

文章编号: 0253-2697(2024)01-0261-15 DOI:10. 7623/syxb202401015

中国海相页岩气地震勘探技术及其发展方向

王立歆 李弘 刘小民 胡华锋

(中石化石油物探技术研究院有限公司 江苏南京 211103)

摘要:页岩气是清洁、高效的非常规天然气资源。近 10 年来中国海相页岩气勘探不断取得突破,对保障国家能源安全发挥了重要作用,中国也成为世界第 2 大页岩气生产国。与国外相比,中国海相页岩气资源广泛分布于川、渝等山地地区,地震勘探技术在先天条件差与资源需求急迫的双重推动下取得了快速发展。聚焦中国复杂山地地表、复杂地下构造条件下的海相页岩气地震勘探技术难题,分析国内外海相页岩气的地震勘探技术现状,明确地震勘探技术在提高水平井钻遇率的宗旨下,应以实现高效经济采集、高精度地震成像及页岩气藏解释为发展目标。系统梳理中国海相页岩气地震勘探的关键技术,对行业关注的节点采集、各向异性深度偏移、随钻快速成像及地质力学参数预测等地震关键技术进行了重点介绍及应用效果分析,提出了中国海相页岩气地震勘探技术面临的主要问题及发展方向,并针对中国复杂的地质条件,指出应加快高端自主地震采集、处理技术的研发,筑牢岩石物理基础,深化地质—工程一体化,提高人工智能技术在页岩气地球物理勘探领域的普及应用,推动深部、常压页岩气资源的高效利用。

关键词:页岩气;地震勘探;复杂山地;高精度成像;“甜点”预测

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

Seismic exploration technologies of marine shale gas and their development directions in China

Wang Lixin Li Hong Liu Xiaomin Hu Huafeng

(Sinopec Geophysical Research Institute Co., Ltd., Jiangsu Nanjing 211103, China)

Abstract: Shale gas is a clean and efficient unconventional natural gas resource. In the past decade, In the past 10 years, China has made breakthroughs in Marine shale gas exploration, which has played an important role in ensuring national energy security, and China has become the second largest shale gas producer in the world. Compared with foreign countries, China's marine shale gas resources are widely distributed in Sichuan and Chongqing mountainous areas, and seismic exploration techniques have achieved rapid development under the incentives of both poor natural conditions and urgent resource demand. This paper focuses on the technical challenges of marine shale gas seismic exploration under complex conditions of mountainous and subsurface structure in China, investigates and analyzes the current status of marine shale gas seismic exploration techniques, and clarifies the goal of technological development to improve the drilling rate of horizontal wells through efficient and economic acquisition, high-precision seismic imaging, and shale gas reservoir interpretation. The paper systematically summarizes the key technologies for marine shale gas seismic exploration in China, mainly introduces the key technologies attracting much attention from the industry, such as node acquisition, anisotropic depth migration, rapid imaging while drilling, and geomechanical parameter prediction, and further analyzes their application effects. Finally, the main problems and development directions faced by China's marine shale gas seismic exploration technology are proposed. It is required to accelerate the research and development of high-end independent seismic acquisition and processing technology considering complex geological conditions in China, build a solid petrophysical foundation, deepen the integration of geology and engineering, improve the popularization and application of artificial intelligence technology in the field of shale gas geophysics, and promote the efficient utilization of deep and ambient pressure shale gas resources.

Key words: shale gas; seismic exploration; complex mountainous area; high-precision imaging; sweet spot prediction

引用:王立歆,李弘,刘小民,胡华锋.中国海相页岩气地震勘探技术及其发展方向[J].石油学报,2024,45(1):261-275.

Cite:WANG Lixin,LI Hong,LIU Xiaomin,HU Huafeng. Seismic exploration technologies of marine shale gas and their development directions in China[J]. Acta Petrolei Sinica,2024,45(1):261-275.

基金项目:国家自然科学基金企业联合基金项目“高精度地震导向钻井关键技术及软件”(No. U23B6010)资助。

第一作者:王立歆,男,1971年3月生,2012年获同济大学博士学位,现为中石化石油物探技术研究院有限公司副院长、教授级高级工程师,主要从事地震成像及预测的技术研究、生产技术管理工作。Email:wanglx.swty@sinopec.com

通信作者:李弘,男,1985年10月生,2009年获中国地质大学(武汉)硕士学位,现为中石化石油物探技术研究院有限公司高级工程师,主要从事地震地质综合解释技术研究工作。Email:lihong.swty@sinopec.com

在中国国家能源安全新战略指导下,中国能源的转型、发展和产供储销体系建设深入推进,供给体系不断完善。中国石油天然气集团有限公司(中国石油)、中国石油化工集团有限公司(中国石化)等大油气公司也持续加强渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地和四川盆地等重点含油气盆地的勘探力度,夯实资源接续基础,推动老油气田稳产,加大新区产能建设力度。

页岩气是以甲烷为主的储存于页岩中的非常规天然气,其通常具有开采寿命长、分布范围广等特点。中国页岩气藏以海相为主,资源潜力巨大,是常规天然气现实的战略接替领域,是支撑中国经济高速发展的清洁、高效能源之一。中国石油、中国石化、中国海洋石油集团有限公司(中国海油)高度重视深层页岩气的勘探攻关。2016年,中国的页岩气年产量超越加拿大,成为全球第2大页岩气生产国^[1],进入页岩气勘探快速发展阶段。根据国家能源局数据,中国2022年的页岩气产量达 $240 \times 10^8 \text{ m}^3$,页岩气勘探取得多项重大突破进展:中国石油西南油气田公司的页岩油气勘探实现持续快速上产;中国石化建设的“深地工程·川渝天然气基地”取得页岩气勘探重大突破,其中,綦江页岩气田首期的探明地质储量达 $1459.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,标志着中国又一个超千亿立方米大型整装页岩气田诞生;四川盆地在二叠系吴家坪组发现页岩气规模增储的新层系,资源量达万亿立方米,在寒武系筇竹寺组取得页岩气勘探重大突破,产层评价的地质资源量为 $3878 \times 10^8 \text{ m}^3$,整个页岩气层段的资源量超过 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[2]。

近年来,中国页岩气田的快速上产与突破离不开地震勘探技术的持续创新发展。笔者跟踪国内外物探技术新进展,聚焦中国海相页岩气地震勘探现状,梳理了勘探面临的难题及其对地震技术的需求,分析了技术的应用效果和适用性,对中国页岩气地震采集、处理及解释技术的创新性和实用性进行了总结,以海相页岩气的持续高效勘探为目标,思考地震勘探技术的方向及举措,并对中国海相页岩气地震技术的发展提出建议。

1 全球及中国海相页岩气地震勘探技术发展现状

1.1 全球海相页岩气地震勘探技术发展现状

美国历经半个世纪的持续攻关探索,在21世纪成功实现多个海相页岩油气田的勘探开发,借此由油气进口国转为净出口国。2021年,美国的页岩气产量达 $7572 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[3]。受资源需求驱动,全球页岩气地震勘探技术保持持续快速发展,不断攻克复杂地质难题,助力页岩气高效勘探开发。

面对复杂地表造成的地震采集不均衡的难题,针对宾夕法尼亚州西南部地区地震采集受限于采集许可与地理条件以及资料空间覆盖非常不均衡的问题,Hren等^[4]提出了新的地震处理技术思路,包括EPOCS-Recon、全波形反演(FWD)/层析成像和L1频率归一化(LFN),可提供高保真的地质模型和精确的深度偏移成像。EPOCS-Recon是一种基于压缩感知的技术,与传统的五维插值和五维正则化(5DR)相比,其具有更好的信噪比和保幅能力^[5];采用陆地FWI和构造约束层析成像相结合的工作流程,可建立具有井校正的高分辨率深度模型;LFN技术可提高储层段的分辨率,保留微小的地质构造,增强信号的带宽而不会过度提升背景噪声。该综合工作流程已被应用于Appalachian盆地。准确的地震成像降低了解释的不确定性,为钻井轨迹的设计和地质导向决策提供了有力依据。

对于大多数美国陆上盆地,页岩气发育的地层近乎呈水平,勘探开发需要沿着薄地层设计侧向钻井路径,因而页岩储层的准确构造成像对于构造解释和水平井部署至关重要。基于双曲线假设的叠前时间偏移(PSTM)技术对于垂向速度变化较快的地质单元存在成像局限性,如美国俄克拉荷马州Anadarko盆地Woodford页岩的地层埋深为3352m,平均厚度为91m,在目标区域表现出明显的地震层速度骤降,从近似5486m/s降到3352m/s。使用PSTM技术无法对薄层内如此快速的速度下降实行校正,地层单元的厚度会呈现出较大的误差。使用叠前深度偏移(PSDM)技术可较好地解决这一难题,实现成像精度的提升,指导水平井的钻探设计^[6]。Zhu等^[7]通过正交速度建模与PSDM技术研究,对Appalachian盆地内Marcellus页岩层的断层和褶皱成功实现了清晰成像,成像结果与新钻井认识结果一致,许多先前解释的断层也被证实为背斜构造。

在页岩气藏的地震解释方面,Mulinska等^[8]开展了基于地质统计学的叠前道集振幅随角度变化(AVA)的反演方法研究,并将其应用到波兰北部下古生界页岩储层的特征识别中,获得了比确定性反演精度更高的脆性指数。Shoemaker等^[9]提出了一种利用各向异性的修正Ben Eaton应力模型来计算水平应力的方法,该方法将反演的三维地震数据体直接代入应力方程,用等效各向异性修正闭合应力标量(CSS)项代替约束泊松比项,进而计算出最小水平应力。CSS可通过岩心、岩石物理、地质力学、完井和油藏工程现场测量等多种数据进行校正。Naeni等^[10]研究表明,有监督的深度神经网络方法可以成为岩石物理、孔隙压力和地质力学分析的替代创新工具,这种岩石物理、孔隙压力

和地质力学性质深度学习预测方法已成功应用于德克萨斯州西部的二叠纪盆地。

综上所述,全球海相页岩气地震勘探技术是以提高水平井的钻遇成功率为目标,通过压缩感知、五维插值等方法克服复杂地表采集难题,通过叠前深度偏移技术、正交速度建模技术等提高深部薄层及复杂构造的清晰成像,通过地质、工程、物探多学科结合的方式提高页岩“甜点”的预测准确度,支撑了以美国为代表的页岩气的勘探开发。

1.2 中国海相页岩气地震勘探技术发展现状

富含有机碳的黑色页岩在中国分布极为广泛。从地理分布来看,四川盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地等均具有较大的勘探潜力,尤其在盆地边缘的斜坡部位,其成藏条件更佳,更有利于形成规模页岩气藏。从

地层分布来看,华北地区主要为湖相页岩,如渤海湾盆地古近系沙河街组页岩、松辽盆地下白垩统青山口组页岩等,但目前规模较大的湖相页岩气藏发现较少;华南地区主要为海相页岩,以四川盆地寒武统筇竹寺组页岩、上奥陶统五峰组页岩、下志留统龙马溪组页岩等多套海相页岩为代表。中国南方海相地层具有优越的页岩气成藏条件及丰富的资源量。得益于近年来的勘探开发突破,南方海相页岩已成为中国重要的能源战略接替领域^[11-12]。

中国是继美国、加拿大之后第 3 个实现页岩气商业性开发的国家,整体资源量丰富。与美国相比,中国页岩气田的地表与深部地震地质条件复杂^[13],地震勘探开发难度更大(表 1)。复杂的地表和深部地震地质条件使得三维地震勘探面临着一系列的难题。

表 1 中美页岩气勘探地质条件对比

Table 1 Comparison of geological conditions for shale gas exploration in China and the United States

对比内容	地表条件	地层构造	埋深	有机碳含量	地震施工
中国	以山地为主,植被丰茂	复杂,多次改造,断裂发育	偏大,以 >3 500 m 为主	偏低,以 1%~5% 为主	难度大,高海拔、灰岩出露
美国	平原或丘陵	简单,一次抬升,断裂较少	较浅,以 2 500~3 500 m 为主	丰富,以 5%~10% 为主	难度小,地势平坦

面对中国页岩气地震勘探的难题,专家学者们在近 10 余年里开展了广泛而又深刻的研究。中国知网(CNKI)的计量可视化分析显示:2009—2022 年,“页岩气、地震”相关的文献总数量达 1 153 篇,页岩气地震勘探的研究热度逐年持续上升;页岩气地震勘探自 2013 年之后步入快车道,2020 年发表文献 135 篇,达到顶峰。高密度、高质量的页岩气地震勘探技术研究有力推动了中国页岩气的快速增储上产。国家能源局公开数据显示:2012 年中国页岩气产量仅为 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$,伴随着地质认识的加深与物探技术的进步,2022 年的页岩气产量达 $240 \times 10^8 \text{ m}^3$,增加至 2012 年的 960 倍(图 1)。

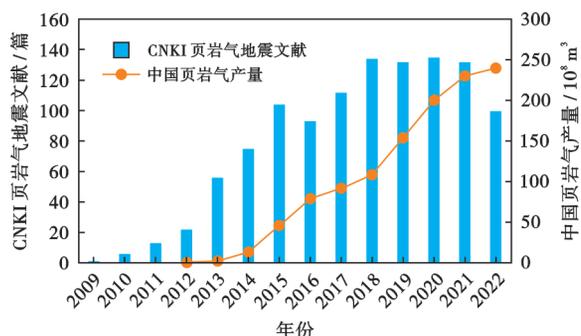


图 1 中国 2009—2022 年页岩气地震文献数量及页岩气年产量统计

Fig. 1 Statistics of literature numbers related to seismic analysis and productions of shale gas in China from 2009 to 2022

面对复杂地表、复杂构造等地质条件,中国海相页岩气地震勘探技术的研究以支撑页岩水平井的精确钻进为目标,实现了包括从小面元-高覆盖-变密度采集、复杂山地层析静校正、各向异性深度偏移处理到“地质甜点”“工程甜点”预测等系列技术的研发与应用。以涪陵页岩气田为例,中国石化在焦石坝地区开展了较高覆盖次数、较小道距、适中排列长度的三维地震资料采集,并通过井控及基于炮检距向量片(OVT)域的地震偏移处理、叠前-叠后联合的地震解释技术攻关,形成了面向页岩气水平井勘探开发的一体化技术系列,包括多信息约束各向异性逆时偏移(TTI-RTM)高精度成像、随钻快速成像、多尺度裂缝检测、“双甜点”地震综合解释等技术,探明了千亿立方米页岩气田,促进了中国页岩气的快速勘探开发^[14-15]。

2 中国海相页岩气地震勘探关键技术及其应用效果

页岩气作为非常规油气资源,其成藏机理、岩石物性及物探响应均与常规油气存在较大差别。因此,从地震采集到处理解释,常规技术流程不再适用于页岩气的勘探评价需求。面对中国海相页岩气独特的地质条件,地球物理行业的学者们通过近 10 余年的技术探索与应用,已建立起较为成熟的技术方案。主要包括:首先,基于复杂山地地表的地震采集技术获得高品质

的原始地震资料;其次,通过“双复杂”(复杂地表、复杂构造)区高精度地震成像技术,最大限度地提高地震分辨率,为后续地震解释提供高保真、高信噪比的数据基础;最后,通过“双甜点”地震解释技术实现页岩气富集有利区的预测并支撑钻井。

2.1 复杂山地地表的震采集技术

中国规模性的海相页岩气资源量主要分布在四川盆地及其周缘地区,该地区的地表以山地为主,地震采集施工面临着高海拔、灰岩部分出露等难题。地震采集资料的品质是后续地震处理解释的基础。由于页岩气的开发依靠水平井的钻探及压裂技术,因而对三维地震资料的构造成像精度、断裂与地应力的预测准确度提出了更高的要求,这也是页岩气区地震资料采集技术研究的目标^[16]。

2.1.1 “小、宽、高、中”三维观测系统

基于山地的地形和地表条件,结合页岩气地震勘探的要求,中国学者在西昌盆地^[17]、四川泸州^[18]、川南^[19]及湖南保靖^[20]等地区的研究发现,采用小面元、宽方位、高覆盖、中—长排列(“小、宽、高、中”)的三维高精度观测系统,可以较好地压制环境噪音,提高剖面的信噪比,获得地下复杂构造及小地质目标的成像,满足页岩气勘探地质描述的需求^[21]。

2.1.2 变密度地震采集技术

对于地表出露岩性与地下构造特征复杂或分区特征明显的页岩气区,在同一个激发单炮的情况下,不同岩性的地表上,排列所接收到的地震波能量差异较大。砂泥岩地表接收的地震资料的信噪比通常高,地层反射能量强;而灰岩地表的反射能量弱,所接收地震资料的信噪比通常低。表2为南川地区不同岩性出露区地震激发的接收效果对比^[22]。由表2可以明显看出,相较于砂岩地表,刚性灰岩及泥灰岩区的信噪比更低、有效频带更窄。

表2 南川地区不同岩性出露区地震激发接收效果对比

Table 2 Comparison of seismic shooting and receiving effects in different lithologic outcrop areas in Nanchuan area

出露地层	地表出露岩性	单炮激发效果		
		主频/ Hz	有效频带/ Hz	信噪比
侏罗系	砂岩	30	60	1.7
上三叠统	砂岩	28	55	1.4
中一下三叠统	刚性灰岩	38	48	0.9
二叠系	泥灰岩	23	40	0.7
志留系	砂、页岩	35	50	1.3

2020年,中国石油化工股份有限公司华东分公司在南川地区基于地表岩性和地下构造对地震采集的影响,提出了采用统一排列片接收地震信号的方

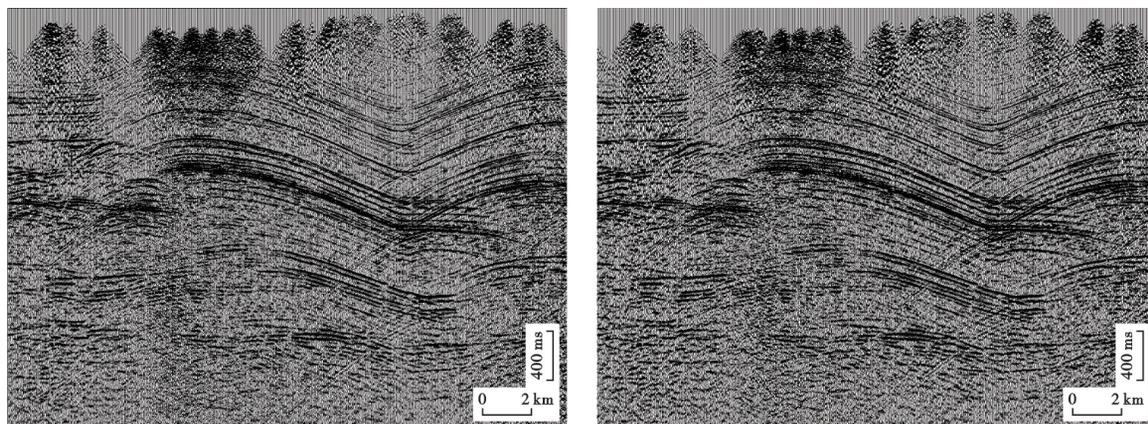
法。根据不同分区,设置由不同密度炮点激发的变密度三维观测系统,采用基于高清航测影像和全局寻优原则的激发点优化设计,提高地震资料的整体采集品质与施工效率。该技术使得页岩层地震反射波组的连续性好、波组特征清晰,满足页岩气的勘探需求。

2.1.3 低密度地震采集技术

对于中国的常压海相页岩气区,由于单井产量低,经济效益相对较差,在确定地震勘探技术有效性的同时还需要考虑其经济性,因而需要研究性价比较高的低密度观测系统。刘厚裕^[23]在武隆地区常压页岩气区开展的低密度地震勘探实践表明:不同于“双复杂”区的地质条件,成熟的地质认识及稳定的地层构造是低密度观测系统实施的前提。采用深井大药量饱和激发来提高有效单炮能量与信噪比,是低密度地震采集技术的关键,武隆地区超过85%的单炮激发采用14 kg以上的药量。基于地表条件及地下构造情况,合理地变化观测系统以及选择合适的参数,可以在低密度条件下保证面元属性的均匀性。比如,在局部复杂构造地区,可以通过加密炮点来增加覆盖次数,从而增强射线照明能量,或通过加长排列来增强倾斜地层的波场照明能量^[23-24]。

2.1.4 节点采集技术

在中国南方山地地区,页岩气勘探区域的地表条件复杂,有线仪器设备布设实施难度大,施工效率低。采用节点仪器工作模式可以缩短部署和检查排列的时间,降低劳动强度和安全风险。孟凡厚^[25]报道了节点仪器高效采集技术在中国南方山地页岩气项目(海坝项目)中的成功实施以及在花林项目中的推广应用,实践表明:节点采集技术提高了现场地震数据采集和后续地震数据合成的可靠性和有效性,实现了地震勘探的高效采集,与传统有线排列施工相比较,其日效提高了1倍以上,证实该技术是解决复杂地表高密度勘探和提质增效的有效手段。黄元溢^[26]在西南山地某海相页岩气勘探项目中开展了节点仪器与有线仪器采集的对比试验,证实二者所采集的地震资料品质基本相当;进一步开展节点仪器在西南山地地表条件下的技术适用性研究证实,节点仪器可以较好地应用于西南山地地区。2021年,中国石油化工股份有限公司勘探分公司在四川盆地盆缘中梁山工区采用节点仪与常规检波器(20DX-10 Hz型)以同点埋置、同步接收地震数据的方式进行施工,节点仪所接收的单炮地震数据在能量、频率、信噪比方面与常规检波器所接收的数据品质一致,经过室内处理之后,二者的偏移叠加剖面在成像质量上整体相当(图2)。



(a) 常规检波器接收叠加剖面

(b) 节点仪接收叠加剖面

图 2 节点仪与常规检波器接收数据叠加剖面效果对比

Fig. 2 Stack sections comparison of the data received by the node geophone and the conventional geophone

2.2 “双复杂”区高精度地震处理技术

页岩气区复杂地表条件与复杂地下构造导致地震资料中干扰波发育,有效波能量被掩盖,反射层次不清,信噪比较低。为了提高侧钻井对页岩层的精确入靶率,需要获取高精度深度域成像地震数据体,准确描述区域速度场和局部速度场的变化,落实目的层的深度、产状以及各级断裂的展布情况,并结合钻井开发的动态,指导页岩气水平井部署及钻探。主要技术包括:面向复杂山地地表的精细静校正技术、各向异性叠前深度偏移技术以及随钻快速成像技术。

2.2.1 面向复杂山地地表的精细静校正技术

段文燊^[27]在川东南地区、川南地区等探区通过实际资料的应用证明了层析静校正与地表一致性剩余静校正技术对复杂地表地震勘探的有效性^[28]。目前,业内主流的做法是开展不同静校正技术的组合应用,陈勇等^[29]通过建立融合静校正技术流程实现了多套静校正量的优势融合,具体做法为:分析不同静校正方法的优势区域,在区域边界处对低频分量进行软拼接,再对原始的高频分量和融合拼接后的低频分量进行加和运算,最终形成总校正量。樊骥铨等^[30]采用表层模型约束首波法三维层析静校正+基于时窗迭代的最大能量地表一致性剩余静校正+基于目标层的沿层最大相关剩余静校正技术,分别解决中长波长、中短波长及非地表一致性引起的静校正问题。

精细静校正技术的采用提高了叠前道集同相轴的一致性和连续性,改善了地震速度谱的质量,提高了速度分析的准确性,为后续地震资料的处理奠定了基础。

2.2.2 各向异性叠前深度偏移技术

叠前深度偏移技术以提高地震资料的信噪比、减少井-震误差为目标。常用的地震偏移技术对地下介质的认识建立在各向同性假设条件下,但在实际的复

杂地下构造介质中广泛存在着各向异性。页岩层的成像由于受地震波传播速度各向异性影响,偏移剖面上常存在突出的井-震矛盾问题,如明显的深度误差或地层产状的不一致,这些都无法满足页岩气勘探开发中对水平井轨迹在优质页岩储层中准确穿行的要求。因此有必要在复杂构造的偏移成像过程中引入各向异性参数,消除由各向异性引起的深度及构造误差。

面向中国页岩气地震勘探开发的需求,叠前深度偏移技术在近年来不断取得进步并得到广泛应用。中石化石油物探技术研究院有限公司研发了各向异性叠前逆时深度偏移(RTM)成像技术,该技术采用全声波方程同时延拓震源和检波点波场,兼有传统射线类Kirchhoff方法和单程波动方程的优点。由于考虑了各向异性参数,该偏移成像技术对介质横向速度变化和高陡倾角构造的适应性更强,可有效突出页岩气层的地震反射特征,提高复杂断裂的成像精度。宋吉杰等^[31]、尹静^[32]先后报道了焦石坝等多个探区成功开展了叠前深度偏移技术的应用,大大地提高了地下成像的精度。

根据页岩气区的地质构造特征及资料特点,各向异性深度偏移技术的实现过程主要分为3步:①对基于各向同性假设的近炮检距的数据开展各向同性叠前深度偏移和速度迭代,可以获得各向同性的深度剖面 and 速度体;②充分利用测井与地震资料求取倾斜横向等参数介质(TTI)的5个各向异性参数——Thomsen参数 ϵ 、Thomsen参数 δ 、各向异性速度、TTI地层的倾角和方位角;③开展TTI各向异性深度偏移成像,基于目标线的偏移结果,参照道集的校平程度、井-震吻合度及其他已知地质认识进行质控。

各向异性叠前深度偏移技术的关键点之一是如何

建立高精度的各向异性速度模型。杨勤勇等^[33]、郭恺等^[34]从各向异性介质的程函方程出发,推导了非双曲时距曲线方程,结合局部层析方法与测井数据,建立了各向异性参数初始模型,再通过等效参数联合层析反演方法增加模型的中高波数信息,进一步提高参数模型的精度,应用该方法后井-震误差明显降低,相对误差绝对值小于1%。潘成磊等^[35]在渝东南地区页岩气探区利用水平井轨迹约束网络层析反演方法,提高了

中一深部速度模型的精度,研究区44口水平井的井-震吻合率达93%。多个应用案例证明,各向异性叠前深度偏移技术可有效提升中国复杂构造条件下页岩气层的成像精度。图3为四川盆地白马页岩气区采用各向同性叠前偏移技术与各向异性叠前深度偏移技术的成像剖面对比,各向异性叠前深度偏移技术可明显改善地下复杂构造的成像质量,深层断裂清晰,陡倾角成像更加聚焦。

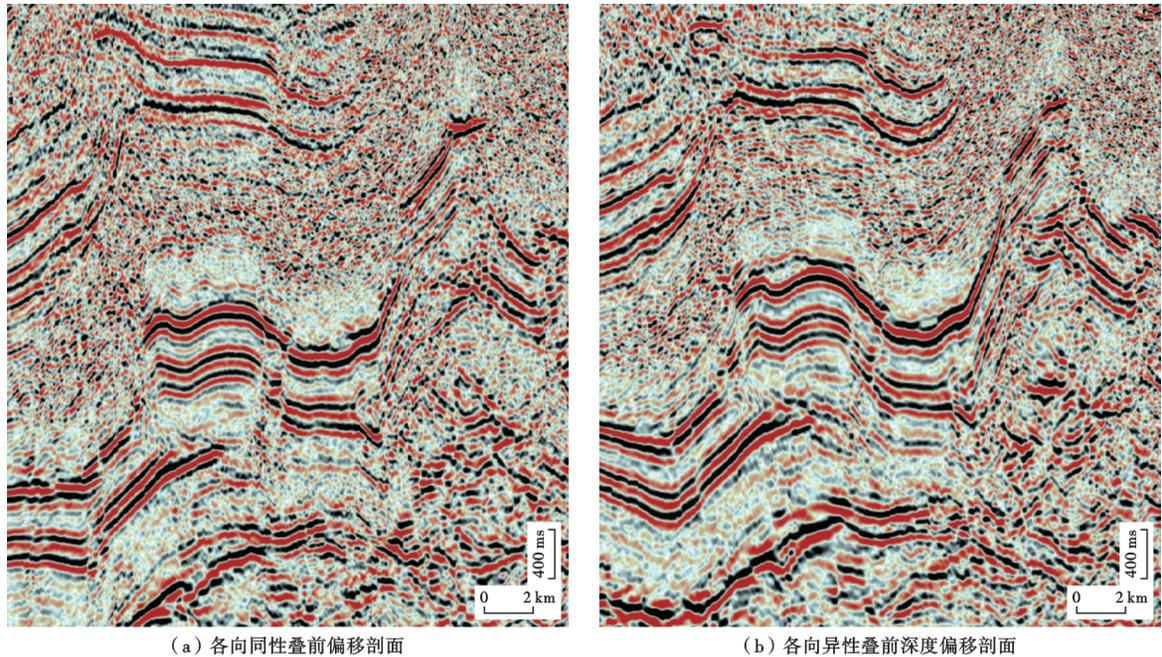


图3 不同偏移技术的成像剖面对比

Fig. 3 Comparison of imaging sections of different migration techniques

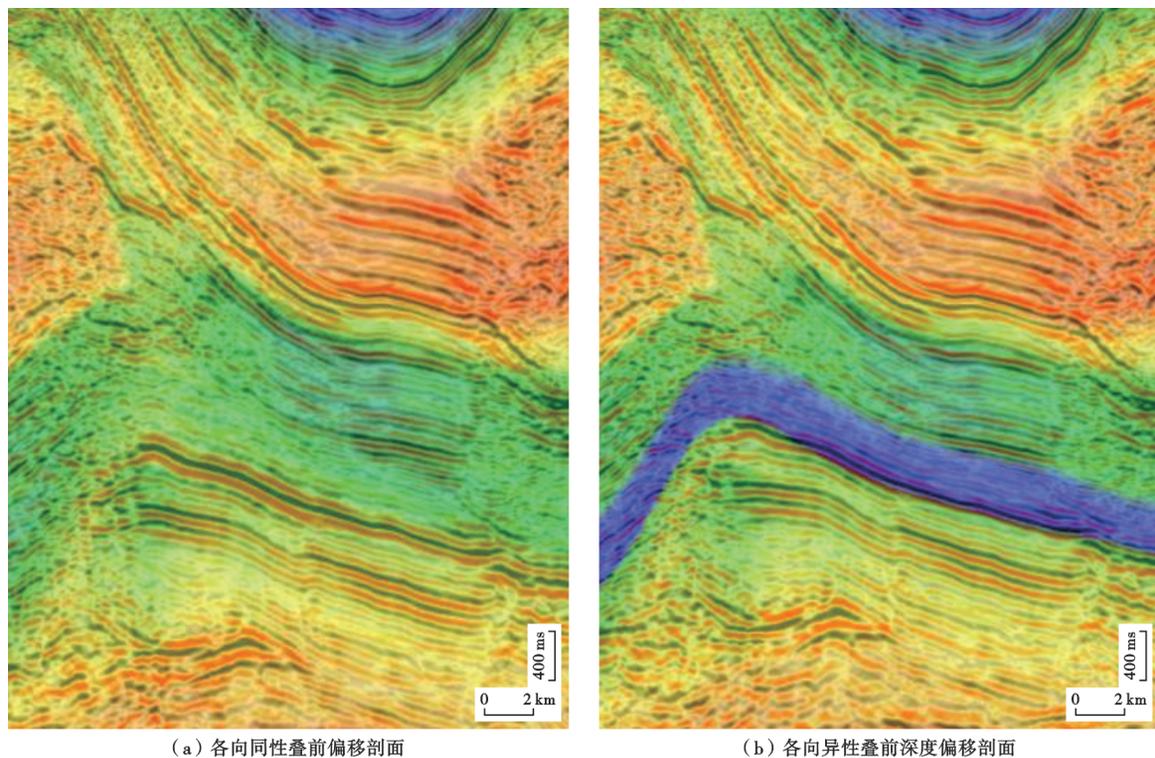
2.2.3 随钻快速成像技术

中国海相页岩储层普遍较薄(层厚为20~60 m),沿层水平井的井位设计和井轨迹优化对地震资料的成像精度要求高。近年来,在高精度叠前深度偏移处理的基础上,为了进一步提高地震对钻井轨迹优化调整的指导能力,随钻快速成像技术得以快速发展与应用。杨宗青等^[36]认为,传统的各向异性叠前深度偏移处理受地层厚度变化较快的影响,会导致成像质量和地层深度、产状等重要参数的精度降低,为此提出了采用优化各向异性偏移的方法,改进了井-震误差的插值方式,形成高效的随钻跟踪处理技术流程,从而在一定程度上实现了随钻快速成像,使偏移处理结果更加精确,地层成像深度、产状更符合实钻结果。随钻快速成像技术在四川盆地某页岩气区已开展实际应用,获得了满足深部页岩气水平井钻进精度需求的偏移成像成果。

中石化石油物探技术研究院有限公司经过攻关,形成了面向水平井钻探与跟踪的随钻快速成像处理技

术:钻前(3~6个月),在室内完成可行性分析研究,开展钻前基准速度模型的构建研究;钻中(1个月,造斜段—水平段钻进阶段),实时跟踪钻井轨迹并开展随钻快速成像研究,在24 h内实现动态更新地震影像;随后,在地震解释和工程地质人员密切配合下,分析钻头所处位置,预测钻头前方断层、产状突变等地质情况,指导钻井姿态的实时调整。

2022年,川东南地区新场构造带的新页1井在水平井的钻进过程中钻遇随钻自然伽马低值的情况,这预示着钻井轨迹偏离了页岩气层。中石化石油物探技术研究院有限公司快速跟踪钻井动态,进行井控层析速度反演,快速优化地震成像速度模型(图4),在24 h内完成了井周10 km²的地震数据快速成像处理,准确预测出钻头前方900 m处的地层产状,及时调整钻井轨迹,最终成功完钻。实钻验证B靶点的地震成像深度误差仅为-2.83 m,相对误差<3%,优质页岩气层的钻遇率为100%(图5)。



(a) 各向同性叠前偏移剖面

(b) 各向异性叠前深度偏移剖面

图 4 随钻信息约束的速度优化前后对比

Fig. 4 Comparison before and after velocity optimization of while-drilling information constraint

2.3 页岩气“双甜点”地震解释技术

页岩气“甜点”一般是指页岩气富集且易于实现开发的靶点,通常包括“地质甜点”和“工程甜点”。“地质甜点”是指靶点的地质条件优越、易于页岩气聚集成藏;而“工程甜点”是指在“地质甜点”的基础上,岩层具备易压裂、易开采条件的靶点。

2.3.1 “地质甜点”地震预测技术

“地质甜点”地震预测技术主要包括:叠前同时反演技术、基于岩石物理模型驱动的地震反演技术、地层压力地震预测技术、叠前纵波各向异性裂缝预测技术。通过上述技术可有效预测页岩的总有机碳(TOC)含量、含气量、地层压力、裂缝以及有效厚度等“地质甜点”参数。

(1) TOC 含量、孔隙度等页岩物性预测技术

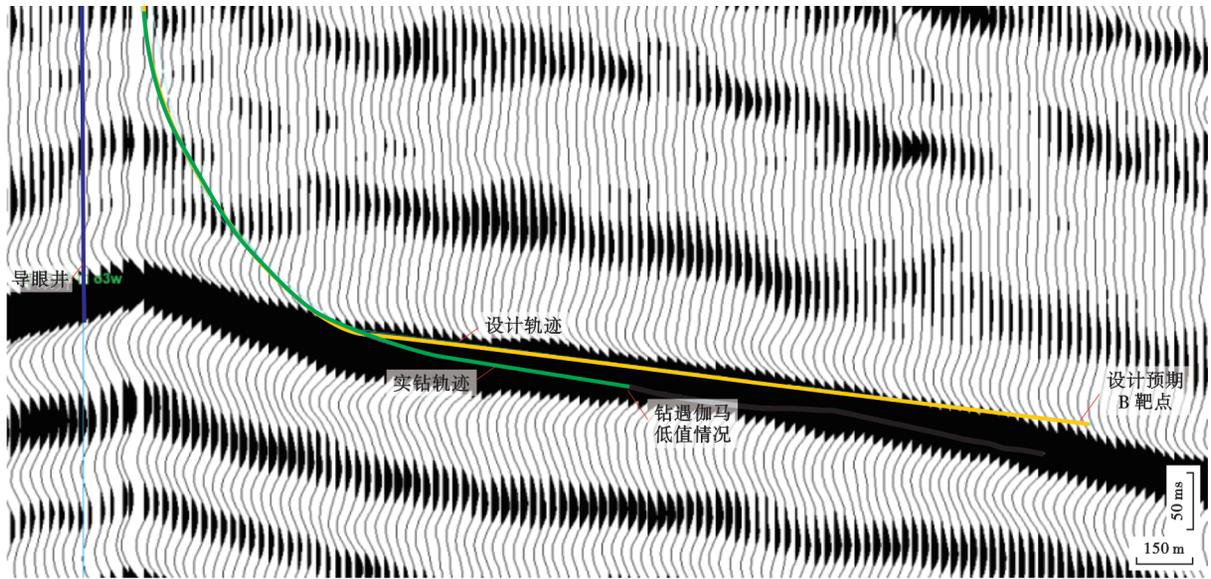
常用的页岩物性参数地震预测技术为叠前同时反演技术。曾庆才等^[37]、何昌龙等^[38]、陈祖庆^[39]、王秀姣等^[40]利用地震数据并基于全道集叠前同时反演的页岩气“甜点”预测方法,定量预测了四川盆地威远地区、焦石坝地区的页岩气“甜点区”,其工作流程包括:研究页岩储层的岩石物理特征,定义页岩气“甜点”敏感的地震弹性参数,建立地震弹性参数与 TOC 含量等“甜点”评价物性参数的定量关系;基于全道集叠前同时反演技术预测页岩储层的地震弹性参数,根据岩石物理分析结果将弹性参数转换为 TOC 含量等储层

评价物性参数,实现最终预测。

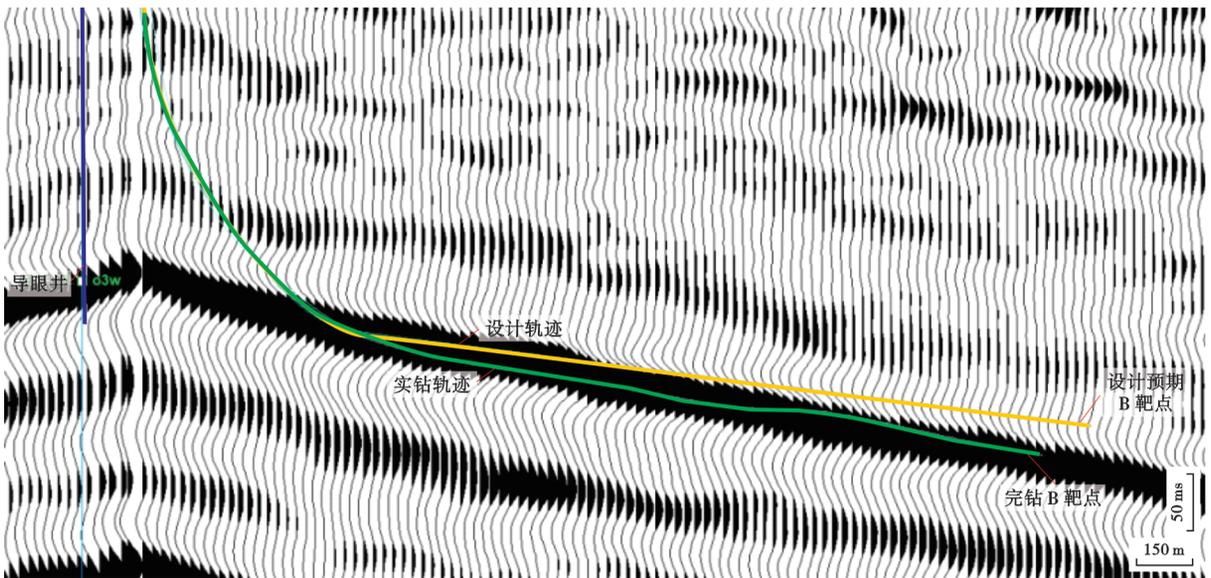
以叠前弹性参数同时反演为核心的页岩物性参数地震预测技术主要采用间接计算方法,其中,由于受密度参数反演的不稳定干扰,TOC 含量计算结果的可靠性可能受到影响。林海鲲等^[41]、陈勇等^[42]通过建立页岩储层的 TOC 含量反演目标函数,综合应用贝叶斯理论、统计岩石物理模型、蒙特卡洛随机抽样等技术,消除了单独反演某一种参数时受到其他参数限制的影响,可以有效地避开密度项的干扰;该方法可有效地利用先验信息,在条件概率的框架下,比较容易地组合各种不同分辨率、不同精度、不同类型的数据源进行反演,并能在有噪声的情况下给出反演结果的不确定性评估。该方法在四川盆地页岩气区取得了良好的应用效果。

(2) 页岩地层压力预测技术

在地质构造稳定的地区,生烃增压往往是页岩气储层超压形成的主要成因,而常规的地层压力预测方法基于欠压实成因理论,并不适宜直接应用于页岩地层的压力预测。近年来,中国学者探索研究了基于改进 Clay-Plus-Silt(CPS)模型的高精度地震地层压力预测技术。该技术基于岩石物理建模的思路,以 CPS 模型为基础,考虑干酪根生烃的影响,建立了一种构建正常压实速度趋势线的新方法,结合 Eaton 方程形成了新的页岩地层压力预测模型。采用该模型既可降低对



(a) 随钻成像前原始地震剖面



(b) 随钻成像优化后的地震剖面

图 5 随钻快速成像前后地震剖面对比

Fig. 5 Comparison of seismic sections before and after rapid imaging while drilling

实测压力观测数据过多的依赖,又可更好地体现出岩性变化对正常压实速度的影响。将高精度叠后波阻抗反演与基于该模型正演得到的正常压实速度相结合,建立了页岩地层压力预测的技术流程。在四川盆地多个页岩气田的实际应用表明,该方法可有效提高钻前地层压力的预测精度^[43-45]。图 6 为威荣页岩气田的地层压力系数预测剖面,其中,龙马溪组页岩的压力系数为 1.70~1.96,属于超压页岩气藏;由反演结果可见,龙马溪组为一个明显的超压带,其上覆地层压力系数逐渐降低。

(3) 页岩储层含气量预测技术

页岩储层的含气量与 TOC 含量、埋深、镜质体反

射率(R_o)、页岩厚度等相关。通过提取地震资料的频变属性,利用高频衰减、低频吸收的特性,可以定性预测页岩储层的含气性,但难以实现对含气量的定量预测。通常利用神经网络或回归算法等方法,根据测井、岩石物理等信息,可建立含气量与 TOC 含量之间的经验关系式,然后利用地震反演等方法计算页岩储层的含气量。

以基于卷积神经网络算法的页岩储层含气量地震预测方法为例,其实现过程为:首先,通过地震叠前反演方法获得速度、密度、杨氏模量等弹性参数,并将其作为外部属性,将地震数据及与含气性相关的地震属性作为内部属性;随后,以外部属性和内部属性作为输

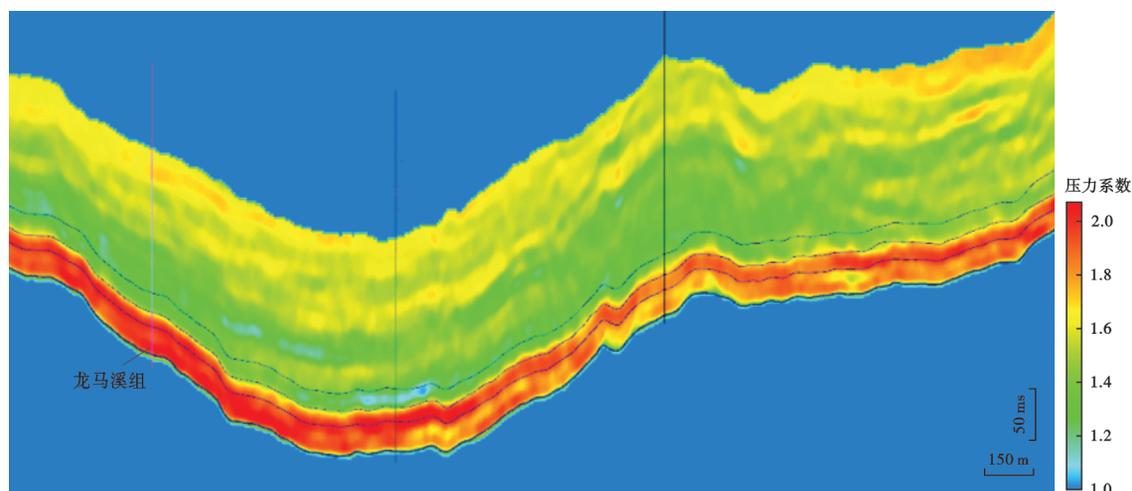


图 6 威荣页岩气田地层压力系数预测剖面

Fig. 6 Formation pressure coefficient prediction section of Weirong shale gas field

入层,开展多属性神经网络分析,优选出最佳地震属性组合;最后,应用卷积神经网络算法,建立页岩含气量与地震属性之间的映射关系,并运用到整个研究区,实现对页岩含气量的预测。

2.3.2 “工程甜点”地震预测技术

在页岩气井的压裂过程中,工程可压性评价越来越成为各大油气田的研究重点。如何选择最优压裂层段(“工程甜点”)是地质工程与地球物理工作者面临的一大难题,其主要的地震预测参数包括裂缝、脆性与地应力^[46]。

(1) 页岩储层裂缝预测技术

页岩储层裂缝的发育程度直接影响着页岩气的富集程度与压裂改造效果。裂缝地震预测方法研究在中国先后经历了横波勘探、多波多分量勘探和纵波裂缝检测等几个阶段。近年来,利用纵波地震资料来预测裂缝的技术取得了长足的进步,且由以往的定性描述向定量计算裂缝发育方位和密度转变。郭同翠等^[47]对各向异性反演方法进行了改进,可定量预测出高角度裂缝,其方法流程为:首先,对各向同性低频模型的方位进行各向异性反演,得出各向异性的强度和方向等参数;其次,通过速度各向异性分析(VVAz)求得各向异性速度差、快P波速度方向等各向异性参数;然后,将各向异性速度参数经过拟合、校正和归一化处理纳入低频模型,建立方位各向异性低频模型;最后,对各向异性低频模型的迭代方位进行各向异性反演,获得新的各向异性强度和方向,用以预测裂缝。通过这种迭代方位各向异性反演预测的裂缝具有较强的方向性和较高的分辨率;实际应用也证实,采用改进方法预测的页岩储层的裂缝方向与区域成像测井解释的裂缝方向一致。

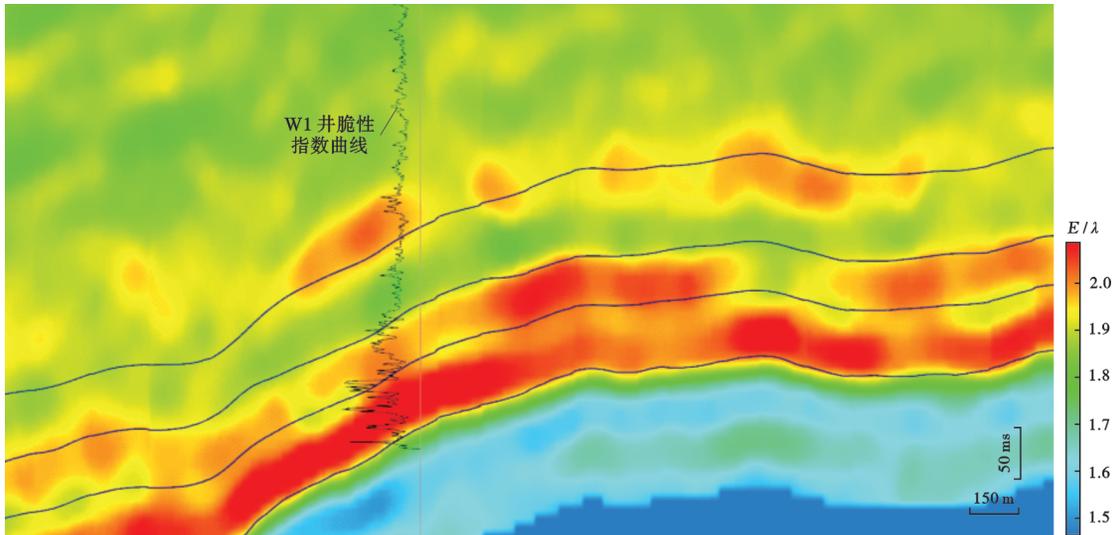
(2) 页岩储层脆性预测技术

页岩储层的脆性预测主要采用叠前同时反演技术和杨氏模量、泊松比叠前直接反演方法。叠前同时反演技术预测脆性主要是通过叠前同时反演计算提取纵/横波速度和密度参数,继而可以得到纵/横波阻抗、拉梅常数、泊松比等岩性参数,再通过脆性岩石物理模板来预测脆性^[38,48-49]。董宁等^[50]、张德明等^[51]、单中强^[52]以上述方法为核心,在川南地区、渝西地区等探区的应用中进行了适当的改进,并将其与贝叶斯参数估计理论、多元回归脆性指数等方法相结合,提高了实际脆性的预测效果。图7为川南地区某海相页岩气田的优质页岩段脆性指数地震预测剖面,可以看出其脆性预测结果的稳定性高,钻井揭示的结果与地震预测的结果一致。

(3) 页岩层地应力预测技术

地应力的精确预测可以有效地指导页岩层水平井的钻井轨迹设计和压裂实施。Iverson^[53]基于宽方位地震数据提出通过振幅随道集偏移距变化(AVO)来反演各向异性的弹性参数,获得任意地方的地应力,并由此构建各向异性的地应力预测模型。中国关于地应力的研究起步较晚,起初的研究主要是利用测井资料来预测地应力^[54-55]。

目前,利用地震资料来预测应力场主要采用应力场数值模拟技术、岩石物理等效模型方法、地震方位各向异性反演方法。应力场数值模拟技术针对张性裂缝的地层构造,基于地层的岩性、岩石物理等已知信息,从构造力学出发建立地质模型、数学模型和力学模型,再采用三维有限差分方法模拟地层应力场,研究构造裂缝的展布与区域应力场的关系,得到主应变、主应力和主应力方向等应力场参数^[56]。应力场数值模拟技



注: E —杨氏模量; λ —拉梅常数。

图7 川南地区页岩气田过W1井的脆性指数预测剖面

Fig. 7 Brittleness index prediction section through Well W1 in Chuannan shale gas field

术的优势在于其体现的是区域的宏观应力状态,而对于局部应力的细节表现较差。张广智等^[57]通过分析页岩的构造特征,建立了适用于页岩地层的岩石物理等效模型,并以此实现了最小水平地应力的有效预测。马妮等^[58]探讨了基于正交各向异性介质的地应力反演方法,利用叠前方位地震数据估算了地层正交各向异性的水平应力差异比(ODHSR)。结合实际资料的反演结果表明,利用叠前方位地震数据估算地层的ODHSR,既考虑了页岩地层的水平层理作用,又考虑了垂直裂缝的影响,更符合实际的页岩地层,能够较为有效地预测页岩中容易压裂成网的区域。对于该类技术的延伸,Du等^[59]提出了在非均质储层中应用叠前道集振幅随方位的变化(AVAz)来反演地应力的新方法,并推导了水平应力差异比(DHSR)与泊松比和裂缝密度之间的新的关系式。

基于前人的研究,袁萌等^[60]将传统应力模型的计算方法和叠前反演方法相结合,再引入机器学习中的支持向量机算法(SVM)修正预测结果,并以川东南地区D区块五峰组—龙马溪组优质页岩层段为例,开展了地应力的定量预测,其研究表明,地应力的空间分布规律与构造、埋深等有关。这种多方法联合的定量预测结果与已钻井结果的吻合程度更高,可为后续科研人员提高页岩地应力预测的准确度提供借鉴。

3 中国海相页岩气地震勘探技术面临的主要问题及发展方向

3.1 中国海相页岩气地震勘探技术面临的主要问题

中国海相页岩气的勘探开发起步晚、发展快,经过

近10年的攻关,形成了一系列页岩气地震勘探关键技术,为页岩气产业的蓬勃发展提供了有力的技术支撑。近年来,伴随着中国海相页岩气的持续高效开发,逐步走向深部(埋深大于3500 m)、走进常压(地层压力系数为0.8~1.2)已成为页岩气勘探开发的发展趋势。深部页岩气勘探在四川盆地泸州、大足、威荣等多个地区已取得重大突破,落实的页岩气有利区资源量超过 $8.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$,提交的探明储量超过 $1.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。常压页岩气主要发育于盆缘构造复杂区及盆外褶皱带,目前,在四川盆地的南川、白马、綦江等地区,页岩气的勘探亦已取得突破,探明地质储量近 $2000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[61]。

如果能将深部、常压页岩气资源释放出来,必将进一步提高页岩气的产量,大大缓解中国的能源压力,这也对地震勘探技术提出了更高的挑战。中国页岩气田的地震地质条件复杂,将面临更多需要持续攻关的难题。

(1) 在地震采集方面,由于地表高程变化剧烈、区域内干扰源多、外界干扰严重、煤矿采空区和灰岩区的接收条件差,地震采集的设计难度高,这导致地震资料的高频噪音背景重,地震激发的单炮资料表现出频带窄、信噪比低、深层信号弱的特点。

(2) 在地震处理方面,当前面临着如何解耦低信噪比资料与高精度建模、成像的矛盾。在盆缘与盆外灰岩出露区,由于地震资料的信噪比低,准确拾取反射波剩余曲率的难度大,因而难以反演正确的速度扰动和进行速度建模。此外,受构造形态影响,页岩气层的埋深变化大,地层内断裂/裂缝发育、纵/横向非均质性较强,尤其对于薄页岩气层,成像深度误差导致其难以保证页岩层的有效钻遇。

(3) 深部页岩气藏埋深大,工程改造难度高。当前,复杂构造区页岩层的深度及产状预测、低序级断裂的检测、微幅构造的精细落实及“工程甜点”参数的预测精度有待于进一步提高。常压页岩气藏的含气量低、储层地震响应特征弱,物性、含气性等“甜点”参数预测的准确性欠佳。

3.2 中国海相页岩气地震勘探技术的主要发展方向

基于中国页岩气地震勘探技术的发展现状与问题分析,笔者提出了中国海相页岩气地震勘探技术的发展方向与对策。

(1) 加快针对复杂地表的高端自主地震采集设备的研发,例如节点采集技术、基于分布式声波传感(DAS)的井中地震采集技术,实现地表适应能力强、安全经济高效的地震采集,提高地震原始资料的信噪比和保真度。

(2) 推进面向复杂地质构造的前沿、高分辨率的地震处理技术的研发与落地实施,如 FWI 高精度建模技术、最小二乘逆时偏移技术(LS-RTM)、压缩感知地震数据重建技术等;实现复杂地层的高精度速度建模,提升小断裂、陡构造的成像精度,夯实地震成果数据的可靠性。

(3) 筑牢岩石物理实验与建模研究基础,不断提高“双甜点”预测的精度。“双复杂”条件及深部的高温高压对“甜点”关键参数的预测提出了新的挑战,需要针对深部页岩在温压耦合下的脆延性转换特征与表征方法,以及在不同压力系统与构造特征下的页岩岩石物理特征等基础理论开展系统研究。

(4) 深化地质—工程一体化研究,进一步构建优化“甜点”关键参数与钻井工程、压裂改造的关系,开展基于地球物理静态参数的工程风险预警、随钻前探与随钻远探等技术研究,实现多学科融合、多技术协同,通过“甜点”、地质力学参数的预测来提高页岩气储层的钻遇率,指导钻井工程的工艺优化。

(5) 提高人工智能(AI)技术在页岩气地球物理领域的普及程度,实现实时数据采集、自动化处理和智能化解释,依托数字化转型迎接行业的长期发展。其发展方向可以是基于 AI 或机器学习技术的页岩气储层预测、产能评估及基于事实数据驱动的生产运营决策等^[62-63]。

高等院校等研究机构与油田公司应继续加强一体化联合攻关,紧密围绕页岩气开发不同时期的不同需求,持续深化地震成像和预测技术体系研究,形成针对页岩气的“勘探开发全周期支撑思路”及其指导下的技术保障方式,降低产建风险。

4 结 论

(1) 高效、高质、经济、低风险的地震采集是实现页岩气地震勘探的基石。中国的规模页岩气田主要分布在中国南方的海相地层中,其地表以山地为主。“小、宽、高、中”三维观测系统较为普遍地适用于页岩气区的地震采集,在此基础上根据地表局部的特殊性(岩性、采空区等)以及地下资源量的差别进行观测系统的调整,如变密度、低密度采集,可以更好地提高激发接收效果,降低页岩气的地震勘查成本。节点采集在提高施工效率、降低风险方面具有较高的前瞻性,未来关注的重点是保持、提高节点采集的数据质量与实现实时质控。

(2) “双复杂”区的高质量地震处理与随钻成像可以有效地指导页岩气井的精确钻探。复杂地表与地层条件对地震成像及页岩气层的精准钻进提出了挑战。面向复杂山地的静校正技术及各向异性叠前深度偏移技术已在国内外被多次证明可以提升陡构造区的成像质量,这些技术已成为中国页岩气地震资料处理的必要技术。随钻快速成像技术是地震勘探与钻井工程相结合的一大突破,实现了地震成像成果由静态交付到动态跟踪的转变,这对计算性能及处理人员的综合素质提出了更高要求。

(3) “双甜点”地震预测是页岩气领域地质—工程一体化的关键技术,助力页岩气井的精准布设及高效开发。基于叠前反演的 TOC 含量、孔隙度、含气量等“地质甜点”预测对于叠前道集质量具有较高的要求,可以通过处理—解释一体化的道集优化、AVO 特征分析、先验模型约束等方式提高地震预测的稳定性及可靠性。裂缝、脆性、地应力等“工程甜点”预测具有较高的精度需求,建议与构造演化、古地貌分析、钻井动态数据、生产资料等地质与工程认识相结合,由宏观到微观分析裂缝、应力的变化,并结合地震分辨率与开发需求,给出科学合理的可识别区间。

参 考 文 献

- [1] 付永强,杨学锋,周朗,等. 川南页岩气体积压裂技术发展与应用[J]. 石油科技论坛,2022,41(3):18-25.
FU Yongqiang, YANG Xuefeng, ZHOU Lang, et al. Development and application of shale gas volume fracturing technology in southern Sichuan Basin[J]. Petroleum Science and Technology Forum,2022,41(3):18-25.
- [2] 余国,陆如泉. 2022 年国内外油气行业发展报告[M]. 北京:石油工业出版社,2023.
YU Guo, LU Ruquan. Development report of domestic and international oil and gas industry in 2022[M]. Beijing:Petroleum In-

- dustry Press,2023.
- [3] 中国石油勘探开发研究院. 全球油气勘探开发形势及油公司动态(2023年)[M]. 北京:石油工业出版社,2023.
Research Institute of Petroleum Exploration and Development. Global petroleum E&D trends and company dynamics (2023) [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,2023.
- [4] HREN D, SIM LEE K, LI Tianjiang. Extended-POCS 5D technology and enhanced depth imaging leads to improved well planning and geosteering performance of the unconventional shale gas reservoirs [C] // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019. San Antonio:Society of Exploration Geophysicists,2019.
- [5] JIANG Tao,GONG Bin,QIAO Feng, et al. Compressive seismic reconstruction with extended POCS for arbitrary irregular acquisition[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. Houston:Society of Exploration Geophysicists,2017.
- [6] RAUCH-DAVIES M, SUTHERLAND S, BRADSHAW M, et al. Use of prestack depth migration for improving the accuracy of horizontal drilling in unconventional reservoirs [J]. The Leading Edge,2018,37(1):27-32.
- [7] ZHU Jinming, COULMAN T. Successful subsurface imaging in the Marcellus shale play with mega 3D seismic surveys using advance processing technologies: from pilot study to production[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019. San Antonio:Society of Exploration Geophysicists,2019.
- [8] MULINSKA M, MALINOWSKI M, CYZ M. Can we reliably estimate brittleness for thin shale reservoirs? A case study from the Lower Paleozoic shales in northern Poland[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. Houston: Society of Exploration Geophysicists,2017:758-762.
- [9] SHOEMAKER M, NARASIMHAN S, QUIMBY S, et al. Calculating far-field anisotropic stress from 3D seismic in the Permian Basin[J]. The Leading Edge,2019,38(2):96-105.
- [10] NAEINI E Z, GREEN S, RAUCH-DAVIES M. An integrated deep learning solution for petrophysics, pore pressure, and geomechanics property prediction[C] // Proceedings of Unconventional Resources Technology Conference. Denver:Society of Exploration Geophysicists,2019.
- [11] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等. 中国页岩气研究现状与发展趋势[J]. 石油学报,2010,31(4):689-694.
CHEN Shangbin, ZHU Yanming, WANG Hongyan, et al. Research status and trends of shale gas in China[J]. Acta Petrolei Sinica,2010,31(4):689-694.
- [12] 张廷山,赵国安,陈桂康,等. 我国页岩气革命面临的问题及对策思考[J]. 西南石油大学学报:社会科学版,2016,18(2):1-8.
ZHANG Tingshan, ZHAO Guo'an, CHEN Guikang, et al. Shale gas revolution in China—problems and countermeasures [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Social Sciences Edition,2016,18(2):1-8.
- [13] 史建勋,王红岩,董大忠,等. 中国页岩气产业发展的特点与经验[J]. 油气与新能源,2022,34(1):25-30.
SHI Jianxun, WANG Hongyan, DONG Dazhong, et al. Characteristics and experience of the development of shale gas industry in China[J]. Petroleum and New Energy,2022,34(1):25-30.
- [14] 郭旭升,刘金连,杨江峰,等. 中国石化地球物理勘探实践与展望[J]. 石油物探,2022,61(1):1-14.
GUO Xusheng, LIU Jinlian, YANG Jiangfeng, et al. Geophysical exploration practices and perspectives at Sinopec[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2022,61(1):1-14.
- [15] 郭旭升,胡东风,黄仁春,等. 四川盆地深层—超深层天然气勘探进展与展望[J]. 天然气工业,2020,40(5):1-14.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, HUANG Renchun, et al. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin: progress and prospect[J]. Natural Gas Industry,2020,40(5):1-14.
- [16] 段文燊,吴朝容,涂远良. 川西南页岩气勘探三维地震资料采集质量提升措施[J]. 石油工业技术监督,2023,39(2):1-6.
DUAN Wenshen, WU Zhaorong, TU Yuangen. Improving methods of collecting quality for three-dimensional seismic data of shale gas exploration in the southwest of Sichuan[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry,2023,39(2):1-6.
- [17] 吴爱国,刘金辉,吴金珠,等. 西昌盆地布拖-昭觉地区页岩气地震勘探应用实践[C]//SPG/SEG南京2020年国际地球物理会议论文集. 南京:中国石油学会石油物探专业委员会,2020:198-201.
WU Aiguo, LIU Jinhui, WU Jinzhu, et al. Seismic exploration practice of shale gas in the Butuo-Zhaojue area of Xichang Basin [C]// Proceedings of SPG/SEG Nanjing 2020 International Geophysical Conference. Nanjing: Society of Petroleum Geophysicists,2020:198-201.
- [18] 周晓冀,杨智超,杜文军,等. 四川盆地泸州区块页岩气三维地震覆盖密度优选[J]. 天然气勘探与开发,2021,44(2):93-99.
ZHOU Xiaoji, YANG Zhichao, DU Wenjun, et al. Optimizing 3D seismic coverage density in Luzhou shale-gas block, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development,2021,44(2):93-99.
- [19] 王雪梅,周晓冀,杨晓,等. 四川盆地川南地区页岩气高精度三维采集技术与成效[C]//第32届全国天然气学术年会(2020)论文集. 重庆:中国石油学会天然气专业委员会,2020:538-547.
WANG Xuemei, ZHOU Xiaoji, YANG Xiao, et al. High-precision three-dimensional acquisition technology and effect for shale gas in southern Sichuan Basin[C]//Proceedings of the 32nd National Natural Gas Academic Conference (2020). Chongqing: Professional Committee of Natural Gas, Chinese Petroleum Society, 2020:538-547.
- [20] 符超. 湖南保靖页岩气区块地震勘探采集技术研究[J]. 工程地球物理学报,2020,17(6):665-671.
FU Chao. Study on seismic prospecting data acquisition technology in Hunan Baojing shale play[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2020,17(6):665-671.
- [21] 赵虎,李汶骏,赵容容,等. 川西复杂构造带地震采集方法思考及参数建议[J]. 石油物探,2023,62(3):442-451.
ZHAO Hu, LI Wenjun, ZHAO Rongrong, et al. Considerations on seismic acquisition methods and parameter recommendations for complex structural areas in western Sichuan, China[J]. Geo-

- physical Prospecting for Petroleum, 2023, 62(3): 442-451.
- [22] 薛野, 任俊兴, 杨帆, 等. 南川复杂构造带常压页岩气变密度三维地震采集技术的实践与认识[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12461-12469.
XUE Ye, REN Junxing, YANG Fan, et al. Practice and understanding of variable-density 3D seismic exploration technology of normal pressure shale gas in Nanchuan complex structural belt[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12461-12469.
- [23] 刘厚裕. 页岩气低密度三维地震勘探方法适应性评估分析[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(5): 34-41.
LIU Houyu. Adaptability evaluation and analysis of low density 3D seismic exploration method for shale gas[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(5): 34-41.
- [24] 赵苏城. 低密度三维勘探方法在武隆地区页岩气勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(1): 27-34.
ZHAO Sucheng. Application of low-density three-dimensional exploration method in shale gas exploration in Wulong area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(1): 27-34.
- [25] 孟凡厚, 梁兴, 黄元溢, 等. 节点采集技术在南方山地勘探的应用[C]//2022年中国石油物探学术年会论文集. 海口: 中国石油学会石油物探专业委员会, 2022: 280-283.
MENG Fanhou, LIANG Xing, HUANG Yuanyi, et al. Application of node acquisition technology in southern mountain exploration[C]//Proceedings of the 2022 Oil Geophysical Prospecting Annual Conference in China. Haikou: Society of Petroleum Geophysicists, 2022: 280-283.
- [26] 黄元溢. 无线节点地震采集技术在西南山地应用研究[C]//2019年中国地球科学联合学术年会论文集. 北京: 中国地球物理学会, 2019: 873-876.
HUANG Yuanyi. Application of wireless node seismic acquisition technology in southwest mountainous area[C]//Proceedings of the 2019 China Earth Science Joint Academic Conference. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2019: 873-876.
- [27] 段文豪. 川东南双复杂区页岩气三维地震勘探资料处理探讨[J]. 石化技术, 2020, 27(10): 116-117.
DUAN Wenshen. Discussion on data processing of three-dimensional seismic exploration of shale gas in double complex areas of Southeast Sichuan Basin[J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(10): 116-117.
- [28] 吴涛, 石学文, 苟其勇, 等. 川南山地页岩气地震资料处理技术和应用[C]//2022年中国石油物探学术年会论文集. 海口: 中国石油学会石油物探专业委员会, 2022: 163-166.
WU Tao, SHI Xuewen, GOU Qiyong, et al. Seismic data processing technology and application for shale gas in southern Sichuan mountainous area[C]//Proceedings of the 2022 Oil Geophysical Prospecting Annual Conference in China. Haikou: Society of Petroleum Geophysicists, 2022: 163-166.
- [29] 陈勇, 董清源, 刘小民, 等. 页岩气高精度地震成像及“甜点”预测技术进展[C]//中国石油学会 2019 年物探技术研讨会论文集. 成都: 中国石油学会石油物探专业委员会, 2019: 901-904.
CHEN Yong, DONG Qingyuan, LIU Xiaomin, et al. Progress in high-precision seismic imaging and “sweet spot” prediction technology for shale gas[C]//Proceedings of the 2019 Geophysical Prospecting Technology Seminar of Chinese Petroleum Society. Chengdu: Society of Petroleum Geophysicists, 2019: 901-904.
- [30] 樊骥铖, 李雪松, 高欢, 等. 组合静校正解决方案及在页岩气地震勘探中的应用[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(4): 1578-1589.
FAN Qicheng, LI Xuesong, GAO Huan, et al. Combined static correction solution and its application in shale gas seismic exploration[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(4): 1578-1589.
- [31] 宋吉杰, 徐春梅, 刘小民, 等. 复杂山地页岩气储层精确成像的关键技术探讨[C]//CPS/SEG 北京 2018 国际地球物理会议暨展览电子论文集. 北京: 中国石油学会, 2018: 569-573.
SONG Jijie, XU Chunmei, LIU Xiaomin, et al. Discussion on key technologies for accurate imaging of shale gas reservoirs in complex mountainous areas[C]//Electronic Proceedings of CPS/SEG Beijing 2018 International Geophysical Conference and Exhibition. Beijing: Chinese Petroleum Society, 2018: 569-573.
- [32] 尹静. 各向异性 RTM 技术在焦石坝南地震资料处理中的应用[J]. 江汉石油职工大学学报, 2019, 32(2): 11-14.
YIN Jing. Application of aeolotropism RTM technology in seismic data processing in northern Jiaoshiba area[J]. Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers, 2019, 32(2): 11-14.
- [33] 杨勤勇, 郭恺, 李博, 等. TTI 各向异性地震成像技术及其在页岩气勘探中的应用[J]. 石油物探, 2019, 58(6): 882-889.
YANG Qinyong, GUO Kai, LI Bo, et al. Application of TTI anisotropic seismic imaging in shale gas exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(6): 882-889.
- [34] 郭恺, 杨林. 一种新的 TTI 介质多参数联合层析反演方法[J]. 石油物探, 2019, 58(3): 412-418.
GUO Kai, YANG Lin. A new multi-parameter joint tomography inversion method for TTI medium[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(3): 412-418.
- [35] 潘成磊, 孟庆利, 庞全康, 等. 井信息约束速度建模技术在双复杂地震资料的应用[C]//2022年中国石油物探学术年会论文集(上册). 海口: 中国石油学会石油物探专业委员会, 2022: 502-505.
PAN Chenglei, MENG Qingli, PANG Quankang, et al. Application of well-constrained velocity modeling technology to dual-complex seismic data[C]//Proceedings of the 2022 Oil Geophysical Prospecting Annual Conference in China. Haikou: Society of Petroleum Geophysicists, 2022: 502-505.
- [36] 杨宗青, 李宏伟, 韩友平, 等. 优化的各向异性深度偏移技术在页岩气随钻跟踪中的应用[C]//中国石油学会 2021 年物探技术研讨会论文集. 成都: 中国石油学会石油物探专业委员会, 2021: 604-607.
YANG Zongqing, LI Hongwei, HAN Youping, et al. Application of optimized 3D depth migration technique with anisotropy in shale gas drilling tracking[C]//Proceedings of the 2021 Geophysical Prospecting Technology Seminar of Chinese Petroleum Society. Chengdu: Society of Petroleum Geophysicists, 2021: 604-607.
- [37] ZENG Qingcai, CHEN Sheng, HE Pei, et al. Quantitative prediction of shale gas sweet spots based on seismic data in Lower Silu-

- rian Longmaxi Formation, Weiyuan area, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(3): 422-430.
- [38] 何昌龙, 吕夔, 黄天俊, 等. 基于岩石物理分析的页岩气叠前预测方法在川南威远地区的应用[J]. *石油学报*, 2020, 41(10): 1209-1218. HE Changlong, LÜ Yan, HUANG Tianjun, et al. Application of pre-stack prediction method of shale gas based on petrophysical analysis in Weiyuan area of the southern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(10): 1209-1218.
- [39] 陈祖庆. 海相页岩 TOC 地震定量预测技术及其应用——以四川盆地焦石坝地区为例[J]. *天然气工业*, 2014, 34(6): 24-29. CHEN Zuqing. Quantitative seismic prediction technique of marine shale TOC and its application: a case from the Longmaxi shale play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(6): 24-29.
- [40] 王秀姣, 陈胜, 杨亚迪, 等. 页岩气“甜点”地震预测关键技术——以川南 Z201 区块下志留统龙马溪组为例[C]//中国石油学会 2021 年物探技术研讨会论文集. 成都: 中国石油学会石油物探专业委员会, 2021: 1332-1335. WANG Xiujiao, CHEN Sheng, YANG Yadi, et al. Key technologies for predicting sweet spots of shale gas with seismic data: a case study of the lower Silurian Longmaxi Formation in the Z201 block, southern Sichuan Basin, China[C]// *Proceedings of the 2021 Geophysical Prospecting Technology Seminar of Chinese Petroleum Society*. Chengdu: Society of Petroleum Geophysicists, 2021: 1332-1335.
- [41] 林海鲲, 印兴耀, 裴松. 一种直接提取三参数反演页岩 TOC 的方法[C]//2019 年中国地球科学联合学术年会论文集. 北京: 中国地球物理学会, 2019: 85-87. LIN Haikun, YIN Xingyao, PEI Song. A method for directly extracting the three-parameter inversion of shale TOC[C]// *Proceedings of the 2019 China Earth Science Joint Academic Conference*. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2019: 85-87.
- [42] 陈勇, 孙振涛, 许凯. 面向页岩气储层的叠前多参数地震反演方法研究[J]. *石油物探*, 2022, 61(6): 1016-1027. CHEN Yong, SUN Zhentao, XU Kai. Pre-stack multi parameter seismic inversion in shale-gas reservoirs[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(6): 1016-1027.
- [43] 林正良, 孙振涛, 胡华锋, 等. 四川盆地 WR 区块页岩气藏孔隙压力分布特征[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(5): 2045-2052. LIN Zhengliang, SUN Zhentao, HU Huafeng, et al. Pore pressure distributional characterization of shale gas reservoir in WR block of Sichuan Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(5): 2045-2052.
- [44] 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(3): 362-368. HU Huafeng, HU Qi, LIN Zhengliang. Pore pressure prediction for shale gas reservoirs and its application in the Sichuan Basin, China[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(3): 362-368.
- [45] 肖鹏飞, 林正良, 胡华锋. 页岩气储层保存条件关键参数地震预测及在川东南的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2020, 42(3): 324-331. XIAO Pengfei, LIN Zhengliang, HU Huafeng. Seismic prediction of key parameters of shale gas reservoir preservation conditions and its application in southeast Sichuan[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 42(3): 324-331.
- [46] 赵爽, 李曙光, 林正良. 川南深层五峰—龙马溪组页岩工程“甜点”地震预测技术[J]. *工程地球物理学报*, 2022, 19(4): 466-473. ZHAO Shuang, LI Shuguang, LIN Zhengliang. Seismic prediction technology for engineering “sweet spot” of deep Wufeng-Longmaxi Formation shale in southern Sichuan[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2022, 19(4): 466-473.
- [47] GUO Tongcui, WANG Hongjun, GUO Yueliang, et al. Fracture prediction based on an improved anisotropy inversion: a shale reservoir fracture prediction case study[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2019. San Antonio: Society of Exploration Geophysicists, 2019: 414-418.
- [48] 陈龙. 地球物理技术在页岩气“工程甜点”预测中的应用[J]. *江汉石油职工大学学报*, 2018, 31(3): 5-7. CHEN Long. Application of geophysical technology in shale gas “engineering dessert” prediction[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers*, 2018, 31(3): 5-7.
- [49] 顾爽, 巫芙蓉, 杨容, 等. 四川盆地渝西地区深层页岩气地质、工程甜点表征技术[C]//中国石油学会 2021 年物探技术研讨会论文集. 成都: 中国石油学会石油物探专业委员会, 2021: 1356-1359. GU Wen, WU Furong, YANG Rong, et al. Geological and engineering sweet spot characterization technology for deep shale gas in the western Chongqing area of Sichuan Basin[C]// *Proceedings of the 2021 Geophysical Prospecting Technology Seminar of Chinese Petroleum Society*. Chengdu: Society of Petroleum Geophysicists, 2021: 1356-1359.
- [50] 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(S1): 69-74. DONG Ning, XU Jie, SUN Zandong, et al. Shale brittleness prediction by geophysical methods[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2013, 48(S1): 69-74.
- [51] 张德明, 刘志刚, 姚政道, 等. 川南页岩气田 L 区块页岩脆性指数叠前地震定量预测[J]. *石油物探*, 2023, 62(1): 154-162. ZHANG Deming, LIU Zhigang, YAO Zhengdao, et al. Quantitative prediction of shale brittleness index in block L of shale gas field in southern Sichuan using pre-stack seismic prediction method[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2023, 62(1): 154-162.
- [52] 单中强. 地震叠前反演方法预测页岩脆性指数在南川地区的应用[J]. *地质学刊*, 2018, 42(2): 291-297. SHAN Zhongqiang. Prediction of shale brittleness index by seismic prestack inversion in Nanchuan area[J]. *Journal of Geology*, 2018, 42(2): 291-297.
- [53] IVERSON W P. Closure stress calculations in anisotropic formations[R]. SPE 29598, 1995.
- [54] 范翔宇, 康海涛, 龚明, 等. 川东北山高前陡构造地应力精细计算方法[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 34(3): 41-46.

- FAN Xiangyu, KANG Haitao, GONG Ming, et al. Fine calculation method study of crustal stress of high-steep conformation in northeast Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum University; Science & Technology Edition, 2012, 34(3): 41-46.
- [55] 邓金根, 陈峥嵘, 耿亚楠, 等. 页岩储层地应力预测模型的建立和求解[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(6): 59-64.
- DENG Jinggen, CHEN Zhengrong, GENG Ya'nan, et al. Prediction model for in-situ Formation stress in shale reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum; Edition of Natural Science, 2013, 37(6): 59-64.
- [56] 王银, 厚东琳. FL 地区页岩气“甜点”地震预测技术——以 FL 地区自流井组大安寨段为例[J]. 中国西部科技, 2015, 14(5): 35-37.
- WANG Yin, HOU Donglin. FL shale gas “sweet spot” seismic prediction technology-taking the Daanzhai Formation in the self-flow well section in FL as an example[J]. Science and Technology of West China, 2015, 14(5): 35-37.
- [57] 张广智, 陈娇娇, 陈怀震, 等. 基于页岩岩石物理等效模型的地应力预测方法研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(6): 2112-2122.
- ZHANG Guangzhi, CHEN Jiaojiao, CHEN Huaizhen, et al. Prediction for in-situ Formation stress of shale based on rock physics equivalent model[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(6): 2112-2122.
- [58] 马妮, 印兴耀, 孙成禹, 等. 基于方位地震数据的地应力反演方法[J]. 地球物理学报, 2018, 61(2): 697-706.
- MA Ni, YIN Xingyao, SUN Chengyu, et al. Inversion for crustal stress based on azimuthal seismic data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(2): 697-706.
- [59] DU B, YANG W, ZHANG J, et al. Stress prediction and evaluation of heterogeneous reservoir[C]//80th EAGE Conference and Exhibition 2018. Copenhagen; European Association of Geoscientists & Engineers, 2018.
- [60] 袁萌, 蒲勇, 缪志伟, 等. 川东南地应力定量预测方法研究及应用[C]//中国石油学会 2021 年物探技术研讨会论文集. 成都: 中国石油学会石油物探专业委员会, 2021: 1376-1379.
- YUAN Meng, PU Yong, MIAO Zhiwei, et al. Research and application of quantitative prediction method of stress in southeastern Sichuan Basin[C]// Proceedings of the 2021 Geophysical Prospecting Technology Seminar of Chinese Petroleum Society. Chengdu; Society of Petroleum Geophysicists, 2021: 1376-1379.
- [61] 何希鹏, 何贵松, 高玉巧, 等. 常压页岩气勘探开发关键技术进展及攻关方向[J]. 天然气工业, 2023, 44(6): 1-14.
- HE Xipeng, HE Guisong, GAO Yuqiao, et al. Progress in and research direction of key technologies for normal-pressure shale gas exploration and development [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(6): 1-14.
- [62] MOHAGHEGH S D, GASKARI R, MAYSAMI M. Shale analytics: making production and operational decisions based on facts; a case study in Marcellus shale[R]. SPE 184822, 2017.
- [63] SYED F I, MUTHER T, DAHAGHI A K, et al. AI/ML assisted shale gas production performance evaluation[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2021, 11(9): 3509-3519.

(收稿日期 2023-07-11 改回日期 2023-10-16 编辑 雷永良)