

多井VSP资料在四川GM地区灯影组储层预测中的应用

秦 俐^{1,2}, 雍 杰^{1,2}, 刘 飞^{1,2}, 罗 坤^{1,2}, 陈 华³, 戈 理^{1,2}

¹中国石油东方地球物理勘探有限责任公司新兴物探经理部, 河北 涿州

²中油奥博(成都)科技有限公司油藏地球物理研究所, 四川 成都

³中国石油东方地球物理勘探有限责任公司西南物探研究院, 四川 成都

收稿日期: 2025年10月24日; 录用日期: 2025年11月13日; 发布日期: 2025年11月21日

摘 要

针对四川GM地区灯影组碳酸盐岩储层非均质性强、地面地震资料分辨率较低以及多次波干扰严重等问题, 本文系统开展了多井VSP资料在储层预测中的应用研究。通过多井VSP资料的高精度处理和联合分析, 建立了灯影组储层地震响应模式, 并基于VSP约束开展了岩石物理弹性参数定量评价, 从而实现了地面地震资料的精细校正与储层预测优化。研究表明, 该方法显著提高了地面地震多次波压制效果, 准确标定了储层界面, 实现了储层属性的高精度识别与预测。该方法创新性地将多井VSP资料深度应用于储层预测流程, 明显优化了传统地震资料分辨率与可靠性方面存在的限制条件, 为四川GM地区深层碳酸盐岩储层精细描述与有利区优选提供了技术支撑, 对提升该地区油气勘探开发效率具有重要意义。

关键词

多井VSP, 灯影组, 储层预测, 地震响应模式, 岩石物理

Application of Multi-Well VSP Data in Reservoir Prediction for the Dengying Formation in the Sichuan GM Area

Li Qin^{1,2}, Jie Yong^{1,2}, Fei Liu^{1,2}, Kun Luo^{1,2}, Hua Chen³, Li Ge^{1,2}

¹New Resources Geophysical Exploration Department, Bureau of Geophysical Prospecting Inc., CNPC, Zhuozhou Hebei

²Reservoir Geophysics Research Institute, Optical Science and Technology (Chengdu) Ltd., Chengdu Sichuan

³Southwest Institute of Geophysical Exploration, Bureau of Geophysical Prospecting Inc., CNPC, Chengdu Sichuan

文章引用: 秦俐, 雍杰, 刘飞, 罗坤, 陈华, 戈理. 多井 VSP 资料在四川 GM 地区灯影组储层预测中的应用[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(11): 1554-1562. DOI: 10.12677/ag.2025.1511144

Abstract

Addressing the challenges of pronounced heterogeneity in the Dengying Formation carbonate reservoirs of the GM area in Sichuan, coupled with low resolution of surface seismic data and severe multiple wave interference, this study systematically investigates the application of multi-well VSP data in reservoir prediction. Through high-precision processing and integrated analysis of multi-well VSP data, a seismic response model for the Dengying Formation reservoirs was established. Constrained by VSP data, quantitative evaluation of rock-physical elastic modulus was conducted, enabling refined correction of surface seismic data and optimised reservoir prediction. Results demonstrate that this methodology significantly enhances suppression of surface seismic multiple waves, accurately delineates reservoir boundaries, and achieves high-precision identification and prediction of reservoir properties. This approach innovatively integrates multi-well VSP data into the reservoir prediction workflow, markedly overcoming limitations in resolution and reliability inherent to conventional seismic data. It provides technical support for detailed characterisation of deep carbonate reservoirs and favourable zone selection in the GM area of Sichuan, holding significant implications for enhancing hydrocarbon exploration and development efficiency in this region.

Keywords

Multi-Well VSP, Dengying Formation, Reservoir Prediction, Seismic Response Model, Rock Physics

Copyright © 2025 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

随着全球能源需求的持续增长，深层碳酸盐岩储层已成为油气勘探的重要领域[1]。四川盆地 GM 地区作为我国西南地区的重要油气富集区，其灯影组碳酸盐岩储层具有埋藏深、岩性复杂、非均质性强等特征[2]。然而，地面地震资料信噪比较低、多次波干扰严重，传统储层预测方法在分辨率与准确性方面均受到明显限制。因此，如何利用高精度地球物理资料实现灯影组储层的精细识别与准确预测，成为制约该区油气勘探开发效率提升的关键科学问题[3]。

VSP (Vertical Seismic Profiling, 垂直地震剖面)技术能够在井中直接获取地震波传播特征，具有高分辨率、高信噪比和精确时深对应等优势，已在储层精细刻画与地震校正中得到广泛应用[4][5]。国内外研究表明，VSP 资料能够有效弥补地面地震资料在时深转换和反射特征解释中的不足[6][7]。但现有研究多集中于单井 VSP 数据的应用，对于多井 VSP 资料的联合应用研究仍显不足，尤其在四川盆地灯影组储层预测中尚未形成一套成熟有效的技术体系。

基于此，本文以四川 GM 地区灯影组为研究对象，系统探讨多井 VSP 资料在 GM 地区灯影组储层预测中的应用。通过对多井 VSP 资料进行系统分析与处理，结合地质、测井等资料，建立储层地震响应模式，评价岩石物理弹性参数特征，进而实现地面地震资料的定量优化解释。研究旨在突破传统地震预测方法在分辨率与可靠性方面的局限，形成一套“VSP 约束 - 响应模式 - 弹性参数优化 - 储层预测”的综合技术流程，为 GM 地区深层灯影组储层精细预测提供了技术支撑，同时也为多井 VSP 料在复杂储层预测中的应用提供新思路和方法借鉴。

2. 基本原理

2.1. VSP 技术原理

VSP 是一种在井中布置检波器、由地面震源激发地震波以获取地下波场的地震测井技术。与常规地面地震相比, VSP 能够直接获取地震波在井孔路径上的全波形传播特征, 具有高信噪比、高分辨率和时深对应精确等优势。该技术的基本原理在于通过分离上行波与下行波, 实现初至波精确拾取、走廊叠加处理及时深关系模型构建[8] [9], 完成地层反射界面精细刻画和波组特征分析。

2.2. 多井 VSP 联合分析机理

单井 VSP 资料虽能精确反映井周储层地震响应, 但空间覆盖有限。多井 VSP 联合分析通过多井间波场对比与速度约束, 可实现由点到面的信息延拓, 提升横向分辨率, 帮助捕捉储层的空间展布规律[10]。其机理主要包括三方面:

- 1) 速度与时深关系统一: 利用多井初至拾取结果与测井速度曲线联合反演, 建立区域统一的时深转换模型, 减少速度失配误差;
- 2) 反射波场一致性对比: 对比多井 VSP 间反射振幅、相位与波形特征, 提取储层反射的稳定响应;
- 3) 地震响应模式构建: 结合测井与岩心资料, 建立不同岩性及含流体类型的地震响应模板, 为区域储层预测提供物理基础。

2.3. VSP 与地面地震联合机理

VSP 与地面地震在分辨率与覆盖特征上互为补充。地面地震具有良好的平面连续性, 但受近地表效应、多次波和吸收衰减影响, 纵向分辨率较低; VSP 垂向分辨率高、波场清晰, 但空间覆盖有限。二者联合应用可实现“VSP 约束下的地面地震优化处理解释” [11], 主要体现在:

- 1) 时深关系校正: 利用 VSP 速度场校正地面地震时深转换, 提高储层垂向定位精度;
- 2) 界面精确标定: 通过 VSP 反射事件与地面地震波形匹配, 明确储层反射位置及特征;
- 3) 多次波识别与压制: VSP 不仅能获取一次反射波信息, 还能清晰记录多次波的传播特征。通过对多次波的识别与分析, 可有效揭示近地表结构与波场传播规律, 为地面地震数据中的多次波压制提供直接约束[12]。特别是在深层碳酸盐岩区, VSP 多次波分析能够辨识地面地震中混叠反射事件的真实成因, 提升目标层的信噪比和地质解释精度[13]。

2.4. VSP 井震联合储层预测

基于多井 VSP 的储层预测综合了岩石物理、地震响应和地质约束三类信息。通过 VSP 建立井震 - 岩石物理约束关系, 可以定量描述岩性、孔隙度及含流体性质对反射特征的影响[14]; 结合地面地震属性反演结果, 利用地质模型提供的空间约束信息, 实现储层预测的精细化与可靠化。

3. 研究方法与技术流程

3.1. 多井 VSP 资料处理

3.1.1. 常规处理流程

VSP 资料的常规处理是确保数据质量与后续分析可靠性的基础。处理流程首先针对野外采集资料中不可避免的噪音干扰, 进行噪音衰减处理, 以提升资料品质, 增强同相轴连续性。在此基础上, 进行波场分离, 分离出上行反射波与下行直达波, 常用方法包括 F-K 滤波法和中值滤波法。其中, F-K 滤波法基于不同波视速度差异, 在频率 - 波数域实现分离。此外, 还需进行振幅处理, 消除非地质因素对振幅的影响, 使振幅能够真实地反映地下阻抗界面的反射特征, 常用真振幅补偿与地表一致性振幅补偿模块实现。

3.1.2. 一致性处理技术

多井 VSP 一致性处理技术是开展 VSP 井震联合研究的关键环节[15]。由于不同井的 VSP 资料在激发、接收条件上存在差异,导致数据一致性较差,影响综合解释的准确性,因此,开展一致性处理十分必要。该技术的核心技术环节是基于 VSP 记录的下行纵波提取目标子波,并利用该子波对研究区的 VSP 资料进行一致性处理。目标子波的提取需满足波形稳定、分辨率高、信噪比好且与研究区地质特征匹配等标准,通过与各井 VSP 资料对比匹配,统一调整校正数据,从而改善资料的连续性和波组特征(图 1),从而实现多井 VSP 资料在同一标准下的联合分析与解释。

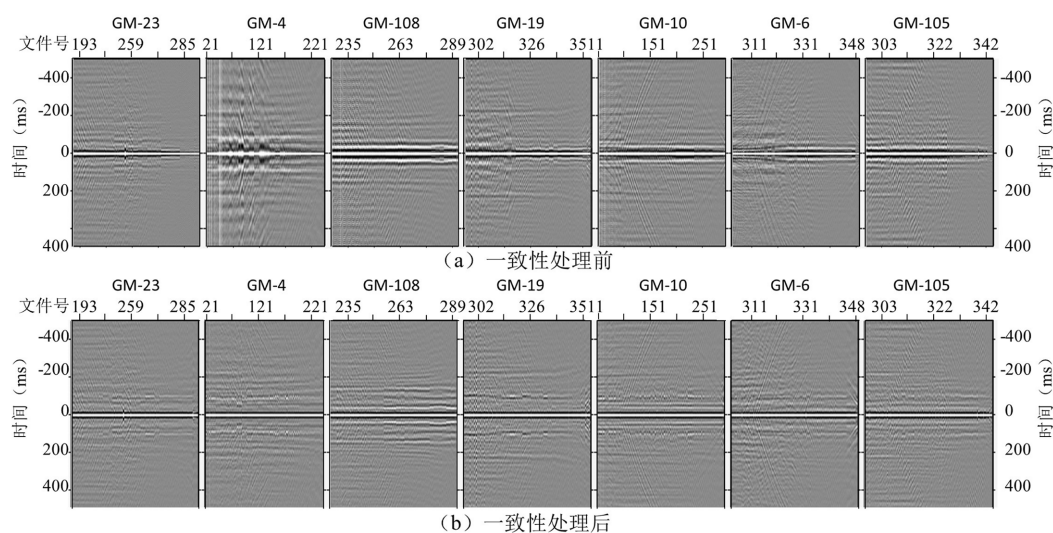


Figure 1. Comparison of autocorrelation records before and after consistency processing of multi-well VSP data
图 1. 多井 VSP 资料一致性处理前后自相关记录对比图

3.2. 多次波压制处理

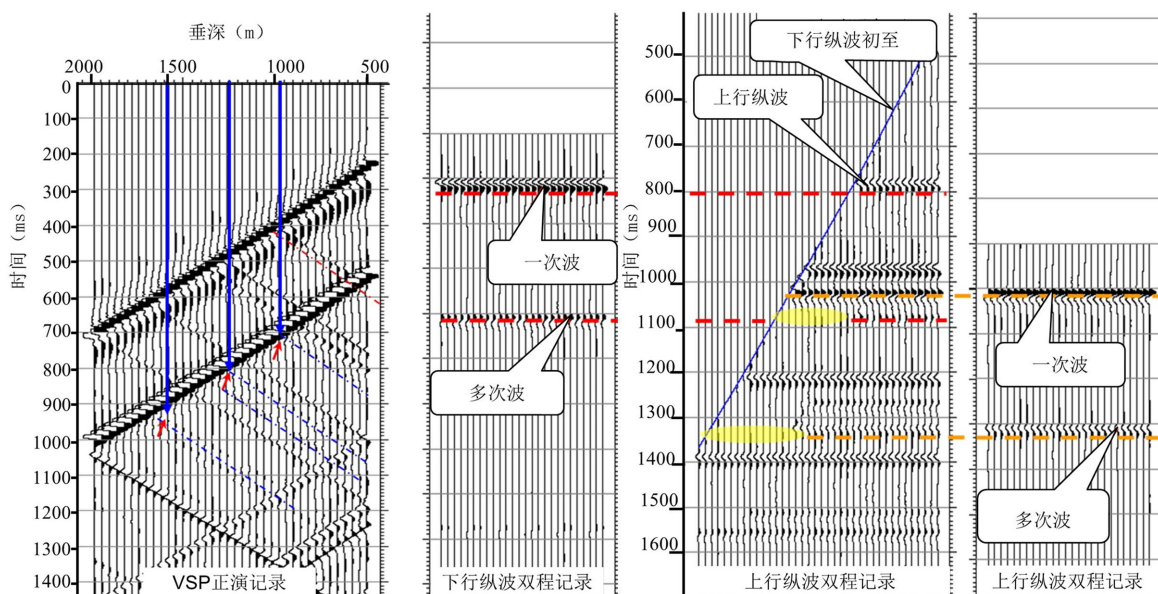


Figure 2. Schematic diagram of multiple recognition principle based on VSP
图 2. VSP 多次波识别原理示意图

四川 GM 地区地震勘探中, 层间多次波干扰问题突出, 影响了有效信号识别, 因此实施多次波压制处理十分必要。根据 VSP 资料, 多次波的同相轴与一次波的同相轴平行, 并且它的旅行时更长; 利用多次波与下行直达波不相交和终止深度指示反射界面等特征, 识别多次波, 并确定多次波位置以及判断其来源(图 2)。通过 VSP 资料精确测量多次波与一次波的旅行时差, 结合反射界面深度信息, 定量计算多次波的传播路径和延迟时间, 为自适应压制技术提供参数依据。进而采用自适应技术, 在地震叠前道集上逐层压制多次波, 从而减少多次波的干扰, 提高地震数据的信噪比和分辨率, 增强有效信号的识别能力, 为油气勘探提供更清晰的地质信息。

3.3. VSP 井地联合建立储层地震响应模式

3.3.1. 声波合成记录时深校正

通过 VSP 的准确时深关系对声波测井速度反算的时深关系进行校正, 形成高质量的声波合成记录, 为储层地震响应特征的精细分析提供基础[16]。首先, 基于测井资料的声波和密度数据, 利用褶积模型制作合成地震记录。选择合适的地震子波, 子波的选取可通过 VSP 资料提取或根据研究区地质特点进行优选。随后, 依据 VSP 测井所确定的零偏移距双程旅行时与深度的对应关系, 将声波测井数据校正至与 VSP 数据相同的基准面。利用 VSP 多级检波器记录所获取的精确时差信息, 计算声波测井数据与 VSP 数据在相邻检波器间距范围内的时差。通过对比两者时差, 得出时差差值。采用线性插值的方法, 将该时差差值合理分配并校正至每个深度点对应的时深关系中。同时, 以 VSP 测井的零偏移距双程旅行时作为标定基准, 以此避免校正过程中产生累计误差。该方法可以声波合成记录制作时手动拉升产生的误差, 提高储层标定的准确性, 为储层地震响应模式构建奠定基础。

3.3.2. 储层地震响应特征分析

基于 VSP 资料进行储层地震响应特征分析包括两个步骤。首先开展 VSP 走廊叠加剖面与合成记录的对比工作, 通过将 VSP 资料所记录的实际地震波场信息, 与基于测井数据构建的正演合成地震记录、井旁地面地震波形进行细致对比, 通过 VSP 井驱地面地震处理确保地震响应与 VSP 观测到的实际地震波形高度吻合, 并符合地质特征。在此基础上, 进行储层地震响应模式的建立, 综合 VSP 资料所揭示的井旁地震波场动力学特征、测井数据提供的岩石物理参数以及地面地震资料反映的地层反射特征, 将不同储层类型的地质信息转化为可分类识别的地震响应模式, 为地震资料的精细解释提供了理论依据。

3.4. 岩石物理弹性参数特征评价

在油气勘探领域, 岩石物理分析是连接地震数据与储层特性的纽带[17]。通过 VSP 资料获得的纵波速度、横波速度, 结合测井得到的密度信息, 可依据岩石物理模型计算岩石的弹性参数, 包括杨氏模量、泊松比、剪切模量等[18]。采用交会图分析方法, 定量构建岩石物理弹性参数与储层属性的关系模型, 为储层的识别和预测提供物理依据, 从而提高储层预测的准确性。

4. 应用效果分析

4.1. 多次波压制效果

通过对 GM 地区 7 口 VSP 资料进行处理, 开展 VSP 井地联合多次波识别与分析, 统计出 15 套次的多次波反射, 明确了多次波的产生位置。根据 VSP 资料对多次波发育的认识, 指导地面地震多次波压制处理, 地面地震剖面上有效信号的连续性和清晰度显著提升, VSP 井震相关性得到了显著提升(图 3), 为后续的储层预测和地质解释提供了更可靠的数据基础。

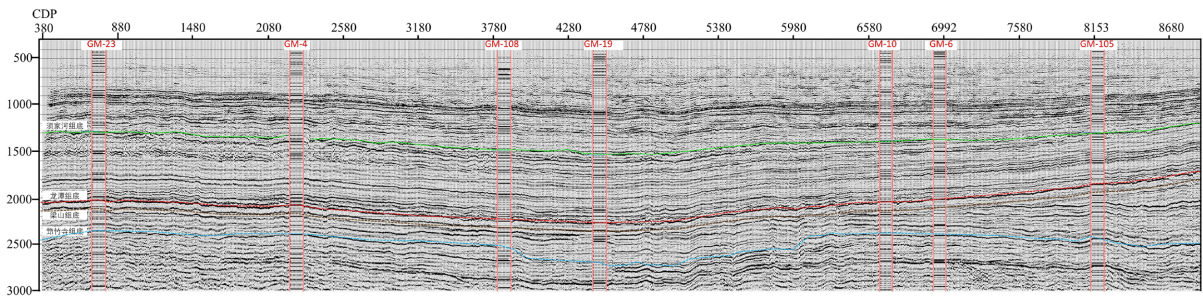


Figure 3. Analysis of surface seismic well connection profile embedded with VSP corridor stack
图 3. VSP 走廊叠加嵌入地面地震连井剖面分析图

4.2. 储层精细标定成果

借助 GM 地区 VSP 资料获得的时深关系, 对声波测井数据进行校正, 校正后的合成记录与地震剖面的反射特征更加吻合, 目标层 1950 ms~2165 ms 相关系数从校正前的 0.65 成功提高到了 0.89 (图 4)。使得储层在地震资料上的反映更加准确, 为后续的储层识别、追踪以及储层参数预测等工作奠定了坚实的基础。

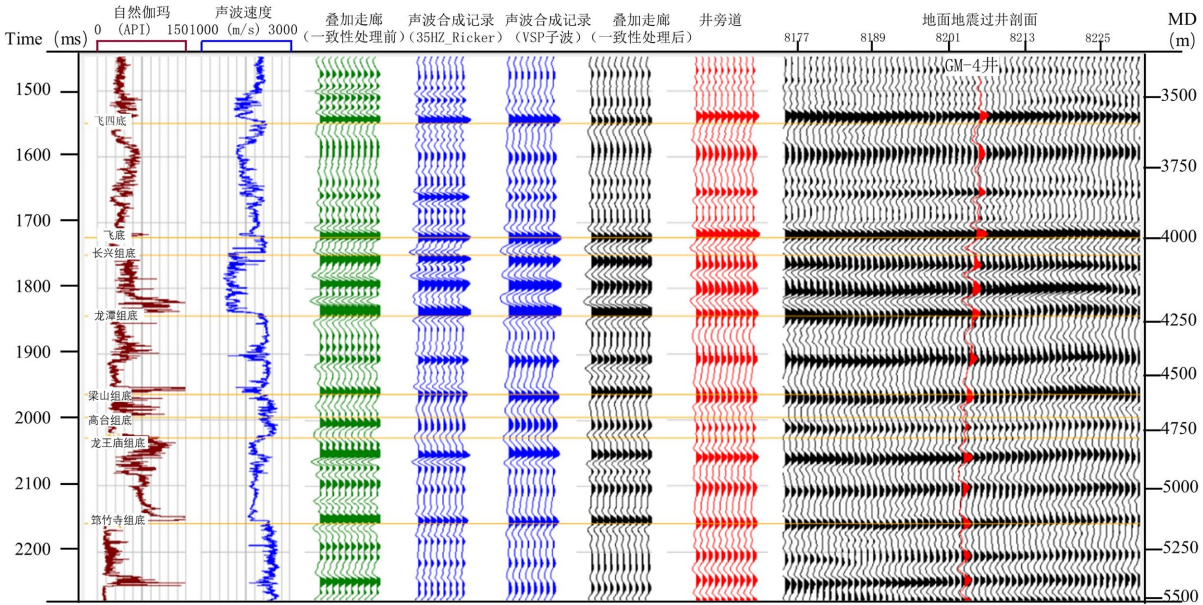


Figure 4. Analysis of well-seismic characteristics of GM-4 well before and after correction of acoustic synthetic record
图 4. GM-4 井声波合成记录校正前后井震特征分析图

4.3. 储层预测效果

GM 地区 VSP 岩石物理弹性参数交会分析表明, 该地区灯影组储层的岩石物理特征表现为较低纵波阻抗、纵横波速度比、体积模量、 $\lambda\rho$ 、杨氏模量、 $\mu\rho$ 以及低泊松比。在这些参数中纵波阻抗与 $\lambda\rho$ 、体积模量、杨氏模量、 $\mu\rho$ 四个参数交会分析对储层流体的敏感性较高, 而纵波阻抗与泊松比、纵横波速度比的交会储层流体的敏感性次之。GM 地区灯影组气层的纵波阻抗主要分布在 15,500~17,500 m/s*g/cc, 横波阻抗主要分布在 9000~10,000 m/s*g/cc (图 5)。利用这些关键特征值为地震资料在储层定量解释提供了理论依据。实际应用表明, 储层厚度的地震预测结果与钻井实测数据之间的绝对误差在 5 m 以内的符合率达到了 87.5% (表 1)。

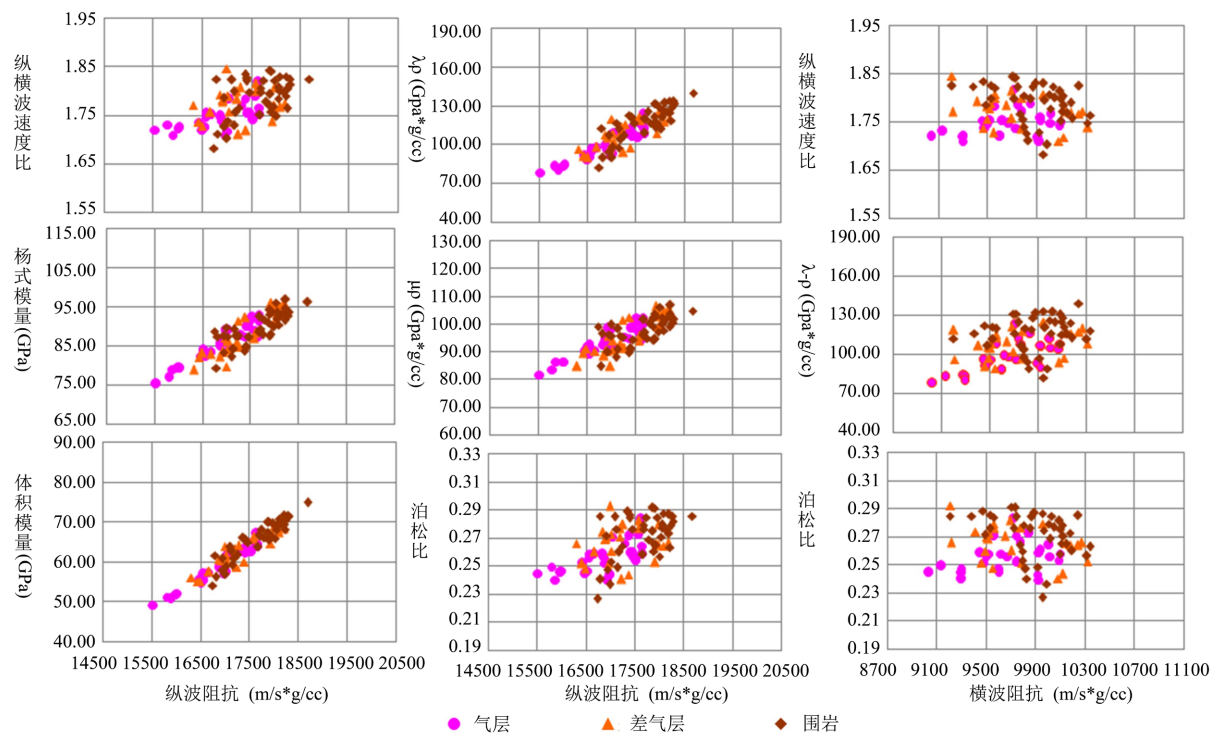


Figure 5. VSP rock-physical elastic modulus cross-plot analysis for the Dengying formation in the GM area
图 5. GM 地区灯影组 VSP 岩石物理弹性参数交会图

Table 1. Statistical comparison of seismic predicted thickness and actual thickness of reservoirs
表 1. 储层厚度地震预测与实际厚度对比统计表

序号	井名	实际厚度(m)	地震预测(m)	绝对误差(m)	符合情况
1	GM-1	47.90	43.50	4.40	吻合
2	GM-2	60.70	57.90	2.80	吻合
3	GM-3	22.90	30.60	7.80	不吻合
4	GM-4	32.70	34.40	1.70	吻合
5	GM-5	5.60	8.20	2.60	吻合
6	GM-6	14.80	14.90	0.10	吻合
7	GM-7	19.10	22.70	3.60	吻合
8	GM-8	27.80	28.50	0.70	吻合
9	GM-9	38.90	31.50	7.40	不吻合
10	GM-10	60.70	60.50	0.20	吻合
11	GM-11	12.60	13.80	1.20	吻合
12	GM-12	27.70	26.90	0.80	吻合
13	GM-13	33.60	35.40	1.80	吻合
14	GM-14	11.10	13.00	1.90	吻合
15	GM-15	36.10	37.70	1.60	吻合
16	GM-16	20.40	24.50	4.10	吻合

5. 讨论

在多井 VSP 资料应用过程中,存在一些局限性。一方面,VSP 资料盖度不足,且采集跨度年度较大。导致样本代表性受到一定影响,难以全面刻画储层非均质性;而采集跨度年度大可能产生因设备迭代、环境变化引入系统性差异,增加数据一致性处理难度。另一方面,多井 VSP 资料处理和分析成本相对较高,在一定程度上限制了大规模推广应用。

针对上述问题,可考虑通过数据共享与算法优化实现突破。建立区域 VSP 数据库,整合多源数据以扩充样本;采用地质统计学插值与生成对抗网络(GAN)模拟缺失数据,结合人工智能算法提升数据覆盖度和成像品质[19]。针对数据差异,开发基于深度学习的归一化校正模型,消除采集条件影响。为降低成本,优化采集方案,在保证数据质量前提下,根据工区地质特征和勘探目标合理规划采集工作量;同时研发更高效的数据处理算法,减少人力和计算资源消耗,提高整体成本效益[20]。

多井 VSP 资料与人工智能、大数据分析融合具有潜在优势。人工智能算法能够自动学习可自动提取 VSP 数据中的高维特征,通过无监督学习识别储层响应模式,减少人工属性提取的偏差。大数据技术则能整合 VSP、地震、测井、地质、工程等多源异构数据,构建“数据-知识”双驱动预测框架,为储层预测提供更全面、准确的信息支持。

基于本研究成果,对于 GM 地区及类似地区未来储层预测技术发展,建议加强多技术联合,将多井 VSP 与 AI、大数据融合,结合地质建模、地球化学分析,构建多维度体系以全面刻画储层;发展高精度低成本数据采集技术,通过优化采集设备和工艺,提升 VSP 资料效率与质量,降低勘探成本;深化复杂地质条件下储层机理研究,明晰储层演化与地震响应关联,为技术创新奠定理论基础。

6. 结论

1) 本文通过多井 VSP 资料处理分析,建立储层地震响应模式、评价岩石物理弹性参数,优化地面地震储层预测解释,有效提升了 GM 地区灯影组储层预测精度与可靠性,解决了该区域复杂地质构造、储层强非均质性带来的预测难题,对传统技术进行了有效改进和提升。

2) 该方法为 GM 地区油气勘探开发提供关键技术支撑,对提升勘探效率意义重大,可精准识别储层分布及特征,为勘探决策提供了有力依据。

3) 未来可拓展其在不同复杂储层的应用,改进技术细节并融合新兴技术,完善多井 VSP 储层预测体系,为油气勘探开发提供更强技术保障,进一步推动行业的发展。

基金项目

本项研究受中国石油天然气集团有限公司科技项目“地球物理井地立体探测方法与装备研发”(2023ZZ05-03)资助。

参考文献

- [1] 何治亮, 金晓辉, 沃玉进, 等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 3-14.
- [2] 史今雄, 赵向原, 潘仁芳, 等. 川中地区震旦系灯影组碳酸盐岩天然裂缝特征及其对气井产能影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 393-405.
- [3] 文华国, 文龙, 丁一, 等. 四川盆地及周缘地区震旦系灯影组白云岩岩石类型及沉积相划分方案[J]. 天然气工业, 2024, 44(7): 27-41.
- [4] 杜玉山, 蒋龙, 程紫燕, 等. 胜利济阳页岩油开发进展与攻关方向[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(5): 77-98.
- [5] 李乐, 陈浩林, 曹中林, 等. 复杂黄土塬区 DAS 井地联采处理技术及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(4): 901-911.

-
- [6] 陈策, 陈浩林, 李嘉宁, 等. 复杂黄土塬区 DAS 井地联采解释技术及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(5): 1234-1246.
- [7] 严伟丽, 陈坤, 宋慧娟, 等. 基于斜井 VSP 的速度建模与联合成像方法研究[J]. 江汉石油职工大学学报, 2025, 38(3): 26-29.
- [8] 任志明, 戴雪, 包乾宗. VSP 直达波和反射波波动方程走时联合反演[J]. 地球物理学报, 2023, 66(9): 3816-3827.
- [9] Lu, C., Qu, L., Liu, J. and Gao, J. (2025) Upgoing and Downgoing Wavefield Separation in Vertical Seismic Profiling Guided by Signal Knowledge Representation. *Applied Sciences*, **15**, Article No. 6360. <https://doi.org/10.3390/app15116360>
- [10] 赵超峰, 张伟, 张铁强, 等. 基于多井 Walkaway VSP 资料的联合处理和综合研究——以陆东凹陷后河地区为例[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(5): 2209-2218.
- [11] 张少华, 苟量, 余刚, 等. 东海 OBN 和三维 DAS-VSP 数据的联合采集与处理方法研究[J]. 石油物探, 2024, 63(1): 30-44.
- [12] 林煜, 苗金鹏, 刘啸虎, 等. “四定法”多次波识别体系的建立与应用[J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(3): 689-699.
- [13] 彭浩天, 何青林, 陈康, 等. “双高”处理技术在薄储层识别中的应用——以川中蓬莱地区深层二叠系茅口组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(3): 417-424+433.
- [14] 张卫红. VSP 和声波测井资料在岩性解释中的联合应用[J]. 石油物探, 2002(2): 149-153.
- [15] 蔡志东, 王冲, 王艳华, 等. 时移 VSP 在准噶尔盆地剩余油气勘探中的应用研究[C]//中国石油学会石油物探专业委员会(SPG), 国际勘探地球物理学家学会(SEG). SPG/SEG 南京 2020 年国际地球物理会议论文集(中文). 2020: 1185.
- [16] 董相杰, 严萌, 王双喜, 等. 大间距深度-时间约束高精度合成地震记录制作技术[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 808-814.
- [17] Zhang, S., Huang, H., Zhu, B., Li, H. and Zhang, L. (2018) Seismic Facies-Controlled Prestack Simultaneous Inversion of Elastic and Petrophysical Parameters for Favourable Reservoir Prediction. *Exploration Geophysics*, **49**, 655-668. <https://doi.org/10.1071/eg17048>
- [18] 李曼, 唐传章, 纪晓亮, 等. 井地联采全流程匹配处理技术研究及应用[C]//中国石油学会石油物探专业委员会. 第二届中国石油物探学术年会论文集(上册). 2024: 470-473.
- [19] 陈沅忠, 胡光岷, 李彦鹏, 等. 分布式声波传感垂直地震剖面法智能处理及多波成像方法[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 363-374.
- [20] Kästner, F., Giese, R., Planke, S., Millett, J.M. and Flóvenz, Ó.G. (2020) Seismic Imaging in the Krafla High-Temperature Geothermal Field, NE Iceland, Using Zero- and Far-Offset Vertical Seismic Profiling (VSP) Data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **391**, Article ID: 106315. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.02.016>