

# 页岩气资源量计算:以鄂尔多斯盆地中生界三叠系延长组长7为例

王凤琴<sup>1</sup>, 王香增<sup>2</sup>, 张丽霞<sup>2</sup>, 刘洪军<sup>1</sup>, 雷宇<sup>3</sup>

1. 西安石油大学 非常规天然气资源研究中心, 陕西 西安 710065
2. 陕西延长石油集团研究院, 陕西 西安 710075
3. 广西壮族自治区地质矿产勘查开发局第7地质队, 广西 柳州 545100

WANG Fengqin<sup>1</sup>, WANG Xiangzeng<sup>2</sup>, ZHANG Lixia<sup>2</sup>, LIU Hongjun<sup>1</sup>, LEI Yu<sup>3</sup>

1. Unconventional Natural Gas Resources Research Center, Xi'an University of Petroleum, Xi'an 710065, China
2. Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd, Xi'an 710075, China
3. No.7 Brigade of Guangxi Bureau of Geology and Mineral Exploitation, Liuzhou 545100, China

WANG Fengqin, WANG Xiangzeng, ZHANG Lixia, et al. The shale gas resources estimation: An example from Mesozoic Triassic Yanchang Formation Member Chang 7, Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(3): 240-246

**Abstract:** The Mesozoic Triassic Yanchang Formation Chang 7 shale in Ordos Basin is an important hydrocarbon source rock and recently has developed into a very active point in shale gas exploration. The goal of the study is to estimate the shale gas resources. On the basis of 279 wells logging data, geological and geochemical database consisting of 347 core samples from 18 core wells of this area, we conducted an overall analysis of lithology, petrofacies, porosity, total organic carbon (TOC) content, thermal maturity and gas content for the Chang 7 gas shale and studied the response of logging curves to the patterns of gas reservoir. On the basis of the study of the forming conditions of the gas shale the present paper builds up the quantitative relationship between TOC and logging data, including acoustic time logging, natural gamma ray logging and resistivity logging. We use volumetric method to estimate the shale gas resources. The results will lay a foundation for the exploration and exploitation of shale gas in the future.

**Key words:** shale gas resources; unconventional oil and gas; Ordos Basin; Yanchang Formation

**摘要:**鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7暗色泥页岩是重要的烃源岩。最近的勘探表明,长7具有良好的页岩气开发前景。重点利用鄂尔多斯盆地279口测井资料、18口取心井的347块岩样实验室多种分析测试资料,开展了鄂尔多斯盆地中生界延长组长7页岩气的岩性、岩相、孔隙类型、有机碳含量、热演化程度、含气性、气体储存方式及其在测井曲线的反响研究;在页岩气形成条件的研究基础上,建立了岩性、含气性、有机质含量与自然伽马、声波时差、电阻率之间的关系,有效地识别含气泥页岩;选择容积法对延长组页岩气资源量进行计算,为未来页岩气的勘探和开发奠定基础。

**关键词:**页岩气资源;非常规油气;鄂尔多斯盆地;延长组

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2013)03-0240-07

收稿日期:2012-12-07;修回日期:2013-01-09

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05018-001)

作者简介:王凤琴(1964—),女,教授,主要从事油气资源勘探与评价教学与研究工作。E-mail:fqwang@xsyu.edu.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2013,20(3)

## 0 引言

页岩气藏从石油地质理论来讲属于自生自储或者自生近储,气体或有很短距离的运移,气体以游离、吸附和溶解状态存在于富含有机质的细粒泥页岩中,分布广泛,没有气水边界的连续分布型气藏。这类气藏储存及分布的特殊性,给页岩气的资源评价及资源量或者储量计算带来挑战。挑战之一,在没有气水边界的情况下如何圈定含气面积;挑战之二,如何识别含气页岩及确定其有效厚度;挑战之三,泥页岩中的含气量、含气饱和度如何确定。美国是页岩气勘探开发的先驱,在资源量的计算中曾采用多种方法,如盆地类比分析法、容积法、地质要素分布概率分析法、基于生气量和排气率的成因法、物质平衡法、递减曲线法和数值模拟法等<sup>[1-5]</sup>。2007年石油工程师学会(SPE)、世界石油学会(WPC)、美国石油地质学家协会(AAPG)、石油评估工程师学会(SPEE)及勘探地球物理学家学会(SEG)共同修订出版《油气资源管理系统》(PRMS),将非常规油气资源纳入整个油气资源计算体系<sup>[6]</sup>。我国页岩气资源量评估工作刚起步,在学习借鉴美国页岩气资源量储量评价与计算的基础上,根据我国页岩气的不同特点,采取适当的方法进行资源评估,对于页岩气未来的勘探和开发具有十分重要的意义。

鄂尔多斯盆地晚三叠世长7时期,强烈的构造活动使得湖盆快速扩张,形成了大范围的深水沉积,以富含有机质的泥岩、页岩、粉砂岩及细砂岩沉积为主,为发育优质的烃源岩提供了基本地质条件。大量的研究及勘探实践表明<sup>[7-14]</sup>,长7泥页岩段分布面积大,可达 $(5\sim 10)\times 10^4\text{ km}^2$ ,主要分布在陕西省、甘肃省境内(图1),湖盆呈北西-南东向展布。泥页岩厚度较大,累计厚度可达80 m以上,有机质含量高,其残余有机碳含量主要为6%~14%,最高可达30%~40%(油页岩)。残留沥青“A”大都在0.4%~1.0%,最高可达2%以上。烃含量大都在0.3%~0.6%。大部分地区均已达到了成熟—高成熟早期( $R_o$ 为0.7%~1.1%)的生油高峰阶段。目前在盆地中发现的中生界的油气绝大多数来源于延长组暗色泥页岩,特别是长7暗色泥页岩。作为优质烃源岩,长7生成的油气经过运移和聚集形成了延长组上组合中的长6、长4+5、长2油藏以及下组合长8、长9、长10油藏,有关油气生成、运移及成藏

的研究已比较深入。国外页岩气的勘探与开发,使长7的研究更为拓宽。初步研究表明<sup>[15-16]</sup>,长7存在丰富的页岩气资源。本文以三叠系延长组长7为例,采用容积法对页岩气的资源量进行了计算。

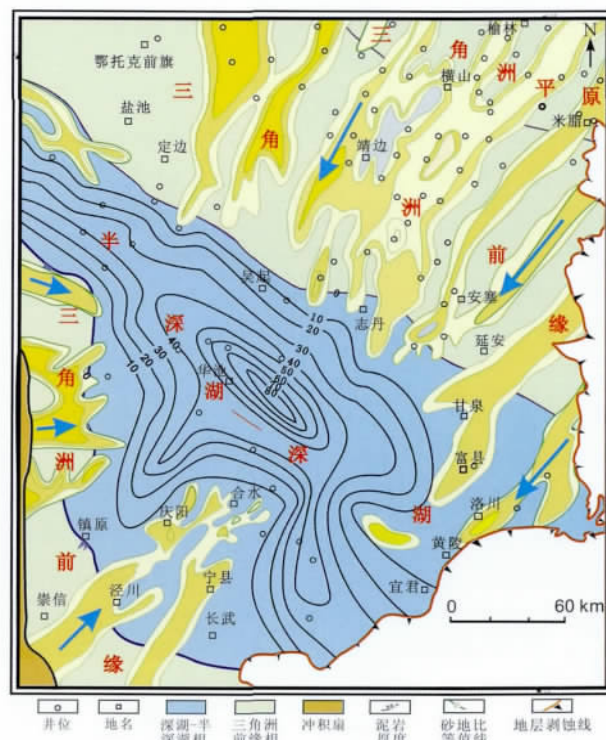


图1 鄂尔多斯盆地延长组长7沉积相图

(据文献[10]修改)

Fig.1 Sedimentary facies of Member Chang 7 in Ordos Basin

## 1 页岩气资源量计算方法及参数选取

容积法是页岩气勘探评价阶段所采用的相对成熟的资源评价方法<sup>[1]</sup>。计算结果的精度取决于对页岩气地质条件和储层条件的认识程度。延长组是鄂尔多斯盆地石油的重点勘探开发层系,在近100多年的石油勘探开发实践中积累了大量的钻井、录井和测井资料。在研究区内,笔者重点选取了279口测井资料,对18口井总长度为364 m的长7暗色泥页岩进行观察和描述,并进行了347块次岩心样品的岩性、孔渗性、岩石热解和含气性分析测试,对长7富含有机质泥页岩厚度、岩性电性特征、地球化学特征、孔隙特征及含气性特征进行分析和研究。

### 1.1 方法

地质、地球化学及生产测试研究表明,延长组长7页岩气在泥页岩中主要以游离态存在于岩石孔隙

与裂隙中,部分以吸附态吸附于有机质颗粒、粘土矿物颗粒、干酪根颗粒表面,或少量溶解于干酪根、沥青质、残留水以及液态原油中的页岩气形式存在,但以游离态和吸附态为主。因此,在计算时,仅需要计算游离气及吸附气的体积含量,忽略溶解气的含量。计算公式如下:

$$R = R_a + R_f \quad (1)$$

式中: $R$  为页岩气资源量( $10^8 \text{ m}^3$ ); $R_a$  为吸附气量( $10^8 \text{ m}^3$ ); $R_f$  为游离气量( $10^8 \text{ m}^3$ )。泥页岩的吸附气量可以通过实测吸附气量获得。页岩中的游离气是指储存于页岩微孔和裂隙中的自由气体,游离气量与页岩的体积及页岩的孔隙度及气体在孔隙中的饱和度有关,游离气量采用下式计算:

$$R_f = V\Phi S_g \quad (2)$$

式中: $V$  为页岩体积( $\text{m}^3$ ); $\Phi$  为页岩孔隙度; $S_g$  为页岩含气饱和度。

## 1.2 参数选取

(1)含气泥页岩厚度的确定。国外的含气泥页岩通常定义为有机质含量高(大于2%)、厚度比较大(大于15 m)、成熟度适中(0.9%~1.4%)、埋深较浅(大多数在2 000 m以内)<sup>[17-18]</sup>。笔者在进行此项研究时发现,长7暗色泥页岩颜色多为深灰色、黑灰色、黑褐色及黑色,致密,含有化石,且所含化石的种类及数量变化较大。岩性以泥岩、页岩和泥质粉砂岩为主。实验室实测总有机碳(TOC)含量变化较大,其数值为0.65%~21%,但是分析样品中有80.7%的样品的TOC含量超过2%,92.3%的样品TOC含量超过1.5%,说明有机质含量比较丰富。钻井及录井中发现暗色泥岩段有气体显示,经过试采,日产气2 000~4 000  $\text{m}^3$ 。为了充分利用测井资料获得含气泥页岩的厚度,笔者进行了岩性、电性及实测有机碳的研究,发现TOC含量与声波时差(AC)有一定的正相关性(图2)。关于富含有机质泥页岩的测井响应,国际及国内学者均有研究<sup>[19-20]</sup>,认为干酪根的声波时差大于固体岩石骨架的声波时差,因此当其他条件一定时,有机质含量越高的烃源岩应具有更大的声波时差。陈荷立等<sup>[21]</sup>在对鄂尔多斯盆地三叠系延长组泥岩压实及油气运移进行过研究,认为长7烃源岩具有异常高的声波时差,据此计算了延长组异常流体高压。Surdam<sup>[22]</sup>认为,致密砂岩气的“甜点”位置,往往和高的声波时差有关。因此,或许是因为富含有机质的泥页岩含气时,声波时差值的异常增大更为明显。

有关此方面的研究,笔者正在进行中。总之,在延长组的这段富含有机质的泥页岩中,声波时差值较大,所以在选取富含有机质泥岩厚度时,AC一般大于220  $\mu\text{s}/\text{m}$ 。电阻率(RT)测井曲线在长7暗色泥页岩段,其数值也相应增大,这与其中的含气量有关,与声波时差呈正相关关系(图3)。自然伽马(GR)曲线是反映泥质含量及有机碳的曲线<sup>[20]</sup>,经统计,自然伽马数值越大,声波时差也越大,它们之间具有正相关性(图4)。因此含气泥页岩的厚度是综合考虑自然伽马、声波时差、电阻率等进行取值,取值电性标准如表1所示。

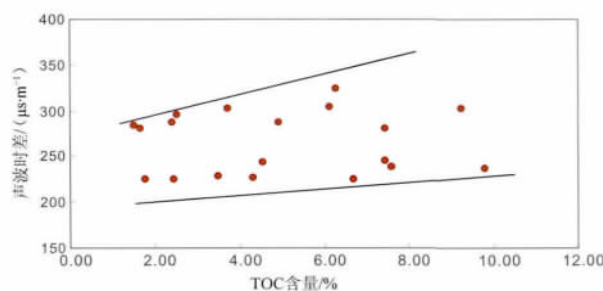


图2 延长组长7泥页岩有机质含量与声波时差的关系图  
Fig. 2 Plots of acoustic time vs. TOC content of Chang 7 shale

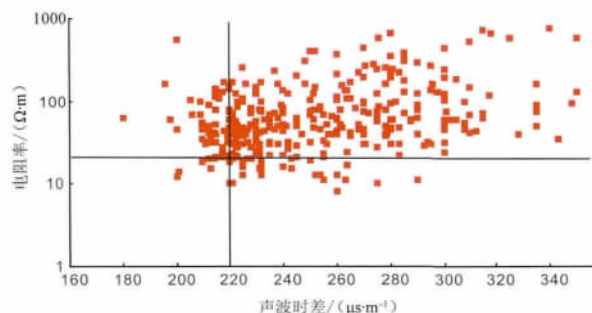


图3 延长组长7泥页岩声波时差与电阻率的关系图  
Fig. 3 Plots of resistivity vs. acoustic time of Chang 7 shale

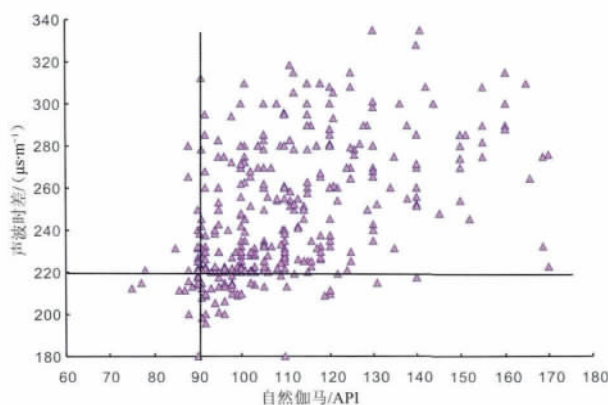


图4 延长组长7泥页岩自然伽马与声波时差的关系图  
Fig. 4 Plots of acoustic time vs. Gamma ray of Chang 7 shale

表 1 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 含气页岩厚度  
岩性电性取值标准

Table 1 Threshold for gas shale of Member Chang 7 using lithology and well logging data in Ordos Basin

岩性	自然伽马/ API	声波时差/ ( $\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ )	电阻率/ ( $\Omega \cdot \text{m}$ )
暗色泥岩、页岩	$\geq 90$	$\geq 220$	$\geq 45$

在读取泥页岩的厚度值时,除考虑泥页岩的电性特征还需考虑泥页岩的单层厚度,我们选取厚度大于 5 m 单层进行统计。这样做的原因是考虑到未来在进行压裂作业时,如果泥页岩层太薄,压裂缝可能会将泥页岩顶底的砂层连通,造成大量水的进入,影响页岩气的产出,所以选择 5 m 为起算厚度。为了保证页岩气有一定的生产周期,选择 15 m 为厚度下限。图 5 为延长组长 7 在陕西省境内的含气泥页岩厚度等值线图。泥页岩的厚度自北而南增厚,在深湖区

(志丹—甘泉以南)达到最大值,厚度可达 123 m。

(2)计算单元及面积确定。页岩气属于连续型油气藏,无边界,计算资源量时,确定的边界是人为边界,认为此边界内地下含有丰富的页岩气,可以在现有的经济、技术条件下进行勘探开发。北美的页岩气边界,有的是采用页岩气的厚度值,也有采用热成熟度值作为边界值<sup>[23-24]</sup>。本次开展研究的地区,利用实测泥页岩中有机质镜质体反射率及测井计算热成熟度,得到长 7 泥页岩的成熟度( $R_o$ )分布图(图 5)。从图中可看出,研究区的富含有机质泥页岩、有机质演化进入热成熟阶段,南部甘泉—富县以西泥页岩较厚的区域有机质热演化程度较高,有机质热演化进入了高熟湿气阶段。根据油气生成理论,有机质进入成熟后,在生油窗以生油为主,但也有一定数量的气体生成。因此,笔者将含气页岩的厚度 15 m 作为边界,在此边界内,大部分的区域泥

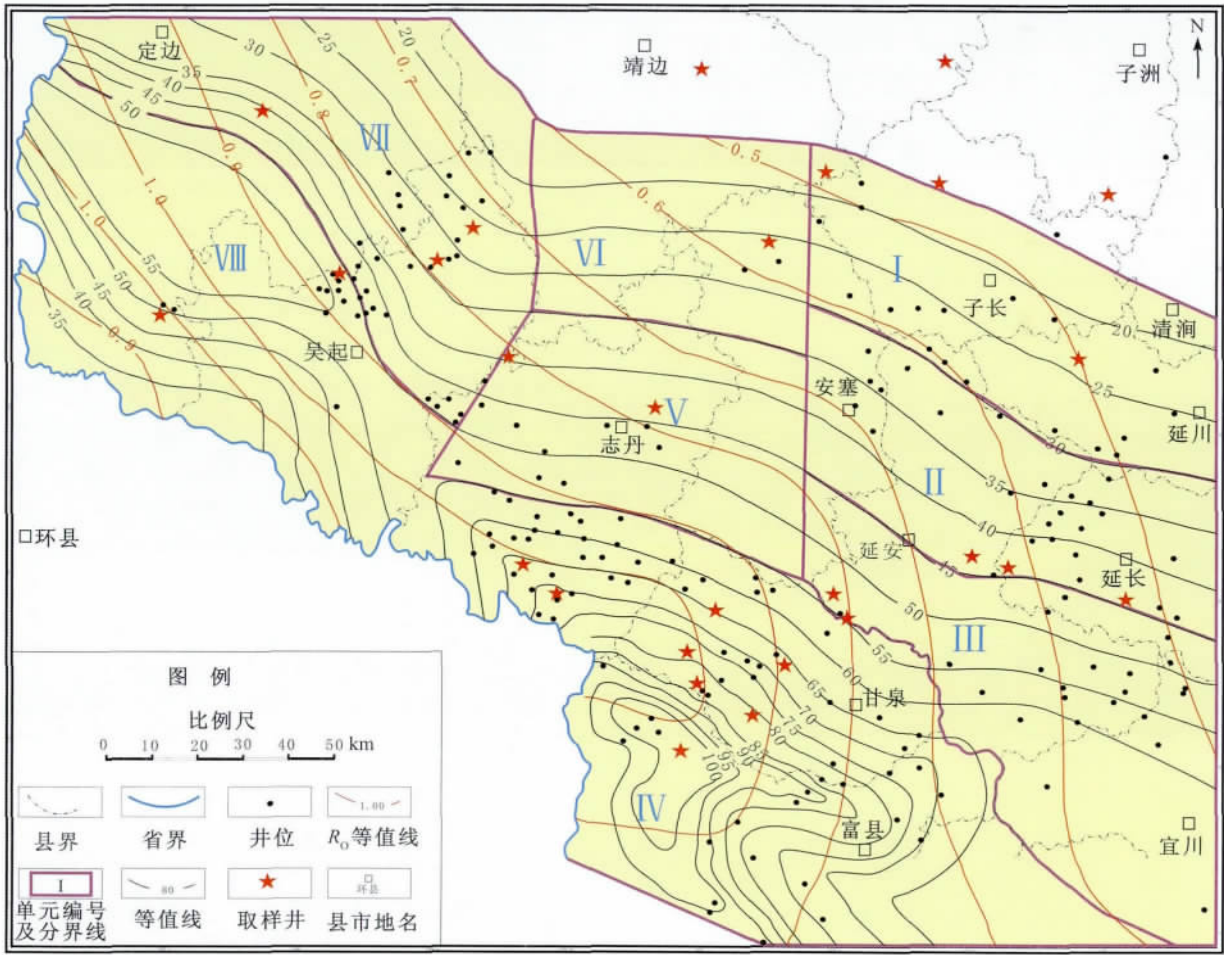


图 5 延长组长 7 页岩气资源计算单元划分

Fig. 5 Unit division of Member Chang 7 for shale gas resource assessment

页岩有机质均进入成熟阶段,南部富县地区进入高熟阶段,具有生成大量气体的可能,因此均作为页岩气的潜力区计算资源量。考虑到研究区域内的含气泥页岩的厚度、含气性、孔隙度、成熟度特征不同,笔者采用划分单元进行资源量计算。在划分单元时,还考虑到生产管理方便及井数密度等因素。资源量计算单元划分为 8 个单元,如图 5 所示。每个单元内厚度变化较小,计算时取厚度的平均值。

(3)密度。泥页岩的密度值是计算资源量必需的参数,在取值时,直接利用实验室对泥岩密度的实测值。

(4)吸附气量。在页岩气藏中,吸附气是页岩气的重要的储藏形式之一。吸附气是指吸附在有机质或者矿物表面上的气体,吸附量的多少与矿物质的类型,有机质含量、有机质成熟度,地下的温度、压力及气体的扩散率有关系。在本次研究中,对泥页岩岩心进行了等温吸附实验,获得泥页岩的吸附气量,但是受取心井样品的限制,不能满足资源量计算。据国外研究<sup>[25-26]</sup>,页岩气吸附气量与有机碳有一定关系,有机碳越丰富,吸附气量越多。其原因主要有两方面:一方面是 TOC 值高,页岩的生气潜力大,单位体积页岩的含气率就高;另一方面,由于干酪根中微孔隙发育,且表面具亲油性,对气态烃有较强的吸附能力,同时气态烃在无定形和无结构基质沥青体中的溶解作用也有不可忽视的贡献。延长组长 7 泥页岩等温吸附实验数据表明,页岩中吸附气变化较大,长 7 泥页岩中,实测吸附气量在  $0.64 \sim 2.76 \text{ cm}^3/\text{g}$  变化,除了一个样品的吸附气量小于  $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ ,其他样品的吸附气量均大于  $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。据统计,吸附气量与有机碳含量有关(图 6),因此取值时参考吸附气量的实测值及 TOC 值的变化趋势综合取值。

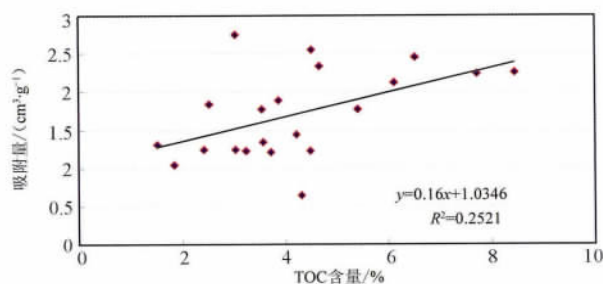


图 6 延长组泥页岩有机质含量与气体吸附量之间的关系图

Fig. 6 Plots of adsorbed gas content vs. TOC content of Member Chang 7 shale

(5)孔隙度。本次计算资源量时,孔隙度值主要以各单元实测值为依据进行选值。长 7 样品实验室岩心物性分析表明,孔隙度的变化范围较大,孔隙度数值为  $0.5\% \sim 3.5\%$ (图 7),平均值为  $1.82\%$ 。孔隙度  $1.0\% \sim 1.5\%$  占总样品的  $33.33\%$ ,  $1.6\% \sim 2.0\%$  占总样品的  $24.24\%$ ,  $2.1\% \sim 2.5\%$  占总样品  $21.21\%$ ,大于  $2.6\%$  的占总样品数的  $12\%$ 。由于各计算单元泥页岩的地质与地球化学的差异性,在取值时主要依据各单元的实测样品孔隙度的平均值。

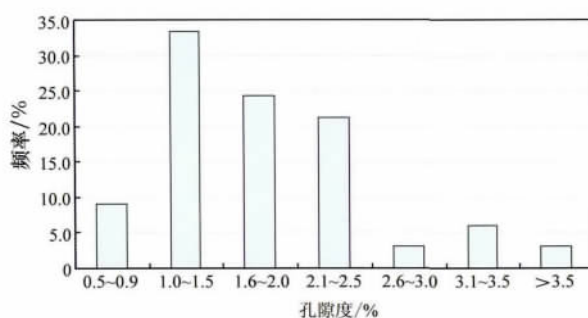


图 7 延长组长 7 泥页岩孔隙度分布图

Fig. 7 Porosity distribution histograms of Member Chang 7 shale

(6)含气饱和度。含气饱和度是计算页岩气中游离气含量的参数。游离气是储存于泥页岩孔隙和天然裂缝中的气体,其饱和度与孔隙大小、地下温度及压力场有关。由于页岩是在满足了吸附之后多余的气体才会发生运移和聚集。不同地区、不同演化阶段生气量不同,气体的饱和度有差异,在低成熟区、成熟区、高成熟区应选择不同的含气饱和度进行计算。笔者在进行此项研究时,受测试条件的限制,确定泥岩中的含气饱和度有相当的难度,因此,计算资源量时每个单元都分别按饱和度为  $0.25$ 、 $0.50$ 、 $0.75$  和  $1.00$  进行计算。

## 2 结果分析

根据上述取值原则,对延长组长 7 页岩气资源量进行计算,结果如表 2 所示。从表中可见,各计算单元资源量丰度变化在  $(0.45 \sim 3.58) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,资源量丰度最大的区域是第 IV 单元区即甘泉—富县区域,此区域是长 7 时期的深湖区,泥页岩沉积厚度大,有机质成熟度相对较高,气体吸附量大,因此是页岩气富集区之一,资源丰度较大。与国外的页岩气对比<sup>[27]</sup>(表 3),从页岩的埋深、厚度、有机碳含量等 11 项指标来看,各项指标均与 Barnett 和 Lewis

表2 延长组长7页岩气资源量计算结果

Table 2 Calculated results of shale gas resources in Member Chang 7

计算单元编号	名称	埋藏深度/ m	厚度/ m	总有机碳 含量/%	成熟度/ %	孔隙度/ %	吸附量/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	资源量丰度/ (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )
I	子长—延长区	200~800	22.5	1.3	0.6~0.7	4.60	1.31	0.75
II	延安—延长区	200~800	37.5	1.4	0.5~0.8	2.00	1.04	0.99
III	延安—宜川区	200~900	52.5	1.2	0.5~0.8	0.90	1.01	1.34
IV	甘泉—富县区	800~1 400	77.5	3.0	0.7~1.2	1.50	1.84	3.58
V	志丹区	1 000~1 800	45.0	1.7	0.8~1.1	1.60	1.35	1.54
VI	靖边以南区	1 000~1 800	25.0	1.0	0.6~0.8	2.50	0.70	0.45
VII	定边—吴起北区	1 800~2 300	32.5	1.7	0.7~0.9	1.70	1.35	1.11
VIII	定边—吴起以南区	1 800~2 300	45.0	3.5	0.7~1.0	1.20	1.64	1.87

表3 鄂尔多斯盆地延长组页岩气特征与国外对比表

Table 3 Comparisons of North American shale gas with Member Chang 7 shale gas in Ordos Basin

盆地	页岩名称	时代	气体成因类型	埋藏深度/m	厚度/m	干酪根类型	有机碳含量/%	镜质体反射率/%	含气量/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	吸附气含量/%	甲烷含量/%	总孔隙率/%	渗透率/(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )	地层压力系数	资源丰度/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )
Fort Worth	Barnett	早石炭世	热解气	1 981~2 591	61~152	II	1.0~13.0	1.0~2.1	8.49~9.91	40~60	77~93	1.0~6.0	0.01	0.99~1.02	7.15
San Juan	Lewis	早白垩世	热解气	914~1 829	152~579	III为主	0.5~2.5	1.6~1.9	0.37~1.27	60~80		0.5~5.5	<0.1	0.46~0.58	1.74
Michigan	Antrim	晚泥盆世	生物气	183~730	49	I	0.3~24.0	0.4~1.6	1.13~2.83	70		2.0~10.0	<0.1	0.81	0.69
Appalachian	Ohio	晚泥盆世	热解气	610~1 524	91~610	II	0.5~23.0	0.4~1.3	1.70~2.83	50	80~95	2.0~11.0	<0.1	0.35~0.92	1.73
Illinois	New Albany	晚泥盆世	热解气、生物气	183~1 494	31~140	II	1.0~25.0	0.4~1.3	1.13~2.64	40~60	72~76	5.0~15.0	<0.1	0.99	
鄂尔多斯	延长组长7	晚三叠世	热解气	225~2 425	10~129	II	0.88~25.46	0.52~1.13	0.64~2.75		72.24	0.5~3.5	<0.01		0.45~3.58

页岩不相上下,因此,鄂尔多斯盆地三叠系页岩气资源丰富,勘探开发的前景十分广阔。

### 3 结论及建议

(1)鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7经过勘探与评价,页岩气形成的条件较好,泥页岩厚度大,埋深浅,有机质含量丰富,发育优质泥质烃源岩。从泥页岩的埋深、厚度、有机碳含量等11项指标来看,各项指标均与Barnett和Lewis页岩气有可比性,因此,鄂尔多斯盆地页岩气资源丰富,勘探开发的前景十分广阔。

(2)大量的岩心及相应井的测井资料统计表明,延长组长7含气页岩其有机质丰度与声波时差、声波时差与自然伽马及电阻率存在良好的相关性,通

过建立相应的岩电关系图版,可以较准确地判断含气页岩。

(3)延长组长7页岩气资源量计算表明,泥页岩厚度大的区域和热成熟度高的区域如IV区(甘泉—富县区)和VIII区(定边—吴起以南),页岩气资源丰度大,可作为今后页岩气重点勘探开发区域。

(4)延长组长7泥页岩的岩性、有机质丰度、含气量等在平面上和纵向上变化较大,建议对页岩气重点区域系统取样,加强页岩气富集特征和规律的研究,为今后的勘探和开发奠定基础。

### 参考文献

- [1] Lee J, Sidle R. Gas-reserves estimation in resource plays[J]. SPE Economics & Management, 2010, 2(2): 86-91.

- [2] Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1993-1999.
- [3] King G R. Material balance techniques for coal seam and Devonian shale gas reservoirs with limited water influx[J]. SPE Reservoir Engineering, 1993, 8(1): 67-72.
- [4] Ross D J K, MarcBustin R. 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.
- [5] Schmoker J W. U. S. Geological survey assessment model for continuous (unconventional) oil and gas accumulations: The "FORSPAN" model[J]. US Survey Bulletin, 1999, 2168: 1-12.
- [6] Chan P, Echerington J R, Aguilera R. A process to evaluate unconventional resources[J]. SPE Economics & Management, 2012, 3(4): 119-127.
- [7] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 48-60.
- [8] 席胜利, 刘新社. 鄂尔多斯盆地中生界石油二次运移通道研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2005, 35(5): 628-632.
- [9] 张文正, 杨华, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59-64.
- [10] 杨华, 张文正. 论鄂尔多斯盆地长 7 段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154.
- [11] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2003, 39(5): 65-71.
- [12] 窦伟坦, 侯明才, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组油气成藏条件及主控因素研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(6): 686-692.
- [13] 陈瑞银, 罗晓容, 赵文智, 等. 鄂尔多斯盆地中生代热异常及烃源岩热演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2008, 34(6): 658-663.
- [14] 苗建宇, 祝总祺, 刘文荣, 等. 泥岩有机质的赋存状态与油气初次运移[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 169-175.
- [15] 王香增, 张金川, 曹金舟, 等. 陆相页岩气资源评价初探: 以延长直罗一下寺湾区中生界长 7 段为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 192-197.
- [16] 雷宇, 王凤琴, 刘洪军, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长 7 泥页岩岩电关系[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(2): 27-35.
- [17] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Pollastro, Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2): 155-175.
- [18] Ross D J K, Bustin R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member northeastern British Columbia, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2007, 55(1): 51-75.
- [19] Passey Q R, Creaney S, Kulla J B. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(5): 1777-1794.
- [20] 徐思煌, 朱义清. 烃源岩有机碳含量的测井响应特征与定量预测模型: 以珠江口盆地文昌组烃源岩为例[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 290-300.
- [21] 陈荷立, 刘勇, 宋国初. 陕甘宁盆地延长组地下流体压力分布及油气运聚条件研究[J]. 石油学报, 1990, 11(4): 8-16.
- [22] Surdam R C. Anomalous pressured gas resource in Rocky Mountain Laramide Basins[J]. World Oil, 2001, 222(9): 80-82.
- [23] Pollastro R M. Total petroleum system assessment in the giant Barnett Shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 551-578.
- [24] Pollastro R M, Jarvie D M, Hill R J, et al. Geologic framework of the Mississippian Barnett Shale, Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bend arch-Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 405-436.
- [25] Lu X C, Li F C, Watson A T. Adsorption studies of natural gas storage in Devonian shales[J]. SPE Formation Evaluation, 1995, 10(2): 109-113.
- [26] Strapoc D, Mastalerz M, Schimmelmann A. Geochemical constraints on the origin and volume of gas in the New Albany Shale (Devonian-Mississippian), eastern Illinois Basin[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11): 1713-1740.
- [27] 李世臻, 乔德武, 冯志刚, 等. 世界页岩气勘探开发现状及对中国的启示[J]. 地质通报, 2010, 29(6): 918-924.