

四川盆地东南缘林滩场地区上奥陶统五峰组-龙马溪组页岩气储层甜点预测

葛 勋^{1,2}, 郭彤楼³, 马永生⁴, 王国力³, 黎茂稳², 余小群⁵, 赵培荣⁴, 温真桃⁵, 王 鹏⁵

[1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石化西南油气分公司, 四川成都 610041; 4. 中国石油化工集团有限公司, 北京 100728; 5. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041]

摘要:中国石化西南油气分公司2017年在四川盆地东南缘林滩场完钻的探井林页1井,证实林滩场构造在奥陶纪末—早志留世处于深水陆棚有利相带,页岩气形成条件较好。为进一步落实该区勘探开发潜力,实现五峰组-龙马溪组页岩气的商业突破,对林滩场进行区域构造和沉积特征分析。在大量基础地质实验数据分析的基础上,优选总有机碳(*TOC*)含量、有效孔隙度(*POR*)和含气量(*GAS*)作为地质甜点评价参数,脆性指数(*BI*)和水平主应力差作为工程甜点评价参数,地层倾角、断裂影响和地层压力作为保存条件评价参数。利用叠前反演求取地震弹性参数(纵横波速度比、密度和泊松比),通过岩心样品测试分析数据、储层地质岩性特征以及储层岩石物理分析,建立储层评价参数与地震弹性参数之间的定量关系,根据定量关系利用叠前反演CRP道集内岩性信息的AVO特征,对各项页岩储层评价参数进行平面预测,最终优选出林滩场页岩气有利目标区。应用地质-测井-地球物理一体化方法对页岩储层甜点区做出精准平面预测,对实现川东南复杂构造区页岩气勘探开发一体化具有重要的指导意义。

关键词:甜点预测;地质甜点;工程甜点;页岩储层;五峰组-龙马溪组;林滩场;四川盆地东南缘

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Prediction of shale reservoir sweet spots of the Upper Ordovician Wufeng-Longmaxi Formations in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

Ge Xun^{1,2}, Guo Tonglou³, Ma Yongsheng⁴, Wang Guoli³, Li Maowen², Yu Xiaoqun⁵,
Zhao Peirong⁴, Wen Zhentao⁵, Wang Peng⁵

[1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Southwest Oil and Gas Branch of SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China; 4. China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China; 5. Exploration and Development Research Institute, Southwest Oil and Gas Branch of SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China]

Abstract: Well LY 1, an exploration well drilled by Sinopec Southwest Oil & Gas Company in the southeastern margin of Sichuan Basin in 2017, has proven that the Lintanchang structure was in a zone of deep water shelf facies during the Late Ordovician to Early Silurian, favorable for shale gas generation. In order to further explore the shale gas potential in this area and realize commercial breakthrough in shale gas development in the Wufeng-Longmaxi Formations, the study analyzes the structure and sedimentary features of Lintanchang area. Based on an array of geological data for tests, we select the *TOC* content, effective porosity and gas content of high-quality shale as the key parameters for evaluating the geological sweet spots, brittleness index and horizontal principal stress difference for determining engineering sweet spots, and dip angle, fracture influence and formation pressure for assessing preservation conditions. Seismic elastic parameters (including transverse to longitudinal velocity ratio, density and Poisson's ratio) are obtained by pre-stack inversion. The quantitative relationship between reservoir evaluation parameters and seismic elastic parameters is established by core sample tests, as well as petrophysical analysis and lithologic characters of reservoir rocks. In addition, the AVO characteristics of lithologic information in CRP gathers are applied to predict planar changes of the

收稿日期:2021-07-26;修订日期:2022-03-10。

第一作者简介:葛勋(1994—),女,博士研究生,非常规油气勘探开发评价。E-mail:2269379165@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003)。

shale reservoir parameters related, and eventually the favorable shale gas target in the Lintanchang structure is determined. The accurate planar mapping of shale reservoir sweet spots in structurally complex areas in the southeastern margin of the Sichuan Basin by a combination of geological-logging-geophysical methods is of guiding significance to the integrated exploration and development of shale gas therein.

Key words: sweet spot prediction, geological sweet spot, engineering sweet spot, shale reservoir, Wufeng-Long-maxi Formations, Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

引用格式:葛勋,郭彤楼,马永生,等.四川盆地东南缘林滩场地区上奥陶统五峰组-龙马溪组页岩气储层甜点预测[J].石油与天然气地质,2022,43(3):633-647. DOI:10.11743/ogg20220312.

Ge Xun, Guo Tonglou, Ma Yongsheng, et al. Prediction of shale reservoir sweet spots of the Upper Ordovician Wufeng-Longmaxi Formations in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 633-647. DOI: 10.11743/ogg20220312.

自2009年以来,中国在四川盆地寒武统、上寒武统一下志留统、下二叠统和上二叠统取得了海相页岩气勘探开发的重大突破^[1-7],先后发现涪陵、长宁、威远和威荣等大中型非常规页岩气田^[8],提交页岩气探明储量超 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,实现了该套页岩气规模效益开发^[9-11]。目前,四川盆地页岩气勘探开发逐渐从盆内向盆缘(外),高压向常压方向发展,四川盆地东南缘(川东南)林滩场地区自中新生代以来共经历5次构造运动^[12],多表现为断裂发育、地应力复杂、页岩储层埋藏差异大、压力系数低^[13-19]。林1井揭示川东南地区存在牛蹄塘组、五峰组-龙马溪组两套区域性烃源岩,且在灯影组、清虚洞组以及石牛栏组中发育有古油藏^[20]。2017年实钻林页1井取得了较好的油气显示,预示该区有望成为新的增储、上产阵地。因此,为进一步落实该区有利勘探目标,川东南盆缘复杂构造区页岩储层甜点预测成为目前页岩气勘探开发的突破点之一。

甜点的地震预测手段主要包括地震反演、地震属性预测、数值模拟分析与AVO等^[21-22]。总有机碳(TOC)含量、储层厚度、孔隙度、渗透率和含油饱和度等评价参数可以对地质甜点进行定量预测^[23-25]。TOC含量与密度测井曲线有很好的线性相关性,可以利用叠前反演技术预测密度再转换为TOC含量;利用杨氏模量和泊松比或OVT域叠前地震资料均可以进行储层脆性预测^[26];叠后地震预测技术可以通过相干、曲率、倾角和蚂蚁追踪等对裂缝进行定量预测^[27-33];通常根据岩石物理和测井分析数据,利用神经网络技术和回归分析等算法建立含气量(GAS)与TOC含量的关系式计算GAS^[34]。现今国内大多使用地震反演技术对页岩储层甜点区进行有效预测,应用叠前资料,也可反演具有岩性区分识别能力的砂泥岩纵波速度和横波速度的乘积敏感属性参数,该参数可用于识别砂、泥岩,反演杨氏模量/泊松比含气性敏感参数,预测优质储层含气性^[35-36]。页岩页理缝含油普遍,页理缝

越发育,各向异性越强,基于VTI介质弹性理论及HTI各向异性理论,可以预测水平层理缝的空间分布,有助于提高地质甜点预测精确度^[37]。近年来针对页岩储层甜点预测的方法尚不完善,利用线性回归算法得到的拟合公式未能对甜点区进行精确预测,同时忽略了将保存条件列为盆缘复杂构造区页岩储层甜点预测的要素之一,且对地质、工程甜点保存条件之间的融合与制约关系认识不清,致使盆缘复杂构造区页岩储层甜点预测缺乏一套准确性高和适用性强的评价参数体系。本文通过对林滩场代表性探井样品进行储层岩石物理分析,建立储层评价参数与地震弹性参数之间的定量关系,探讨应用叠前反演对各项评价参数做出精准平面预测的技术方法,期望能够实现川东南盆缘复杂构造区页岩气勘探开发一体化提供技术借鉴与指导。

1 区域地质特征

林滩场行政区划隶属贵州省赤水市、习水县和四川省古蔺县,区域构造上位于川东南隔挡式断褶带与黔北坳陷的交汇处。林滩场背斜南端紧邻桑木场背斜^[38-39],两背斜以齐岳山隐伏断裂为界,林滩场构造位于齐岳山断裂以西,大断裂位于背斜两翼,浅部地层(二叠系—白垩系)部分遭受剥蚀。林滩场受川东南构造演化的影响,中、新生代以来经历多期复合联合构造运动,整体表现为NE-NW向展布的长轴背斜,主要发育NE和NW向断裂,NE向断裂多为基底高角度逆冲断裂。NE-SW向构造形成于燕山中期和晚期,NW-SE向构造形成于燕山末期—喜马拉雅期^[40-43](图1)。

林滩场构造地层自上而下依次为侏罗系、三叠系、二叠系、志留系、奥陶系、寒武系和震旦系。受到自中燕山期以来构造运动的影响,缺失泥盆系、石炭系、中—上三叠统、下白垩统及新生界。背斜两端地表出露以

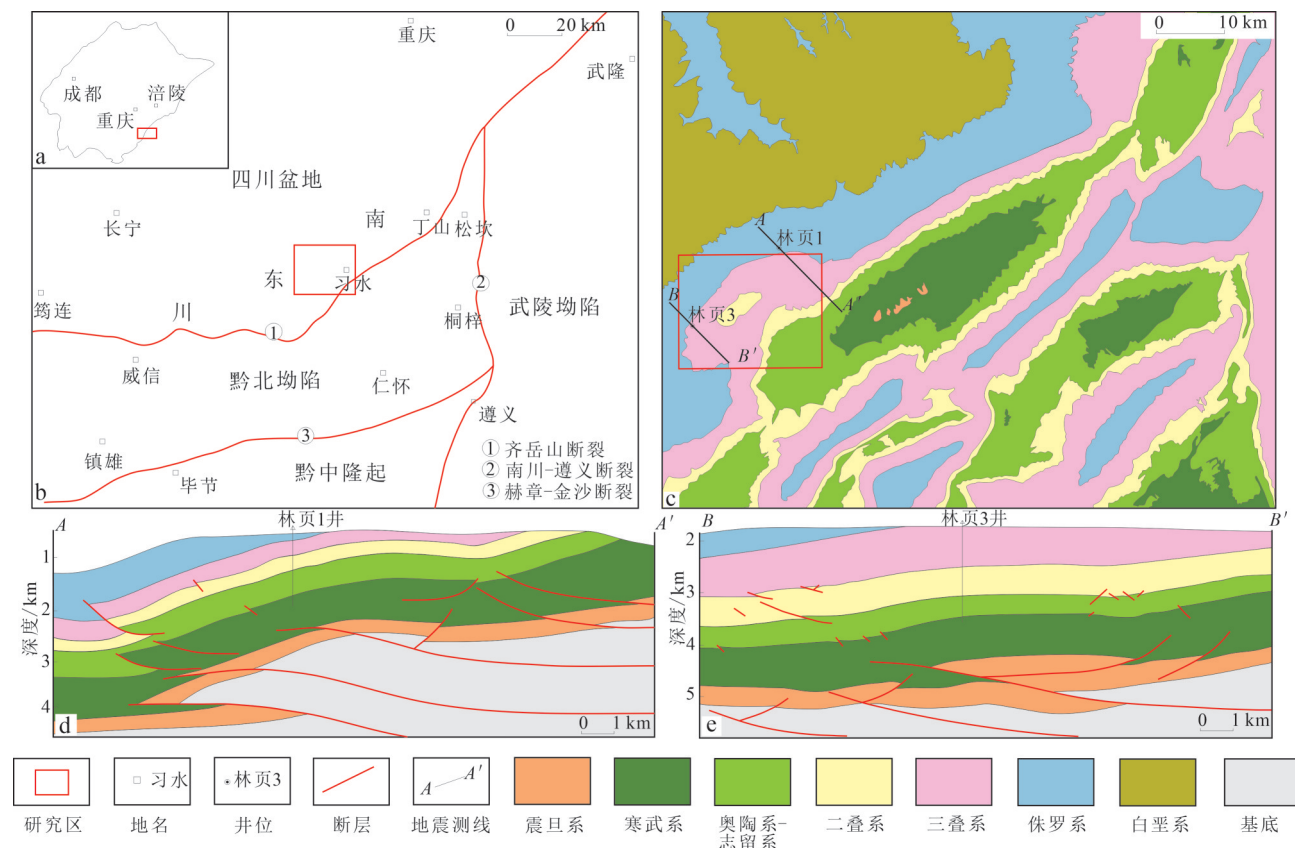


图1 川东南盆缘林滩场地区区域地质

Fig. 1 Regional geological map of the Lintanhe area, southeastern margin of Sichuan Basin

a. 四川盆地位置示意图; b. 川东南盆缘构造简图; c. 林滩场地区沉积地层; d, e. 过林滩场地区地震剖面(剖面位置见图1c)

侏罗系为主,构造高部位以二叠系和三叠系为主,震旦纪—中三叠世为海相沉积,沉积厚度约6 000 m,晚三叠世—白垩纪为陆相沉积,沉积厚度约为4 000 m。五峰组—龙一段沉积时期,林滩场处于深水陆棚有利相带,沉积了一套横向展布稳定的黑色富有机质页岩(厚度80~106 m)。

2 五峰组-龙马溪组页岩甜点区预测

2.1 储层地质特征

林页1井五峰组—龙一段底部4个黑色页岩样品腐泥组定形体含量94%~96%,平均95%,为I型干酪根;五峰组—龙一段有机质三叠纪初期开始大规模生烃,侏罗纪中、晚期进入生气阶段,镜质体反射率(R_o)为2.26%~2.48%,有机质热演化程度适中;另外,五峰组—龙一段下部主要沉积富碳、高硅微相的页岩,富有机质泥页岩段TOC含量为3.00%~5.40%,平均为4.48%,有机碳含量较高,生烃潜力较大。钻井薄片鉴定和X射线衍射全岩分析结果表明,川南探区海相页岩矿物成分比较复杂,除含有伊利石和高岭石

等粘土矿物外,石英、长石、云母以及方解石等碳酸盐矿物均较为发育。林页1井五峰组—龙一段80个样品分析表明,①—⑨号小层硅质平均含量40.28%,钙质矿物平均含量14.37%,粘土矿物平均含量42.83%,总体上表现为脆性矿物含量较高的特点。

林页1井五峰组—龙一段①—⑨号小层实测有效孔隙度(POR)1.50%~7.00%、平均3.91%,①—④号小层POR介于4.70%~7.00%,平均6.05%,纵向上,五峰组—龙一段POR自上而下逐渐增大,其中林页1井②号小层POR最大,平均7.00%;五峰组—龙一段岩心实测渗透率($0.000\ 3\sim0.223\ 0$) $\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均 $0.042\ 8\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,纵向上,龙一段底部渗透率较高,其中④号小层平均渗透率 $0.063\ 2\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,②和③号小层平均渗透率 $0.056\ 2\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,向上渗透率降低。林页1井88块岩心样品现场GAS实验数据统计表明,岩心实测总GAS为2.72~7.60 m³/t,均值4.18 m³/t,纵向上自上而下岩心实测GAS总体呈逐渐增大趋势。综合来看,赤水地区五峰组—龙一段页岩物性受微相和岩相的控制,从上往下逐渐变好,以五峰组—龙一段底部评价最优(表1)。

表1 川东南林滩场地区林页1井龙一段页岩储层地质与物性特征

Table 1 Geological and physical characteristics of shale reservoirs in the Long 1 Member in Well LY1, Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

岩性	黑灰色、灰色和黑色页岩					
地层	龙一段					
	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
TOC/%	3.0	1.1	0.8	0.7	0.8	—
POR/%	4.7	1.8	1.9	1.9	1.5	—
GAS/(m ³ ·t ⁻¹)	3.17	3.58	3.37	3.02	2.72	—
渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	0.005 2~0.223 0	0.001 4~0.103 6	0.002 6~0.102 2	0.001 0~0.012 7	—	—
R _o /%	2.26~2.48					
干酪根	腐泥组含量/%	94~96				
	镜质组含量/%	5				
	壳质组含量/%	—				
	类型	I				
矿物平均含量/%	硅质	40.28				
	钙质	14.37				
	粘土	42.83				

注:“—”表示未测量。

2.2 储层电性特征

林滩场五峰组-龙马溪组优质页岩具有明显的“三高两低”测井响应特征,即:高自然伽马(169 API)、高声波时差(78 μs/ft)和高电阻率(72 Ω·m),以及低中子(14%)和低密度(2.5 g/cm³)(图2)。

2.3 储层岩石物理分析

储层岩石物理分析是连接测井与地震的桥梁,其过程是采用交会分析和多元线性回归等手段,建立优质页岩 TOC、POR、GAS 与脆性指数(BI)等储层地质参数与地震弹性参数(纵波阻抗、横波阻抗、纵横波速度比、密度、岩石模量、体积模量和拉梅常数)的定量关系,再利用此定量关系开展 CRP 道集叠前同时反演,实现用地震弹性参数来对页岩储层地质甜点的平面分布预测^[44]。

利用林页1井岩心及测井解释的 TOC 含量进行储层岩石物理分析,发现密度、纵波阻抗、泊松比与 TOC 含量之间的相关性最好,相关系数最大值为 0.991 4,再将 TOC 与弹性参数进行多元回归线性分析(图3),得到最能反映4者之间相关性的拟合公式:

$$TOC = 49.935 - 16.180\rho - 8.137V_p - 1.290v \quad (1)$$

式中:TOC为总有机碳含量,%; ρ 为密度,g/cm³;V_p为纵波速度,m/s; v 为泊松比,无量纲。

POR与密度、纵横波速度比、泊松比相关性较好,

相关系数最大为0.999 2,多元拟合公式为:

$$POR = 0.441 - 0.134\rho - 0.018V_p/V_s - 0.131v \quad (2)$$

式中:POR为有效孔隙度,%;V_p/V_s为纵、横波速度比,无量纲。

GAS与密度、纵横波速度比相关性较好,相关系数最大值为0.9672,多元拟合公式为:

$$GAS = -47.204 - 148.358v + 51.059V_p/V_s - 0.569\rho \quad (3)$$

式中:GAS为含气量,m³/t。

BI与密度、纵横波速度比、泊松比之间具有较好的相关性,相关系数最大值为0.969 1,多元拟合公式为:

$$BI = 167.322 - 29.926V_p/V_s - 41.156v - 16.100\rho \quad (4)$$

式中:BI为脆性指数,无量纲。

从地质测井解释和反演预测的误差统计可知(表2),两者误差较小,预测精度整体较高,甜点参数平面分布规律和趋势与井点的一致性较好。

2.4 地质甜点平面预测

在对研究区五峰组-龙马溪组优质页岩储层地质特征和测井响应特征分析的基础上,运用岩石物理分析方法建立甜点参数与地震弹性参数的定量关系,开展叠后稀疏脉冲反演和叠前同时反演,获得纵波阻抗、横波阻抗、密度、泊松比和V_p/V_s等弹性参数(图4);再

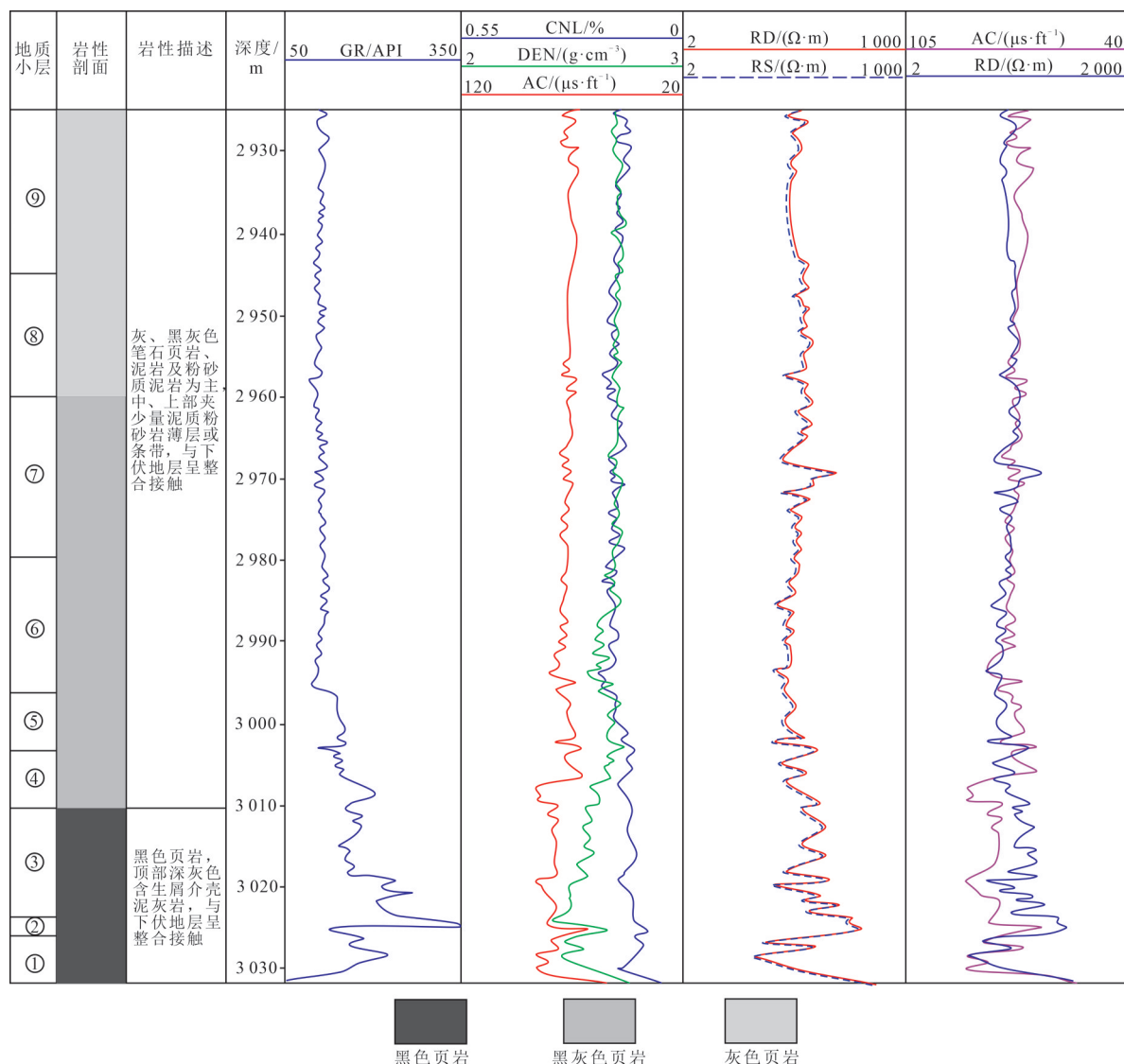


图2 川东南林滩场地区林页1井测井曲线

Fig. 2 Logging curves of Well LY1 in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

将地震弹性参数转换为页岩储层甜点参数,实现优质页岩段厚度, POR , TOC , GAS 和 BI 等甜点参数预测(图5)。

通过五峰组-龙马溪组 *TOC* 含量平面预测图(图 6a)可知, *TOC* 含量分布在 1.8%~3.0%, 林页 1 井附近略高(>3.0%), 中部和西南略低(2.0%~2.6%); *POR* 总体在 2%~5%, 横向变化不大, 西北部斜坡略低(图 6b); *GAS* 在 2%~5.5%, 高值区主要分布在东北部(图 6c)。

3 五峰组-龙马溪组页岩工程甜点预测

3.1 脆性指数

根据前面岩石物理分析结果,通过叠前反演得到

纵、横波速度比与密度数据体,可以计算获得 BI 。五峰组-龙马溪组 BI 平面预测图(图6d)显示,全区 BI 分布在48%~64%,工区北部、东北部和西南部为 BI 高值区, BI 分布在60~66,中部和南部为介于52~62的低值区,工区整体页岩可压性显示较好。

3.2 最大水平主应力差

通过水平主应力差可以对页岩工程甜点进行平面预测,在对非常规储层设计压裂改造时,人工裂缝的形态取决于气藏现今地应力的大小和方向,因此需保证水平井的方向垂直于最大主应力方向。在实际压裂施工中,裂缝的高度不是一成不变的,而是在沿最大水平主应力方向推进的过程中,在纵向上根据最小水平主应力的变化而变化的动态高度。水平主应力差较小的

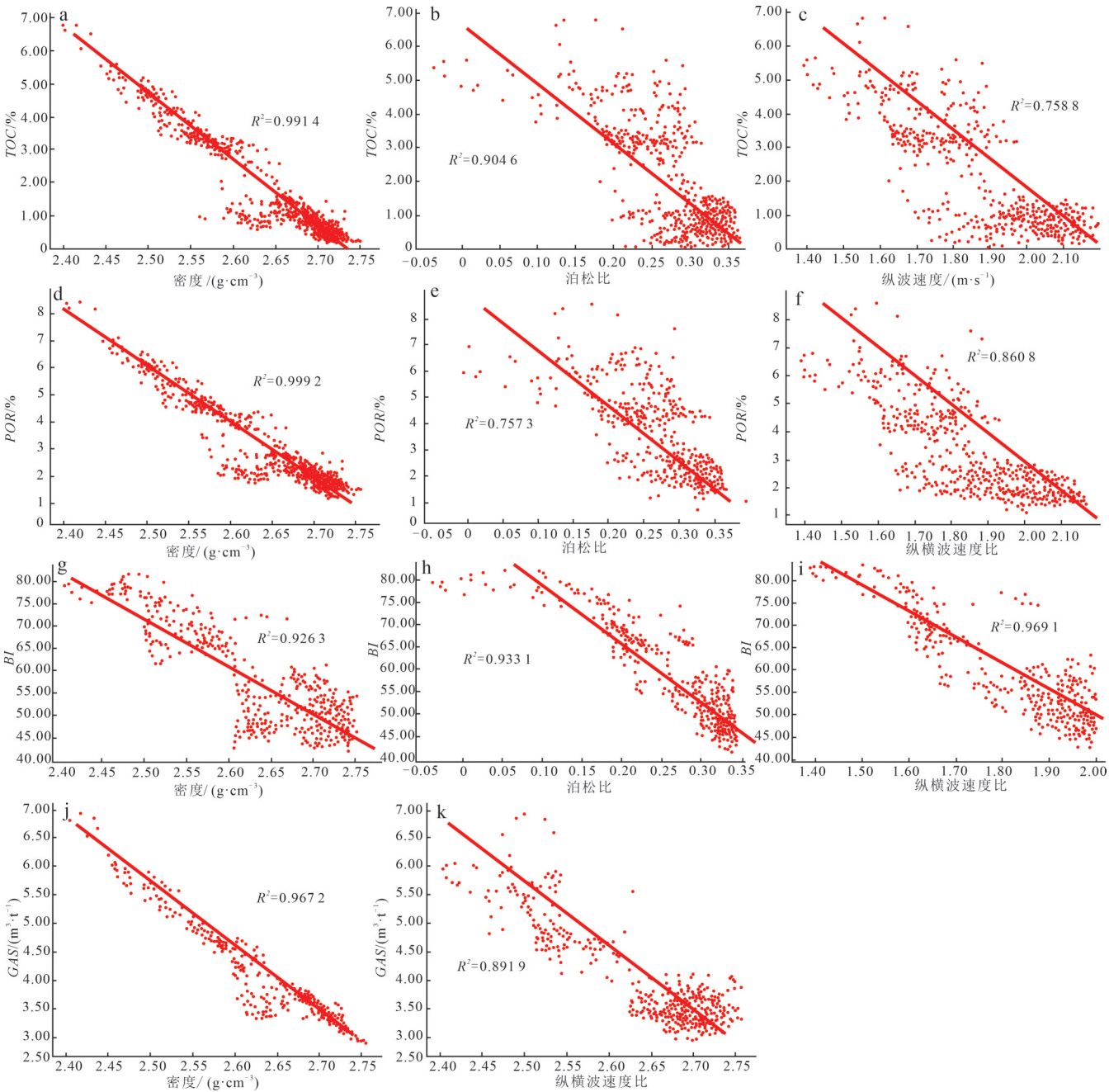


图3 川东南林滩场地区储层各地质参数与多弹性参数交会图

Fig. 3 The cross correlation of reservoir geological parameters and multi-elastic parameters in Lintanchang area , southeastern margin of Sichuan Basin
a—c. TOC; d—f. POR; g—i. BI; j, k. GAS

表2 川东南林滩场地区龙马溪组①—⑤号小层甜点参数误差统计

Table 2 Statistical table of parameter errors of sweet spots in sub-layers ①—⑤ in the Longmaxi Formation in Lintanhcang area, southeastern margin of Sichuan Basin

井名	POR/%			TOC/%			GAS/(m³·t⁻¹)			BI		
	测井	反演	误差	测井	反演	误差	测井	反演	误差	测井	反演	误差
林页1井	4.21	4.10	0.11	2.96	2.96	0	4.61	3.68	0.93	62.93	62.55	0.38
林1井	3.45	3.44	0.01	2.26	2.28	-0.02	4.58	4.99	-0.41	53.87	53.53	0.34
林页3井	4.16	4.26	-0.10	2.84	2.80	0.04	3.41	3.36	0.05	57.67	58.35	-0.68

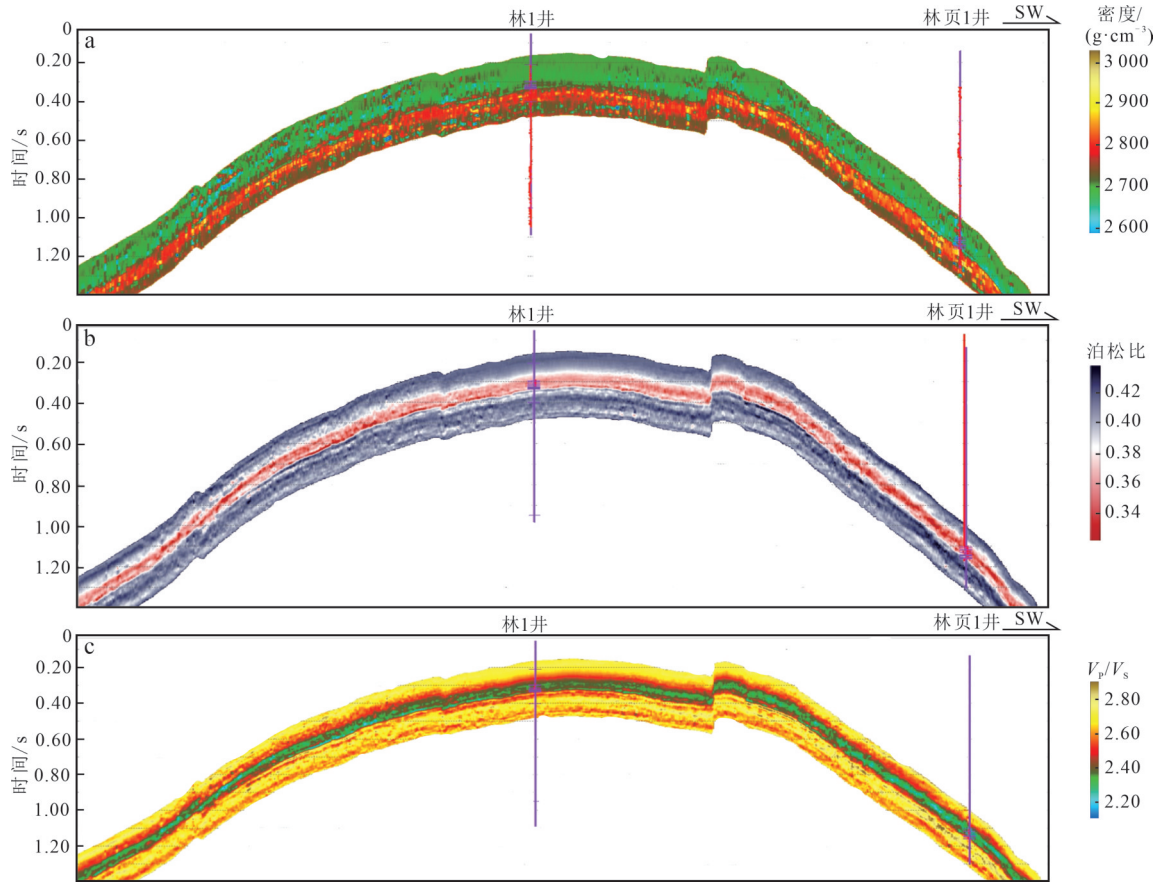


图4 川东南林滩场地区地震弹性参数反演剖面

Fig. 4 Reservoir inversion profile shown by seismic elastic parameters in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

a. 密度; b. 泊松比; c. 纵、横波速度比

部位,更易形成网状缝。

根据Schoengerg理论和Hooke力学定律建立的应力与应变数学关系公式(5),然后利用公式(6)计算最大与最小水平应力,最终利用公式(7)预测水平主应力差(D_{HSR})。五峰组-龙马溪组背斜核部区域为 D_{HSR} 高值区(图7),表明其两个方向的水平地层主应力差异较大,地层形变最强,与构造变形规律吻合。自背斜核部向两翼, D_{HSR} 逐渐降低,在工区西南部的林页3井区降至0.1左右,表明此区域水平应力差较小。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_h \\ \varepsilon_H \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} + Z_N & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \sigma_h \\ \sigma_H \\ \sigma_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_h = \sigma_z \frac{\nu(1+\nu)}{1+EZ_N-\nu^2} \\ \sigma_H = \sigma_z \frac{\nu(1+EZ_N-\nu)}{1+EZ_N-\nu^2} \end{cases} \quad (6)$$

$$D_{\text{HSR}} = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_H} = \frac{EZ_N}{1 + EZ_N + \nu} \quad (7)$$

式中: D_{HSR} 为水平主应力差,无量纲; E 为杨氏模量,MPa; ε 为应变,无量纲; Z_N 为法向柔度,无量纲; σ 为应力,MPa; H, h 和 z 分别为水平最大、水平最小和垂直地应力方向标识^[29]。

4 保存条件

南方海相页岩气符合“二元富集”规律,优质的生烃潜力是页岩气“成藏控储”的基础条件,保存条件则是“成藏控产”的关键^[45-55]。川东南地区构造变形十分复杂,经勘探实践表明,页岩气保存条件影响因素多样,主要有构造样式及地层倾角、断裂影响和地层压力系数。

4.1 地层倾角

地层倾角能够反映构造作用的强弱,地层倾角越大,说明构造变形强度大,不利于页岩气保存。林滩场

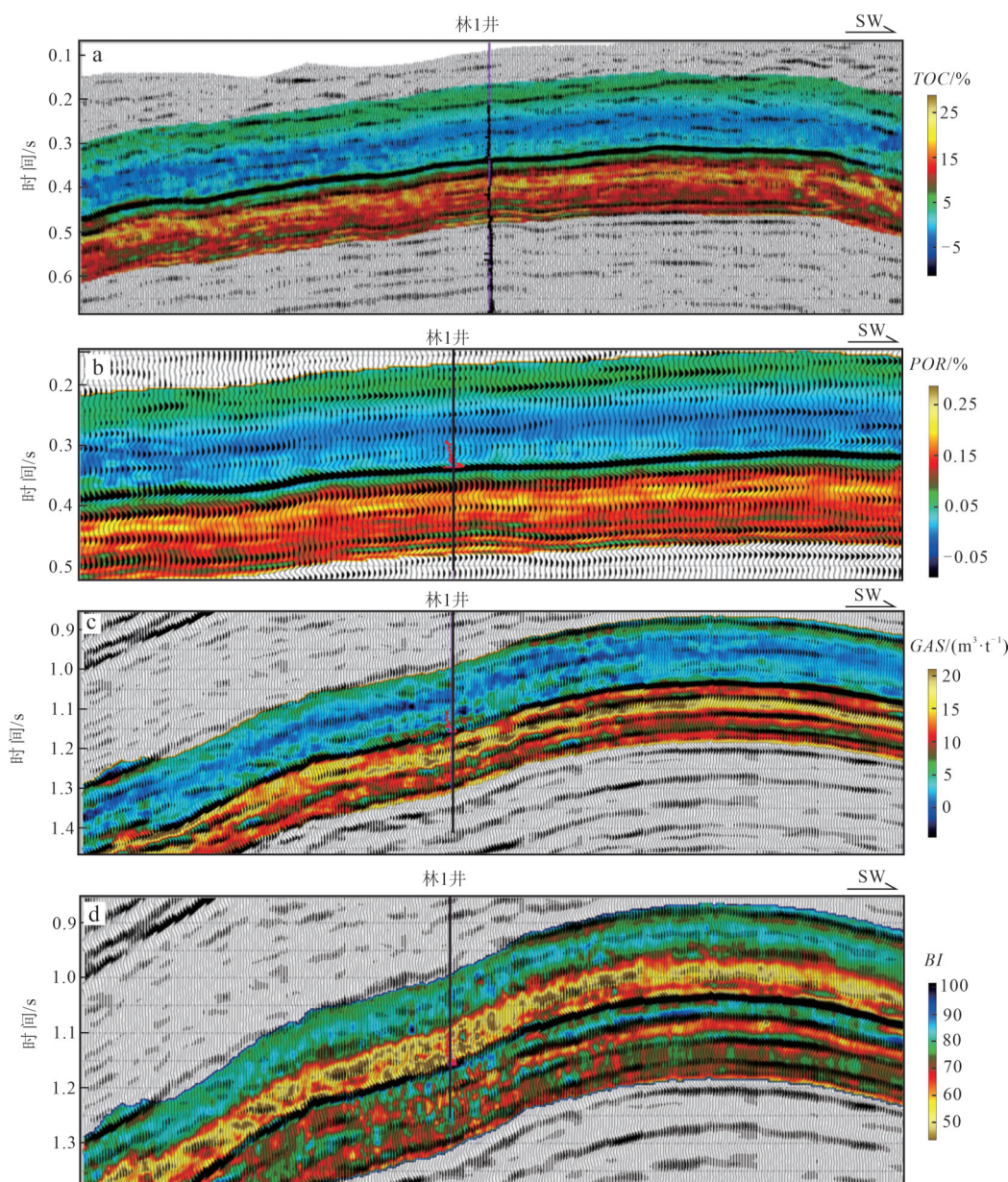


图5 川东南林滩场地区储层地质参数反演剖面

Fig. 5 Reservoir inversion profile shown by geological parameters in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

a. TOC; b. POR; c. GAS; d. BI

核部、南部构造变形强度弱,倾角较小($0^{\circ} \sim 20^{\circ}$),保存条件最为有利;北部地层倾角相对较小($10^{\circ} \sim 20^{\circ}$),向北东倾角缓慢增大($20^{\circ} \sim 30^{\circ}$),保存条件较为有利;西北部受到断层影响,倾角分布在($30^{\circ} \sim 60^{\circ}$),保存条件最差;东南部从背斜核部向两翼地层墙角逐渐变大($0^{\circ} \sim 50^{\circ}$),保存条件较差(图8a)。

4.2 断裂影响

远离大断裂相互连通的多套天然裂缝可改善储层的储集性能和渗透率,有效增加页岩储层的产量,因此裂缝分布预测工作十分重要。本文主要应用叠后地震

预测技术(相干属性和曲率属性)对林滩场地区的断裂进行预测。相干属性主要用来识别大断裂,表现为相干阴影特征,工区大断裂主要集中在林滩场背斜两翼,尤其是西北翼斜坡区为大断层及其伴生断裂发育区,背斜南、北段裂缝相对不发育。曲率属性主要反映由大断裂与小断裂诱导发育产生的微小尺度裂缝,工区内微小尺度裂缝主要集中在两翼,呈条带状分布(图8b,c)。

4.3 地层压力系数

地层压力系数是指实测地层压力与同深度静水

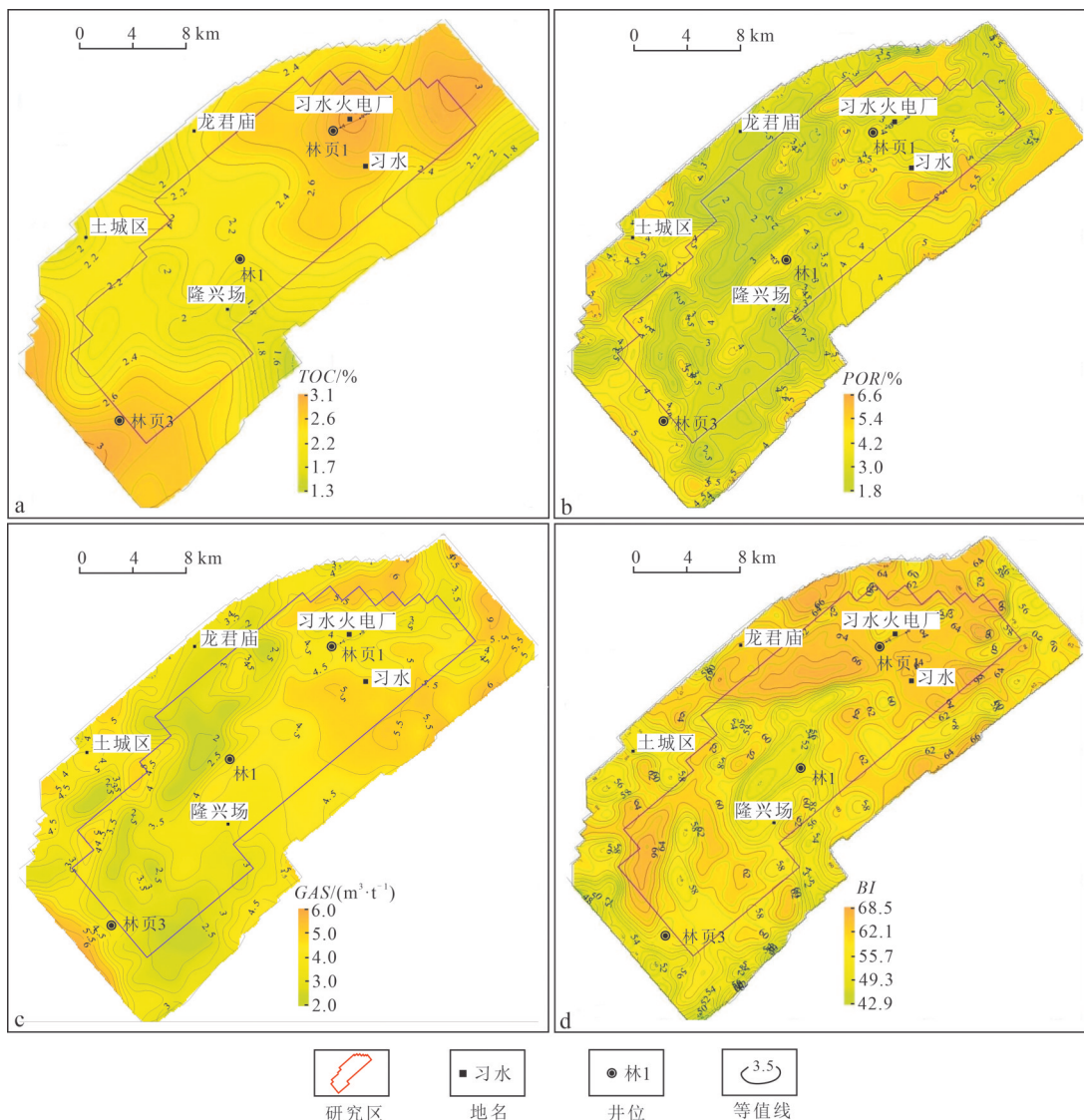


图6 川东南林滩场地区储层地质参数预测

Fig. 6 Prediction of reservoir geological parameters in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

a. TOC; b. POR; c. GAS; d. BI

压力之比,是衡量地层压力是否正常的一个指标。涪陵页岩气田勘探开发实践表明,压力系数与储层段总含气量、吸附气含气量和游离气含气量均呈正相关性。因此,地层压力系数是优选页岩气“甜点”区的一个重要参数。本文选用了适合砂泥岩地层的Eaton法,该方法根据压实理论,结合有效应力和均衡理论,综合考虑压力的形成机制和测井信息之间的关系,建立正常压实趋势线预测地层压力及压力系数。全区五峰组-龙马溪组页岩地层压力系数变化较大,在0.7~1.9,其中背斜核部区域地层压力系数较低(1.0~1.1),自核部向两翼随着埋深的增加,地层压力系数逐渐升高,林页3井附近达到1.6,由此推测在相同的勘探开发条件下,工区东南部页岩气产能可能更高(图8d)。

5 龙马溪组油气综合评价

参照《中国石化海相页岩气目标优选评价系统》中“页岩气目标评价技术规范”,综合页岩 TOC、POR、GAS、BI、水平主应力差、地层倾角、断裂影响和地层压力系数进行页岩气目标综合评价(表3),评价出页岩气 I 类区、II 类区和远景区(图9)。林滩场地区龙马溪组页岩气埋深有利面积为 290.68 km²,资源量 1 650.90 × 10⁸ m³,其中 I 类区资源量 1 274.00 × 10⁸ m³, II 类区资源量 376.90 × 10⁸ m³,远景区资源量 911.38 × 10⁸ m³, I 类区及远景区资源丰度 5.93 × 10⁸ m³/km², II 类区资源丰度 4.97 × 10⁸ m³/km²,资源潜力大,具有良好的勘探开发潜力。

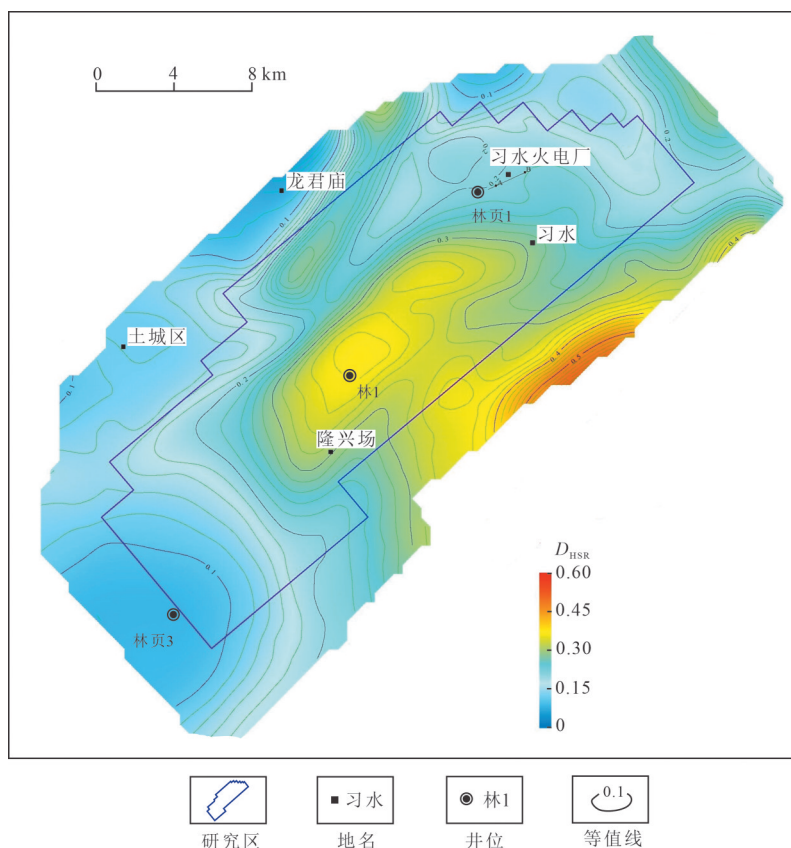


图7 川东南林滩场地区五峰组-龙马溪组 D_{HSR} 预测

Fig. 7 Prediction of D_{HSR} of Wufeng-Longmaxi Formations in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

6 实例验证

通过利用以上页岩甜点区预测成果,2019年在林滩场构造南部倾没端部署实施了林页3井,该井完钻井深5 830 m,水平段长1 500 m,气测全烃含量3.67%~26.76%、平均16.16%, C_1 含量为2.42%~25.73%、平均14.76%,综合评价I类储层1 467 m, TOC 含量5.3%, POR 为7.8%, GAS 为5.2 m³/t, BI 为64,整体油气显示较好。采用“多段多簇密切割+高砂比超强加砂+大排量”压裂工艺和变粘压裂液体系,完成28段和13簇压裂改造,测试产量 17×10^4 m³/d,取得了勘探重大突破。为进一步扩大勘探成果,实现商业突破,目前在南、北倾没端继续部署了2口探井即林页10井和林页7井,其中林页10井已获总部同意,正在准备实施。

林页3井的突破进一步证实了林滩场良好的勘探开发潜力及甜点区预测的准确性。应用此方法对页岩储层甜点区做出精准平面预测,对实现川东南盆缘复杂构造区页岩气勘探开发一体化具有重要的指导意义。

7 结论

1) 林滩场五峰组-龙马溪组优质页岩具有高自然伽马、高声波时差和高电阻率,以及低中子和低密度的测井响应特征,通过岩心样品分析测试数据、储层地质岩性特征以及储层岩石物理分析建立储层评价参数(TOC , POR , GAS 和 BI 等)与地震弹性参数(纵波阻抗、横波阻抗、纵横波速度比、密度和泊松比)的定量关系。利用叠前反演效果分析获得纵横波速度比、密度和泊松比反演剖面,根据定量关系预测 TOC , POR , BI 和 GAS 的平面图。

2) 针对川东南盆缘复杂构造区建立页岩气甜点预测评价体系,最终确定林滩场地区页岩气勘探有利区面积88.83 km²,位于研究区南部与东北部。根据实例验证,林页3井的实钻结果证明甜点预测结果的准确性,林页3井位于甜点预测有利区, TOC 含量为5.3%, POR 为7.8%, GAS 为5.2 m³/t, BI 为64.0,综合评价为I类储层,有利于压裂施工改造,采用“多段多簇密切割+高砂比超强加砂+大排量”压裂工艺和变粘压裂液体系,单井测或日产气量较高,勘探开发前景十

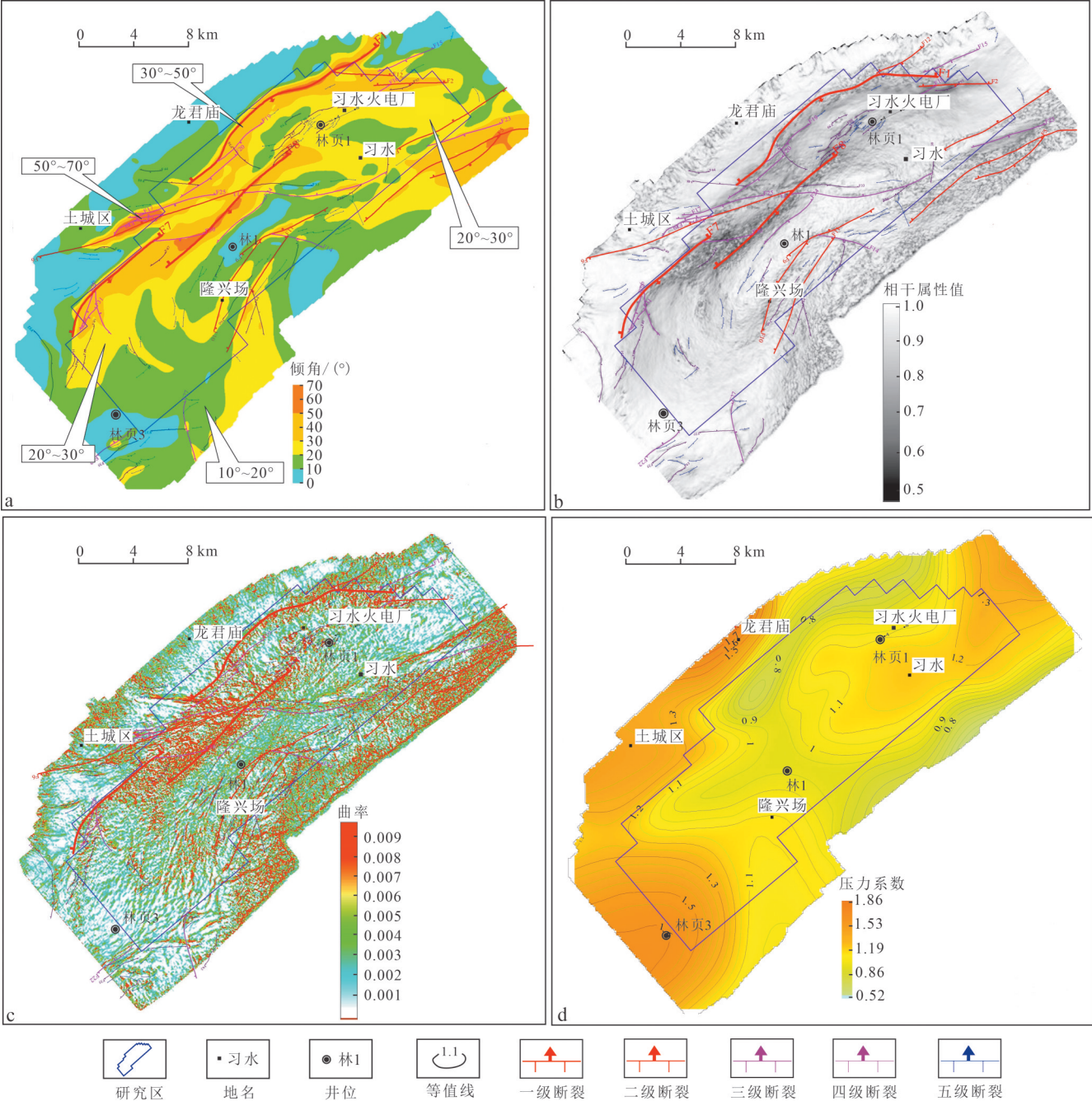


图 8 川东南林滩场地区五峰组-龙马溪组地层倾角平面分布(a)、地震相干属性(b)、地震曲率属性(c)以及压力系数预测(d)

Fig. 8 Planar distribution map of dip angle (a), seismic coherence attributes (b), seismic curvature attributes (c), and pressure coefficient prediction (d) of Wufeng-Longmaxi Formations in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

表 3 川东南林滩场地区 I 类区与 II 类区参数对比

Table 3 Comparison of parameters between zones of Type I and Type II in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

综合评价	地质参数			工程参数		保存条件			
	TOC/%	POR/%	GAS/(m ³ ·t ⁻¹)	BI	D _{HSR}	地层倾角/ (°)	断裂影响		地层压力系数
							相干属性值	曲率属性值	
I 类区	>3.0	>4.0	>5.0	>55.0	>0.1	<10	>0.9	<0.002	<0.8
II 类区	2.0~3.0	3.0~4.0	4.0~5.0	50.0~55.0	0.1~0.2	10~20	0.7~0.9	0.002~0.007	0.8~1.2
远景区	<2.0	<3.0	<4.0	<50.0	>0.2	>20	<0.7	>0.007	>1.2

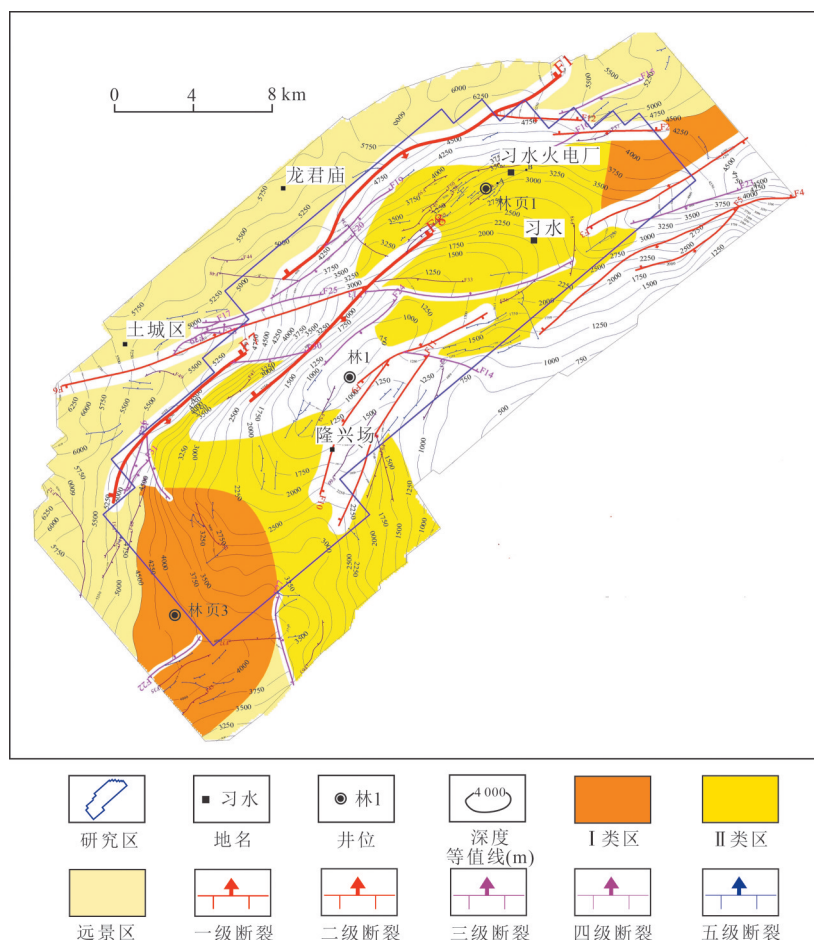


图9 川东南林滩场地区五峰组-龙马溪组储层有利区综合评价

Fig. 9 Composite evaluation of play fairways in the Wufeng-Longmaxi Formations in Lintanchang area, southeastern margin of Sichuan Basin

分可观。

3) 地质甜点、工程甜点与保存条件的一体化预测对林滩场乃至整个川东南盆缘复杂构造区页岩气产能规模增长、勘探开发一体化的实现都具有重要的指导和借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561-574.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (4), 561-574.
- [2] 郭彤楼. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 317-326.
Guo Tonglou. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 317-326.
- [3] 郭彤楼,何希鹏,曾萍,等. 复杂构造区页岩气藏地质特征与效益开发建议——以四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1490-1500.
Guo Tonglou, He Xipeng, Zeng Ping, et al. Geological characteristics and beneficial development scheme of shale gas reservoirs in complex tectonic regions: A case study of Wufeng-Longmaxi Formations in Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1490-1500.
- [4] Guo T L. Evaluation of highly thermally mature shale-gas reservoirs in complex structural parts of the Sichuan Basin[J]. Journal of Earth Science, 2013, 24(6): 863-873.
- [5] 郭旭升,胡东风,段金宝. 中国南方海相页岩气勘探展望[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 675-686.
Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Duan Jinbao. Marine petroleum exploration in South China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42 (5), 675-686.
- [6] 周庆凡. 页岩油气资源评价基本问题的讨论[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 26-33.
Zhou Qingfan. Discussion on key issues of shale oil/gas resource assessment[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 26-33.
- [7] 黎茂稳,马晓潇,金之钧,等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 1-25.
Li Maowen, Ma Xiaoxiao, Jin Zhijun, et al. Diversity in the litho-

- facies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 1-25.
- [8] 蔡勋育,赵培荣,高波,等. 中国石化页岩气“十三五”发展成果与展望[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 16-27.
Cai Xunyu, Zhao Peirong, Gao Bo, et al. Sinopec's shale gas development achievements during the "Thirteenth Five-Year Plan" period and outlook for the future[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 16-27.
- [9] 蔡勋育,刘金连,张宇,等. 中国石化“十三五”油气勘探进展与“十四五”前景展望[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(1): 31-42.
Cai Xunyu, Liu Jinlian, Zhang Yu, et al. Oil and gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan period and prospect forecast for the 14th Five-Year Plan[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(1): 31-42.
- [10] 郭彤楼. 深层页岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(1): 1-6.
Guo Tonglou. Progress and research direction of deep shale gas exploration and development[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(1): 1-6.
- [11] 邹才能,赵群,从连铸,等. 中国页岩气开发进展、潜力及前景[J]. *天然气工业*, 2021, 41(1): 1-14.
Zou Caineng, Zhao Qun, Cong Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 1-14.
- [12] 邓宾,刘树根,杨锁,等. 林滩场构造多期节理构造特征及其意义[J]. *矿物岩石*, 2009, 29(3): 83-90.
Deng Bin, Liu Shugen, Yang Suo, et al. Structural characteristics of joints and its' implication in the lintanchang anticline[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2009, 29(3): 83-90.
- [13] 郭彤楼. 元坝气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2019, 40(6): 748-760.
Guo Tonglou. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Yuanba gas field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(6): 748-760.
- [14] 方志雄. 中国南方常压页岩气勘探开发面临的挑战及对策[J]. *油气藏评价与开发*, 2019, 9(5): 1-13.
Fang Zhixiong. Challenges and countermeasures for exploration and development of normal pressure shale gas in southern China[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9(5): 1-13.
- [15] 何希鹏,卢比,何贵松,等. 渝东南构造复杂区常压页岩气生产特征及开发技术政策[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 225-240.
He Xipeng, Lu Bi, He Guisong, et al. Production characteristics and optimized development technologies for normal-pressure shale gas in the structurally complex areas of southeastern Chongqing[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 225-240.
- [16] 何希鹏,齐艳平,何贵松,等. 渝东南构造复杂区常压页岩气富集高产主控因素再认识[J]. *油气藏评价与开发*, 2019, 9(5): 32-39.
He Xipeng, Qi Yanping, He Guisong, et al. Further understanding of main controlling factors of normal pressure shale gas enrichment and high yield in the area with complex structure of the southeast area of Chongqing[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9(5): 32-39.
- [17] 高玉巧,蔡潇,何希鹏,等. 渝东南盆缘转换带五峰组-龙马溪组页岩压力体系与有机孔发育关系[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(2): 662-674.
Gao Yuqiao, Cai Xiao, He Xipeng, et al. Relationship between shale pressure system and organic pore development of Wufeng-Longmaxi Formation in marginal conversion zone of Southeastern Chongqing Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(2): 662-674.
- [18] 卢志远,何治亮,余川,等. 复杂构造区页岩气富集特征——以四川盆地东南部丁山地区下古生界五峰组-龙马溪组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 86-97.
Lu Zhiyuan, He Zhiliang, Yu Chuan, et al. Characteristics of shale gas enrichment in tectonically complex regions——A case study of the Wufeng-Longmaxi Formations of Lower Paleozoic in southeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 86-97.
- [19] 倪楷,王明筏,李响. 四川盆地东南缘页岩气富集模式——以丁山地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩为例[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(4): 580-588.
Ni Kai, Wang Mingfa, Li Xiang. Enrichment model of shale gas in southeastern Sichuan Basin: A case study of Upper Ordovician Wufeng and Lower Silurian Longmaxi Formations in Dingshan area[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(4): 580-588.
- [20] 刘树根,马永生,蔡勋育,等. 四川盆地震旦系一下古生界天然气成藏过程和特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(4): 345-354.
Liu Shugen, Ma Yongsheng, Cai Xunyu, et al. Characteristics and accumulation process of the natural gas from Sinian to lower Paleozoic in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 2009, 36(4): 345-354.
- [21] 张桢伟. 松辽盆地查干湖南青一段页岩油[D]. 西安:西安石油大学, 2020.
Zhang Zhenwei. Prediction of shale oil reservoir dessert in the first section of Qing-1 in the south of Chagan Lake, Songliao Basin[D], Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.
- [22] 王勇,龙凡,杨建礼,等. 叠前反演在龙虎泡致密油“工程甜点”预测中的应用[J]. *石油物探*, 2020, 59(1): 114-121.
Wang Yong, Long Fan, Yang Jianli, et al. Prestack elastic inversion for “geomechanical sweet spot” prediction in Lonhupao region of Songliao Basin, China[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2020, 59(1): 114-121.
- [23] 曾茂才,陈胜,贺佩,等. 四川盆地威远龙马溪组页岩气甜点区地震定量预测[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(3): 406-414.
Zeng Qingcai, Chen Sheng, He Pei, et al. Quantitative seismic prediction of shale gas sweet spots in Lower Silurian Longmaxi Formation, Weiyuan area, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(3): 406-414.
- [24] 王迪,张益明,刘志斌,等. AVO定量解释模版在LX地区致密

- 气“甜点”预测中的应用[J]. 石油物探, 2020, 59(6): 936-948.
- Wang Di, Zhang Yiming, Liu Zhibin, et al. Application of an AVO template to identify sweet spots in a tight sandstone reservoir in the LX area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(6): 936-948.
- [25] 徐森. 非常规油气藏地震储层预测方法研究与应用——以新疆乌夏地区风城组致密油地震预测为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- Xu Sen. Research on seismic reservoir prediction method for unconventional reservoirs and its application——A case study of seismic prediction of tight oil in Fengcheng Formation in Wuxia, Xinjiang[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [26] 陈超, 印兴耀, 陈祖庆, 等. 深层页岩气工程“甜点”地震预测技术探讨——以DS地区为例[J]. 石油物探, 2021, 60(4): 632-642.
- Chen Chao, Yin Xingyao, Chen Zuqing, et al. A seismic prediction strategy for engineering “sweet spots” in deep shale gas exploration: A case study in DS area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(4): 632-642.
- [27] 韩向义. 页岩气储层甜点地震预测方法研究及应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- Han Xiangyi. Research and application of seismic prediction method for shale gas reservoir sweet spots[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [28] 王志伟, 赵永刚, 阴钰毅, 等. 页岩气“甜点”地震预测研究[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(1): 37-41.
- Wang Zhiwei, Zhao Yonggang, Yin Yuyi, et al. Seismic prediction of “sweet spots” for shale gas[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2020, 34(1): 37-41.
- [29] 梁志强. 不同尺度裂缝的叠后地震预测技术研究[J]. 石油物探, 2019, 58(5): 766-772.
- Liang Zhiqiang. Poststack seismic prediction techniques for fractures of different scales[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(5): 766-772.
- [30] 刘振峰, 曲寿利, 孙建国, 等. 地震裂缝预测技术研究进展[J]. 石油物探, 2012, 51(2): 191-198.
- Liu Zhenfeng, Qu Shouli, Sun Jianguo, et al. Progress of seismic fracture characterization technology[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(2): 191-198.
- [31] 叶艳. 储层裂缝高精度综合预测及含气性检测研究与应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- Ye Yan. Comprehensive prediction of precise reservoir fracture and the application study on the gas-bearing detection[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [32] 严川荣. 四川盆地威远东-荣昌北区块页岩气岩石物理特征及在“甜点区”地震预测中的应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- Yan Chuanrong. Shale gas rock physics characteristics of the Weiyuan East-Rongchang North block in the Sichuan Basin and their application in “sweet spot” seismic prediction[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [33] 王濡岳, 胡宗全, 周彤, 等. 四川盆地及其周缘五峰组-龙马溪组页岩裂缝发育特征及其控储意义[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1295-1306.
- Wang Ruyue, Hu Zongquan, Zhou Tong, et al. Characteristics of fractures and their significance for reservoirs in Wufeng-Longmaxi Shale, Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1295-1306.
- [34] 唐建明, 徐天吉, 程冰洁, 等. 四川盆地深层页岩气“甜点”预测与钻井工程辅助设计技术[J]. 石油物探, 2021, 60(3): 479-487.
- Tang Jianming, Xu Tianji, Cheng Bingjie, et al. Sweet spot prediction and aided design for drilling engineering: Application to deep shale gas reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(3): 479-487.
- [35] 韩飞鹏, 宋光建, 吴振坤, 等. 致密油“甜点”多属性融合预测技术[J]. 特种油气藏, 2019, 26(1): 94-99.
- Han Feipeng, Song Guangjian, Wu Zhenkun, et al. Multi-attribute fusion prediction technique for tight oil “sweets”[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2019, 26(1): 94-99.
- [36] 李久娣. 东海西湖N区块致密砂岩气藏甜点预测研究[J]. 石油物探, 2020, 58(3): 444-452.
- Li Jiudi. “Sweet Spot” prediction of a tight sandstone gas reservoir in the N Block in Xihu Sag, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(3): 444-452.
- [37] 刘财, 邓馨卉, 郭智奇, 等. 基于岩石物理的页岩储层各项异性表征[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(2): 339-346.
- Liu Cai, Deng Xinhui, Guo Zhiqi, et al. Shale reservoir anisotropic characterization based on rock physics[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(2): 339-346.
- [38] 宋光永, 刘树根, 黄文明, 等. 川东南丁山-林滩场构造灯影组热液白云岩特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(6): 706-715.
- Song Guangyong, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Characteristics of hydrothermal dolomite of Upper Sinian Dengying Formation in the Dingshan-Lintanchang structural zone, Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2009, 36(6): 706-715.
- [39] 马文辛, 刘树根, 黄文明, 等. 四川盆地东南缘林滩场构造二叠系沥青的地球化学特征及意义[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 1064-1075.
- Ma Wenxin, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Geochemical characteristics and its significance of permian bitumen from Lintanchang Structure in Southeast Margin of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 1064-1075.
- [40] 钟城, 秦启荣, 胡东风, 等. 川东南丁山地区五峰组-龙马溪组页岩气藏“六性”特征[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(2): 14-24.
- Zhong Cheng, Qin Qirong, Hu Dongfeng, et al. Experimental study on “six properties” of shale gas reservoirs in the Wufeng-Longmaxi Formation in Dingshan area, southeastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(2): 14-24.
- [41] 钟城, 秦启荣, 魏志红, 等. 酒店坝-桑木场构造须家河组节理发育特征与应力场解析[J]. 现代地质, 2018, 32(2): 279-288.

- Zhong Cheng, Qin Qirong, Wei Zhihong, et al. Characteristics and tectonic stress field of joints in Xujiahe Formation of Jiudian-ya-Sangmuchang Structure [J]. *Geoscience*, 2018, 32(2): 279-288.
- [42] 钟城. 川东南丁山地区龙马溪组页岩裂缝特征及其与含气性关系[D]. 成都:西南石油大学, 2019.
- Zhong Cheng. Fracture characteristics of Longmaxi Formation shale and its relationship with gas content in Dingshan area, southeastern Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [43] 马军. 页岩裂缝成因及其对含气性影响——以渝东南地区阳春沟构造带五峰-龙马溪组为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(3): 126-134.
- Ma Jun. Origin of shale fractures and its influence on gas-bearing properties: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Yangchongou structural belt in southeast Chongqing [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(3): 126-134.
- [44] 邓宇, 陈胜, 欧阳永林, 等. 川西南威远地区页岩气效益“甜点区”地震综合预测方法及其应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2019, 38(2): 112-122.
- Deng Yu, Chen Sheng, Ouyang Yonglin, et al. Seismic comprehensive predicting method and its application of the shale gas effect “sweet spot region” in Weiyan area of Southwest Sichuan [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2019, 38(2): 112-122.
- [45] 郭旭升. 南海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. *地质学报*, 2014, 88(7): 1209-1218.
- Guo Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in Southern China: Understanding from the Longmaxi formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [46] 魏祥峰, 李宇平, 魏志红, 等. 保存条件对四川盆地及周缘海相页岩气富集高产的影响机制[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(2): 147-153.
- Wei Xiangfeng, Li Yuping, Wei Zhihong, et al. Effects of preservation conditions on enrichment and high yield of shale gas in Sichuan Basin and its periphery [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(2): 147-153.
- [47] 王濡岳, 丁文龙, 龚大建, 等. 黔北地区海相页岩气保存条件——以贵州岑巩区块下寒武统牛蹄塘组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 45-55.
- Wang Ruyue, Ding Wenlong, Gong Dajian, et al. Gas preservation conditions of marine shale in northern Guizhou area: A case study of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Cen'gong Block, Guizhou Province [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 45-55.
- [48] 胡东风. 四川盆地东南缘向斜构造五峰组-龙马溪组常压页岩气富集主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(5): 605-615.
- Hu Dongfeng. Main controlling factors on normal pressure shale gas enrichments in Wufeng-Longmaxi Formations in synclines, southeastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(5): 605-615.
- [49] 魏力民, 王岩, 张天操, 等. 页岩气富集与高产主控因素——以川南地区五峰组-龙马溪组为例[J]. *断块油气田*, 2020, 27(6): 700-704.
- Wei Limin, Wang Yan, Zhang Tiancao, et al. Main control factors of enrichment and high production of shale gas: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Southern Sichuan [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(6): 700-704.
- [50] 汪生秀, 汪威, 张志平, 等. 渝东南强变形区断裂对页岩气藏保存条件的控制作用[J]. *断块油气田*, 2020, 27(6): 695-699.
- Wang Shengxiu, Wang Wei, Zhang Zhiping, et al. Controlling effect of faults in strong deformation zone on shale gas reservoir preservation conditions in southeast Chongqing [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(6): 695-699.
- [51] 许露露, 温雅茹, 张焱林, 等. 鄂西地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩含气性特征及保存条件[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(3): 395-405.
- Xu Lulu, Wen Yaru, Zhang Yanlin, et al. Gas-bearing characteristics and preservation conditions of Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Shale in western Hubei [J]. *Petroleum Geology & Experiment* 2021, 43(3): 395-405.
- [52] Zhao Z H, Wu K D, Fan Y, et al. An optimization model for conductivity of hydraulic fracture networks in the Longmaxi Shale, Sichuan Basin, Southwest China [J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(1/2): 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.05.001>.
- [53] Li Y Z. Mechanics and fracturing techniques of deep shale from the Sichuan Basin, SW China [J]. *Energy Geoscience*, 2021, 2(1): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.06.002>.
- [54] 李海, 白云山, 王保忠, 等. 湘鄂西地区下古生界页岩气保存条件[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(6): 22-25.
- Li Hai, Bai Yunshan, Wang Baozhong, et al. Preservation conditions research on shale gas in the lower Paleozoic of western Hunan and Hubei area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(6): 22-25.
- [55] 徐政语, 姚根顺, 梁兴, 等. 扬子陆块下古生界页岩气保存条件分析[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(4): 407-417.
- Xu Zhengyu, Yao Genshun, Liang Xing, et al. Shale gas preservation conditions in the Lower Paleozoic, Yangtze Block [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(4): 407-417.

(编辑 梁 慧)