

四川盆地陆相页岩气形成条件及勘探开发前景

朱彤 包书景 王烽

中国石化石油勘探开发研究院

朱彤等.四川盆地陆相页岩气形成条件及勘探开发前景.天然气工业,2012,32(9):16-21.

摘要 与北美页岩气主要形成于海相富有机质泥页岩层系相比,我国主要含油气盆地页岩气具有赋存于陆相及海陆过渡相富有机质泥页岩层系的特点,是未来非常规油气资源勘探开发新的重要领域。为此,综合应用野外地质剖面勘测、岩心及其测试分析资料,对四川盆地陆相页岩气形成条件、含气特征及可采性等进行了分析。结果表明:四川盆地上三叠统须家河组和下侏罗统自流井组的河、湖相泥页岩具分布广、厚度大、有机质丰度较高、保存条件好、脆性矿物含量高的特点,有利于页岩气的成藏和压裂改造。通过老井复查和常规兼探,已在川东建南、涪陵地区和川东北元坝地区自流井组,川西新场地区须家河组泥页岩中获得良好的天然气显示和工业气流。结论认为:四川盆地陆相页岩气与北美海相页岩气形成条件相当,优于圣胡安盆地海陆过渡相 Lewis 页岩,具有良好的勘探开发前景。初步优选川中阆中—平昌、三台—广安,川东南涪陵—长寿为自流井组页岩气勘探的有利地区,川西孝泉—新场、川中三台—广安为须家河组(须五段)页岩气勘探的有利地区。

关键词 四川盆地 陆相 晚三叠世 早侏罗世 河湖相泥页岩 页岩气 气藏形成 增产改造 勘探有利区

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2012.09.004

与北美地区页岩气主要形成于海相富有机质泥页岩层系相比,中国沉积盆地多旋回的构造演化过程中,发育了海相、陆相及海陆过渡相3类富含有机质的泥页岩层系,具有“多层系、多类型、多演化、多成因”的特点^[1-3]。通过老井复查、复试和重新评价认识,四川盆地陆相页岩气的勘探已在川西新场地区上三叠统须家河组、川东建南和涪陵地区、川东北元坝地区下侏罗统河、湖相泥页岩中获得良好的天然气显示和工业气流,成为中国陆相页岩气勘探开发的重要区域。

1 四川盆地陆相页岩气形成条件

四川盆地是中生代以来在上扬子准地台内,经历了多期和多个方向的深断裂活动而形成的菱形构造—沉积盆地。中三叠世末期的早印支构造运动结束了四川盆地海相碳酸盐岩台地沉积环境,盆地区域性隆升遭受剥蚀,形成区域性海陆相分界面。晚三叠世开始,盆地西部的龙门山开始向东逆冲推覆,导致盆地西缘造山隆起,海水逐渐退出盆地,沉积环境以三角洲、河流、湖泊相为特征;在印支晚幕运动后,早侏罗世以滨

浅湖沉积环境为特征;中晚期侏罗世水体逐渐变浅,主要发育河流—三角洲沉积环境。由此四川盆地陆相泥页岩主要发育于上三叠统须家河组和下侏罗统自流井组湖相泥质烃源岩中。

1.1 泥页岩的分布特征

四川盆地上三叠统须家河组沉积环境以海陆过渡相到河流—三角洲相含煤建造沉积为主,纵向上泥页岩主要分布在须家河组一、三、须五段,岩性主要为黑色泥页岩与粉砂岩互层,夹薄煤层和煤线。其中须一段暗色泥页岩厚度介于50~350 m,分布局限,沉积中心位于川西龙门山前缘中南段,厚度大于100 m,底部埋深一般大于4 200 m;须三段暗色泥页岩厚度介于50~700 m,沉积中心位于川西龙门山前缘中段,厚度大于100 m,底部埋深介于3 400~5 800 m;须五段暗色泥页岩厚度介于50~375 m,沉积中心位于川西龙门山前缘中南段—川中地区,厚度大于200 m(图1),埋深一般介于2 000~4 100 m。

四川盆地地下侏罗统沉积环境以滨浅湖—半深湖为主,为一套湖相泥岩与介壳灰岩不等厚互层沉积^[4]。

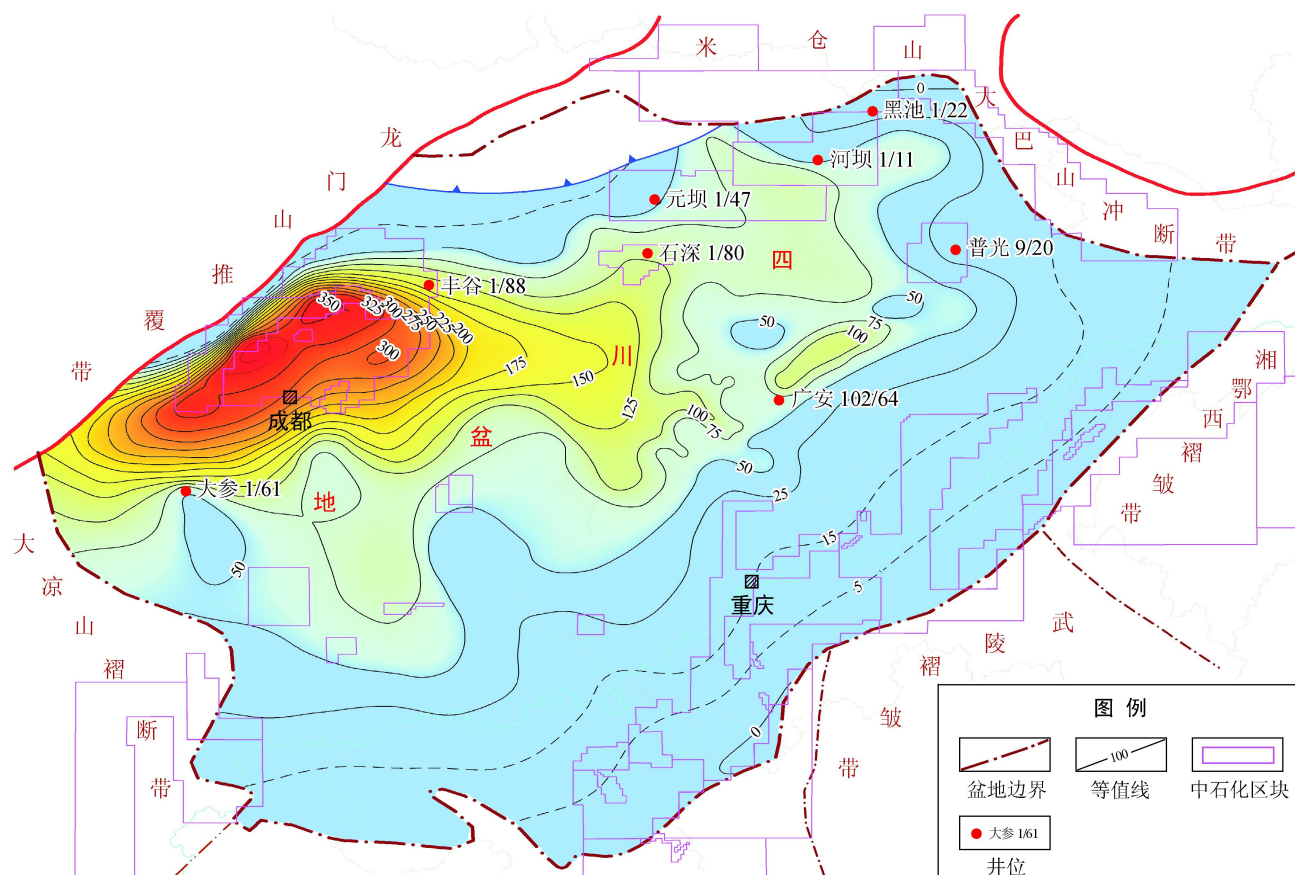


图1 四川盆地须家河组须五段暗色泥岩厚度等值线图

纵向上泥页岩主要分布在大安寨段,次为东岳庙段和珍珠冲段,岩性为黑色泥页岩夹粉砂岩、石灰岩^[5]。平面上展布具有东厚西薄的特征。暗色泥页岩厚度变化范围较宽,从20 m到240 m不等。沉积中心位于川中阆中—川东北宣汉、万州一带,暗色泥岩厚度普遍大于100 m;在川西南、川西地区厚度较薄,一般介于20~50 m。在川东南的长寿—南川地区和川南的威远地区存在2个暗色泥质岩相对发育区,厚度分别介于80~120 m和80~100 m(图2)。下侏罗统泥岩埋藏深度较浅,其中又以川西拗陷和川东北地区埋深最大,川西彭州一带埋深一般介于2 600~3 400 m;阆中—宣汉一带埋深介于1 400~3 400 m;川西南威远—资阳一带埋深很浅,仅在200 m左右;往川南方向,埋深有所增大,宜宾—长宁—合江一带埋深介于1 400~2 200 m之间;在石柱复向斜埋深一般小于1 500 m。

1.2 泥页岩的地球化学特征

四川盆地上三叠统须家河组泥页岩有机碳含量较高,一般介于0.5%~5%,平均值为1.13%,其中须五段有机碳含量平均值为2.35%,最高可达16.33%,高于须一、三段,在川西拗陷须五段有机碳含量一般大于

2%;有机质类型主要为腐殖型,演化程度介于1.02%~1.68%,处于成熟—高成熟演化阶段。川西地区泥页岩热演化程度较高,除龙门山前缘安县、绵竹、隆丰、大邑和洛带地区小于1.3%,处于成熟演化阶段以外,其他地区 R_o 均介于1.3%~1.8%之间,达到高成熟演化阶段。

四川盆地地下侏罗统泥页岩有机碳含量变化范围较宽,一般介于0.2%~2.4%,平面上总体呈现出北高南低的趋势,反映了明显受沉积相带控制的特点。高有机质丰度的泥页岩主要分布在川中阆中—大竹—重庆一带,有机碳含量普遍大于1.4%,其中川东北元坝区块泥页岩有机碳含量度较高,大安寨段为0.58%~3.64%,平均为1.2%;川东南涪陵区块东北部大安寨段泥页岩有机碳含量介于0.62%~3.81%,平均为1.44%;建南地区东岳庙段泥页岩有机碳含量介于0.94%~2.8%,平均为1.87%。有机质类型以偏腐泥混合型为主,热演化程度(R_o)介于0.9%~1.6%,已达到成熟到高成熟阶段,其中川东北地区热演化程度相对较高, R_o 介于1.5%~1.8%,有利于天然气的生成。

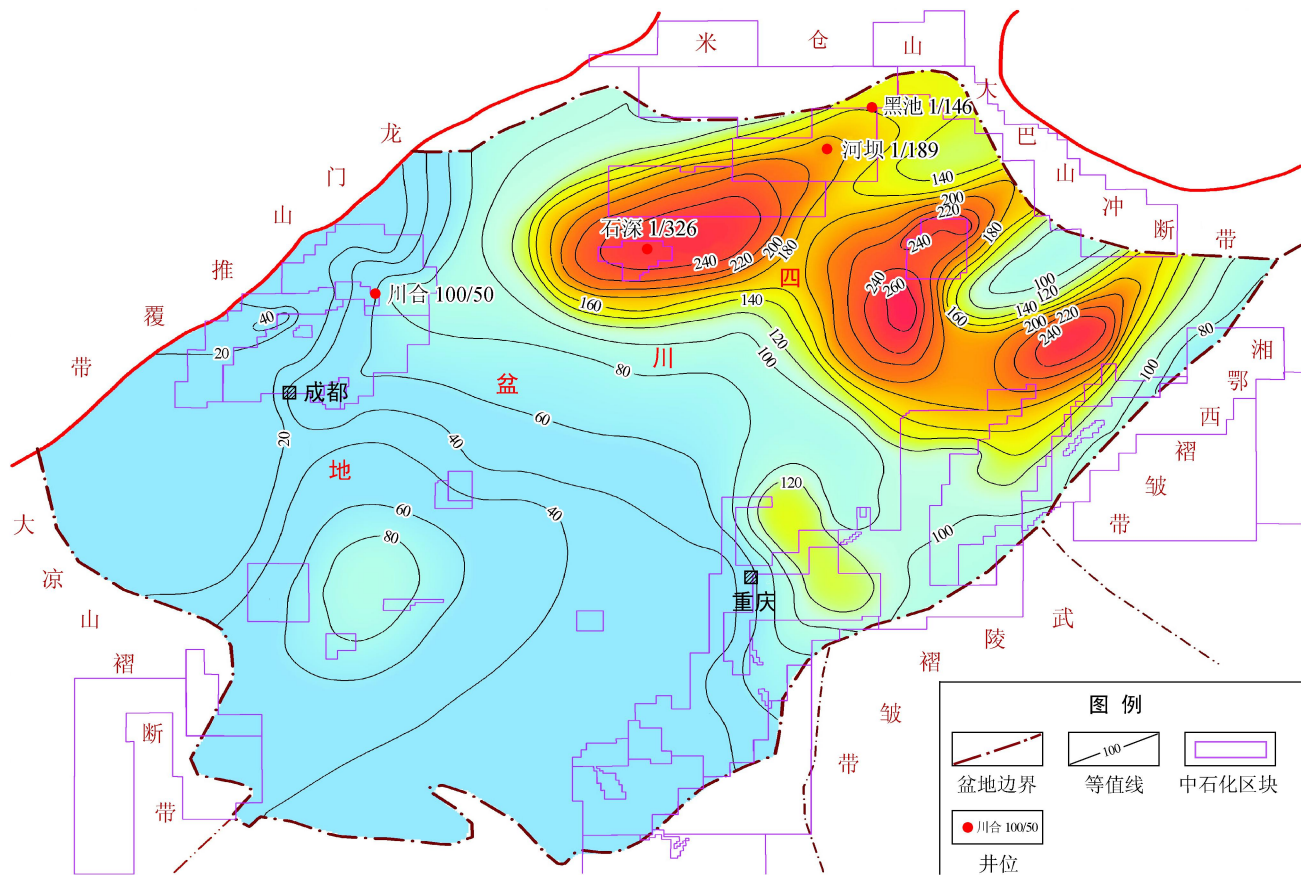


图 2 四川盆地下侏罗统暗色泥岩厚度等值线图

1.3 泥页岩的储集特征

通过对四川盆地陆相泥页岩储集特征的研究,结果表明(表 1):该区泥页岩具有较好的储集性,有利于页岩气的富集。川西须家河组泥页岩孔隙度介于 0.85%~5.03%,平均为 4.06%,高于砂岩和砾岩的

孔隙度(平均为 3.36%);而川东北地区下侏罗统大安寨段泥页岩的孔渗性明显高于介壳灰岩^[6],泥页岩孔隙度介于 2.15%~6.77%,平均为 4.04%,渗透率介于 0.93~325.00 mD,平均为 51.29 mD;高于介壳灰岩的平均孔隙度(1.24%)和平均渗透率(19.3 mD)。

表 1 四川盆地陆相泥质岩储集特征统计数据表

地区	层位	岩性	孔隙度			渗透率/mD		
			最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
川西	上三叠统	泥页岩	0.85%	5.03%	4.03%	0.77	1.37	0.14
		砂岩和砾岩	0.34%	12.3%	3.36%	0.01	7.67	1.70
川东北	下侏罗统	泥页岩	2.15%	6.77%	4.04%	0.93	325.00	51.29
		介壳灰岩	0.40%	4.38%	1.24%	0.21	506.00	19.31

1.4 页岩气的保存条件

由于页岩气具有以吸附状态为主的、大面积连续分布的、自生自储型、源内成藏特点,因此对于厚层页岩的成藏具有自我封闭的特点,保存的要求不像常规气藏那么苛刻。但对于陆相薄层泥页岩的成藏,游离气的含量仍决定于盖层或保存条件。因此区域构造运

动形成的大型断裂发育程度和上覆致密层的相对封盖都影响着页岩气的保存。

四川盆地自晚印支构造事件后,虽然西缘龙门山山系、北缘秦岭造山带及其四川盆地过渡的大巴山逆冲推覆带发生了强烈的构造隆升^[6],但多局限在盆地边缘,在盆内的川西、川北、川东北地区则是相对稳定

的深拗陷,构造相对稳定,大断裂不发育,在此构造背景下形成的河湖相泥页岩与石灰岩和致密砂岩的不等厚互层沉积,有利于页岩气保存。据统计,川西地区须五段暗色泥质岩厚度介于 200~350 m,泥质岩含量为 55%;川东建南构造东岳庙段泥页岩及泥质灰岩最大单层厚度超过 75 m,总厚度平均超过 114 m,占地层厚度的比例一般超过 89.7%;川东北元坝区块东岳庙—大安寨段泥页岩厚度介于 188.6~272.7 m,平均为 230 m。

此外,四川盆地陆相层系普遍具超压的特点。川西地区上三叠统因生烃增压和晚期构造运动挤压,为超高压含气区域^[7],须五段、须三段泥页岩异常压力系数最大值分别为 1.66、1.5,分别高于下伏须四、须二段砂岩段最高压力系数 1.51 和 1.42。同样,川东北地区陆相层系自流井组—须家河组为高压带,地压系数介于 1.40~1.90,封闭条件好,有利于页岩气的保存。

2 四川盆地及周缘陆相页岩气含气分布及可压性分析

2.1 页岩气含气分布

四川盆地及周缘陆相页岩气形成条件分析结果表明,上三叠统须家河组和下侏罗统自流井组广泛分布富含有机质的河、湖相泥页岩,这些泥页岩厚度较大,有机质丰度较高,储集条件较好,深度和演化程度适中,具有较好的页岩气形成条件和自生自储连续型大面积分布的特点^[8]。通过老井复查、复试和水平井勘探评价,已在泥页岩中钻获了众多的油气显示。其中在川西钻遇须家河组的 85 口深井中,须五段见页岩气显示 244 层,累计厚度达 884.29 m,占总显示层的 18%;川东建南构造东岳庙段显示共 22 层,累计厚度为 344.1 m,单层厚度平均 15.64 m。川东北元坝地区自流井组泥页岩中油气显示多达 67 层,累计厚度为 125.05 m,集中分布在东岳庙段、马鞍山段和大安寨段,为页岩气勘探的有利层系。

元坝、涪陵地区东岳庙段—大安寨段和新场地区须五段泥页岩含气量测试结果表明,含气量主要分布在 0.64~2.8 m³/t,平均为 1.45 m³/t。其中大安寨段、马鞍山段、东岳庙段平均含气量分别为 1.48 m³/t、1.53 m³/t、1.45 m³/t,须五段平均含气量为 1.48 m³/t,均具有较好的含气性(图 3)。

2.2 可压性分析

建南、元坝、涪陵下侏罗统自流井组和新场上三叠统须家河组岩心全岩 X 射线衍射碎屑矿物成分统计结果表明,四川盆地陆相泥页岩硅质矿物含量为 30%

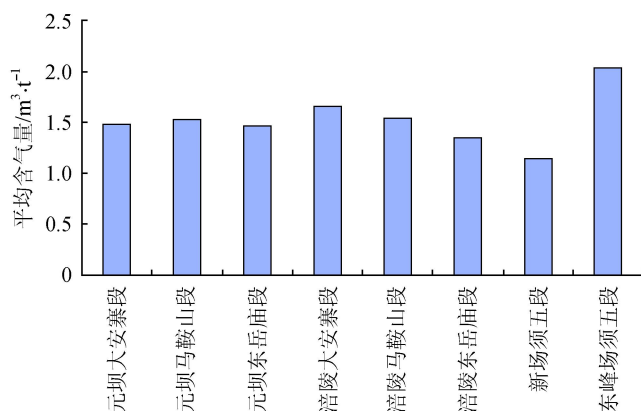


图 3 四川盆地陆相泥页岩层系含气量测试结果统计图

~80%,平均为 43.78%,其中下侏罗统泥页岩硅质矿物含量相对较低,主要分布在 30%~54%,平均为 41.53%,上三叠统须家河组泥页岩硅质矿物含量较高,主要分布在 50%~80%,平均为 51.67%,有利于压裂改造(图 4)。通过对川东建南构造的实施的直井和水平井东岳庙段泥页岩大型水力加砂压裂测试,分别获日产气近 0.4×10⁴ m³ 和 1.4×10⁴ m³ 工业气流,针对直井采用气举排水方式,日产气量稳定在 2 200~2 700 m³。对川东北元坝地区 5 口井大安寨段泥页岩夹灰岩测试压裂获日产 13.97×10⁴~50.7×10⁴ m³ 的工业气流,表明四川盆地陆相页岩气藏富集条件较好,有效的压裂改造和合理的试采方式可保证页岩气藏的可持续生产。

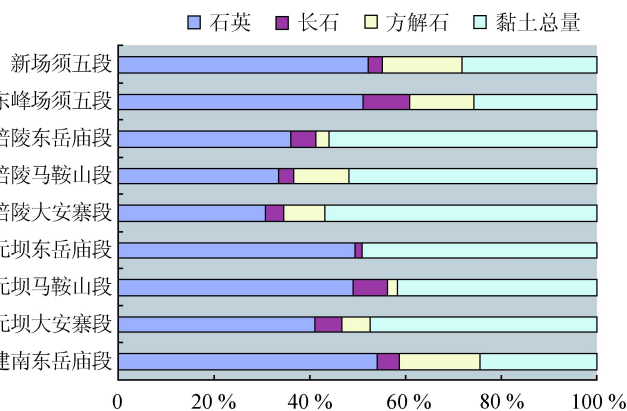


图 4 四川盆地陆相泥页岩全岩 X 射线衍射碎屑矿物成分统计图

3 四川盆地及周缘陆相页岩气勘探前景

通过对美国已发现的 5 大页岩气系统的地质参数调研^[9-12](表 2),除圣胡安盆地白垩系 Lewis 页岩为海陆过渡—三角洲相环境沉积、有机质类型以混合型—

表 2 北美 5 大页岩气系统与四川盆地陆相页岩气形成地质参数对比表

盆地名称	阿巴拉契亚	密执安	伊利诺伊	福特沃斯	圣胡安	四川	
盆地类型	前陆	内克拉通	内克拉通	前陆	前陆	前陆	
沉积环境	海相	海相	海相	海相	海陆过渡— 三角洲相	湖相	海陆过渡— 三角洲相
页岩名称	Ohio 页岩	Antrim 页岩	New Albany 页岩	Barnett 页岩	Lewis 页岩	湖相泥页岩	河湖相泥页岩
层位	泥盆系	泥盆系	泥盆系	石炭系	白垩系	下侏罗统	须家河组五段
埋藏深度/m	610~1524	183~730	183~1494	1981~2591	914~1829	2 000~4 000	2 800~3 500
泥页岩厚度/m	91~305	49	31~122	61~90	152~579	40~240	50~375
TOC	0~4.7%	0.3%~2.4%	1.0%~25%	2.0%~7.0%	0.45%~2.5%	1.4%~2.4%	2.0~16%
干酪根类型	腐泥—混合	腐泥—混合	腐泥—混合	腐泥—混合	混合—腐殖	混合—腐殖	腐殖
R _o	0.4%~1.3%	0.4%~0.6%	0.4%~1%	1.1%~1.4%	1.6%~1.88%	0.9%~1.6%	1.02%~1.68%
孔隙度	4.7%	9%	10%~14%	4%~5%	3%~5.5%	2%~8%	1%~3%
硅质含量		20.0%~41%		35%~50%	50%~75%	30%~54%	50%~80%
含气量/m ³ ·t ⁻¹	1.69~2.83	1.13~2.83	1.13~2.26	8.5~9.91	0.42~1.27	1.35~1.66	0.64~1.49
压力系数	0.49~1.31	1.15	1.41	1.41~1.44	0.66~0.82	1.57~1.9	1.42~1.66
单井日产气量/10 ⁴ m ³	0.085~1.416	0.113~1.416	0.028~0.142	10~100	0.2832~2.831	0.4~23.78	5~7
地质储量/10 ⁸ m ³	0.5~1.1	0.7~1.6	0.8~1.1	3.3~4.4	0.9~5.5		
单井储量/10 ⁴ m ³	425~1 699	566~3 398	425~1 699	1 416~4 248	1 699~5 663		
采收率	10%~20%	20%~60%	10%~20%	8.0%~15%	5%~15%		

腐殖型为主、与四川盆地陆相页岩气具有相似性外,其他四大页岩气系统均为海相沉积,有机质类型以腐泥型—混合型为主。

圣胡安盆地的 Lewis 页岩是目前美国五大页岩气系统中地质年代(白垩系)和页岩气商业开发时间都最年轻的页岩气勘探目标。四川盆地陆相页岩气形成地质参数与之相比,在泥页岩厚度、有机碳含量、热演化程度、孔隙度、硅质含量和含气性上均相似或相当,甚至还更好(如川西须家河组五段泥页岩有机碳含量最高可达 16%、硅质矿物含量介于 50%~80%)。但在埋藏深度和地层压力上也存在一定的差异。Lewis 页岩埋深较浅(914~1 829 m),压力系数较低(0.66~0.82),有利于勘探开发,近年来页岩气产量稳步上升,成为美国 5 大页岩气系统之一,1979—1999 年期间实现了页岩气商业开发。而四川盆地陆相页岩普遍超压,压力系数较高(1.4~1.9),有利于烃类的大量吸

附,但埋深较大(2 000~4 500 m),对勘探开发工程工艺技术和经济有效性提出了挑战。

从四川盆地地下侏罗统和上三叠统页岩单井日产气 $0.4 \times 10^4 \sim 50.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ 看,除低于福特沃斯 Barnett 海相页岩单井日产气 $10 \times 10^4 \sim 100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 外,高于 Lewis 海陆过渡相页岩单井日产气 $0.2832 \times 10^4 \sim 2.831 \times 10^4 \text{ m}^3$,与北美其他海相页岩相当,由此预示四川盆地陆相泥页岩气含丰富,与海相页岩气一样,具有较好的勘探前景。

按照页岩气有利区泥页岩厚度大于 50 m,有机碳含量大于 1.5%,镜煤反射率大于 1%,埋深小于 4 000 m 的选区评价标准,同时考虑岩石力学性质、构造和断裂发育对保存条件的影响因素,优选出川中阆中—平昌、三台—广安、川东南涪陵—长寿为自流井组页岩气勘探的有利地区,川西孝泉—新场、川中三台—广安为须五段页岩气勘探有利地区(表 3)。

表 3 四川盆地陆相页岩气有利区块优选表

层系	地区	泥页岩厚度/m	TOC	R _o	埋深/m	评价结果
自流井组	川东北元坝—达州	120~240	0.8%~1.4%	1.3%~1.6%	3 800~4 300	较有利
	川中阆中—平昌	120~240	1.6%~2.4%	1.0%~1.3%	2 800~3 400	有利
	川中三台—广安	60~100	1.4%~1.6%	1.1%~1.2%	1 600~2 600	有利
	川东南涪陵—长寿	100~120	1.4%~2.0%	1.0%~1.1%	1 400~2 500	有利
须五段	川西孝泉—新场	200~350	3.0%~4.5%	1.0%~1.5%	2 300~3 500	有利
	川中三台—广安	50~200	2.0%~3.0%	1.0%~1.3%	2 000~3 000	有利
	川东北元坝—达州	25~75	2.5%~4.0%	1.3%	3 600~4 500	较有利
	川东—川东南	<50	1.5%~3.0%	1.0%~1.3%	1 000~2 000	较有利

4 结论

1)四川盆地陆相页岩气主要发育于上三叠统须家河组和下侏罗统自流井组河、湖湘泥页岩,具分布广、厚度大、有机质丰度较高、保存条件好、脆性矿物含量高的优势,有利于页岩气形成和压裂开采。

2)通过与美国已发现的五大页岩气系统地质参数对比表明,四川盆地陆相页岩气在泥页岩厚度、有机碳含量、热演化程度、孔隙度、硅质含量和含气性上均与Lewis页岩相当,但埋藏深度较大、地层压力较大,对勘探开发工程工艺技术和经济有效性提出了挑战。从四川盆地陆相页岩气单井日产气量高于Lewis海陆过渡相页岩且与北美海相页岩气相当上看,前者应具有较好的勘探开发前景。

3)初步优选结果:川中阆中—平昌、三台—广安,川东南涪陵—长寿为自流井组页岩气勘探的有利地区,川西孝泉—新场、川中三台—广安为须五段页岩气勘探有利地区。

致谢:成文中统计和参考了中国石化勘探南方分公司和中国石化西南油气分公司有关泥页岩含气量测试、全岩X射线衍射碎屑矿物成分等部分分析数据,在此表示衷心感谢!

参 考 文 献

[1]李大荣.美国页岩气资源及勘探历史[J].石油知识,2004,104(1):61.

- [2]康玉柱.中国非常规泥页岩油气藏特征及勘探前景展望[J].天然气工业,2012,32(4):1-5.
- [3]聂海宽,何发岐,包书景.中国页岩气地质特殊性及其勘探对策[J].天然气工业,2011,31(11):111-116.
- [4]胡宗全,郑和荣.四川盆地地下侏罗统大安寨组层序分析[J].天然气工业,2000,20(3):34-37.
- [5]李军,陶士振,汪泽成,等.川东北地区侏罗系油气地质特征与成藏主控因素[J].天然气地球科学,2010,21(5):732-741.
- [6]邓康龄.四川盆地柏垭—石龙场地区自流井组大安寨段油气成藏地质条件[J].油气地质与采收率,2001,8(2):9-13.
- [7]叶军,曾华盛.川西须家河组泥页岩气成藏条件与勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(12):18-25.
- [8]梁狄刚,冉隆辉,戴弹申,等.四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J].石油学报,2011,32(1):8-17.
- [9]张林晔,李政,朱日房,等.页岩气的形成与开发[J].天然气工业,2009,29(1):124-128.
- [10]CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J].AAPG Bulletin,2002,86(11):1921-1938.
- [11]CALDWELL R. Unconventional resources: are they for real[J].Scotia Newsletter,2006,3:1-2.
- [12]MONTGOMERY S L, JARVIE D M, BOWKER K A, et al. 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.

(修改回稿日期 2012-07-02 编辑 居维清)