井响应特征、岩性组合特征、有机碳含量和气测显示等资料划分含气泥页岩层段(图1),以富含有机碳的泥页岩作为含气泥页岩层段顶、底的界限,连续厚度一般不小于20 m。纵向划分依据为:①含气泥页岩层段是以富含有机质泥页岩为主的含气层段,内部可以有砂岩类、碳酸盐岩类夹层,其中泥页岩累积厚度大于含气泥页岩层段厚度的50%以上;②顶、底为致密岩层,内部砂岩条带较薄,或者无明显水层;③在该层段内气测曲线上有明显异常;④含气泥页岩层段测井响应呈现“三高—低”的特征,即高自然伽马(30~90 API)、高电阻率(大于100 Ω·m)、高声波时差(50~90 μs/m)、低密度(2.5~2.8 g/cm³);⑤具有一定的压力异常。

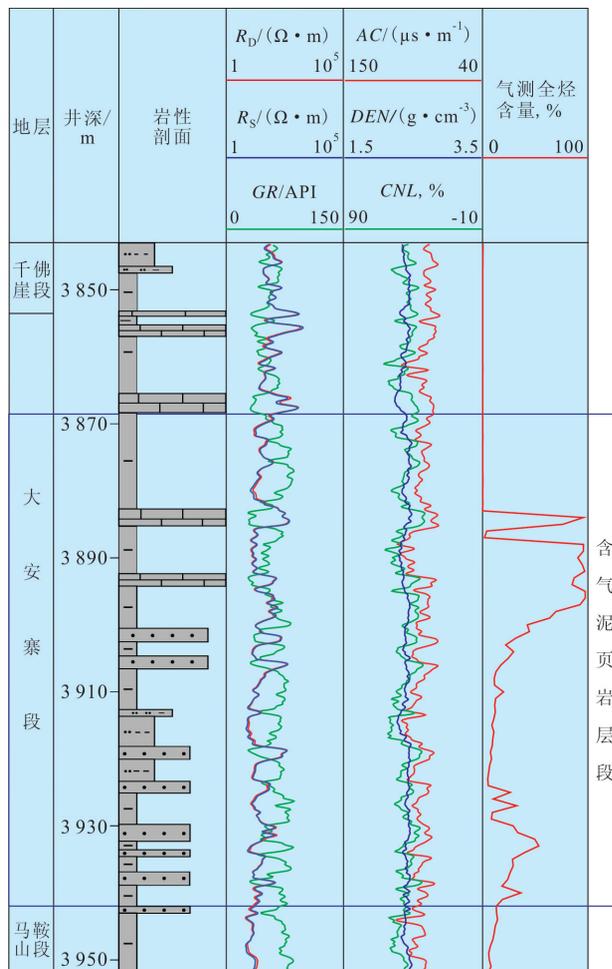


图1 四川盆地xx井含气泥页岩层段纵向划分

在含气泥页岩层段内按照泥页岩类、砂岩类和碳酸盐岩等不同岩相进行厚度分类统计。依据每口井评价单元内不同岩相的厚度,结合地震资料,分别绘制泥页岩类、砂岩类、碳酸盐岩等的有效厚度平面分布图。

1.2.2 含气量

现场解吸法 现场解吸法是测量页岩含气量

最直接的方法,通常在取心现场完成。在钻井取心过程中,待岩心提上井口后迅速将其装入样品罐,在模拟地层温度的条件下,测定页岩中天然气的释放总量,该值通常是吸附气含量与游离气量之和。

ELAN模型测井解释法 目前斯伦贝谢公司采用岩石物理解释程序ELAN,可准确地识别各类矿物的类型并计算各类矿物的含量和关键的物性参数(孔隙度、饱和度和渗透率)。首先将干酪根的体积定为石英、长石和云母的体积之和,根据解释获得的干酪根体积,将干酪根的量转化成总有机碳含量^[9];再根据地区的等温吸附曲线和测井得到的地层温度、压力,经过对温度和有机碳含量的校正,得到地层条件下的吸附气含量;最后采用ELAN解释程序,得到有效孔隙度和含气饱和度^[9-10]。

等温吸附模拟法 等温吸附模拟法是通过泥页岩样品的等温吸附实验来模拟样品的吸附特征和吸附量,通常采用兰氏模型来描述其吸附特征。根据该实验得到的等温吸附曲线可以获得不同样品在不同压力(深度)下的最大吸附气含量。兰氏体积和压力可由等温吸附实验法得到,其中兰氏体积反映了给定泥页岩的最大吸附能力;兰氏压力则是当吸附气含量达到1/2兰氏体积时所对应的压力。

当使用等温吸附模拟法时,吸附气含量的计算式为

$$q_{\text{吸}} = \frac{V_L p}{p_L + p} \quad (3)$$

式中: V_L 为兰氏体积, m³/t; p 为地层压力, MPa; p_L 为兰氏压力, MPa。

等温吸附实验是在特定的有机碳含量和温度下进行的。当等温吸附实验时的温度与地层温度不同时,需要按照文献[9]对兰氏方程进行校正。

有机碳含量拟合法 通常有机碳含量的实测数据有限,当缺少有机碳含量数据时,可以考虑利用测井资料拟合有机碳含量。目前常用Δlg R法估算有机碳含量^[11]。

前人在研究中曾指出有机碳含量直接影响含气量,两者成近似线性正相关^[9],可建立研究区含气量与有机碳含量的关系式,由测井获得的有机碳含量推测含气量。

1.2.3 含气饱和度

直接获取含气饱和度比较困难,但可通过测井解释等方法间接获取。对于泥页岩孔隙型储层,利用阿尔奇公式计算含气饱和度。对于泥页岩裂缝型储层,建立岩石电阻率、泥质水电阻率、有效孔隙

度同地层混合水电阻率的关系式,以此为基础利用阿尔奇公式计算含水饱和度^[12]。

1.2.4 孔隙度

天然气在泥页岩中的储集空间包括基质微孔隙和裂缝2部分,故总孔隙度为两者之和。测定孔隙度既可利用岩心在实验室直接测得,也可通过测井解释等多种方法获取。目前,页岩气储集参数的测井解释,主要还是利用传统的三孔隙度测井与电阻率测井组合法^[10,13]。

对于高勘探程度区,因其三维地震、相关分析化验和测井等资料比较丰富,主要采用体积法,在有多口探井控制和地震资料控制的条件下,绘制相关参数的平面等值线图,根据有效体积和含气量,进行资源量计算。当评价区勘探程度较高、获得部分含气量数据且可确定泥页岩有效厚度和面积时,使用体积法进行页岩气总地质资源量计算使评价结果更加准确。

2 类比法

类比法是一种由已知区推测未知区的方法。其运用的前提条件是某一评价区(预测区)和某一高勘探程度区(标准区)的油气地质条件具有一定的相似性。由于低勘探程度区仅有少部分钻井和相关测试资料,缺乏评价的关键参数,故主要采用类比法,通过与标准区的泥页岩地化特征和储层特征等关键参数的类比确定地质条件的相似程度,估算页岩气总地质资源量。类比法主要可以分为含气量类比法和资源面积丰度类比法等。类比法是一种简单快速的评价方法,可适应于不同的地质条件和资料情况。其缺点是权值和分值的确定缺乏准确依据,人为因素影响比较大。

2.1 含气量类比法

含气量类比法是以含气量作为主要的类比资源参数进行类比,页岩气总地质资源量计算式为

$$Q = A_i h_i \rho_i G \alpha \quad (4)$$

式中: Q 为预测区的页岩气总资源量, 10^6 m^3 ; A_i 为预测区含气泥页岩层段的分布面积, km^2 ; h_i 为预测区含气泥页岩层段厚度, km ; ρ_i 为预测区泥页岩密度, t/m^3 ; G 为类比标准区含气量, m^3/t ; α 为类比相似系数,其值为预测区地质类比分与标准区地质类比分之比。

2.2 资源面积丰度类比法

资源面积丰度类比法是以资源面积丰度作为

主要的资源类比参数进行类比,其计算式为

$$Q = A_i K \alpha \quad (5)$$

式中: K 为标准区页岩气资源丰度, $10^6 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

2.3 类比参数的确定方法

笔者在制定类比法参数取值标准方案时,充分考察了页岩气的形成条件及成藏特点,将有机碳含量、干酪根类型、镜质组反射率、泥页岩单层厚度、脆性指数、孔隙度和埋深作为主要类比参数。

2.3.1 有机碳含量

有机碳是页岩气形成的物质基础,也是衡量气源岩产气能力的重要指标。烃源岩有机碳含量主要受沉积环境的影响。水生生物发育相对繁盛,水体处于弱氧化—还原环境有利于形成高有机质丰度的烃源岩。研究表明,烃源岩的有机碳含量和氢指数随着烃源岩热演化程度的增加而逐渐降低^[14],美国不同盆地泥页岩演化过程显示,在页岩气的高产区,泥页岩氢指数和热解烃量较低。对于高成熟烃源岩,残余有机碳含量不能准确判断其生气能力,需要对有机碳含量进行恢复,将烃源岩中残余有机碳含量转化为原始有机碳含量。美国5大含气页岩系统的有机碳含量分布范围较广,为0.45%~25%^[15-17]。其中热演化程度较高的Ohio页岩、Barnett页岩和Lewis页岩的有机碳含量较低,为0.45%~4.7%;而热演化程度相对较低的Antrim页岩和New Albany页岩的有机碳含量较高,为0.3%~25%。另外,总有机碳含量与吸附气含量也密切相关,在富含粘土的层段有机质丰度最高,吸附性强,有利于页岩气的赋存。

2.3.2 干酪根类型和镜质组反射率

I型和II型干酪根主要以生油为主,III型干酪根主要以生气为主。实验条件下,不同类型干酪根主生气期对应的镜质组反射率不同,I型干酪根镜质组反射率为1.2%~2.3%,II型干酪根为1.1%~2.6%,III型干酪根为0.7%~2.0%,海相石油为1.5%~3.5%^[15]。美国页岩气盆地中干酪根以I型与II型为主,也有少量为III型干酪根^[16-18]。泥页岩镜质组反射率为0.4%~5.0%,变化较大,不同类型的干酪根在不同的热演化阶段均可以产出页岩气,可见干酪根类型并不是决定产气量的关键因素。低成熟度的泥页岩中主要形成生物气,如密执安盆地Antrim页岩的镜质组反射率仅为0.4%~0.6%,主要为I型干酪根,页岩气主要为低成熟的生物成因气。福特沃斯盆地中Barnett页岩有机质以II型干酪根为主,镜质组反射率为1.0%~2.1%,气藏中的

天然气主要来源于早期生成的石油裂解气。含气泥页岩的成熟度同时也影响页岩气井的气体流量,成熟度较高的Barnett页岩区由于干酪根和油的裂解使生气量大幅提高,导致页岩气井气体流量大于成熟度低的泥页岩区^[16]。对于热成因的天然气,泥页岩镜质组反射率应在生气窗范围之内,一般应大于1.2%。

2.3.3 泥页岩单层厚度

富含有机质泥页岩的厚度越大,页岩气藏富集程度就越高。泥页岩厚度和分布面积是保证有充足的储渗空间和有机质的重要条件,一般形成页岩气藏的泥页岩厚度应大于30 m^[19-20]。目前,由于水平井钻井技术和水力压裂、分段压裂等完井技术的成功应用,泥页岩有效厚度下限已降至10~15 m^[21]。

2.3.4 孔隙度和渗透率

泥页岩储层的孔隙在数量级上小于常规碳酸盐岩或砂岩储层的孔隙。美国主要页岩气产层的孔隙度为0.5%~12%,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[16-18]。Zhang等研究表明,福特沃斯盆地中Barnett的硅质页岩中的孔隙半径大多为5~750 nm,属于纳米级^[22]。泥页岩中的孔隙可分为矿物基质孔隙、有机质中的孔隙及裂缝孔隙3种类型^[23]。泥页岩的孔隙度直接控制着游离态天然气的含量,超过50%的天然气储存在泥页岩孔隙中。

渗透率是判断页岩气藏是否具有开发经济价值的重要参数。由于泥页岩的基质渗透率非常低,因此需要人工压裂措施提高渗透率获得工业气流。

2.3.5 矿物组成

岩石的矿物学特征是决定页岩气产能的关键因素,其中脆性矿物含量影响页岩气的开采,粘土矿物含量影响泥页岩的吸附能力。只有少数泥页岩天然裂缝发育,页岩气的开采通常需要人工压裂造缝,石英和长石等脆性矿物容易在外力作用下形成诱导裂缝,有利于天然气渗流和成藏。最好的Barnett页岩产层来自于石英含量为45%和粘土含量仅为27%的泥页岩层段^[14]。通常情况下,泥页岩脆性矿物含量应大于30%~40%才有利于压裂。

根据国外页岩气盆地的主要参数特征并结合中国的实际情况,笔者将有机碳含量、干酪根类型、镜质组反射率、泥页岩单层厚度、脆性指数、孔隙度和埋深的权值分别定为0.2,0.1,0.15,0.15,0.2,0.1和0.1,其分值取值标准见表1。当镜质组反射率为1.2%~2.0%时,有机质演化处于热裂解生湿气阶段,是有机质的主生气期,故赋予的分值最高,为0.75~1;而泥页岩的成熟度过低或过高均不利于天然气的生成,因此,镜质组反射率小于1.2%或大于2.0%时,对应的分值也会相应减小。当泥页岩埋深为1 000~1 500 m时为最佳,赋予分值为0.75~1;埋深太浅不利于页岩气的保存,而埋藏太深会增大开发成本,因此,泥页岩的埋深小于1 000 m或者大于1 500 m时,其分值相应减小。将预测区和标准区的7个类比参数的分值和权值相乘后求和,分别作为预测区和标准区地质类比总分,两者之比即为类比相似系数。

表1 类比参数分值取值标准

有机碳含量, %		干酪根类型				镜质组反射率, %				泥页岩单层厚度/m				脆性指数, %				孔隙度, %				埋深/km					
						0.4~0.7~1~												0.2~0.5~									
1	2					0.7	1	1.2	1.2	10	30					20	40	2	4	<0.2	0.5	1	1				
<1	~	~	>4	I	II ₁	II ₂	III	或	或	或	~	≤10	~	~	≥50	<20	~	~	>60	<2	~	~	>6	或	或	或	~
2	4					3~	2.5~	2~	2	30	50					40	60	4	6	>2.5	2~	1.5~	1.5				
						4	3	2.5									4	6	2.5 2								
0	0.25	0.5	0.75	0.75	0.5	0.25	0	0	0.25	0.5	0.75	0	0.25	0.5	0.75	0	0.25	0.5	0.75	0	0.25	0.5	0.75	0	0.25	0.5	0.75
~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
0.25	0.5	0.75	1	1	0.75	0.5	0.25	0.25	0.5	0.75	1	0.25	0.5	0.75	1	0.25	0.5	0.75	1	0.25	0.5	0.75	1	0.25	0.5	0.75	1

3 结束语

中国页岩气总地质资源量的评价主要采用类比法和体积法。对于高勘探程度区,主要采用体积法。该方法的优点是在页岩气总地质资源量计算中易于取得更加准确的数据,缺点是需要丰富的地

震、相关测试分析数据以及测井等综合资料。在低勘探程度区,主要采用类比法估算页岩气总地质资源量。该方法是一种简单快速的评价方法,缺点是权值和分值的确定缺乏准确的依据,且人为因素影响比较大。

在计算页岩气总地质资源量中,应根据评价区的勘探程度,选取合适的资源量评价方法。有效厚

度、含气量、含气饱和度和孔隙度是体积法计算页岩气总地质资源量的关键参数。其中含气量的确定有多种方法,不同方法的计算结果可能存在差异,在确定含气量参数时应选择相对较准确的计算方法。类比法中标准区的选择及类比相似系数的确定直接影响评价结果。因此,在使用类比法估算页岩气总地质资源量时尽量使标准区的类比参数具有代表性。

参考文献:

- [1] Hill R J, Jarvie D M, Zumberge J, et al. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 445.
- [2] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理 [J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.
- [3] 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.
- [4] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
- [5] Gault B, Stotts G. Improve shale gas production forecasts [J]. Exploration & Production, 2007, 80(3): 85-87.
- [6] 张金华, 魏伟, 钟太贤. 国外页岩气资源量评价方法分析 [J]. 中外能源, 2011, 16(9): 38-42.
- [7] 刘成林, 葛岩, 范柏江, 等. 页岩气成藏模式研究 [J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 1-5.
- [8] 刘成林, 范柏江, 葛岩, 等. 中国非常规天然气资源前景 [J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(5): 26-29.
- [9] Lewis R, Ingraham D, Percy M. New evaluation techniques for gas shale reservoirs [C]. Schlumberger, Reservoir Symposium, 2004.
- [10] 莫修文, 李舟波, 潘保芝. 页岩气测井地层评价的方法与进展 [J]. 地质通报, 2011, 31(2): 400-405.
- [11] Passey Q R, Creaney S, Kulla J B, et al. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(12): 1 777-1 794.
- [12] 李艳丽. 页岩气储量计算方法探讨 [J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 466-470.
- [13] 李显路, 曾小阳, 胡志方, 等. 安棚深层系储层孔隙度计算方法研究 [J]. 河南石油, 2004, 18(6): 17-18.
- [14] Daniel M Jarvie, Ronald J Hill, Tim E Ruble, 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.
- [15] 赵文智, 邹才能, 宋岩, 等. 石油地质理论与方法进展 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 132-134.
- [16] John B Curtis. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1 921-1 937.
- [17] 姜福杰, 庞雄奇, 欧阳学成, 等. 世界页岩气研究概况及中国页岩气资源潜力分析 [J]. 地学前缘, 2012, 16(2): 199-210.
- [18] 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.
- [19] 张利萍, 潘仁芳. 页岩气的主要成藏要素与气储改造 [J]. 中国石油勘探, 2009, 14(3): 20-23.
- [20] 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件 [J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 27-32.
- [21] 陈更生, 董大忠, 王世谦, 等. 页岩气藏形成机理与富集规律初探 [J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 17-21.
- [22] Zhang Tongwei, Geoffrey S Ellis, Stephen C Ruppel, et al. Effect of organic-matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale-gas systems [J]. Organic Geochemistry, 2012, 47: 120-131.
- [23] Robert G Loucks, Robert M Reed, Stephen C Ruppel, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1 071-1 098.

编辑 常迎梅

欢迎订阅 2013 年《断块油气田》

《断块油气田》是中国石油化工集团公司主管、中原石油勘探局主办、专门研究断块油气田的综合性刊物,国内外公开发行,国内刊号 CN41-1219/TE,国际刊号 ISSN1005-8907。

本刊开设栏目有专论综述、地质勘探、开发工程、钻采工艺、测井测试、信息简讯等,报道内容涉及断块油气田研究的各个领域。本刊被《中国期刊全文数据库(CJFD)》、《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》、《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国石油文摘》、美国《剑桥科学文摘(自然科学)》、美国《剑桥科学文摘(工程技术)》、美国《石油文摘(PA)》、美国《化学文摘(CA)》、美国《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》等数据库收录。《断块油气田》为大 16 开版本,双月刊,逢单月 25 日出版,每期定价 10 元,全年 60 元(含邮费)。每年还有一定数量的合订本,每册 80 元。欢迎订阅。

本刊承办广告业务(广告经营许可证:4109004000001),在推广新技术、新产品,开拓市场,沟通产销渠道,宣传企业形象方面,竭诚为广大客户提供最优质的服务。

邮发代号:36-351 邮政编码:457001 联系电话:(0393)4820093,4824957 E-mail:dkyqt@vip.163.com

汇款地址:河南省濮阳市中原东路 360 号《断块油气田》期刊社 联系人:简本君 网址:www.dkyqt.com