

京西凹陷上古生界页岩气资源潜力分析

赵 勇,刘 予,李瑞杰,吴虎峻

(北京市地质调查研究院,北京 100195)

摘 要:京西凹陷经历了地台结晶基底-盖层发育-板内造山复杂构造演化三个阶段。在晚奥陶世-早石炭世处于隆起剥蚀区,自晚石炭世开始由东南向西北的海侵和早二叠纪自西北向东南海退的总趋势,其间伴有多次小规模海水进退事件的发生,使本区堆积了滨海湖沼、三角洲-沼泽相的深色泥页岩、含煤建造。地层主要分布上石炭统太原组和下二叠统山西组黑色泥页岩。本次针对太原、山西组含页岩层系开展野外调查研究,在样品测试,含气量初评的基础上,对京西凹陷上古生界页岩气资源前景进行初步评价。研究表明,本区上古生界石炭-二叠系太原组-山西组有机质丰度较高、有机质类型好、达成熟-过成熟阶段,具有页岩气形成与富集的有利地质条件,可作为京西地区上古生界的生烃层位。经采用概率体积法进行页岩气资源评价,估算其潜在资源量约为 $8.12 \times 10^9 \text{ m}^3$,表明该区域具有一定的页岩气资源勘探前景。

关键词:页岩气;上古生界;资源潜力;京西凹陷

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2015)04-0284-07

前人在北京西山地区开展的地质工作已有上百年的历史,取得大量基础地质、矿产、遥感、水文、环境、工程地质等各类成果,资料十分丰富。给后人研究奠定了坚实的资料基础和工作依据。但在非常规油气(页岩气)地质调查基本处于空白区。页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中、以吸附或游离状态为主要存在方式的天然气聚集^[1-2]。本次工作在京西凹陷开展页岩气资源前景调查工作,根据泥页岩沉积与分布特征、有机地化参数、含气性、储集特征等进行页岩气资源潜力分析,采用概率体积法对其资源量进行了估算,认为本区上古生界黑色泥页岩具有一定的页岩气勘探前景。该研究可对首都地区寻找非常规天然气清洁能源提供基础性材料。

1 京西凹陷区域地质背景

京西凹陷大地构造位置位于太行山褶皱带西山褶皱带(图1),面积约500 km²。本区从太古宙以来经历了前吕梁期的地台结晶基底形成发展、后吕梁期-印支期的地台盖层发育和燕山-喜马拉雅滨太平洋大陆边缘活动3个构造发展阶段,地质构造漫长而复杂^[3-4]。在晚奥陶世-早石炭世地台整体抬升,处于

隆起剥蚀区,沉积缺失,大约延续140 Ma,发育了一古风化壳。晚石炭世-中三叠世,本区再次下沉接受沉积,沉积环境由滨海平原向内陆河湖盆地发展,沉积一套海陆交互过渡为陆相含煤碎屑岩及不含煤的杂色碎屑岩系。

2 页岩气形成与富集条件

京西凹陷上古生界发育的泥页岩层位稳定,主要分布于上石炭统太原组、早二叠统山西组,面积分布较大,沉积厚度适中,泥页岩层段富含有机质且有机质类型较好,大多处于成熟-过成熟阶段,具备一定的页岩气形成条件。

2.1 泥页岩的分布

研究区泥页岩主要发育在上古生界石炭-二叠系太原-山西组地层中,太原-山西组发育深灰色泥岩、黑色页岩、炭质粉砂岩、砂岩等。据本次野外路线地质调查、露头剖面测量与老井资料复查,结合区域构造和沉积地层分布特征,其泥页岩层系分布较稳定,呈北东-南西向分布,在凹陷南部边沿沿秋林铺-莲花庵-史家营-金鸡台一线展布,泥页岩层段在史家营-金鸡台地区厚度较大(图1)。在沉积上,地

收稿日期:2015-06-02

资助项目:中国地质调查“重点地区页岩气资源调查评价专题-京西地区页岩气资源前景调查评价(1211302108025-3)”

作者简介:赵勇(1983-),男,工程师,2011年毕业于中国地质大学构造地质专业,从事地质矿产调查与研究, E-mail:zhaoyong3068@163.com。

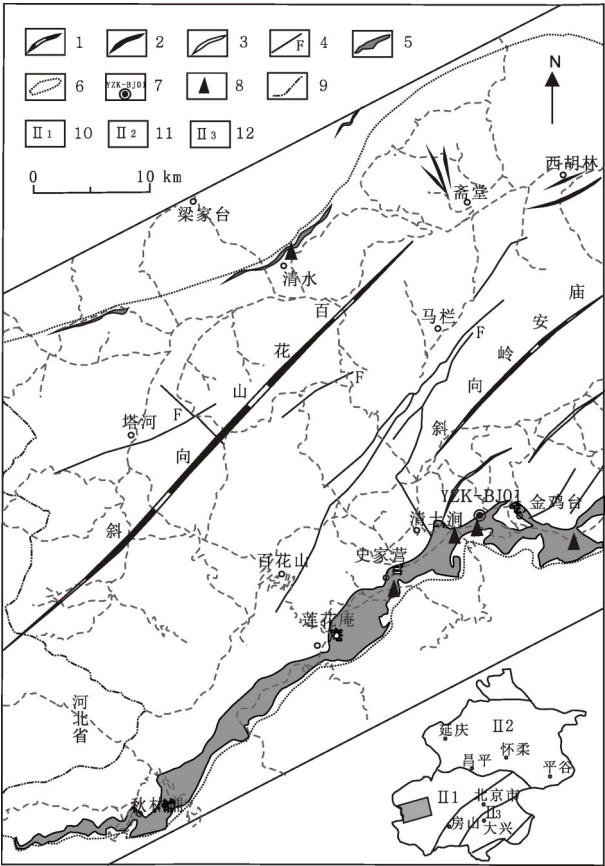


图1 大地构造位置及地质构造简图

Fig.1 Schematic map of geological and tectonic of study area

- 1.向斜;2.背斜;3.倒转褶皱;4.断裂;5.含泥页岩地层出露区;
6.盆地边界;7.取芯孔位;8.剖面观测点;9.省界;
10.太行山褶皱带;11.燕山褶皱带;12.冀辽断陷盆地

层表现为频繁的砂泥互层现象,累计厚度相对较大,夹层发育,单层有效厚度变化较大,部分夹煤层或煤线,局部暗色泥页岩可见植物化石。总体上,太原组-山西组泥页岩层系有效累计厚度约50余米(图2)。

2.2 泥页岩有机地球化学特征

本次研究对太原组-山西组地表实测剖面 and 地下钻井进行泥页岩样品采集,地表采集样品 17 件,钻井中采集 17 件。分析化验发现(表 1),有机碳含量为 0.29% ~ 6.54%,其中有机碳含量大于 2.0% 的占 53%,大于 1.0% 的占 21%(图 3),按照 TOC 丰度评价标准^[5],总体属于中等-好烃源岩,是一套重要的富有机质页岩层系。

本次根据典型样品有机显微组分分析结果(表 2),有机质类型主要为腐泥腐植型干酪根 II₂ 型。其中显微组分主要腐泥组为主(腐泥无定型),其次为惰质组,缺乏腐殖无定型、镜质组和壳质组。从腐泥

表 1 泥页岩有机碳(TOC)含量测试数据表
Table 1 TOC data of the clay shale samples

地表样品		钻井样品	
编号	TOC 含量(%)	样品编号	TOC 含量(%)
1105-1B1	0.29	YZK-18-1	4.78
YPM06-26B1	0.57	YZK-18-2	6.23
YPM01-31	0.64	YZK-20-1	2.88
YPM06-13B1	0.87	YZK-20-2	2.39
YPM02-02	0.95	YZK-20-3	2.42
YPM01-14	1.52	YZK-28-1	5.12
YPM01-17	1.64	YZK-32-2	0.62
YPM01-34	2.04	YZK-32-3	1.39
D4001-B1	2.12	YZK-33-1	1.27
YPM01-24	2.64	YZK-45-1	1.48
1106-14B5	3.19	YZK-48-1	4.51
YPM02-16	0.37	YZK-48-2	4.15
1031-4B1	0.53	YZK-48-3	2.19
1031-5B	1.96	YZK-50-1	3.1
D4001-B1	2.12	YZK-50-2	3.64
1031-3B3	3.16	YZK-52-1	0.71
1106-15B2	6.54	YZK-58-1	1.1

注:实验测试单位为华北石油邦达新技术有限公司

表 2 泥页岩干酪根显微组分鉴定数据表
Table 2 Micro-composition of kerogen in the clay shale samples

样号	腐泥组(%)	惰质组(%)	腐泥组颜色	类型指数	类型
	无定形				
YZK-18-1	58	42	黑褐	16	II 2
YZK-18-2	55	45	黑褐	10	II 2
YZK-20-1	62	38	黑褐	24	II 2
YZK-20-3	65	35	黑褐	30	II 2
YZK-30-1	68	32	黑褐	36	II 2
YZK-30-2	65	35	黑褐	30	II 2
YZK-32-2	63	37	黑褐	26	II 2
YZK-33-1	64	36	黑褐	28	II 2
YZK-48-1	56	44	黑褐	12	II 2
YZK-48-3	69	31	黑褐	38	II 2
YZK-50-1	66	34	黑褐	32	II 2

注:实验测试单位为华北石油邦达新技术有限公司

组分的显微组成特征来看,无定形呈现黄色荧光表明(图 4),具有一定的生烃潜力。

镜质体反射率测试结果表明,暗色泥页岩的成熟度(Ro)在 0.22% ~ 5.38% 之间,平均 2.65%(图 5),该套泥页岩层系总体演化程度较高,达成熟-过成熟阶段,进入生气阶段。

2.3 泥页岩储集特性

通过对上古生界太原组-山西组泥页岩露头 and 钻井样品物性分析,泥页岩储层具超低孔、低渗致密的

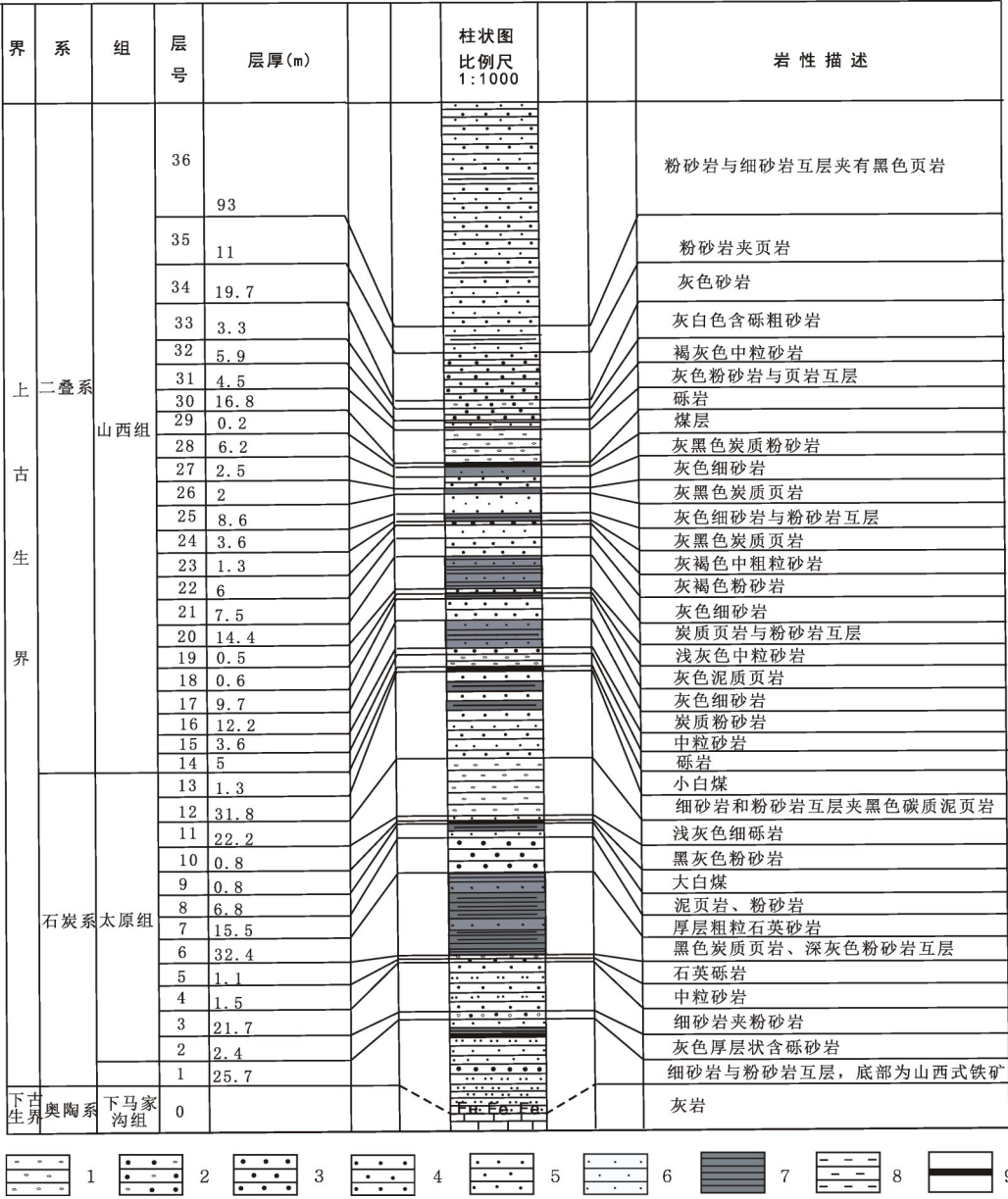


图2 含泥页岩地层柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the clay shale

1.砾岩;2.含砾砂岩;3.粗砂岩;4.中砂岩;5.细砂岩;6.粉砂岩;7.(泥)页岩;8.粘土岩;9.煤层/煤层

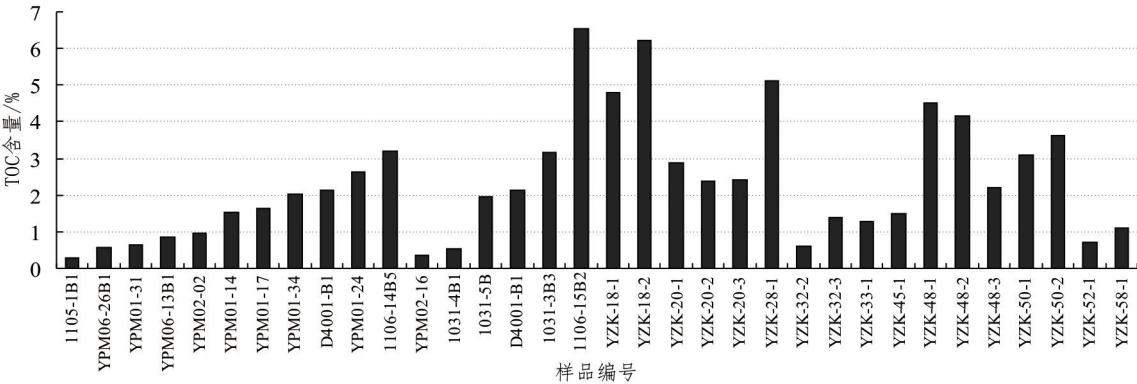


图3 泥页岩样品有机碳含量(TOC)图

Fig.3 TOC frequency of the clay shale samples

物性特征。泥页岩物性分析中,孔隙度分布区间为0.172%~9.4%,平均值1.93%。渗透率为 $0.0016\times10^{-3}\mu\text{m}^2\sim0.0438\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均值 $0.007\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

扫描电镜特征显示,本区泥页岩微孔隙和微裂缝等较发育。其中微孔隙可分为溶孔、泥质层间微孔、微孔缝、晶间微孔隙等(图6)。微裂缝的产生可能与断层和褶皱等构造运动有关。微裂缝和孔隙的发育为页岩气的游离富集和吸附提供储渗空间。

本次据钻孔典型黑色泥页岩样品粘土矿物及全岩X-射线衍射分析,暗色泥页岩的矿物成分主要为碎屑矿物和粘土矿物。其中碎屑矿物含量在14.9%~64%之间,成分主要为石英和少量的钾长石和斜长石,粘土矿物含量在36%~85.1%之间。测试结果显示,泥页岩全岩矿物中,粘土矿物所占比重比较大,普遍在50%以上,主要的脆性矿物石英含量主要落在12.6%~59%之间(图7、8)。

2.4 等温吸附模拟

页岩等温吸附曲线是描述页岩储存气体能力的曲线,在恒温下页岩吸附气量是压力的函数。本次实验采用仪器FY-KT 1000型等温吸附仪。样品制备

过程将每个样品取120~200 g,破碎至60目以下,喷洒蒸馏水,使其预湿,充分混合后,再放入底部装有饱和K₂SO₄溶液的恒温箱中,该溶液可以使相对湿度保持在97%~98%之间。间隔24小时称重一次,直到恒重为止,过程持续约3天。其实验过程如下:

(1)将预处理达到平衡水分的样品准确称重,密封在实验缸内,温度控制精度为0.1℃,压力测量精度为0.1 psi。

(2)气密性检查:用氦气作测量气体,调节温度,系统采集参考缸和样品缸的压力数据,压力平衡视为气密性良好。

(3)自由空间体积测定:根据质量守恒定律,采用容量法,用不被煤吸附的氦气作为测量气体,需重复3~4次,使测量结果可靠。

(4)等温吸附实验:首先确定最高压力点和各实验压力点,注入甲烷气,测定8个压力点,从大气压力向设计的最高压力平稳增加。每一个压力点达到平衡的时间不小于12小时,然后再增压到下一个压力点,逐渐加压至最终压力。

数据处理:根据自由空间测定的数据,计算样品

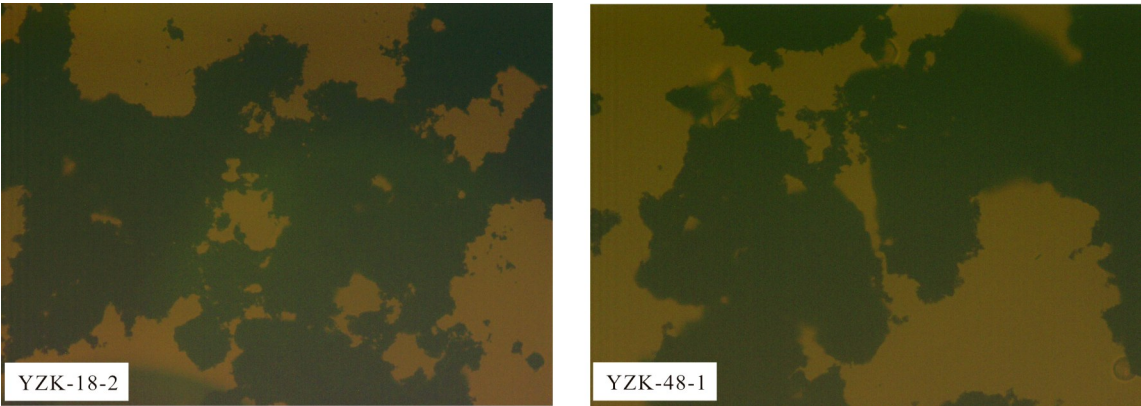


图4 有机显微组分特征

Fig.4 Characteristics of micro-composition of kerogen

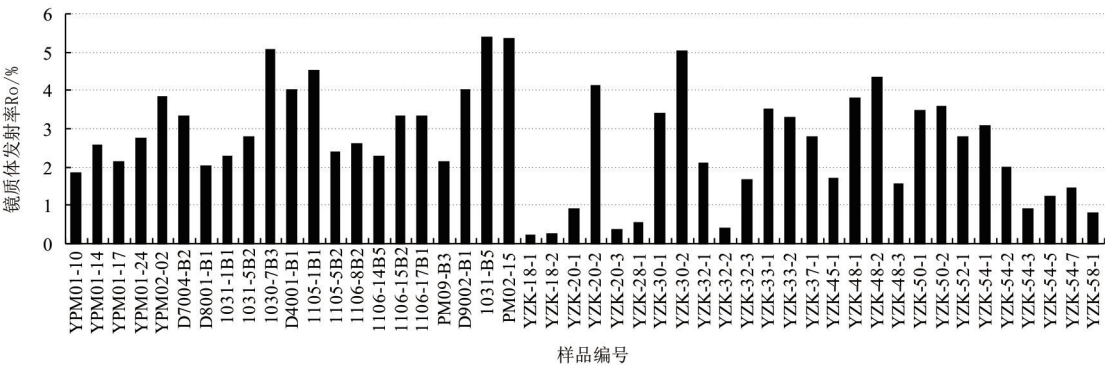


图5 泥页岩样品成熟度(Ro)柱状图

Fig.5 Ro of the clay shale samples

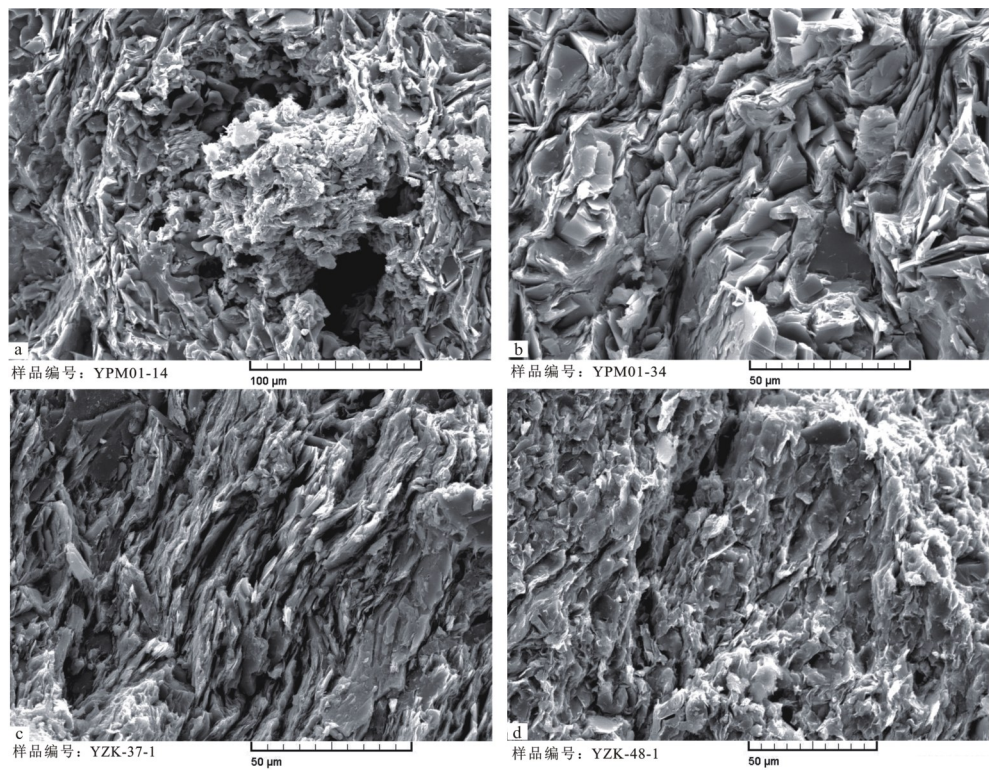


图6 泥页岩微孔隙与微裂缝特征

Fig.6 Characteristics of miro-pore and micro-fracture in black shale

a.溶孔发育;b.泥晶间微孔隙;c.泥晶间微孔隙发育;d.晶间微孔隙发育

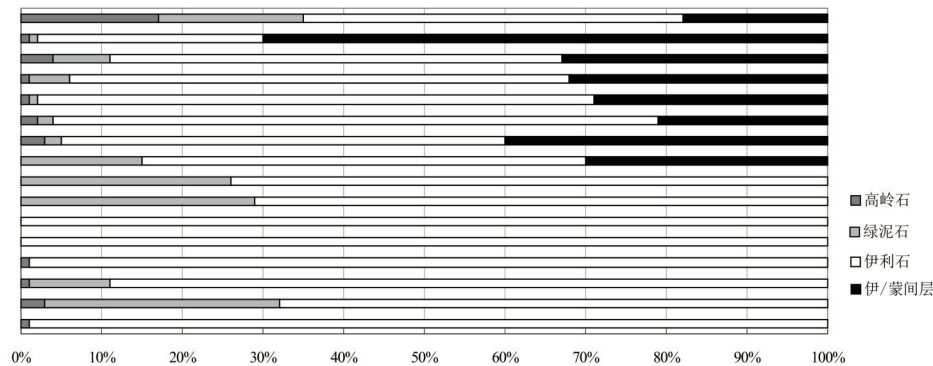


图7 上古生界(太原组-山西组)泥页岩粘土矿物含量组成分布图

Fig.7 Columnar section of components of clay mineral in the shale, Upper Paleozoic

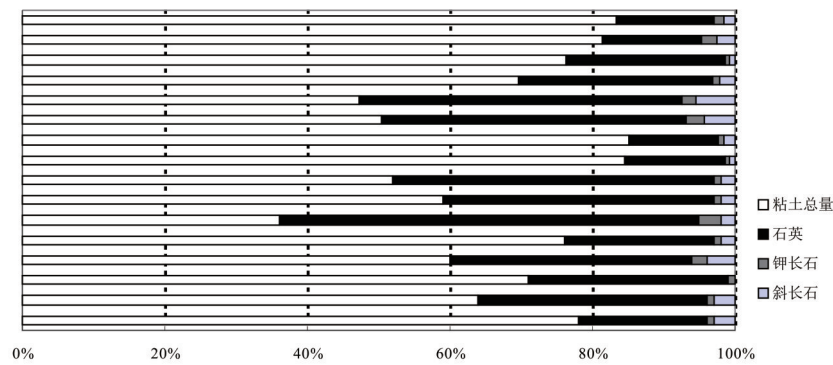


图8 上古生界(太原组-山西组)泥页岩全岩矿物组分组成分布图

Fig.8 Columnar section of components of rock mineralogical in the shale, Upper Paleozoic

自由空间体积。根据吸附过程中每一点的实验压力,利用理想气体定律,分别计算每点的吸附量,通过回归得到一条曲线,即等温吸附曲线,遵循 Langmuir 等温吸附关系^[6]:

$$V=VL\times P/(PL+P)$$

式中:V为在压力P下单位体积储层里吸附气的体积(m³/t);VL为Langmuir压力,表示吸附剂的最大吸附体积(m³/t);P为地层压力(MPa);PL为Langmuir压力(MPa)。

本次选取钻井中8件富含有机质泥页岩样品进行等温吸附实验,样品编号及其测试结果如下表3。

本次取吸附气含量为各样品测得的Langmuir体积(VL)的1/2估算,即V=1/2 VL,计算得出含气量平均值(q)1.22 m³/t。

从上述做等温吸附实验的8件样品中选出5件样品,根据它们的岩石矿物测试参数,见表4,结合其等温吸附模拟实验吸附曲线变化趋势(图9),进行页岩气含气量影响因素综合评价。分析结果显示,吸附能

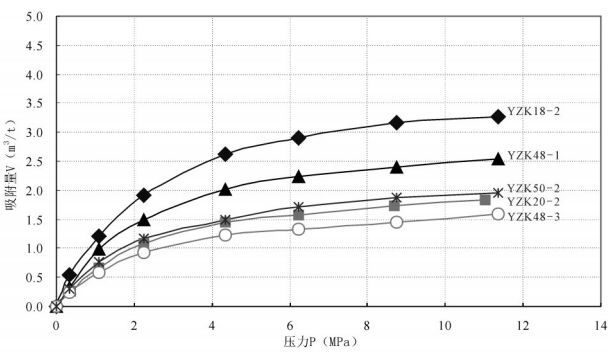


图9 泥页岩样品等温吸附曲线图
Fig.9 Methane adsorption isotherm of the clay shale

力最强的是 YZK-18-2 样品,其次是 YZK-48-1、YZK-50-2、YZK-20-2、YZK-48-3。可见,随着 TOC 含量的不断增加,其吸附气含量明显呈逐步上升趋势。

3 页岩气资源量估算

由于京西凹陷油气勘探程度低,非常规油气(页岩气)勘探处于空白区。本次资源量预测在含气性实验测试基础上,采用概率体积法对资源进行评估^[7-10]。依据概率体积法基本原理,页岩气资源量为泥页岩质量与单位质量泥页岩所含天然气(含气量)之概率乘积。

假设Qt为页岩气资源量(10⁸ m³),A为含气泥页岩面积(km²),h为有效页岩厚度(m),ρ为泥页岩密度(t/m³),q为含气量(m³/t),则,

$$Qt=0.01\cdot A\cdot h\cdot\rho\cdot q$$

$q=V_L P/(P_L+P)$ (VL为Langmuir体积;P为地层压力;PL为Langmuir压力)

泥页岩含气量是页岩气资源计算和评价过程中的关键参数^[11-13]。在本次实际工作中,含气量参数主要是依据等温吸附实验法,即将待实验样品置于近似地下温度的环境中,模拟并计量不同压力条件下的最大吸附气量。考虑页岩气主要以吸附状态存在于泥页岩地层中^[14-15],故以此来估算页岩气吸附气资源量。

根据京西凹陷区域面积(A)500 km²,有效页岩厚度(h)50 m,泥页岩密度(ρ)2.63 t/m³,含气量平均值(q)1.22 m³/t,估算页岩气潜在资源量约为 Qt=0.01·A·h·ρ·q=8.12×10⁸ m³。

4 结论

经综合分析认为,研究区京西凹陷上古生界石

表3 含气量测试数据表
Table 3 Gas content of the clay shale

泥页岩样品编号	实验参数		
	拟合系数	VL(m ³ /t)	PL(MPa)
YZK-18-2	0.9994	3.95	2.29
YZK-20-2	0.9995	2.24	2.52
YZK-30-1	0.9988	1.64	2.38
YZK-32-3	0.9963	1.07	2.06
YZK-48-1	0.9988	3.14	2.60
YZK-48-3	0.9990	1.89	2.39
YZK-50-2	0.9997	2.34	2.29
YZK-58-1	0.9989	3.46	2.88
Langmuir 方程	$V=VL\times P/(PL+P)$		

注:实验测试单位:华北石油邦达新技术有限公司

表4 泥页岩全岩X衍射分析及有机碳含量数据表(%)
Table 4 Whole rock X-ray diffraction and TOC frequency

样号	石英	高岭石	绿泥石	伊利石	伊/蒙间层	有机质含量
YZK-18-2	11.93	/	12.69	46.53	25.38	4.78
YZK-20-2	10.72	2.55	1.70	46.81	34.04	2.39
YZK-48-1	11.38	0.81	0.81	22.76	56.91	4.51
YZK-48-3	10.41	1.60	0.80	20.83	57.67	2.19
YZK-50-2	11.43	14.18	15.01	39.20	15.01	3.64

注:实验测试单位为华北石油邦达新技术有限公司

炭-二叠系黑色页岩有机质丰度较高、有机质类型好、处于成熟-过成熟阶段,泥页岩具备储、渗条件,经概率体积法估算其潜在资源量约为 $800 \times 10^8 \text{ m}^3$,表明京西凹陷具有一定的页岩气资源勘探前景。

参考文献:

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] 张金川, 金之均, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24 (7): 15-18.
- [3] 北京市地质矿产局. 北京市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991, 1-16.
- [4] 鲍亦冈, 刘振峰, 王世发, 等. 北京地质百年研究[M]. 北京: 地质出版社, 2001, 5-38.
- [5] SYT5735-1995 烃源岩地球化学评价方法[S]. 北京市: 中国石油天然气总公司, 1995.
- [6] 于荣泽, 张晓伟, 卞亚南, 等. 页岩气藏流动机理与产能影响因素分析[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 10-15.
- [7] 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.
- [8] 张金川, 林腊梅, 姜生玲, 等. 页岩气资源潜力评价与有利区优选方法标准操作手册[M]. 北京: 中国地质大学, 2011: 1-19.
- [9] Curtis J B, Montgomery S L. Recoverable natural gas resource of the United States: Summary of recent estimates[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(10): 1671-1678.
- [10] 涂乙, 邹海燕, 孟海平, 等. 页岩气评价标准与储层分类[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 153-158.
- [11] 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. “连续型”油气藏及其在全球的重要性: 成藏、分布与评价[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 669-682.
- [12] 张大伟. 加快中国页岩气勘探开发和利用的主要路径[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 1-5.
- [13] 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): 308-311.
- [14] 王飞宇, 贺志勇, 孟晓辉, 等. 页岩气赋存形式和初始原地气量(OGIP)预测技术[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 501-510.
- [15] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. 地球科学进展, 2010, 25(6): 597-604.

An Analysis of Resource Potential on Upper Paleozoic Shale Gas in Depression of Western Beijing

ZHAO Yong, LIU Yu, LI Rui-jie, WU Hu-jun

(Beijing Institute of Geological Survey, Beijing 100195, China)

Abstract: The Jingxi sag has experienced three stages of complex tectonic evolution that contain platform crystalline basement, caprock development and intraplate orogeny. It was in the uplift and denudation zone during late Ordovician to early Carboniferous epoch. The transgression starts from southeast to northwest since late Carboniferous and the regression starts from northwest to southeast. Meantime, many small-scale transgressive and regressive events occurred. General trend of transgression and regression makes the area accumulating the dark mud shale and coal bearing construction of littoral-limnetic facies and delta-swamp facies. The formation is composed of black mud shale that mainly distributes on Taiyuan Group of Upper Carboniferous and Shanxi Group of lower Permian series. Base on geological survey, the shale gas resources are evaluated preliminarily on the basis sample tests and gas content assessment of Upper Palaeozoic Shanxi and Taiyuan Group in the depression west of Beijing. The results show that the Carboniferous strata have a wide distribution, with variable single layer thickness, well developed dark mudstones and abundant organic matter. The abundance of hydrocarbon source rocks is medium to good, and the organic matter is mainly of type II₁, the thermal evolution of organic matter has entered the high mature-over mature stage and consists mainly of dry gas. The study area has the basic geological conditions of producing shale gas. By a probability volume method, it shows that Upper Palaeozoic Shanxi and Taiyuan Group shale gas resource is of certain value for exploration development with volume of $800 \times 10^8 \text{ m}^3$.

Key words: shale gas; Upper Palaeozoic; resource potential; depression of western Beijing