

Geophysical Prediction and Comprehensive Evaluation of Marine Shale-Gas in Southern Sichuan

Shuguang Li^{1,2}

¹Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil-Gas Field Company, SINOPEC, Chengdu Sichuan

²Key Laboratory of Multi-Components Seismic Technology, SINOPEC, Chengdu Sichuan
Email: lishuguang.xnyq@sinopec.com

Received: Apr. 7th, 2019; accepted: Apr. 22nd, 2019; published: Apr. 29th, 2019

Abstract

The research of shale-gas has been carried out of many years in China, and the geophysical technology of shale-gas prediction and evaluation has been gradually improved. Through several years of technical research and exploration & development practice, a complete system of geophysical technology is set up, including: seismic data target fine processing, shale gas logging comprehensive evaluation and reservoir characteristics analysis, structural and seismic stratigraphic interpretation, geophysical inversion and target prediction, shale fracture prediction, gas detection, shale preservation conditions analysis. Through the application of some technologies in the shale gas exploration and development of Longmaxi formation in south Sichuan, the important role of shale gas geophysical technology is demonstrated.

Keywords

Marine Shale-Gas, Target Prediction, Seismic Inversion, Longmaxi Formation, Comprehensive Evaluation

川南海相页岩气地球物理预测及综合评价方法

李曙光^{1,2}

¹中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都

²中国石化多波地震技术重点实验室, 四川 成都

Email: lishuguang.xnyq@sinopec.com

收稿日期: 2019年4月7日; 录用日期: 2019年4月22日; 发布日期: 2019年4月29日

摘要

国内页岩气的研究已开展多年,页岩气地球物理预测与评价技术也逐步完善。通过几年的技术攻关和在川南地区海相页岩气的勘探开发实践,基本建立了完整的地球物理技术体系,主要包括:地震资料目标精细处理、页岩气测井综合评价与储层特征分析、构造及地震地层解释、地球物理反演及目标预测、页岩裂缝预测、含气性检测、页岩保存条件分析等方面。通过部分技术在川南某地龙马溪组页岩气勘探开发中的应用,展示了页岩气地球物理技术的重要作用。

关键词

海相页岩气, 目标预测, 地震反演, 龙马溪组, 综合评价

Copyright © 2019 by author and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

四川盆地及其周缘地区是我国最早发现页岩气的地区,被认为是最具潜力的页岩气勘探地区。其中川南地区下古生界海相页岩(下寒武统筇竹寺组(筇竹寺组)、下志留统龙马溪组)构造变形较弱,埋藏适中;沉积环境处于深水陆棚和深浅海沉积盆地的环境;富有机质页岩厚度大,有机碳丰度高,下寒武统筇竹寺组(筇竹寺组) TOC 平均 3%~4%;龙马溪组平均 2.5%,演化程度高,页岩脆性矿物丰富,发育多种类型纳米孔-微裂缝,被公认为中国最有潜力,可望实现商业突破的重点有利区[1][2]。

四川盆地古生界海相页岩气勘探进展迅速,尤其是在焦石坝地区,页岩气勘探开发成果显著。2012年11月28日,在多方努力下,焦页1HF井试气获日产气20.3万立方米,取得中国石化页岩气勘探重大突破。2013年底,中国石化批准了涪陵焦石坝区块50亿立方米页岩气建设意见。2014年初,中国石化在香港宣布焦石坝地区计划2017年建成年产能100亿立方米的页岩气田。如今涪陵页岩气田的百亿产能建设目标已全面完成[3]。焦石坝的成就极大地鼓舞了页岩气勘探人,坚定了页岩气勘探的信念。随着页岩气勘探开发的不断深入,相应的页岩气地球物理预测与评价技术也成为必不可少的一环,不断成熟进步。

2. 页岩气地球物理预测技术

就地球物理学而言,地震技术在油气勘探开发中是一种非常有效的工具,已得到广泛应用[4]。但在美国加拿大的页岩气前期勘探开发中,地震应用较少。主要原因是经营者认为页岩气属于非常规连续型气藏,分布广,勘探成功率较高(勘探成功率近90%),并且总体上与构造关系不密切。但后来随着页岩气勘探开发不断深入,不少公司应用三维地震技术来查明页岩气产区的断层和裂缝发育状况、地层厚度变化、侧向连续性及页岩的特性,进而确定高产带的位置,即所谓的“甜点”。越来越多的经营者认识到要降低页岩气的勘探风险、提高勘探成功率、增加储量,采用三维地震技术不可避免。如美国西南能源公司在阿科马盆地的Fayetteville页岩气远景区开展三维地震调查,2007年底估计三维地震调查面积为400平方英里。目前,该公司所有钻井地区都经过三维地震调查证实。另外,应用三维地震数据检查非常规气藏中裂缝,在加拿大阿尔伯达Mannville煤层气和页岩气以及美国怀俄明州Pinedale气田的致密气砂岩中都获得了良好的效果。

国内页岩气的相关研究不断深入,页岩气地球物理预测与评价技术也逐步完善[5] [6] [7] [8] [9]。通过几年的技术攻关和在川南地区海相页岩气的勘探开发实践,基本建立了完整的川南海相页岩气地球物理技术体系,形成了大规模的工业化生产能力,能够解决勘探开发难题。这些技术主要包括:地震资料目标精细处理、页岩气测井综合评价与储层特征分析、构造及地震地层解释、地球物理反演及目标预测、页岩裂缝预测、含气性检测、页岩保存条件分析等方面的技术。

1) 页岩气地震资料目标精细处理技术

解决好页岩气勘探区地震资料处理中的静校正问题、信噪比问题、分辨率问题、各向异性速度分析问题、偏移成像问题以及各向异性的保持与消除处理问题,采用有针对性的处理方法和措施,建立一整套合理的处理流程,为解决页岩气勘探开发区地质任务,特别是为寻找和落实构造细节、储层研究等提供基础数据体。

2) 页岩气测井综合评价与储层特征分析技术

页岩气层与常规孔隙性、裂缝性砂岩和砂泥岩储层的测井评价方法差别较大,需要一套适用的专门针对泥页岩求取物性的测井解释评价方法,需要基于岩心分析数据建立合适的测井模型,求取岩石物性参数,得到地区经验公式。页岩的有机质含量 TOC 是反映岩石有机质丰度最主要的指标,有机质的成熟度是表征其成烃有效性和产物性质的重要参数,它们都是页岩生烃能力的重要指标。通过页岩气的测井综合评价研究建立不同地区页岩气的解释模型,开展储层物性参数、页岩生烃潜力测井评价。

3) 页岩气地震地层解释技术

页岩气有利区块通常是页岩发育程度高、油气生烃能力强的区域。充分收集区域沉积相研究的相关资料,进行单井和连井沉积相分析,在前期工作的基础上,以层序地层学理论和方法为指导,结合地震地层学解释,对主要研究目的层进行地震相分析,为沉积特征、沉积相分析提供基础。

4) 页岩气地球物理反演及目标层预测技术体系

在储层精细标定的基础上,针对不同类型储层,利用模型正演开展储层地震响应特征分析,建立储层的含气地震响应识别标志;在储层有利相带预测的基础上,利用振幅、频率、相位、反射极性 etc 常规属性开展目的层储层平面预测;开展波阻抗反演,在地震属性储层预测基础上,实现主要目的层页岩段页岩分布预测以及页岩厚度预测;通过地震叠前反演,实现储层岩性、物性、脆性综合预测和生烃能力的地球物理预测。

5) 页岩气裂缝预测技术

页岩生烃潜力是页岩气钻井获产的基础,而裂缝发育与否是页岩气获产的关键。在区域应力场研究、构造精细解释的基础上,基于高精度构造解释开展构造应力场反演分析,结合各种裂缝预测方法技术进行裂缝综合预测,实现裂缝发育区综合预测。

6) 页岩气含气性检测技术

地震含气性检测常用的频率、衰减等含气性检测技术基本上都是基于孔隙介质理论,主要针对砂岩储层,对于页岩储层其实用性需要通过验证。叠前叠后反演得到的岩石弹性参数,在页岩层段参数的变化可以在一定程度上反映页岩含气性的变化。通过不断的探索和创新,形成适应川南地区页岩气的含气性检测技术。

7) 页岩气保存条件分析技术

保存条件是页岩气藏的关键。断裂与裂缝的发育与页岩气的生产关系密切;页岩气在储层中主要以吸附状态存在,而吸附气量与有机碳含量和地层压力成正比;顶底板为相对致密、具有油气封盖能力的油气盖层能够保证页岩层中的高压流体不至于散失。通过构造形态、埋深、断裂系统及断层性质分析,以及地层压力预测、地层对置关系、顶底板完整性等分析,评价页岩气保存条件。

3. 页岩气主要评价参数预测方法

对于一个页岩气探区,要评价页岩目标层的品质,最主要的参数包括页岩的厚度、页岩的 TOC、页岩的孔渗性等,这些参数是对页岩本身最直观的评价,是决定页岩气能否富集、是否存在开采价值的基础[10]-[15]。以川南某区龙马溪组页岩为例,对这几个参数的预测进行阐述。

3.1. 页岩厚度预测

一般通过地震波阻抗反演来进行优质页岩储层厚度的预测。纵波叠后反演实现较为方便,反演结果可为储层的空间展布、厚度等刻画提供重要数据。利用叠后地震数据,通过反演模型建立、迭代反演,得到反演的波阻抗数据,如图 1 所示,在波阻抗剖面上,蓝色区域的低波阻抗对应着优质页岩的发育。

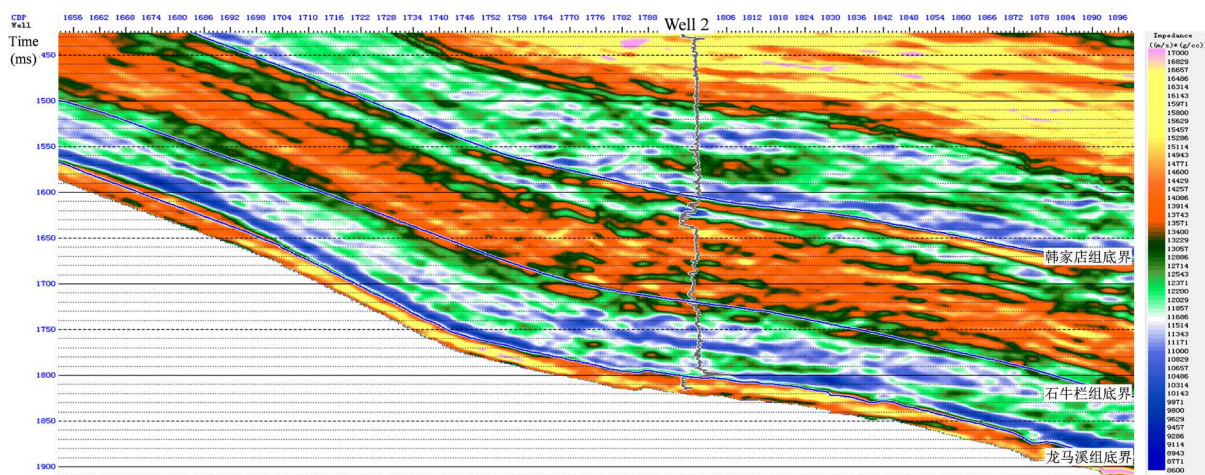


Figure 1. Result of impedance inversion

图 1. 阻抗反演结果

根据井上分析,选定合适的波阻抗阈值,提取龙马溪组底部最优质页岩的厚度,结果如图 2 所示,区内优质页岩厚度都在 20 米以上,西侧较厚,可超过 30 米。

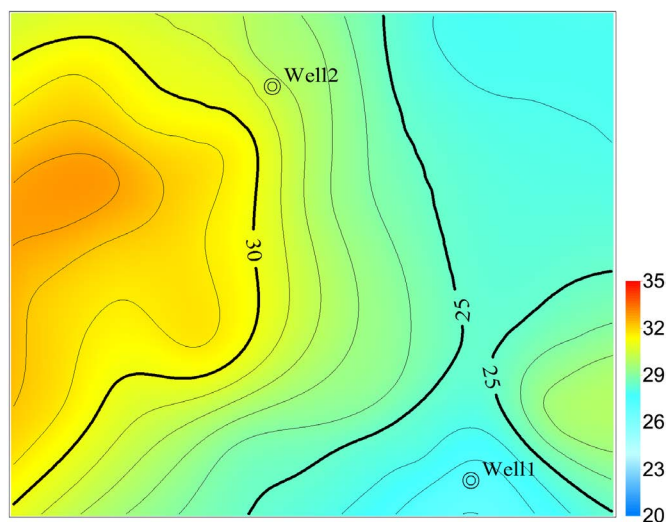


Figure 2. Planar distribution of thickness of high-quality shale

图 2. 优质页岩厚度平面分布

3.2. 有机质含量预测

页岩储层的有机质含量(TOC)是一个非常重要的参数,很大程度上反映了页岩储层产气的潜力。有机质含量(TOC)与页岩的产气率密切相关,同时也是与吸附气量密切相关的。这主要是由页岩气的特征决定的,有机质可以为吸附气提供载体,其含量的高低可以影响吸附气含量发生数量级的改变。另外,丰富的 TOC 也是形成大量纳米级孔隙的重要载体。

利用地震方法获取页岩 TOC 参数信息是页岩气目标层地震预测方法研究的重点之一。如果工区范围内只完成了叠后地震的反演,刚可通过建立波阻抗与 TOC 之间的交会关系,利用叠后地震反演波阻抗计算 TOC 数据。如图 3 所示,波阻抗与 TOC 交会,获取两者之间的指数曲线拟合关系:

$$TOC = 33650.7393 * e^{(-0.0009 * \text{波阻抗})}$$

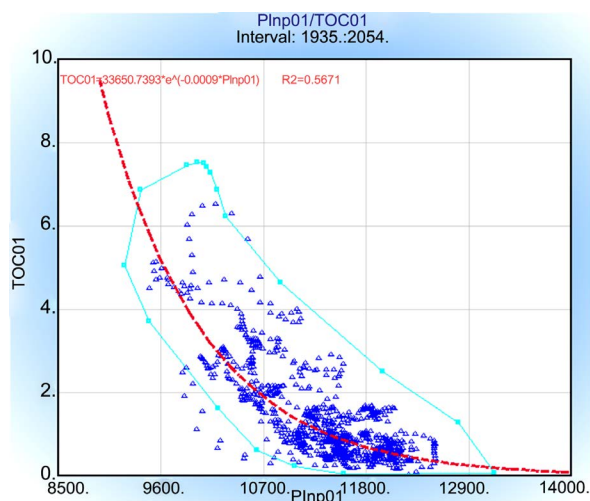


Figure 3. Crossplot of impedance and TOC

图 3. 阻抗与 TOC 交会

利用此关系得到 TOC 数据,根据 TOC 数据,提取龙马溪段下段的平均 TOC 分布图,如图 4 所示,可以看到,平均 TOC 能达到 2%~3%,西侧大部分地区能达到 4%及以上,有机质条件总体较好。TOC 值高的区域与优质页岩发育较厚的区域基本对应,说明其本身沉积条件较好。

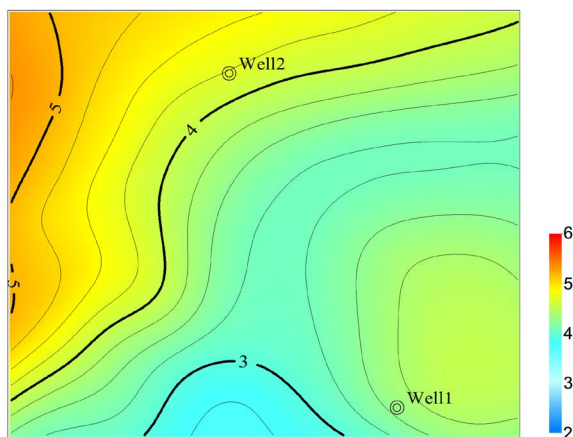


Figure 4. Planar distribution of TOC of high-quality shale

图 4. 优质页岩 TOC 平面分布

3.3. 孔渗性预测

孔渗性条件也是影响页岩气富集成藏的关键因素，其受到多种因素控制，包括页岩孔隙度是否发育，影响渗透性的节理缝、微裂缝等是否发育，地层压力是否足够大等。从地震的角度开展孔渗性的预测则主要是利用地震技术开展与孔渗性条件相关的物性、物理参数等进行预测从而实现间接的孔渗性描述。目前一般主要针对孔隙度进行预测。

交会分析表明，孔隙度与波阻抗具有较好的相关性，可以通过地震反演得到的波阻抗数据体预测孔隙度。如图 5 所示，为该区龙马溪段孔隙度数据与波阻抗数据的交会，通过交会，确定了孔隙度与阻抗之间的线性关系：

$$\text{孔隙度} = 11.8346 - 0.0008 * \text{波阻抗}$$

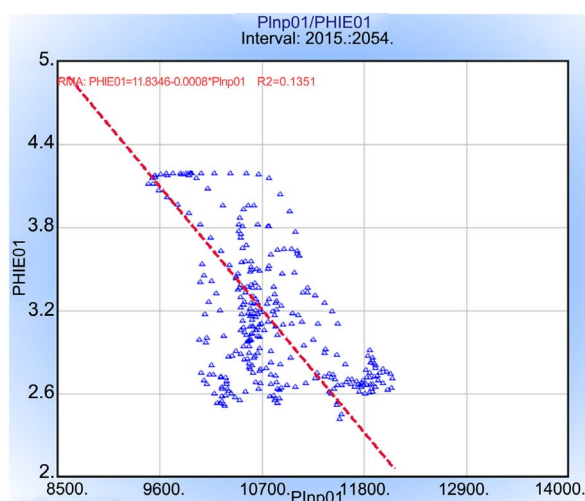


Figure 5. Crossplot of impedance and porosity

图 5. 阻抗与孔隙度交会

依上述关系，利用叠后地震反演得到的波阻抗数据体，计算得到了对应的孔隙度数据体。图 6 即为利用该孔隙度数据体，获取的龙马溪组底部优质页岩的平均孔隙度分布图。可看到，该段平均孔隙总体为自东向西逐渐增加的趋势，可能因为页岩沉积相对较好的区域，厚度相对较厚，有机质含量增加，有机孔也相对发育，总的孔隙度增加，孔渗性增强。

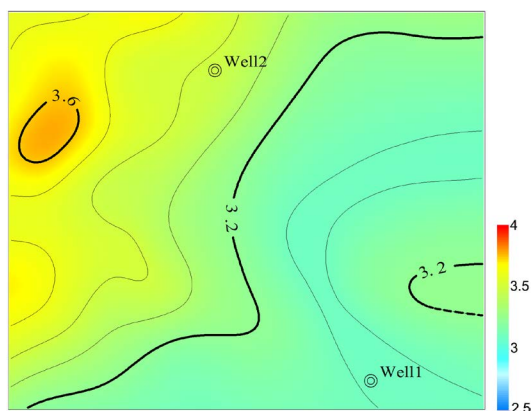


Figure 6. Planar distribution of porosity of high-quality shale

图 6. 优质页岩孔隙度平面分布

4. 综合评价方法

针对川南海相页岩气的地球物理综合预测与评价的思路以地质分析为指导,以页岩气富集成藏条件为依据,以岩石物理分析为基础,以解决页岩气富集成藏主控因素为目标,形成包含 TOC 预测、压力预测、页岩分布特征预测、孔渗性预测、脆性预测、含气性预测的技术体系,通过针对性的地震预测技术(包括:构造解释技术、地震反演技术、压力预测技术、TOC 预测技术、地震属性分析及裂缝预测技术等)开展页岩气富集有利区的分布预测,实现页岩气富集区的综合评价。因此在进行综合评价分析的过程中主要考虑的页岩气富集成藏控制因素包括页岩分布特征、压力条件、TOC 特征、含气性、孔渗性特征、保存条件等,具体控制因素涉及到页岩构造形态特征、储层厚度、压力条件、TOC 含量、含气性特征、孔隙度条件、裂缝发育程度、脆性条件、顶板岩性条件等。考虑到有效优质页岩的主控因素,确定了基于构造、储层及保存条件的优质页岩综合评价因素,开展优质页岩综合评价(图 7)。



Figure 7. Comprehensive evaluation of high-quality shale
图 7. 优质页岩综合评价

5. 结论

目前对于页岩气的预测与评价,基于地震反演的页岩主要评价参数预测是重要的一个方面。在地震综合预测基础上,结合地质成藏条件和富集规律,综合有利沉积相带预测,岩性、物性、脆性、生烃能力、含气性、裂缝预测,开展目标层段“甜点”综合评价。在综合评价、甜点预测的基础上,优选开发目标,提出井位部署建议。随着页岩气勘探开发的深入以及三维地震资料的丰富,地球物理技术的作用也将越来越重要。

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] 刘洪林, 王红岩, 刘人和, 等. 非常规油气资源发展现状及关键问题[J]. 天然气工业, 2009, 29(9): 113-116.
- [2] 安晓璇, 黄文辉, 刘思宇, 等. 页岩气资源分布、开发现状及展望[J]. 资源与产业, 2010, 12(2): 103-109.
- [3] 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.
- [4] 刘洪林, 五莉, 王红岩, 等. 中国页岩气勘探开发适用技术探讨[J]. 油气井测试, 2009, 18(4): 68-71.
- [5] 潘仁芳, 赵明清, 伍媛. 页岩气测井技术的应用[J]. 中国科技信息, 2010(7): 16-18.

- [6] 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[J]. 石油物探, 2016, 55(1): 1-9.
- [7] 李曙光, 程冰洁, 徐天吉. 页岩气储集层的地球物理特征及识别方法[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(4): 351-352.
- [8] 郭秀英, 陈义才, 张鉴, 等. 页岩气选区评价指标筛选及其权重确定方法——以四川盆地海相页岩为例[J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 57-64.
- [9] 宁宁, 王红岩, 雍洪, 等. 中国非常规天然气资源基础与开发技术[J]. 天然气工业, 2009, 29(9): 9-12.
- [10] 张金川, 聂海宽, 徐波. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
- [11] 朱华, 姜文利, 边瑞康, 等. 页岩气资源评价方法体系及其应用——以川西坳陷为例[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 130-134.
- [12] Montgomery, S.L., Jarvie, D.M., Bowker, K.A., *et al.* (2005) Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, North-Central Texas: Gas-Shale Play with Multi-Trillion Cubic Foot Potential. *AAPG Bulletin*, **89**, 155-175.
<https://doi.org/10.1306/09170404042>
- [13] Curtis, J.B. (2002) Fractured Shale-Gas Systems. *AAPG Bulletin*, **86**, 1921-1938.
<https://doi.org/10.1306/61EEDDBE-173E-11D7-8645000102C1865D>
- [14] 李延钧, 刘欢, 刘家霞, 等. 页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J]. 西南石油大学学报, 2011, 33(2): 28-34.
- [15] 刘力辉, 李建海, 刘玉霞, 等. 地震物相分析方法与“甜点”预测[J]. 石油物探, 2013, 52(4): 26-31.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org