

川西南寒武系筇竹寺组优质页岩地震综合预测

李曙光

中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都
Email: lishuguang.xnyq@siopec.com

收稿日期: 2020年12月15日; 录用日期: 2021年2月19日; 发布日期: 2021年2月26日

摘要

川西南地区寒武系筇竹寺组地层较老, 优质页岩纵向和横向变化较大。筇竹寺组优质页岩的地震预测, 重点在于对优质页岩储层参数展布的刻画及可压性和保存条件的评价。通过高精度叠前叠后地震反演, 有效预测优质页岩小层厚度及TOC、孔隙度、含气量的平面分布, 通过地震脆性预测和基于P波各向异性页岩微裂缝预测评价页岩可压性, 结合地层压力预测评价保存条件, 形成针对性的预测技术体系, 综合评价优质页岩有利区及页岩气勘探开发潜力。

关键词

筇竹寺组, 优质页岩, 脆性, 各向异性, 地层压力

Comprehensive Seismic Prediction of High-Quality Shale in the Cambrian Qiongzhusi Formation in Southwestern Sichuan

Shuguang Li

Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil-Gas Field Company, SINOPEC, Chengdu Sichuan
Email: lishuguang.xnyq@siopec.com

Received: Dec. 15th, 2020; accepted: Feb. 19th, 2021; published: Feb. 26th, 2021

Abstract

The Cambrian Qiongzhusi Formation in the southwestern Sichuan Basin is older, and the high-quality shale has great vertical and horizontal changes. The seismic prediction of high-quality shale in the

Qiongzhusi Formation focuses on the description of the distribution of shale reservoir parameters and the evaluation of compressibility and preservation conditions. Through high-precision pre-stack and post-stack seismic inversion, the thickness of high-quality shale layers and the plane distribution of TOC, porosity and gas content are effectively predicted, and shale is evaluated through seismic brittleness prediction and P-wave anisotropic shale micro-fracture prediction. Compressibility, combined with formation pressure prediction, evaluation and preservation conditions, forming a targeted prediction technology system to comprehensively evaluate favorable areas of high-quality shale and shale gas exploration and development potential.

Keywords

Qiongzhusi Formation, High-Quality Shale, Brittleness, Anisotropy, Formation Pressure

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

下寒武统筇竹寺组作为一套较古老的烃源岩沉积，在四川盆地分布较为广泛，被海相页岩气勘探寄与厚望[1]。中石油、中石化先后针对筇竹寺开展了大量的勘探实践，并取得了一些成果[2]，但目前并没有取得商业性的突破。筇竹寺组页岩气分布面积大，资源量大，仍然是志留统龙马溪组之后，勘探潜力较好的页岩气目标[3] [4]。

川西南筇竹寺组埋藏深度适中，但优质页岩纵向和横向变化较大，预测和评价的难度相对较高。以川西南 JY 地区筇竹寺组为例，针对该区筇竹寺组优质页岩的特征，采用针对性的地震预测技术开展优质页岩的预测评价，形成适用于川西南筇竹寺组页岩气的地震预测思路及方法，为筇竹寺组页岩气的勘探开发提供支撑。

2. 地质概况

川西南 JY 地区寒武系筇竹寺组纵向上发育泥质陆棚页岩沉积，颜色以灰黑、黑色为主。富有机质页岩层段主要处于深水陆棚相沉积，黑色页岩及深灰色含砂质页岩发育，浮游生物繁茂，由于水体较深，处于相对缺氧的静水环境，有利于有机质的保存。区域构造相对较稳定，区内褶皱与断裂主要形成于喜山运动早幕(四川运动)，主要受南东和北西向水平侧向挤压应力场的作用，构造走向主要呈北东向或北北东向近平行状排列展布。

在构造背景的约束下，结合早寒武世筇竹寺期岩相古地理及单井沉积相研究，认为该地区位于绵阳拉张槽的边缘过渡带，其沉积模式存在一定程度的变迁[5]。筇竹寺早期，由于受桐湾运动抬升剥蚀的影响，区内表现为南东低，北西高的沉积格局；筇竹寺后期，由于受兴凯运动拉张的影响，绵阳-长宁拉张槽范围不断扩大，发生构造反转，区内表现为南东低，北西高的沉积格局。因此，区内页岩发育纵向上变化频繁，横向上分布不稳定，与志留系龙马溪组连续、稳定沉积，优质页岩变化平缓的情形差别较大。

根据野外地质剖面岩性组合、沉积特征，可将筇竹寺组分为上、下两段，上段为筇第二段，岩性为深灰、灰黄色粉砂质页岩、页岩夹薄层粉岩、泥岩，下段为筇第一段，主要以黑色高碳质页岩或碳质泥岩为主，夹少量灰绿色薄层砂岩或黄棕色细砂岩，底为富含黄铁矿及有机质的黑色硅质岩及磷块岩。

在筇竹寺组两亚段划分的基础上,结合沉积特征、岩性组合、电性、含气性、地震波形等,根据探井实钻、测试情况,进一步划分为11个小层,见图1,其中①、⑤、⑨号层为黑色页岩,是筇竹寺组最为优质的页岩小层,为预测评价的主要目标。

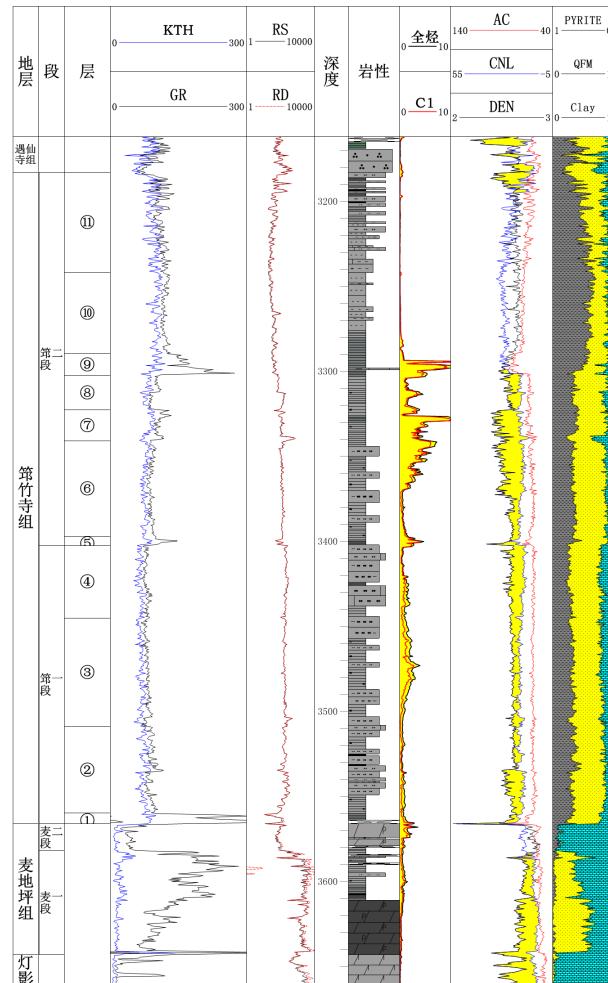


Figure 1. Vertical favorable shale gas formations in JY1 well
图 1. JY1 井页岩气纵向有利层系

3. 地震预测技术

目前国内外对于页岩气优质储层的地震预测技术已开展了大量的研究和实践[6] [7] [8]。筇竹寺组优质页岩由于其纵向上的变化和横向上的不稳定,其预测技术与描述重点也应与志留系龙马溪组优质页岩有所不同,应有适合其特点的地震预测思路及方法。

首先要进行纵向上划分的主要优质页岩在平面上的分布的刻画,明确优质页岩厚度的分布,预测页岩的TOC、孔隙度及含气量等作为页岩品质评价的重要指标参数的平面分布特征,进一步评价优质页岩的规模、优质程度。涉及的地震预测技术主要有高精度的地震反演技术、页岩参数的定量预测技术。

其次开展页岩的工程品质、主要是可压性的预测,这里面主要有两个参数。一个是页岩的脆性,脆性反映了页岩发生破裂的难易程度,脆性越强,则页岩在水力压裂时越容易发生脆性破裂形成人工改造裂缝[9] [10] [11] [12]。目前预测方法比较成熟,除了传统的 Rickman 脆性,也出现了如 E/λ 脆性预测等

特色技术，但其基础都在于高精度的叠前参数反演，通过叠前地震反演，得到高精度的弹性参数，进而通过各种方式计算相关脆性参数[13] [14]。另一个主要参数是页岩的天然微裂缝发育。对于页岩气而言，相对大的、强的裂缝对水力压裂改造效果起负面作用，压裂时应力沿强的天然裂缝释放，难以形成复杂的裂缝网络，因此页岩气水平井的实施要尽量避开断层和大的裂缝带[15] [16] [17]。但是，适当存在的天然微裂缝网络，可以降低压裂改造时压裂成缝的难度，主形成复杂的主缝、次缝、微缝网络，显著提高有效改造体积，提高页岩气单井产能和经济可采储量。因此，对页岩储量微裂缝的预测很重要。

另外，页岩气的保存条件是页岩气能否富集的关键，保存条件与很多因素相关，如页岩地层的埋深、地层的产状、与破坏性断层的距离、构造改造的强度、页岩自身的厚度、顶底板的条件，等等。页岩的地层压力和地压系数是一种直接的参数，能够反映页岩地层的内在能量，即保存条件的好坏[18] [19] [20]。地压系数高，则页岩气保存条件好，内部能量足，易获得高产。因此，通过地震技术预测地层压力并计算压力系数，是评价页岩气保存条件的重要工作。其预测技术通过不断发展，日趋成熟[21]。

4. 地震综合预测

4.1. 地震响应特征

筇竹寺组①、⑤、⑨号优质页岩层段测井曲线表现为相对高伽玛、低声波、低密度特征。如图2，结合测井曲线及地震精细标定可以看到，①、⑨号优质页岩高伽玛特征明显，伽玛值大于200API，优质页岩具有一定厚度，低阻抗特征突出，页岩底界面表现为强波谷反射，易于识别追踪；⑤号优质页岩厚度小，伽玛值达不到200API，阻抗值降低幅度不大，底界面在地震剖面上表现为弱波峰，较难准确追踪。

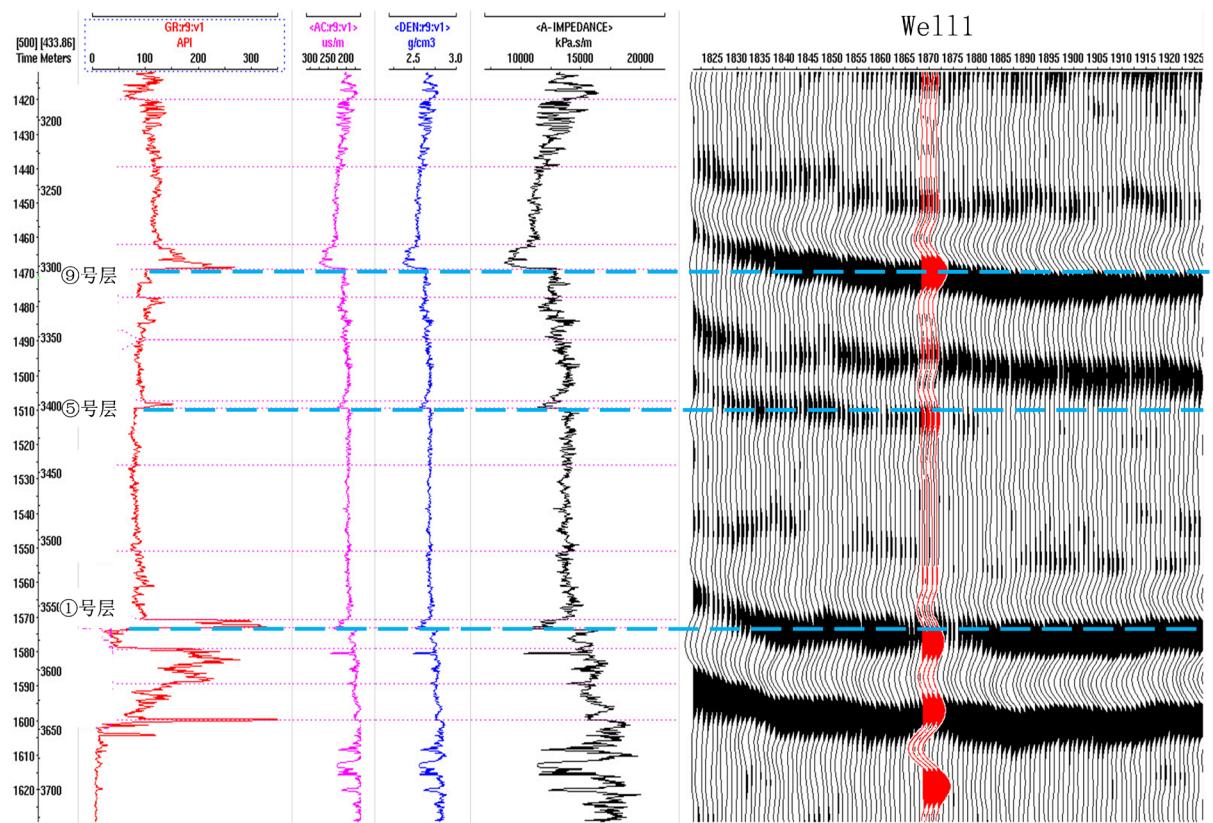


Figure 2. Seismic response characteristics

图2. 地震响应特征

4.2. 储集参数预测

储集参数主要包括优质页岩厚度、TOC、孔隙度、含气量等表明页岩气富集程度的参数。由于①、⑤、⑨号层优质页岩低阻抗特征明显，通过叠后地震波阻抗反演，根据各小层优质页岩的波阻抗阈值，利用样点厚度统计获取各套优质页岩小层厚度。如图3所示即为①、⑤、⑨号优质页岩地震厚度预测结果，可以看到，⑨号层优质页岩厚度变化较大，区内东南部集中分布，厚度0~25米，北西方向变薄甚至消失；⑤号层优质页岩分主要分布在东南角，整体厚度较小，定量预测较困难；①号小层优质页岩分布稳定，厚度往北西增厚。因此，①号层优质页岩为后续研究重点。

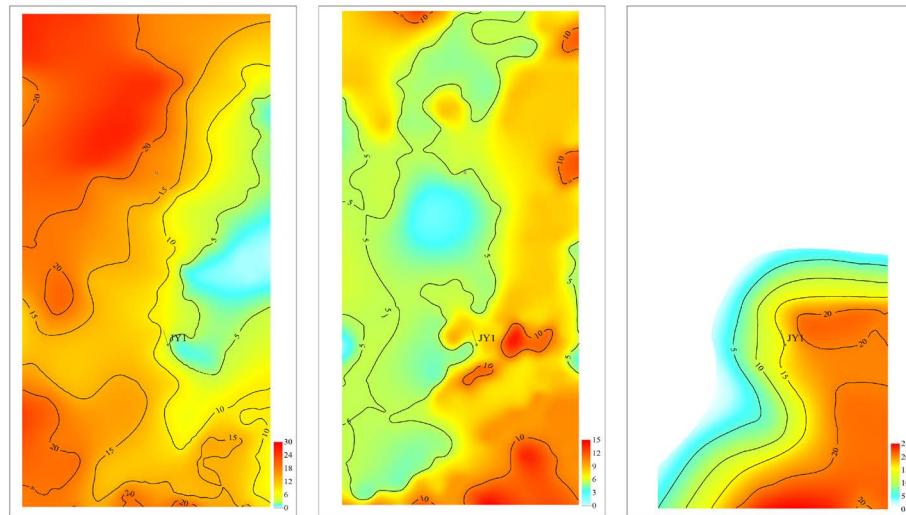


Figure 3. High quality shale thickness of layer ① (left) ⑤ (middle) ⑨ (right)
图 3. ①(左)⑤(中)⑨(右)号层优质页岩厚度

建立 TOC 与波阻抗、孔隙度与波阻抗的交会关系，利用波阻抗反演结果计算 TOC 和孔隙度，实现两者的三维地震预测。如图4，预测结果表明，①号层页岩 TOC 分布稳定，TOC 含量大于 4%，大部分区域 TOC 约 4.2%；孔隙度相对较高，分布在 3%~3.4% 之间，储层条件相对较好。

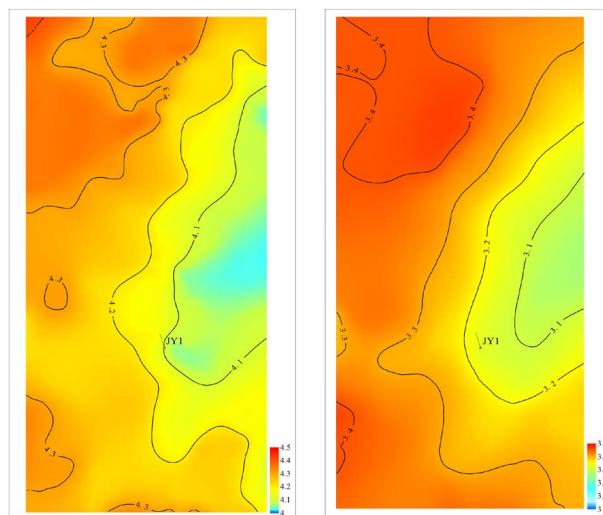


Figure 4. Planar distribution of TOC (left) and porosity (right)
图 4. TOC (左)、孔隙度(右)平面分布

页岩含气量是由多种因素决定的，包括埋藏深度、TOC、页岩成熟度、页岩厚度、地层压力、保存条件等，是页岩富集程度的直接表现。对于地球物理综合预测，只能通过寻找敏感弹性参数来达到间接预测含气量。目前普遍认为，页岩密度与页岩含气量相关性最强，因此，通过叠前反演密度参数，进而计算含气量。如图5，预测表明，①号页岩含气量较好，总体分布在3.0~4.2 m³/t之间，西北部含气量尤佳；页岩密度小于2.55 g/cm³，则含气量一般大于4 m³/t。

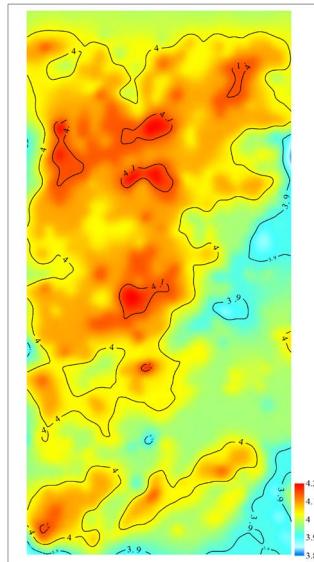


Figure 5. Planar distribution of gas content
图 5. 含气量平面分布

4.3. 可压性预测

利用叠前反演可获取密度、纵横波阻抗、纵横波速度比等参数，图6为过JY1井叠前地震反演效果

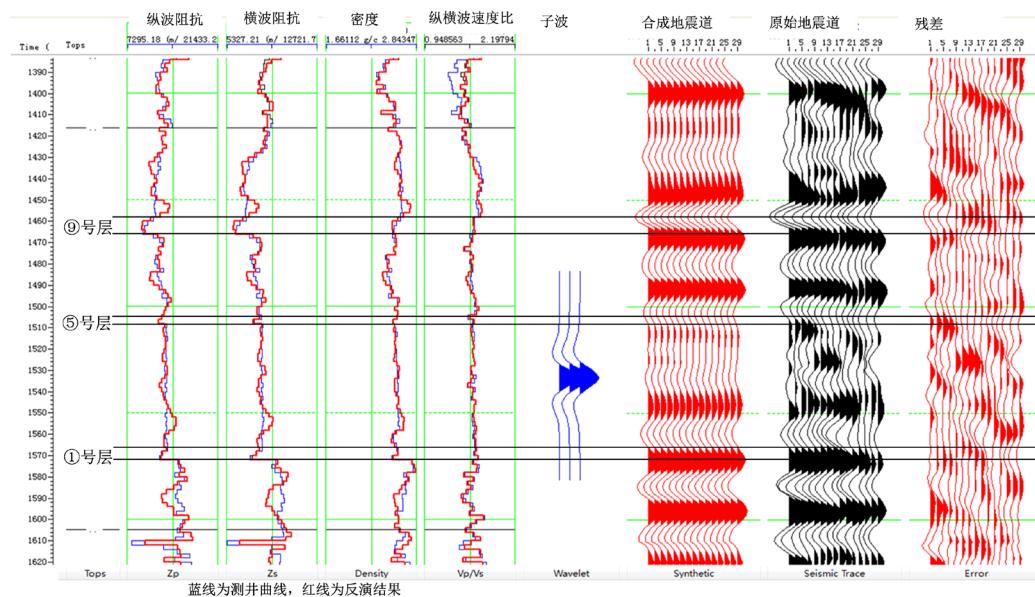


Figure 6. Prestack inversion results
图 6. 叠前反演结果

分析, 左侧蓝色曲线为测井或测井计算的纵波阻抗、横波阻抗、密度及纵横波速度比曲线, 红色曲线为井旁道集反演的这几个参数的结果, 可能看到, 反演效果较好, 反演结果与测井数据差异不大, 优质页岩小层的低密度、低纵横波阻抗特征明显。根据 RickMan 脆性预测方法, 利用叠前反演结果计算杨氏模量脆性和泊松比脆性, 预测页岩脆性系数, 图 7 为过 JY1 水平井的脆性预测剖面, 可以看到, 反演剖面与利用测井脆性矿物含量计算的脆性系数对应关系好, 优质页岩脆性适中。因纵向上页岩岩性存在一定变化, 脆性矿物含量变化明显, 脆性反演剖面脆性分层特征明显。

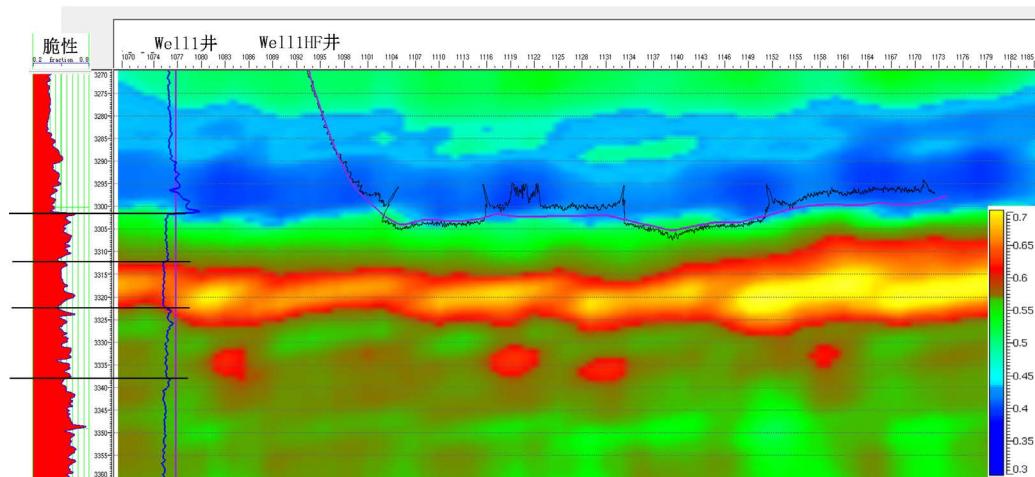


Figure 7. Brittle prediction profile of JY1 well

图 7. 过 JY1 井脆性预测剖面

该地区构造简单, 微裂缝相对不发育。利用 P 波方位各项异性开展区内微裂缝预测, 图 8 为预测的最终结果, 分析表明全区各向异性总体较弱。南部由于局部构造形变促进了微裂缝的发育, 表现为一定的各向异性。北部各向异性极弱, 页岩储层均质性强, 有利于压裂施工改造形成网状缝。

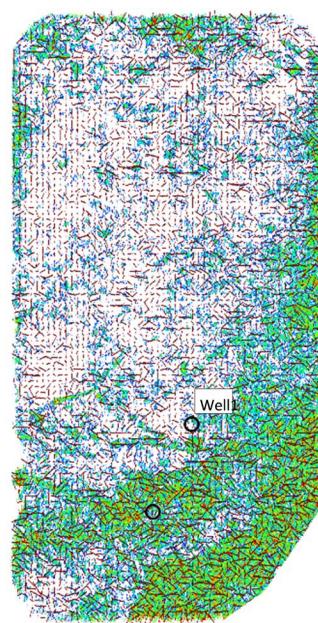


Figure 8. Anisotropic microfracture prediction

图 8. 各向异性微裂缝预测

4.4. 保存条件预测

通过地震速度预测地层压力，根据地层压力与静水柱压力的比值计算地层压力系数，结果如图9。可以看到，①号优质页岩地层压力在44~58 MPa之间，变化较平缓；计算得到的地层压力系数在1.4~1.6之间；断层发育区地压系数未明显变化，表明局部断层对保存条件的破坏有限，未能造成明显泻压。总体保存条件较好。

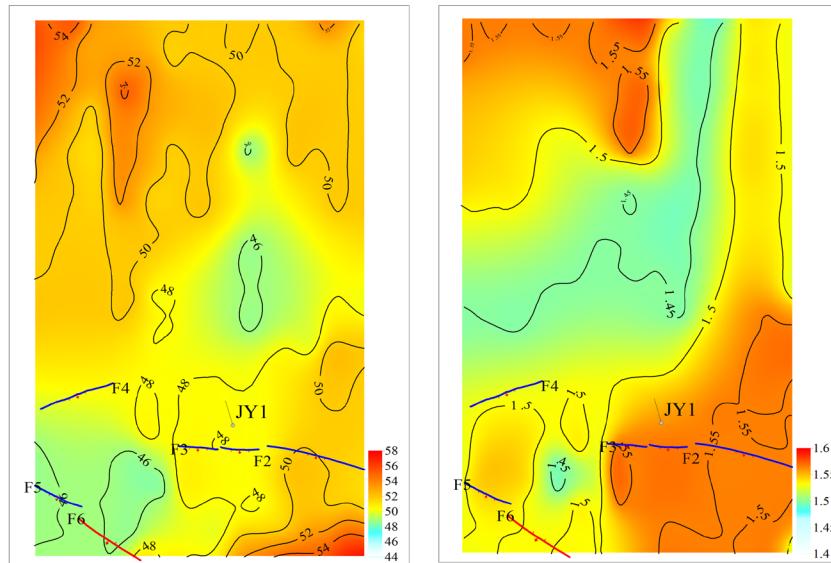


Figure 9. Prediction of seismic formation pressure (left) and earth pressure coefficient (right)
图9. 地震地层压力(左)及地压系数(右)预测

5. 结论

考虑到筇竹寺组页岩纵向、横向的不稳定，其地震预测评价的重点及相关预测技术也有自身的特色。利用高精度的地震叠前叠后反演，定量预测优质页岩的厚度、TOC、孔隙度、含气量等参数的平面分布，实现精细刻画，评价优质页岩的规模及品质，确定筇竹寺组页岩气的物质基础；通过叠前地震反演页岩脆性预测和基于P波方向各向异性的页岩微裂缝预测，评价优质页岩可压性寻找适于工程压裂改造的甜点区域；辅以地震地层压力预测，明确页岩的保存条件，区分常压及高压页岩气。

地震技术结合地质评价，为川西南JY地区的下寒武统筇竹寺页岩气勘探开发提供支撑，评价认为其①号优质页岩层纵向上有一定厚度，横向上变化不强，储层品质较高，大部分区域可压性合适，保存条件较好，区内西北部更优，是今后勘探的重点层系和区域。

基金项目

中国石化科技部重点科技项目“深层页岩气综合评价及开发技术政策”(编号：P18058-1)。

参考文献

- [1] 张静平, 唐书恒, 郭东鑫. 四川盆地下古生界筇竹寺组与龙马溪组页岩气勘探优选区预测[J]. 地质通报, 2011, 30(2-3): 357-363.
- [2] 孟宪武, 田景春, 张翔, 等. 川西南井研地区筇竹寺组页岩气特征[J]. 矿物岩石, 2014, 34(2): 96-105.
- [3] 郭彤楼. 中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主探因素[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 317-326.

- [4] 任东超, 王晓飞, 刘冬冬, 等. 威远地区筇竹寺组选区评价标准及有利区预测[J]. 非常规油气, 2017, 4(5): 38-43.
- [5] 刘树根, 孔玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 511-520.
- [6] Collet, O., Gurevich, B., Madad, M. and Pervukhina, M. (2014) Modeling Elastic Anisotropy Resulting from the Application of Triaxial Stress. *Geophysics*, **79**, C135-C145. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0311.1>
- [7] 门晓溪, 韩志辉, 王磊. 页岩气资源勘探开发历史及现状[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(3): 372-376.
- [8] 马永生, 张建宁, 赵培荣, 等. 物探技术需求分析及攻关方向思考——以中国石化油气勘探为例[J]. 石油物探, 2016, 55(1): 1-9.
- [9] Eaton, B.A. (1972) Graphical Method Predicts Geopressure Worldwide. *World Oil*, **182**, 51-56.
- [10] 李红敬, 林正良. 页岩储层可压裂性地震预测方法新进展[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2466-2471.
- [11] 董宁, 许杰, 孙赞东, 等. 泥页岩脆性地球物理预测技术[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(增刊1): 69-74.
- [12] 王瀚玮, 夏宏泉, 刘畅, 等. 页岩储层脆性指数的随钻测井计算方法研究——以威远地区寒武系筇竹寺组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(3): 73-78.
- [13] 王鹏, 纪有亮, 潘仁芳, 等. 页岩脆性的综合评价方法——以四川盆地 W 区下志留统龙马溪组为例[J]. 地质勘探, 2013, 33(12): 1-6.
- [14] 宗兆云, 印兴耀, 张峰, 等. 杨氏模量和泊松比反射系数近似方程及叠前地震反演[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3786-3794.
- [15] 刘喜武, 刘宇巍, 刘志远, 等. 页岩层系天然裂缝地震预测技术研究[J]. 石油物探, 2018, 57(4): 211-217.
- [16] 李楠, 王龙颖, 黄胜兵, 等. 利用高清蚂蚁体精细解释复杂断裂带[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(1): 182-190.
- [17] 段永刚, 张泰来, 魏明强, 等. 页岩气藏“井工厂”模式下水平井裂缝分布优化[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(6): 78-84.
- [18] 马海. Fillippone 地层压力预测方法的改进及应用[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(6): 56-61.
- [19] 张庆, 直钰平. 利用地层速度预测地层压力[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(6): 710-713.
- [20] 孙武亮, 孙开峰. 地震地层压力预测综述[J]. 勘探地球物理进展, 2007, 30(6): 428-432.
- [21] 胡华锋, 胡起, 林正良. 页岩气储层地层压力预测方法及其在四川盆地的应用[J]. 石油物探, 2018, 57(2): 262-268.