

文章编号: 1000-0747(2011)06-0693-07

滇黔北坳陷威信凹陷页岩气成藏条件分析与有利区优选

梁兴, 叶熙, 张介辉, 舒红林

(中国石油天然气股份有限公司浙江油田公司)

基金项目: “十二五”国家重大科技专项“大型油气田及煤层气开发”之“页岩气勘探开发关键技术”项目(2011ZX05018-006)

摘要: 根据页岩气区域地质调查研究、钻探和地震勘探成果, 研究滇黔北坳陷威信凹陷页岩气成藏条件, 优选页岩气勘探“甜点”。寒武系牛蹄塘组和志留系龙马溪组黑色页岩是威信凹陷页岩气两套重点勘探评价层系, 单层厚度达 50 m 以上, 有机质丰度高, 具有低孔、低渗和富硅质特征, 具备形成页岩气藏的有利地质条件并易于后期储集层压裂改造。上覆碎屑岩盖层、无通天断层、浅层整体封闭 3 大因素并存利于页岩气藏保存。岩心解吸显示页岩气成分以甲烷为主, 页岩气含量随保存条件变好、页岩 TOC 丰度增大和地层压力加大而增加。页岩气勘探甜点综合评价优选认为, 凹陷北部的筠连—罗布地区为龙马溪组和牛蹄塘组页岩气目的层叠合的最有利甜点勘探区, 中部的花坭—威信地区为牛蹄塘组页岩气有利甜点区。建议重视下石炭统旧司组、上二叠统乐平组的页岩气勘探评价。图 7 表 3 参 14

关键词: 滇黔北坳陷; 威信凹陷; 页岩气; 成藏条件; 区带优选

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Reservoir forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in the Weixin Sag, Dianqianbei Depression

Liang Xing, Ye Xi, Zhang Jiehui, Shu Honglin

(PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Forming conditions of the shale gas reservoir of the Weixin Sag in the Dianqianbei Depression are studied and preferable sweet spots for shale gas exploration are proposed based on the results of geologic survey, drilling and seismic exploration in the shale gas region. The black shales of Cambrian Niutitang Formation and Silurian Longmaxi Formation are the two principal exploration targets in the Weixin Sag, having the characteristics of big single layer thickness (>50 m), abundant organic matter, low porosity and permeability, and rich silicon. Those two formations have favorable conditions for the formation of shale gas reservoirs and also can be easily hydraulic fractured in the later stages of production. The coexistence of the clastic rock layer on the top, shallow entire seal, and the absence of exposed faults are the three desirable factors for the preservation of shale gas reservoir. The shale core analysis shows that the major composition is methane, the content of which increases as the preservation conditions become better and the shale TOC abundance and formation pressure increase. After integrated evaluation and optimized selection of shale gas exploration zones, it is determined that the Junlian-Luobu zone located in the north of the sag is the most favorable sweet spot for shale gas exploration in the overlapping target layer of the Longmaxi Formation and Niutitang Formation, and the Huani-Weixin zone in the middle of the sag is proposed to be the sweet spot for shale gas exploration in the Niutitang Formation. It is recommended that importance be attached to the evaluation of shale gas exploration in the Lower Carboniferous Jiusi Formation and Upper Permian Leping formation.

Key words: Dianqianbei Depression; Weixin Sag; shale gas; reservoir forming condition; optimized exploration zone selection

中国页岩气资源较为丰富, 资源勘探潜力大^[1-8]。

滇黔北坳陷威信凹陷下志留统龙马溪组和下寒武统牛蹄塘组灰黑—黑色泥页岩区域展布稳定, 分布区域广, 单层厚度大, 有机质丰度高, 与四川盆地页岩条件大致类似^[5], 是页岩气勘探评价的重点层位。本文根据页岩气区域地质调查研究、钻探和地震勘探成果, 研究威信凹陷页岩气成藏条件, 优选页岩气勘探“甜点”。

1 区域地质特征

威信凹陷地处云贵川三省交会处, 区域构造属于

扬子地块构造域西南缘滇黔北坳陷的东部, 北望四川盆地, 南毗滇东黔中隆起, 西以近南北走向的洛泽河断裂与昭通凹陷相邻(见图 1)。

根据威信凹陷及周缘主要压性构造线展布特征, 可分为南北向、北东东向和北东向等 3 个方向的构造形变体系。这些构造体系彼此复合, 交接关系十分明显, 存在限制、横跨、归并改造等复合现象。以晚元古代—早古生代康滇古隆起为基础的南北向构造体系形成最早, 次为印支期—燕山期北东东向构造体系; 晚燕山期—喜马拉雅期陆内造山向西北逆冲共同作用

形成北东向构造体系。

威信凹陷可划分出 13 个近北东走向的褶皱构造带(见图 1), 为典型“背斜带平缓宽阔、向斜带陡峭狭窄”的隔槽式褶皱形变带。背斜带与向斜带在威信—毕节以东区域呈向西北凸出的弧形, 在赤水河附近变

为 3 个背斜带与向斜带相间的格局。地表背斜构造带核部出露寒武系一下奥陶统, 翼部由中上奥陶统、志留系、泥盆系、二叠系、三叠系等组成, 页岩层埋深小于 3 000 m; 向斜轴部出露条带状的上三叠统一白垩统, 下古生界页岩层埋深达 3 000~5 500 m。

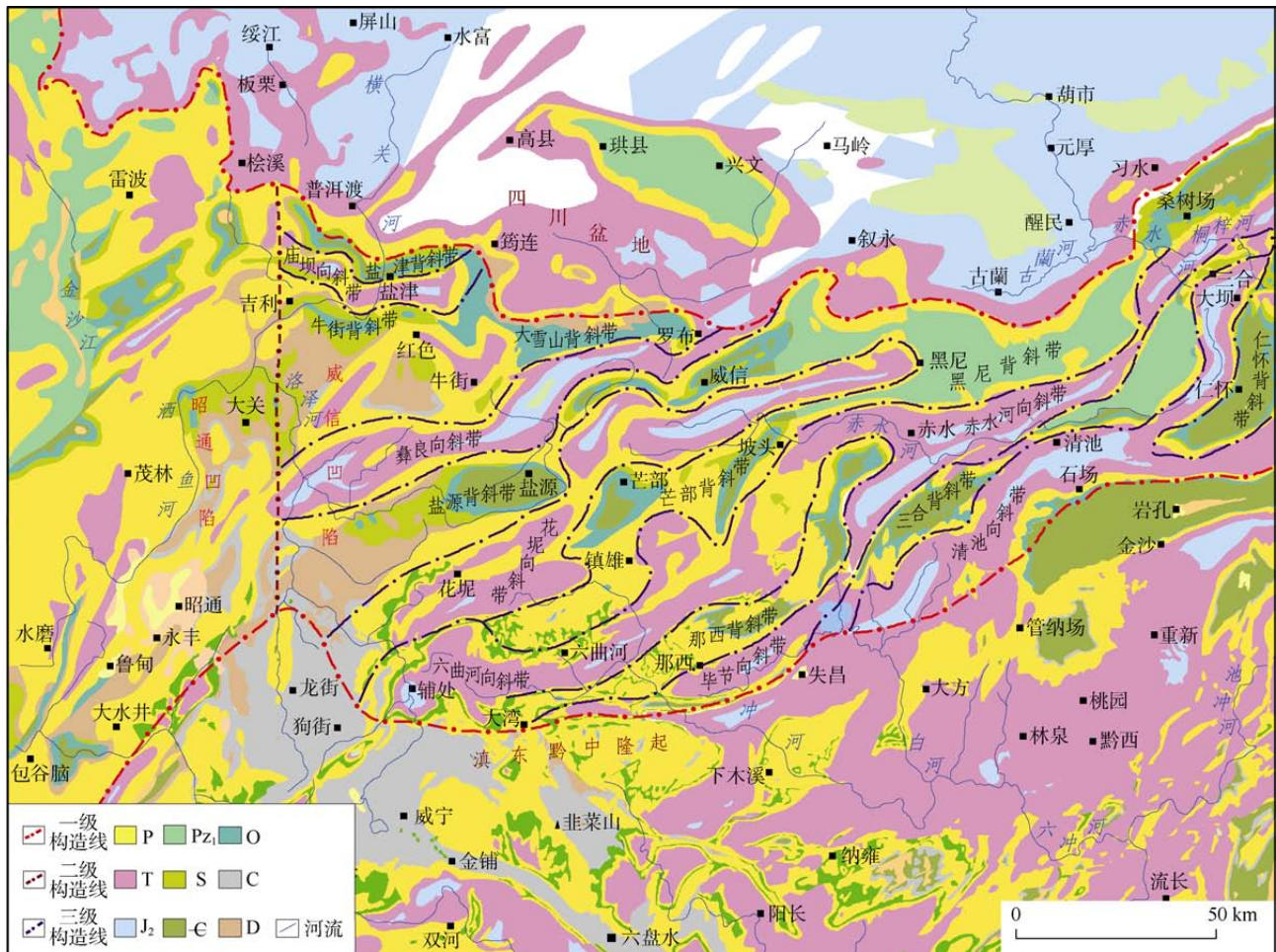


图 1 滇黔北坳陷威信凹陷构造区划图

威信凹陷发育海相震旦系—中三叠统和陆相上三叠统一白垩统两大沉积组合。上二叠统龙潭组(P_2l)、下石炭统大塘组(C_1d)、下志留统龙马溪组(S_1l)和下寒武统牛蹄塘组(C_1n), 是黑色页岩发育层位。

2 页岩气成藏条件

页岩气是一种非常规天然气, 赋存于极低渗透率、富有机质的深灰—灰黑色泥页岩或高炭泥页岩天然裂缝和孔隙之中^[1-8], 多呈吸附和游离状态, 少量以溶解状态存在于干酪根和沥青质中。页岩气藏是以富有机质页岩为气源岩且源岩、储气层、盖层“三位一体”的连续型非常规天然气藏, 是基本没有经过运移和聚集过程的“自生自储型”气藏, 具有“厚、富、泥、

熟、密、脆”的特点^[2,4]。

北美页岩气开采实践表明, 页岩气藏成藏特性主要由页岩层厚度、埋藏深度、有机质含量、有机质热演化程度、页岩含气性、页岩矿物成分、页岩力学性质、储集层物性等 8 大要素体现^[2-5]。本文根据页岩层区域展布特征、有机质丰度、有机质热演化程度、储渗条件、保存条件及页岩含气量等方面评价威信凹陷页岩气成藏条件。

2.1 页岩层区域展布

2.1.1 下志留统龙马溪组

下志留统龙马溪组(S_1l) 沉积于华南加里东造山带西北侧的前陆盆地, 为华南造山带西北前缘闭塞形成的陆棚相滞流缺氧环境, 富含笔石和有机质的黑色

泥页岩发育^[5, 9-10]。由北向南,下志留统龙马溪组(S_1l)厚度变薄,黑色泥页岩厚度也减薄,南部区域出现灰岩夹层并逐渐增多,显示龙马溪组沉积中心在威信凹陷的北部—四川盆地南部(见图 2)。

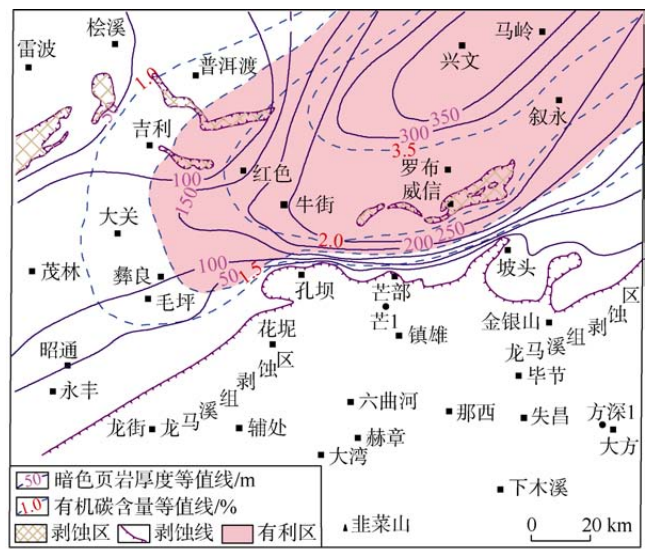


图 2 威信凹陷及邻区下志留统龙马溪组页岩综合评价图

2.1.2 下寒武统牛蹄塘组

威信凹陷处于早古生代扬子克拉通盆地(大陆架)的东南缘,下寒武统牛蹄塘组($-C_1n$)形成于早寒武世早期全球快速海侵体系域,属于快速上升洋流形成的陆架外缘斜坡贫氧环境—陆棚海(深水陆棚)缺氧沉积环境^[10-11],发育富含有机质和生物元素、有色金属的黑色岩系,以泥页岩和硅质岩为主^[12-14],平面上形成了镍钼矿、钒矿、腐泥无烟煤 3 个成矿带^[12]。下寒武统牛蹄塘组($-C_1n$)沉积区域稳定,分布连续,地层厚度大。受西部康滇古陆影响,黑色泥页岩总体呈“西薄东厚”的特征(见图 3),筠连—芒 1 井以东区域黑色泥页岩厚 358.5 m 以上。

2.2 有机质丰度及热演化程度

区域露头地质调查、钻探及样品测试结果表明,威信凹陷牛蹄塘组和龙马溪组黑色泥页岩发育于其沉积层系的中下部,泥页岩 TOC 值分别为 0.55%~9.37% 和 0.61%~3.24% (见表 1),大多在 1.5% 以上。有机质丰度随岩性的不同而改变(见图 4、图 5),沉积层系底部灰黑色页岩 TOC 值明显较高,是形成页岩气藏的最有利层段。如:YQ1 井 196.75~219.58 m 井段的 S_1l 底部页岩 TOC 值大于等于 2%(单层厚度达 32 m),平均 2.26% (见图 4);YQ2 井 192.39~281.68 m 井段的 $-C_1n$ 页岩 TOC 值大于 2%,平均为 2.94% (见图 5)。灰黑色页岩的高 TOC 值与志留纪高生产力表层水浮游

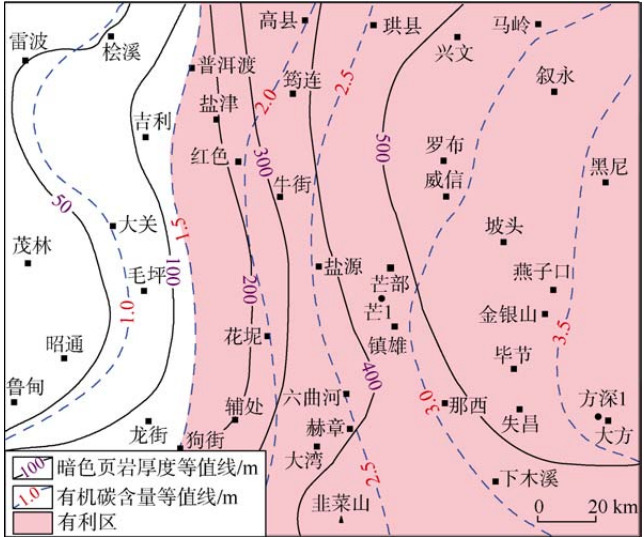


图 3 威信凹陷及邻区下寒武统牛蹄塘组页岩综合评价

表 1 威信凹陷及邻区灰黑色泥页岩地球化学资料统计表

地质剖面或钻井	地层	TOC/%	R_o /%
大雪山海湾		0.63~3.24 (2.06)	2.23~3.13 (2.85)
盐津李家湾	龙马溪组	0.61~2.70 (1.97)	2.08~2.42 (2.18)
筠连 YQ1 井		0.65~3.14 (1.52)	2.92~2.99 (2.95)
盐源蓼叶坝		2.08~4.78 (3.30)	2.01~4.35 (3.25)
盐源 YQ2 井	牛蹄塘组	0.55~9.37 (1.80)	4.01~4.12 (4.05)
芒 1 井		0.57~4.19 (2.67)	
方深 1 井		0.65~8.02 (2.70)	

注:括号内数据为平均值

生物圈和有利于有机质保存的缺氧水体物理化学条件有关^[12]。

海相成因的页岩有机质母质类型为Ⅰ型, R_o 值 2.00%~4.35%。龙马溪组页岩 R_o 值比牛蹄塘组页岩略低,如:YQ1 井龙马溪组页岩 R_o 值为 2.92%~2.99%,YQ2 井牛蹄塘组页岩 R_o 值为 4.01%~4.12%。YQ1 井龙马溪组、YQ2 井牛蹄塘组页岩伊蒙混层矿物间层比为 5%~10%,YQ1 井($\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_1$)值为-3.2‰~0.3‰,说明页岩母质演化程度已达高成熟—过成熟阶段,处于过成熟晚期生气状态。

在 YQ1 井龙马溪组底部灰黑色泥页岩中发现页岩气,热水浸泡岩心即析出密集的气泡,汇集的天然气可点燃(蓝色火焰高达 30 cm 左右),甲烷含量为 73.12%~88.32%。该含气层段厚 52 m,TOC 值为 2.12%~3.14%, T_{max} 为 484~524 ℃,最高含气量 0.429 m³/t 以上。在如此浅的埋藏深度发现页岩中有甲烷气存在,显示了威信凹陷页岩气的勘探潜力。

威信凹陷页岩气层有机质丰度、热演化程度与美国福特沃斯盆地南部类似,均明显经历了埋藏—抬升—再埋藏—再大规模抬升剥蚀的演化过程,且都有明

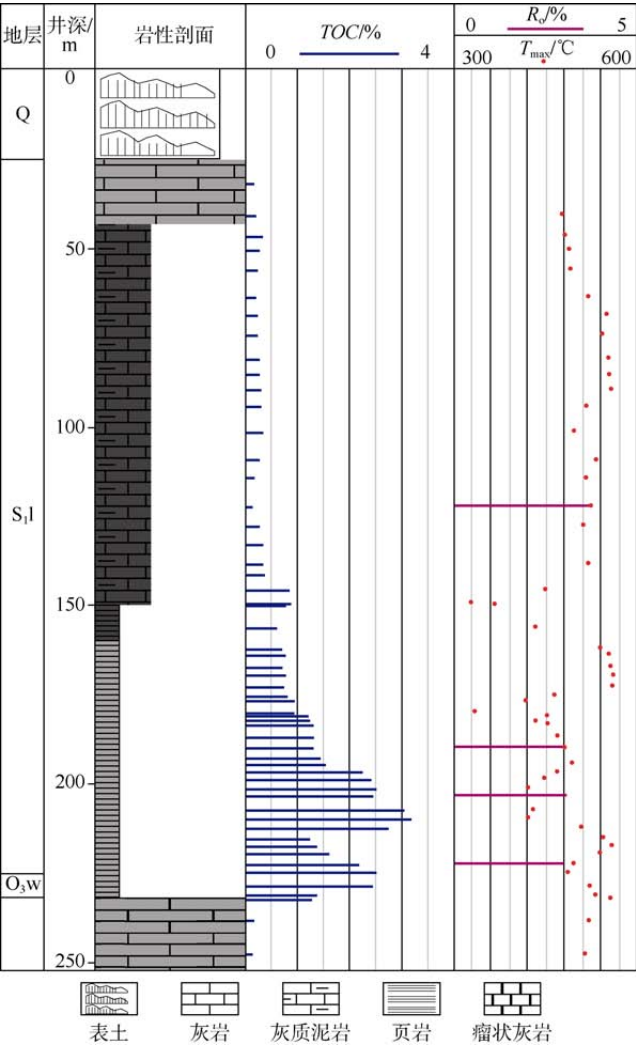


图4 筠连 YQ1 井龙马溪组泥页岩 TOC 和 R_o 纵向分布图

显的二次生烃过程。经研究分析认为，威信凹陷龙马溪组未完全进入裂解气阶段就发生大规模抬升，下寒武统已处于过成熟阶段，表明凹陷具有较好的页岩气资源勘探开发前景。

2.3 储渗条件

区域地质调查和地质浅井揭示，页岩结构致密，孔隙发育较差。YQ1 井龙马溪组和 YQ2 井牛蹄塘组页岩密度值变化不大，平均 2.66 g/cm^3 左右，含页岩气层段的岩石密度比不含气层段岩石密度低 $0.05\sim0.21\text{ g/cm}^3$ 左右，与美国商业开采的页岩层密度大体一致^[4]。

中国石油勘探开发研究院廊坊分院对浅井测试样品分析（见表 2）表明，YQ1 井龙马溪组页岩孔隙度 $1.1\%\sim4.9\%$ ，平均值 2.63% ，渗透率 $0.0043\times10^{-3}\sim0.0420\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ ，平均 $0.019\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ ；YQ2 井牛蹄塘组页岩孔隙度 $0.3\%\sim1.3\%$ ，平均值 0.65% ，渗透率 $0.0067\times10^{-3}\sim0.0150\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ ，平均 $0.012\times10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ 。与北美商业开采的页岩气孔隙度 $2\%\sim10\%$ 、渗透率

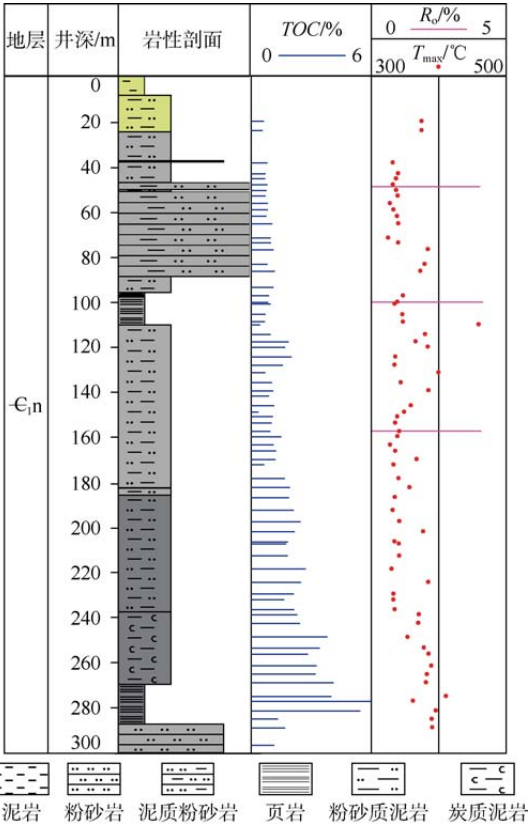


图5 盐源 YQ2 井牛蹄塘组泥页岩 TOC 和 R_o 纵向分布图

$1\times10^{-13}\sim10\times10^{-7}\text{ }\mu\text{m}^2$ 值相比，YQ1 和 YQ2 井页岩孔隙度偏小，渗透率处于中等水平。岩心薄片鉴定表明，页岩中的石英以陆源碎屑来源为主，与美国 Barnett 页岩石英矿物主要是生物来源不同，这可能是造成孔

表 2 YQ1、YQ2 井孔隙度、渗透率表

井号	序号	样品编号	深度/m	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$
YQ1	1	YQ1-D26	31.55~31.69	1.8	0.018 0
	2	YQ1-D4	80.81~81.08	3.5	0.042 0
	3	YQ1-D32	161.99~162.17	3.1	0.004 3
	4	YQ1-D34	203.34~203.51	4.9	0.028 3
	5	YQ1-D59	224.87~224.98	2.6	0.006 0
	6	YQ1-D37	232.19~232.34	1.4	0.008 9
	7	YQ1-D38	295.75~295.98	1.1	0.026 0
平均				2.63	0.019 0
YQ2	1	YQ2-3	38.27~38.47	1.3	0.015 0
	2	YQ2-8	65.27~65.51	0.9	0.015 0
	3	YQ2-11	83.36~83.62	0.7	0.013 0
	4	YQ2-14	117.61~117.91	0.7	0.014 0
	5	YQ2-17	146.01~146.29	0.5	0.013 0
	6	YQ2-20	178.25~178.56	0.7	0.012 0
	7	YQ2-23	206.41~206.71	0.7	0.010 0
	8	YQ2-28	236.50~236.75	0.4	0.010 0
	9	YQ2-32	261.37~261.65	0.3	0.007 1
	10	YQ2-35	281.91~289.20	0.3	0.006 7
平均				0.65	0.012 0

隙度偏低的一个重要因素；另外，国内页岩孔隙度测定方法有别于北美也是孔隙度测定值偏低的一个关键因素。

页岩层孔隙度与渗透率呈现一定的正相关性。YQ1 井龙马溪组底部约 60 m 厚的页岩层孔渗条件相对较好（见图 6）；YQ1 井附近刚完钻的某井揭示龙马溪组底部页岩页理发育，岩心出筒时气体逸出明显，现场分析吸附气含量达 0.21~0.27 L/kg，表明在孔隙度相对较高的区带，页岩气资源潜力大，其经济可采性高。

岩石扫描电镜和薄片观察表明，威信凹陷页岩中可见少量微孔隙、微裂缝，颗粒表面存在大量溶蚀孔（见图 7）。胶结物以伊利石、绿泥石为主，见少量的方解石，黏土矿物和有机质大量充填于微孔隙，可能是造成页岩层束缚水含量较高的主因。地面露头剖面和岩心观察发现页岩中高角度缝和微裂缝十分发育，主要为构造缝及缝合线，如 YQ1 井每米长度岩心见裂缝 1~14 条不等，宽度 5~15 μm，充填物磨圆度为次棱一次圆状，胶结类型为孔隙式胶结，线性颗粒接触关系；YQ2 井构造缝宽（30~75）μm，大多小于 Barnett 页岩裂缝宽度（0.05 mm）。因此，威信凹陷页岩储集层总体致密、低孔渗，但仍具备较好的储集条件。

勘探研究表明，页岩所夹的薄层泥质粉砂岩和各

种砂岩中的天然气主要属于游离气并随页岩中的吸附气一并采出。目前，美国页岩气开采主要采用大型压

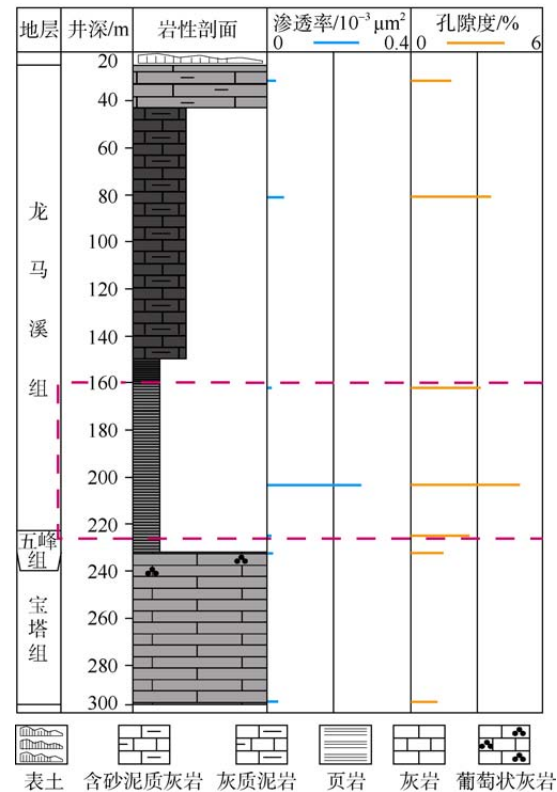


图 6 筠连 YQ1 井龙马溪组页岩气储集层孔隙结构剖面图

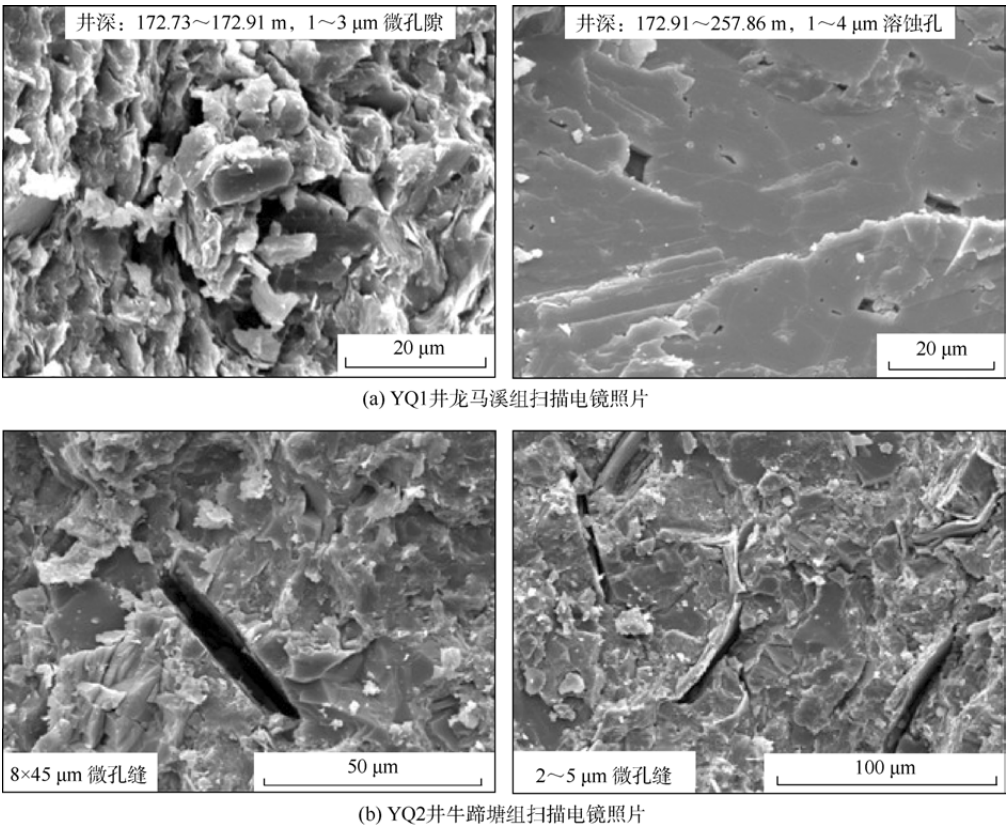


图 7 筠连 YQ1 和盐源 YQ2 井页岩扫描电镜照片

裂产生裂缝来采出吸附气。因此,页岩的脆性和硬性对页岩气的开采十分重要。威信凹陷 S_{1l} 和 $-C_{1n}$ 页岩矿物组成中,脆性矿物总量较高,石英含量占 26%~40%,石英和长石总量的平均值大于 56% (最高达 65% 以

上);方解石和白云石含量多在 10%~25%,最高可达 86% (见表 3)。页岩中砂质和钙质含量较高,表明页岩硬度较高,脆性强,水力压裂改造时有利于产生大量的裂缝网,利于页岩气商业开采。

表 3 威信凹陷页岩全岩定量元素分析结果

剖面或钻井	层位	黏土/%	石英/%	钾长石/%	斜长石/%	方解石/%	白云石/%	黄铁矿/%
盐源	$-C_{1n}$	25~55 (39.4)	32~45 (39.10)	1~5 (2.8)	6~26 (16.5)	2~5 (3.3)	0	0
海湾	S_{1l}	9~53 (26.3)	3~40 (28.70)	1~12 (4.8)	2~10 (4.7)	3~86 (24.7)	6~22 (14.75)	1~8 (3.7)
李家湾	S_{1l}	26~48 (39.0)	9~43 (26.17)	2~7 (4.0)	4~16 (6.8)	1~65 (26.0)	7	0
小草坝	C_{1j}	11~82 (60.6)	8~42 (29.56)	1~2 (1.5)	1~2 (1.5)	2~57 (29.5)	24	0
YQ1 井	S_{1l}	20~55 (7.5)	23~38 (32.25)	1~5 (2.0)	1~6 (3.3)	5~26 (12.0)	2~29 (11.87)	1~4 (1.9)
	O_{3w}	40~48 (44.0)	30~35 (32.50)	1~6 (3.5)	4~8 (6.0)	7~10 (8.5)	3~4 (3.50)	1.9~2.0 (1.9)

注:括号中数据为平均值

2.4 保存条件及页岩含气量

常规天然气藏对保存条件要求很高,以往认为页岩气不受保存条件控制。但最近一年多的威信页岩气勘探实践表明,保存条件好坏控制页岩气含气量及气体组分(集中反映为甲烷含量和含氮量),主要体现在:①页岩气目的层系之上要有盖层保护,以碎屑岩盖层为佳;②要远离“通天断层”,断层横向影响范围略大于断层的切割深度;③大体具备整体封闭保存体系,浅层以承压水文地质环境为佳。因此,上覆碎屑岩盖层、无通天断层、浅层具备整体封闭体系“三大因素”并存,是优选页岩气甜点的重要条件。

根据地质浅井密闭岩心解吸实验,页岩解吸出的天然气含气量和甲烷含量随着井深的增加而增加,解吸速度随浸泡水温度升高而加快。页岩的甲烷吸附量随 TOC 值增大而增加,证实了富有机质的页岩较贫有机质的页岩具有更多的微孔隙空间,吸附的天然气量更多。页岩吸附气量大也与页岩比表面积大有关,如 YQ1 井 S_{1l} 底部页岩比表面积在 8.69~20.36 m²/g,吸附气量远大于相邻的 S_{1l} 上部泥岩及宝塔组 (O_{2b}) 灰岩,后者的平均孔隙直径相对较大,岩石比表面积较小 (O_{2b} 灰岩仅 0.487 m²/g)。

3 勘探甜点优选

3.1 优选原则

通过调研北美页岩气勘探开发经验,结合威信凹陷页岩气地质条件,认为页岩气有利勘探甜点优选应着重考虑以下因素:①灰黑色泥页岩层位稳定,分布区域广,单层厚度在 30 m 以上;②灰黑色泥页岩 TOC 值大于等于 1.5%,母质以 I_1 型为主,成熟度不过高;③页岩硅质含量大于等于 40%;④有一定的基质

孔隙度,发育裂隙;⑤构造相对简单,地层横向产状无突变,页岩层埋深小于 3 500 m;⑥上覆碎屑岩盖层,无通天断层,浅层具备整体封闭体系,保存条件好;⑦地貌起伏相对较小,交通条件较好,地震勘探和勘探工程相对便利。

3.2 评选结果

根据上述页岩气勘探甜点优选原则,综合评价认为,威信凹陷北部的筠连—罗布地区是龙马溪组和牛蹄塘组页岩气目的层叠合的最有利勘探甜点区;中部的花坨—威信地区为牛蹄塘组页岩气有利甜点区。

3.2.1 筠连—罗布地区

具体指盐津—大雪山背斜带以北区域,位居四川盆地南部边缘,总体呈宽阔的向斜,构造相对简单,地层展布相对稳定,普遍具有二叠系、三叠系区域盖层,大中型断层极少,总体属于承压水文地质环境,天然气区域保存条件好。具有稳定展布的 $S_{1l}+C_{1n}$ 两套页岩气目的层,页岩气层埋藏深度多为 1 800~3 000 m,井下已发现了 S_{1l} 页岩气。属丘陵地貌,低洼平坝连片,交通便利,靠近四川盆地天然气生产基地,技术保障等相对便利。

3.2.2 花坨—威信地区

具体指盐源、芒部背斜带和彝良、花坨向斜带。总体为隔槽式形变带格局,背斜构造带宽广,勘探回旋余地大。该区大多发育下寒武统、下奥陶统碎屑岩盖层,深大断裂少,有一定的区域保存条件。 $-C_{1n}$ 页岩层区域稳定,页岩气层埋藏深度多为 1 200~2 600 m。地处云贵高原平坝带和低小丘陵地貌,有县级公路,交通运输和供给便利。

4 结论

威信凹陷发育下志留统龙马溪组与下寒武统牛蹄

塘组两套黑色泥页岩，区域分布稳定、单层厚度大、有机质丰度高、成熟度高，具备形成页岩气藏的有利地质条件，是威信凹陷重要的页岩气勘探目的层系。

上覆碎屑岩盖层、无通天断层、浅层整体封闭 3 大因素并存利于页岩气藏的保存。地质浅井岩心解吸试验表明，下志留统和下寒武统两套黑色泥页岩天然气成分以甲烷为主，其含量随保存条件变好、页岩埋深增加、TOC 丰度增大而增加。页岩具有低孔、低渗、富硅质特征，易于后期储集层压裂改造。

综合评价页岩气地质条件和埋深、地面地貌因素，优选威信凹陷北部的筠连—罗布地区为龙马溪组和牛蹄塘组目的层叠合的最有利勘探甜点区，中部的花坭—威信地区为牛蹄塘组目的层有利勘探甜点区。

威信凹陷下石炭统旧司组 and 上二叠统乐平组均发育厚度大（112~198 m）、TOC 丰度高（3%~15%）、成熟度适中（ R_o 值为 1.39%~2.24%）的黑色泥页岩层系，是形成于晚古生代滨浅海沉积环境的黑色细碎屑岩系，分别在威信凹陷西南部和东北部地区广泛展布，最近的钻探已发现明显的含气显示，可能是资源量非常大的潜在页岩气勘探层系，应予重视并加强勘探评价。

参考文献：

- [1] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [2] 李登华, 李建忠, 王社教, 等. 页岩气藏形成条件分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 22-26.
Li Denghua, Li Jianzhong, Wang Shejiao, et al. Analysis of controls on gas shale reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 22-26.
- [3] 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 等. 四川盆地下志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 225-230.
Pu Boling, Jiang Youlu, Wang Yi, et al. Reservoir-forming conditions and favorable exploration zones of shale gas in Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 225-230.
- [4] Curtis J B. Fractured shale gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [5] 王世谦, 陈更生, 董大忠, 等. 四川盆地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 51-58.
Wang Shiqian, Chen Gengsheng, Dong Dazhong, et al. Accumulation conditions and exploitation prospect of shale gas in the Lower Paleozoic Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 51-58.
- [6] 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.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, et al. Global importance of “continuous” petroleum reservoirs: Accumulation, distribution and evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 669-682.
- [7] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129-145.
Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.
- [8] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641-653.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653.
- [9] 陈旭. 论笔石的深度分带[J]. 古生物学报, 1990, 29(5): 507-526.
Chen Xu. Graptolite depth zonation[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1990, 29(5): 507-526.
- [10] 姜月华, 岳文浙, 业治铮. 华南下古生界缺氧事件与黑色页岩及有关矿产[J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(5): 272-278.
Jiang Yuehua, Yue Wenzhe, Ye Zhizheng. Anoxic event, black shales and related mineral resources: Taking the Lower Palaeozoic in southern China as an example[J]. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 1994, 3(5): 272-278.
- [11] 安作相. 塔里木—华南地块裂解与四川下古生界油气[J]. 石油学报, 1997, 18(1): 18-22.
An Zuoxiang. Taphrogeny of Tarim-south China massif and its related to low Paleozoic oil-gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18(1): 18-22.
- [12] 张爱云, 伍大茂, 郭丽娜, 等. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
Zhang Aiyun, Wu Damao, Guo Li'na, et al. Marine black shale formation geochemistry and metallogenic significance[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [13] 陈兰, 钟宏, 胡瑞忠, 等. 湘黔地区早寒武世黑色页岩有机碳同位素组成变化及其意义[J]. 矿物岩石, 2006, 26(1): 81-85.
Chen Lan, Zhong Hong, Hu Ruizhong, et al. Composition of organic carbon isotope of early Cambrian black shale in the Xiang-Qian area and its significances[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26(1): 81-85.
- [14] 李有禹. 湖南大庸慈利一带下寒武统黑色页岩中海底喷流沉积硅岩的地质特征[J]. 岩石学报, 1997, 13(1): 121-126.
Li Youyu. The geological characteristics of sea-floor exhalation sedimentary chert in Lower Cambrian black shales in Dayong-Cili Area, Hu'nian Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 1997, 13(1): 121-126.

第一作者简介：梁兴（1965-），男，广西北流人，博士，中国石油天然气股份有限公司浙江油田公司高级工程师，主要从事油气地质综合评价研究和勘探开发管理工作。地址：浙江省杭州市西湖区留下街道荆山岭，中国石油天然气股份有限公司浙江油田公司，邮政编码：310023。E-mail: liangx85@petrochina.com.cn

收稿日期：2010-10-11 修回日期：2011-09-21

（编辑 王大锐 绘图 刘方方）