

鄂西黄陵背斜南翼震旦系陡山沱组 有利目标区页岩气资源潜力评价

李浩涵¹, 陈科¹, 包书景¹, 张焱林², 宋腾¹, 王鹏¹

(1. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 湖北省地质调查院, 武汉 430074)

摘要: 随着鄂西黄陵背斜南翼震旦系陡山沱组全球最古老页岩气的首次发现, 该层系暗色页岩的含气性已获得证实。通过宜昌—秭归地区黄陵背斜南翼秭地1井岩心现场含气量解析和岩矿分析, 获得了黄陵背斜南翼震旦系陡山沱组暗色页岩含气量和密度数据; 通过区域地震资料处理解释和秭地1井、秭地2井钻井标定层位, 获得了有利区含气页岩厚度及分布, 明确了含气页岩的体积; 通过概率体积法对该区陡山沱组页岩气资源量进行计算, 其范围为 $(845.78 \sim 3\,029.08) \times 10^8 \text{ m}^3$, 中值资源量为 $1\,947.27 \times 10^8 \text{ m}^3$, 证明该层系具有良好的页岩气资源潜力, 可作为鄂西地区下一步页岩气勘探的重点区域。

关键词: 页岩气; 资源潜力; 陡山沱组; 震旦系; 黄陵背斜; 鄂西

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Evaluation of shale gas resources of the Sinian Doushantuo Formation in the southern Huangling anticline, western Hubei Province

LI Haohan¹, CHEN Ke¹, BAO Shujing¹, ZHANG Yanlin², SONG Teng¹, WANG Peng¹

(1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

2. Hubei Institute of Geological Survey, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: With the first discovery of the world's oldest shale gas in the Sinian Doushantuo Formation on the southern limb of the Huangling anticline in the western Hubei Province, the gas-bearing properties of the dark shale in this layer have been confirmed. The gas content and density data of the dark shale of the Sinian Doushantuo Formation in the study area were obtained by gas content and rock and mineral analyses of the core samples from the well ZD-1. Based on the interpretation of regional seismic reflection profiles and well data of ZD-1 and ZD-2, we delineated the distribution and thickness variation of the black shale in detail, and defined the volume of the gas-bearing shale. The resource potential of the Lower Sinian Doushantuo Formation on the south limb of the Huangling anticline was determined by the probabilistic volume method. The gas resource was calculated, ranging $(85 \sim 303) \times 10^9 \text{ m}^3$, and the median resource was $195 \times 10^9 \text{ m}^3$, which indicates that the layer has a good shale gas resource potential. It was recommended as a shale gas exploration target in the western Hubei Province.

Key words: shale gas; resource potential; Doushantuo Formation; Sinian; Huangling anticline; Western Hubei Province

自国家大力推进页岩气勘探开发工作以来, 在南方海相地区尤其是四川盆地已经获得了页岩气产量的重大突破^[1-4], 在西部陆相地区也取得了良好的页岩气显示^[5-6]。我国中扬子地区自震旦系起, 主要发育震旦系、下寒武统、下志留统、下二叠统和上二叠统等为代表的8套黑色页岩^[7-8]。其中下震旦统陡山沱组泥页岩虽然有机质丰度较高, 有机质类型好, 但限于其在武陵山地区普遍埋

深较大、成熟度较高等不利因素, 在页岩气有利区优选往往不受重视^[9]。针对这一套潜在含气页岩层系的研究仍限于基于地表露头样品测试的地质特征和资源潜力分析, 其含气性长期以来未得到证实。

武陵山地区自震旦纪以来进入了以稳定沉积为主的拗陷型沉积盆地发育阶段。黄陵背斜南翼属陆棚台地相, 在晚震旦世发育一套由黑色泥页岩、

深灰—灰黑色泥晶灰岩及含碳含泥云岩组成的烃源岩。陡山沱组地层划分为一个二级层序(SS1),其中包含4个三级层序(SQ1、SQ2、SQ3、SQ4),其优质暗色泥页岩主要分布在SQ2层序内,即上震旦统陡山沱组二段^[10]。该地区陡山沱组主要为有利的台间坳陷相沉积,陡山沱组二段主要岩性为碳质泥晶灰岩和白云岩,有机质类型主要为腐泥型(I型)或腐植腐泥型(II₁型);有机质丰度整体品位中等,TOC含量在0.55%~2.23%,平均值1.4%;R_o在1.49%~1.86%,平均为1.74%,基本处于过成熟阶段^[11]。虽然武陵山地区陡山沱组泥页岩总体上埋藏较深、成熟度较高,但随着该地区全球最古老页岩气的发现,证明在以黄陵背斜为代表的古隆起区周边仍具备页岩气生成和储存的条件。

本文通过对宜昌—秭归地区黄陵背斜南翼秭地1井、秭地2井陡山沱组岩心进行现场含气量解析和损失气计算,首次获得了该层系泥页岩含气量数据,证实了震旦系暗色页岩的资源潜力;通过二维地震地理解释,落实了该地区有利页岩的厚度及分布情况,并通过概率体积法计算了页岩气资源量。

1 页岩气资源量计算方法

页岩气藏储层连续分布,具有较强的非均质性。在页岩气资源评价中,根据地质因素的不确定性,以及关键参数及其获取方式的不同,主要采用福斯潘(FORSPAN)法、单井(动态)储量估算法、资源丰度类比法和概率体积法等资源评价方法^[12-19]。

在勘探实践中,本地区勘探程度仍较低,可获

取的参数较为有限,如页岩含气量数据仅在部分井位有数据,还需通过概率法的基本原理对各项计算参数进行筛选和赋值,通过分析计算最终对结果进行表征^[20]。因此本文在多种方法中选择采用概率体积法来进行研究区的页岩气资源评价工作。

根据概率体积法的基本原理,页岩气地质资源量应等于地层中页岩的质量与其单位质量所含页岩气之概率乘积^[20]。假设Q₁为页岩气资源量;V为含气页岩体积;ρ为泥页岩密度;q为页岩含气量,则:

$$Q_1 = V\rho q$$

文中,通过二维地震地理解释可直接得出含气页岩的分布范围和厚度,可据此计算出含气页岩体积V,因此体积参数采用确定值;页岩密度ρ的取值直接采用含气页岩实测值;页岩含气量通过统计实测值,利用概率法对该项参数进行赋值。

2 有效页岩体积的确定

2.1 评价单元边界

页岩气属于连续型油气藏,一般不认为有明显的边界,计算资源量时,需要首先人为地限定一个边界,并在该边界范围内开展资源评价,并进行现有经济、技术条件下的勘探开发^[21]。本文评价边界主要受断层、露头分布和地震控制范围约束。其中研究区西侧以仙女山断裂为界,南部和北部以震旦系地表出露为边界,东部以现有地震覆盖范围为边界(图1)。

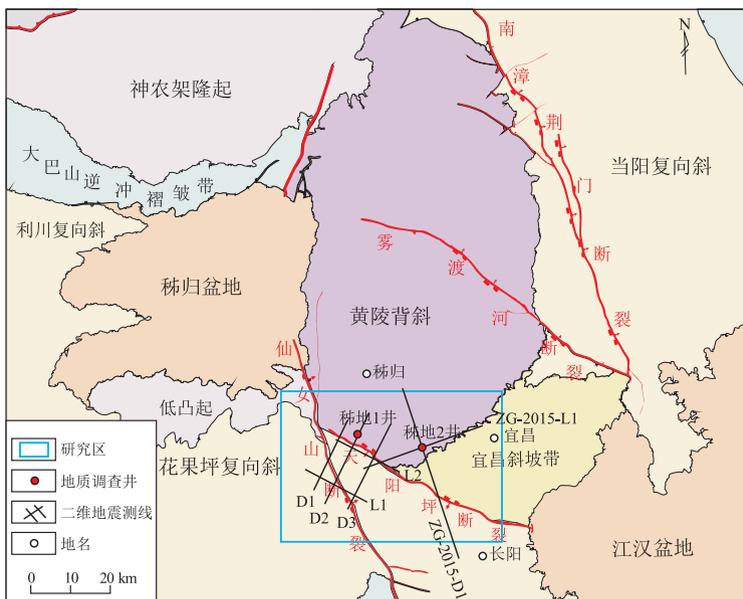


图 1 鄂西黄陵背斜南翼研究区构造概况

Fig.1 Structural map of research area in the southern Huangling anticline, western Hubei Province

2.2 有效页岩厚度预测及体积计算

秭地1井和秭地2井实钻资料揭示了该地区陡山沱组厚度在150~200 m左右,其中主力泥页岩陡二段在秭地1井厚度为151.66 m,在秭地2井厚度

为155.26 m。本文以总含气量(总含气量=解析气量+损失气量+残余气量)大于0.5 m³/t为下限划定有利页岩厚度,其中秭地1井有利含气页岩厚度为90.8 m,秭地2井有利含气页岩厚度为70 m(图2)。

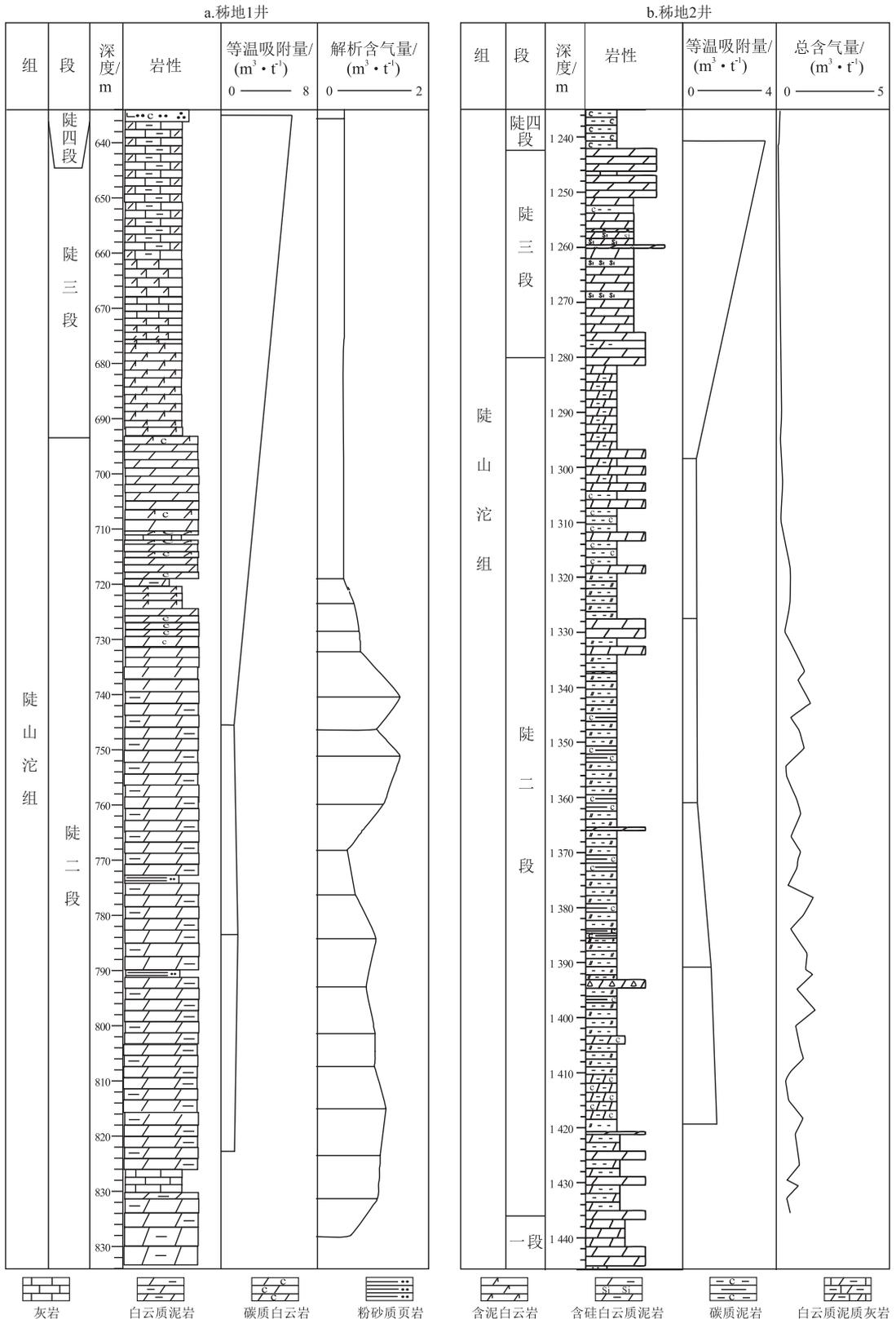


图2 鄂西黄陵背斜南翼陡山沱组柱状图

Fig.2 Composite columnar section of Doushantuo Formation in the southern Huangling anticline, western Hubei Province

有利含气页岩分布数据依赖于钻井含气性数据的获取,在实测数据有限的情况下,可利用地球物理手段预测富有机质页岩厚度进而替代有利含气页岩的厚度分布。富有机质页岩厚度可以通过地球物理反演、时间厚度换算等多种方法进行预测,需要根据不同的资料情况选择不同的方法进行。通过求取地震剖面的相对波组抗,取相对波阻抗 0 为富有机质页岩和普通页岩的阈值,小于 0 的为富有机质页岩。依据综合标定成果,确定陡山沱组富有机质页岩在剖面的位置。通过地震道进行积分计算,获得相对波阻抗剖面,以标定成果在道积计算后的相对波阻抗剖面上以小于 0 为标准,确定陡山沱组富有机质页岩的分布,并进行平面成图,完成对陡山沱组富有机质页岩厚度的预测。从预测结果(图 3)来看,秭地 1 井和秭地 2 井陡山沱组二段富有机质页岩模拟厚度分别为 100 m 和 80 m,与实钻数据基本相符合。从总体上看陡山沱组富有机质页岩厚度为 45~115 m,平均厚度 85 m。

获得含气泥页岩厚度及分布后,通过以下步骤计算有效页岩体积:(1)将陡山沱组富有机质页岩等厚图网格化,并进行坐标校正;(2)根据评价边界划出评价范围,去掉评价范围以外的部分,确定有效页岩分布面积为 1 238.54 km²;(3)根据含气页岩厚度参数和面积,通过计算获得有效页岩体积

为 7.42×10¹⁰ m³。

3 参数的获取

3.1 页岩密度

在计算页岩气资源量的过程中,页岩密度值是一项必需的参数。在取值时,可直接在实验室中对其进行测定^[21]。本测试应用的岩石密度测量仪基本原理是利用称重传感器,称出岩石标本在空气中的重量 P_1 和水中的重量 P_2 ,将其转换成电信号送到处理器进行数据处理,最终显示出测试结果。秭地 1 井陡山沱组碳质页岩密度分析结果显示,陡二段页岩密度最大为 2.66 g/cm³,最小为 2.63 g/cm³,计算中取其平均值,为 2.65 g/cm³(表 1)。

3.2 页岩含气量

在泥页岩地层中,页岩气主要以游离态、吸附态或者溶解态等方式赋存,其中溶解气由于比重极

表 1 鄂西黄陵背斜南翼秭地 1 井陡山沱组碳质页岩特征

Table 1 Density of carbonate shale of Doushantuo Formation in well ZD-1 in the southern Huangling anticline, western Hubei Province

样品编号	样品深度/m	层位	岩石密度/(g·cm ⁻³)
ZD01-29Ty	745.36	Z ₁ d ²	2.63
ZD01-35Ty	783.29	Z ₁ d ²	2.66
ZD01-40Ty	822.54	Z ₁ d ²	2.64

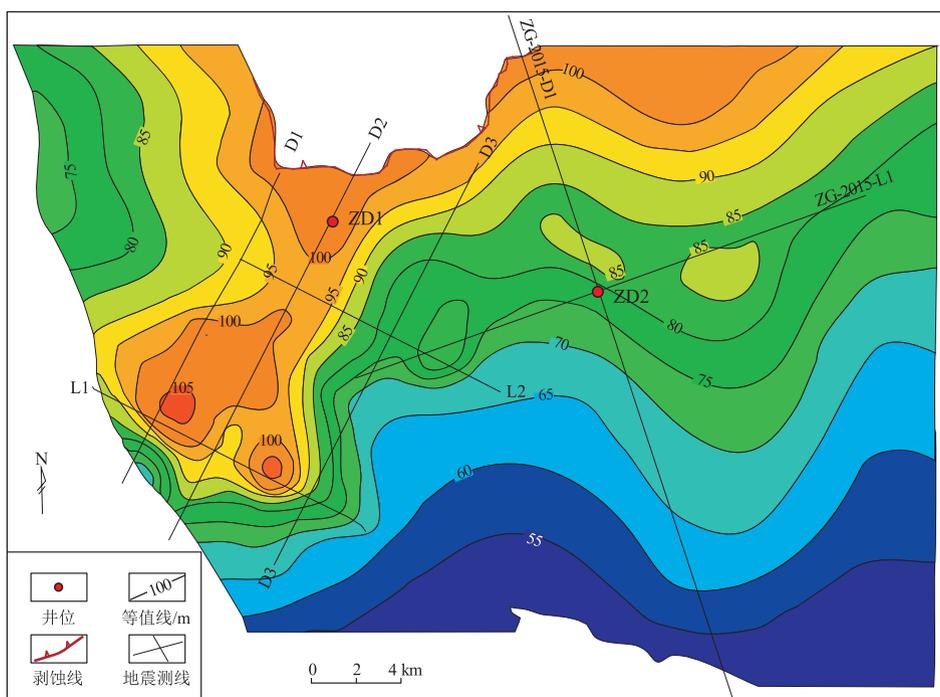


图 3 鄂西黄陵背斜南翼陡山沱组二段富有机质页岩厚度平面位置图见图 1 研究区。

Fig.3 Isopach map of organic-rich shale of the 2nd member of Doushantuo Formation in the southern Huangling anticline, western Hubei Province

小,一般可不做计算^[20]。测量页岩含气量最直接的方法是解吸测定法,在解吸过程中通过模拟地层温度,进而在该条件下测量页岩中天然气的释放总量。获得的含气量通常包括吸附气量与游离气量之和^[22-25],因此这种方法能够真实、客观地反映岩石的含气性。总解析气量一般包括损失气、解吸气和残余气 3 部分,即:总解析气量=损失气+解吸气+残余气。其中损失气为岩心地层钻开后到装罐前散失的气量,本文采用 USBM 直线回归法进行计算,页岩气损失气的起算时间为提钻到井深一半的时间^[26];解吸气为钻探现场通过排水法测得的标准状态下(101.325 kPa,0 ℃或 25 ℃)泥页岩解吸气含量;残余气为现场岩心解析后样品粉碎后,再次解吸获得的含气量^[27-28]。

通过现场含气量解析和计算,稀地 1 井陡山沱组二段泥页岩总含气量为 0.473~1.48 m³/t,含气量大于 0.5 m³/t 的层段平均可达 0.95 m³/t;稀地 2 井陡山沱组二段总含气量为 0.337~1.666 m³/t,含气量大于 0.5 m³/t 的层段平均为 0.91 m³/t(表 2)。

在本研究区假设页岩含气量 q 分布服从正态分布,即假设在评价单元内获得的含气量数值分别为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, 则平均数(μ)、方差(δ)及正态分布的概率密度函数 $[\varphi(x)]$ 分别可用下列公式表示^[13]:

$$\mu = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) / n \quad (1)$$

$$\delta^2 = \frac{1}{n} [(x_1 - \mu)^2 + (x_2 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2] \quad (2)$$

$$\varphi(x) = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\delta^2}(x-\mu)^2} \quad (0 \leq x < \infty) \quad (3)$$

当参数从最小值变化到最大值时,概率密度积分为 1。当计算数据的取值范围在数值 a 与 b 之间时,一定概率下的参数赋值同样也在从 a 到 b 的范围内,从最小值积分到 x 时的面积, x 即为不同概率下所对应的参数值^[20]。

获得不同概率下的参数对应值对概率密度函数积分即可,即令积分函数分别等于 5%、25%、50%、75%、90%,即可计算相应结果。如概率为 75%(P_{75})时的概率赋值为:

$$\int_a^b \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\delta^2}(x-\mu)^2} dx = 0.75 \quad (4)$$

通过计算可得该地区 P_5 含气量为 1.54 m³/t, P_{25} 含气量为 1.22 m³/t, P_{50} 含气量为 0.99 m³/t, P_{75} 含气量为 0.76 m³/t, P_{95} 含气量为 0.43 m³/t(表 3)。

4 页岩气资源量计算结果分析

通过概率法对参数赋值后,对研究区震旦系陡山沱组二段含气页岩的页岩气资源量进行了计算,结果表明该评价单元页岩气资源量为(845.78~3 029.08)×10⁸ m³,其中 P_{50} 资源量为 1 947.27×10⁸ m³,资源丰度为 1.57×10⁸ m³/km²,证明研究区页岩气资源潜力大。

前人研究已经证明,与美国等已成功实现商业开采的页岩气产区相比,本地区陡山沱组海相暗色泥页岩,从地球化学特征、岩石矿物学特征等方面来说具备了页岩气形成的基本地质条件,主要表现为有机质丰度相对较低,热演化程度高,脆性矿物含量高,黏土矿物含量低,页岩孔隙度和渗透率低^[10]。

表 2 鄂西黄陵背斜南翼稀地 1 井、稀地 2 井陡山沱组二段泥页岩含气量统计

Table 2 Gas content of dark shale of the 2nd member of Doushantuo Formation in wells ZD-1 and ZD-2 in the southern Huangling anticline, western Hubei Province

井位	样品数	解吸气含量/ (m ³ ·t ⁻¹)		损失气含量/ (m ³ ·t ⁻¹)		残余气含量/ (m ³ ·t ⁻¹)		总含气量/ (m ³ ·t ⁻¹)		含气量大于 0.5 m ³ /t 的样品平均总含气量/ (m ³ ·t ⁻¹)
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	
稀地 1 井	18	0.109~0.992	0.47	0.005~0.135	0.037	0.063~0.763	0.443	0.473~1.480	0.911	0.95
稀地 2 井	40	0.121~0.917	0.42	0.013~0.613	0.223	0.063~0.449	0.231	0.337~1.666	0.876	0.91

表 3 鄂西黄陵背斜南翼稀归地区陡山沱组二段资源量计算结果

Table 3 Shale gas resources of the 2nd member of Doushantuo Formation in the southern Huangling anticline, western Hubei Province

项目	概率				
	P_5	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{95}
含气页岩体积/10 ⁸ m ³	742.24	742.24	742.24	742.24	742.24
密度/(t·m ⁻³)	2.65	2.65	2.65	2.65	2.65
总含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	1.54	1.22	0.99	0.76	0.43
资源量/10 ⁸ m ³	3 029.08	2 399.66	1 947.27	1 494.87	845.78

表 4 鄂西黄陵背斜南翼陡山沱组页岩气特征与北美对比

Table 4 Comparisons of North American shale gas with Doushantuo Formation in the southern Huangling anticline, western Hubei Province

盆地/构造	页岩名称	时代	气体成因类型	埋深/m	厚度/m	干酪根类型	有机碳含量/%	镜质体反射率/%	含气量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	资源丰度/ ($10^8 \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)
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	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	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	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	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	
黄陵背斜	陡山沱组 二段	震旦纪	热解气	692~3 000	45~115	I 为主	0.55~2.23	1.49~1.86	0.34~1.67	1.57

注:北美页岩气数据据参考文献[29]。

而通过二维地震处理解释和地质调查井实钻资料,进一步证实了黄陵背斜南翼地区陡山沱组泥页岩含气性以及含气页岩的分布范围,证明该地区页岩气资源较为丰富。陡山沱组含气页岩各项指标与国外主要页岩^[29]相比(表 4),除成熟度较高、埋藏深度较大外,其余无论从厚度、有机质丰度,还是含气性都具有可对比性,资源丰度更是与美国 Ohio 和 Lewis 页岩不相上下。因此,可以认为黄陵背斜南翼地区陡山沱组页岩气资源丰富,勘探开发的前景十分广阔。

5 结论

(1)黄陵背斜南翼地区陡山沱组页岩有机质含量高,泥页岩埋深相对较浅,且厚度较大,页岩气形成条件较好。陡二段暗色泥页岩含气量较高,总含气量平均大于 $0.9 \text{ m}^3/\text{t}$,最高可达 $1.666 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

(2)黄陵背斜南翼地区陡山沱组地层分布较为稳定,地层厚度普遍在 $150\sim 200 \text{ m}$,其中陡二段有效含气页岩厚度在 $45\sim 115 \text{ m}$,平均厚度可达 85 m ,已落实含气页岩分布面积达到 $1\ 238.54 \text{ km}^2$ 。

(3)采用概率体积法计算出研究区上震旦统陡山沱组页岩气资源量为 $(845.78\sim 3\ 029.08)\times 10^8 \text{ m}^3$,其中 P_{50} 资源量为 $1\ 947.27\times 10^8 \text{ m}^3$,资源丰度为 $1.57\times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,证明研究区页岩气资源潜力大,可作为今后页岩气重点勘探开发区域。

致谢:湖北省地质调查院刘早学教授在本文资料收集及成文过程中给予了大力支持和帮助,在此致以衷心感谢!

参考文献:

- [1] 董大忠,邹才能,李建忠,等.页岩气资源潜力与勘探开发前景[J].地质通报,2011,30(2/3):324-336.
DONG Dazhong,ZOU Caineng,LI Jianzhong,et al.Resource poten-

- tial,exploration and development prospect of shale gas in the whole world[J].Geological Bulletin of China,2011,30(2/3):324-336.
- [2] 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):288-308.
DONG Dazhong,CHENG Keming,WANG Yuman,et al.Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region,China[J].Oil & Gas Geology,2010,31(3):288-299.
- [3] 张柏桥,孟志勇,刘莉,等.四川盆地涪陵地区五峰组观音桥段成因分析及其对页岩气开发的意义[J].石油实验地质,2018,40(1):30-37.
ZHANG Boqiao,MENG Zhiyong,LIU Li,et al.Significance of shale gas genesis to the development of Guanyinqiao Member, Wufeng Formation, Fuling area, Sichuan Basin [J].Petroleum Geology & Experiment,2018,40(1):30-37.
- [4] 刘尧文,王进,张梦吟,等.四川盆地涪陵地区五峰-龙马溪组页岩气层孔隙特征及对开发的启示[J].石油实验地质,2018,40(1):44-50.
LIU Yaowen,WANG Jin,ZHANG Mengyin,et al.Pore features of shale gas layer in Wufeng-Longmaxi formations in Fuling area of Sichuan Basin and the application to development [J].Petroleum Geology & Experiment,2018,40(1):44-50.
- [5] 李浩涵,任收麦,郭天旭,等.柴达木盆地鱼卡凹陷侏罗系泥页岩地球化学特征及储集条件:以柴页 1 井为例[J].地质通报,2016,35(2/3):250-259.
LI Haohan,REN Shoumai,GUO Tianxu,et al.Organic geochemistry characteristics and reservoir conditions of Jurassic shale in Yuqia Depression of northern Qaidam Basin;a case study of Chaiye-1 well[J].Geological Bulletin of China,2016,35(2/3):251-259.
- [6] 杜世涛,田继军,李绍鹏,等.准噶尔盆地二叠系页岩气储层特征及潜力区优选[J].特种油气藏,2018,25(2):49-55.
DU Shitao,TIAN Jijun,LI Zhaopi,et al.Permian shale gas reservoir characterization and favorable area identification in Junggar Basin [J].Special Oil & Gas Reservoirs,2018,25(2):49-55.
- [7] 刘洪林,王红岩,刘人和,等.中国页岩气资源及其勘探潜力分析[J].地质学报,2010,84(9):1374-1378.
LIU Honglin,WANG Hongyan,LIU Renhe,et al.China shale gas resources and prospect potential [J].Acta Geologica Sinica,2010,84(9):1374-1378.

- [8] 张金川,姜生玲,唐玄,等.我国页岩气富集类型及资源特点[J].天然气工业,2009,29(12):109-114.
ZHANG Jinchuan,JIANG Shengling,TANG Xuan, et al.Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J].Natural Gas Industry,2009,29(12):109-114.]
- [9] 杨平,谢渊,李旭兵,等.雪峰山西侧震旦系陡山沱组烃源岩生烃潜力及油气地质意义[J].中国地质,2012,39(5):1299-1309.
YANG Ping,XIE Yuan,LI Xubing, et al.Hydrocarbon-generating potential of the source rocks of the Sinian Doushantuo Formation on the western side of the Xuefeng Mountain[J].Geology in China,2012,39(5):1299-1309.
- [10] 单长安,张廷山,郭军杰,等.中扬子北部上震旦统陡山沱组地质特征及页岩气资源潜力分析[J].中国地质,2015,42(6):1944-1958.
SHAN Chang'an,ZHANG Tingshan, GUO Junjie, et al.Geological characteristics and resource potential of the Upper Sinian Doushantuo Formation shale gas in the north of Middle Yangtze region[J].Geology in China,42(6):1944-1958.
- [11] 李旭兵,陈绵琨,刘安,等.雪峰山西侧埃迪卡拉系陡山沱组页岩气成藏体系评价[J].石油实验地质,2014,36(2):188-193.
LI Xubing,CHEN Miankun,LIU An, et al.Evaluation of accumulation system for shale gas of Doushantuo Formation in western Xuefeng Mountain[J].Petroleum Geology & Experiment,2014,36(2):188-193.
- [12] SCHMOKER J W.Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems[J].AAPG Bulletin,2002,86(12):1993-1999.
- [13] SCHMOKER J W.U.S. Geological Survey assessment model for continuous (unconventional) oil and gas accumulations; the "FORSPAN" model[J].U. S. Geological Survey Bulletin,1999,2168:1-12.
- [14] POLLASTRO R M.Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas [J]. AAPG Bulletin,2007,91(4):551-578.
- [15] KUUSKRAA V A.The unconventional gas resources base[J].OGJ Unconventional Gas Article,2007(24):1-14.
- [16] 姜生玲,张金川,李博,等.中国现阶段页岩气资源评价方法分析[J].断块油气田,2017,24(5):642-646.
JIANG Shengling,ZHANG Jinchuan,LI Bo, et al.Analysis of shale gas resources assessment method in China[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2017,24(5):642-646.
- [17] 张玲,魏绍蕾,黄学斌,等.基于综合权重法的页岩气储量评价方法探讨[J].石油实验地质,2017,39(5):694-699.
ZHANG Ling,WEI Shaolei,HUANG Xuebing, et al.Shale gas reserve quality evaluation based on a comprehensive weighting method[J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(5):694-699.
- [18] 陈元千,齐亚东,傅礼兵,等.井控页岩气可动地质储量和可采储量的评价方法[J].油气地质与采收率,2018,25(4):73-78.
CHEN Yuanqian,QI Yadong,FU Libing, et al.Methods for estimating well-controlled movable; place and recoverable reserves of shale gas [J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2018,25(4):73-78.
- [19] 包兴,李少华,张程,等.基于试验设计的概率体积法在页岩气储量计算中的应用[J].断块油气田,2017,24(5):678-681.
BAO Xing,LI Shaohua,ZHANG Cheng, et al.Application of probability volume method based on experimental design to calculation of shale gas reserves[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2017,24(5):678-681.
- [20] 张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩气资源评价方法与技术:概率体积法[J].地学前缘,2012,19(2):184-191.
ZHANG Jinchuan,LIN Lamei,LI Yuxi, et al.The method of shale gas assessment; probability volume method [J]. Earth Science Frontiers,2012,19(2):184-191.
- [21] 王凤琴,王香增,张丽霞,等.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[J].地学前缘,2013,23(3):240-246.
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 [J]. Earth Science Frontiers,2013,23(3):240-246.
- [22] 侯读杰,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.
HOU Dujie,BAO Shujing,MAO Xiaoping, et al.Discussion on the key issues of resource potential evaluation for shale gas [J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2012,34(3):7-16.
- [23] 李玉喜,乔德武,姜文利,等.页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J].地质通报,2011,30(2/3):308-317.
LI Yuxi,QIAO Dewu,JIANG Wenli, et al.Gas content of gas-bearing shale and its geological evaluation summary [J]. Geological Bulletin of China,2011,30(2/3):308-317.
- [24] 张东晓,杨婷云.页岩气开发综述[J].石油学报,2013,34(4):792-801.
ZHANG Dongxiao,YANG Tingyun. An overview of shale-gas production [J].Acta Petrolei Sinica,2013,34(4):792-801.
- [25] 杨华,李士祥,刘显阳.鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J].石油学报,2013,34(1):1-11.
YANG Hua,LI Shixiang,LIU Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica,2013,34(1):1-11.
- [26] 刘洪林,邓泽,刘德勋,等.页岩含气量测试中有关损失气量估算方法[J].石油钻采工艺,2010,32(S1):156-158.
LIU Honglin,DENG Ze,LIU Dexun, et al.Discussion on lost gas calculating methods in shale gas content testing [J].Oil Drilling & Production Technology,2010,32(S1):156-158.
- [27] SHTEPANI E,NOLL L A,ELROD L W, et al.A New regression-based method for accurate measurement of coal and shale gas content [J].SPE Reservoir Evaluation & Engineering,2010,13(2):359-364.
- [28] BOWKER K A.Barnett shale gas production, Fort Worth Basin; issues and discussion [J].AAPG Bulletin,2007,91(4):523-533.
- [29] 李世臻,乔德武,冯志刚,等.世界页岩气勘探开发发现及对中国的启示[J].地质通报,2010,29(6):918-924.
LI Shizhen,QIAO Dewu,FENG Zhigang, et al.The status of worldwide shale gas exploration and its suggestion for China [J]. Geological Bulletin of China,2010,29(6):918-924.