doi: 10.11720/wtyht.2026.1295
李源, 刘微, 章雄, 等. 致密气水平井地震导向技术在金秋气田的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 34-42. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1295
Li Y, Liu W, Zhang X, et al. Application of seismic steering technology for horizontal wells to the Jinqiu gas field[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 34-42. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1295

致密气水平井地震导向技术在金秋气田的应用

李源[1], 刘微[2], 章雄[1], 张德明[1]
(1. 中国石油东方地球物理公司 西南物探研究院, 四川 成都 610213; 2. 中国石油西南油气田分公司 原油事业部, 四川 成都 610000)

摘 要: 四川盆地金秋气田致密气资源丰富, 受多期构造运动影响, 侏罗系沙溪庙组正断层分布广, 主要目标 6 号、8 号河道砂体纵向叠置、横向相互搭接、厚度变化快、薄泥岩夹层发育、储层非均质性强等因素给水平井导向带来极大挑战。为此, 建立了一套致密气水平井地震导向技术体系指导随钻跟踪。在高置信地震数据基础上, 根据不同地质情况分别针对入靶和水平段建立相应的导向技术。首先, 在区域速度基础上, 利用导眼井和正钻水平井动态校正速度获得精度更高的时深转换速度, 结合地质统计学反演提高分辨率, 指导入靶; 然后在区域成果基础上, 结合已钻导眼井、水平井信息, 分别采用处理解释一体化动态各向异性叠前深度偏移、动态地质统计学反演和叠前同时反演, 预测地层产状、砂体、含气"甜点", 指导水平段钻进。实钻跟踪结果表明, 该技术确保了水平井精准入靶, 提高了砂体和含气"甜点"钻遇率, 可为致密气高效开发提供技术保障。

关键词: 致密气; 水平井; 导向技术; 处理解释一体化; 叠前地震数据; 金秋气田
中图分类号: P631.4; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)01-0034-09

0 引言

全球油气勘探方向逐渐由常规油气向非常规油气转移[1-2]。致密气作为非常规油气的重要组成部分, 已在四川盆地实现重大勘探突破[3]。该盆地资源量高达 6.9×10^{12} m^3, 其中川中地区沙溪庙组已有多口探井获得高产工业气流, 展示出良好的勘探开发前景[3-4]。

在非常规油气开发领域, 相较于传统直井, 水平井具有巨大的经济优势, 已成为致密气藏开发的主要技术手段。水平井技术经过多年的发展, 逐渐形成了井深结构及配套设备优化、井轨迹设计及优化、体积压裂改造、井网立体开发的完整技术链[5-8]。随钻导向技术作为该体系的核心环节, 综合地震、钻井、录井等多学科协同进行实时决策, 修正随钻地质导向模型, 大幅提高了储层钻遇率[9-10]。目前, 主要采用随钻伽马测井和气测录井技术识别储层与流体[11-12], 但受限于仪器精度、仪器盲区长度, 加之轨迹调整需平衡地质与工程要求(如控制狗腿度), 地层产状或储层横向快速变化时, 易导致水平井脱靶。相比之下, 地震数据空间分辨率高, 可提前预警并优化井轨迹, 最大限度保障钻头在储层中穿行。如何利用地震数据对水平井导向成为随钻跟踪的研究重点。近年来, 地震地质随钻导向技术在不同油气领域均取得进展, 在页岩气和常规油气领域中的研究较为成熟, 入靶阶段聚焦于时深转换速度模型的建立, 不同方法预测地层埋深[13-14]; 水平段则重点针对地层产状预测、小断层及裂缝地震识别等问题[13-17]。在致密油气领域, 学者们通过地震反演预测河道砂体空间分布, 并初步探索了地震波形检测储层含气性, 然而基于叠前地震数据的含气性预测研究尚未进一步开展[14,18]。

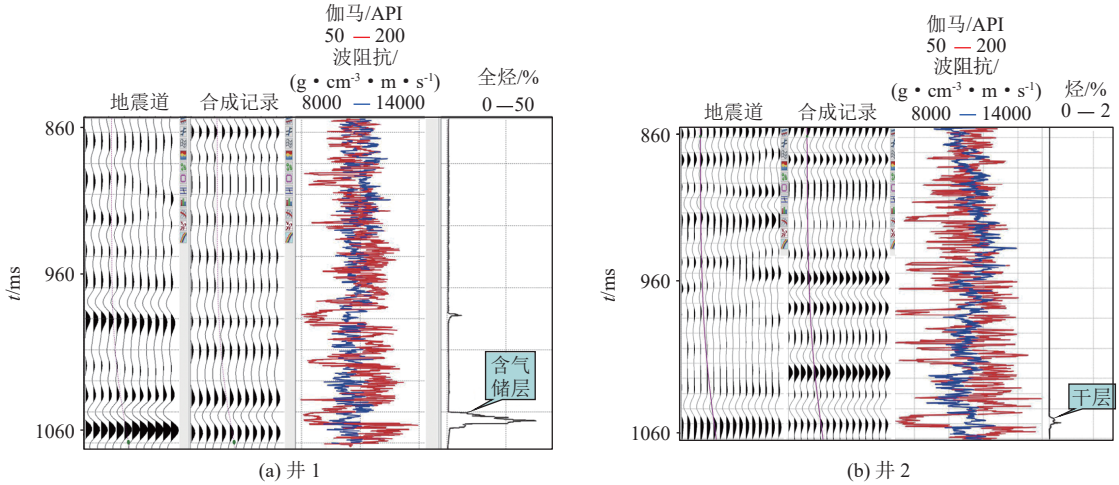
1 地质概况

四川盆地侏罗系沙溪庙组为一套 500～2 300 m 厚的河湖相碎屑岩沉积, 岩性主要为暗紫红色泥岩

收稿日期: 2025-09-16; **修回日期**: 2025-10-14
基金项目: 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司勘探开发研究院项目(12-02-10-2022)
第一作者: 李源(1987-), 男, 工程师, 主要从事地震地质综合研究工作。Email: billyliyuan@126.com

夹中厚层砂岩, 以“叶肢介页岩”为界将地层划分为沙一段和沙二段。金秋气田沙溪庙组上段(沙二段)为浅水三角洲相—河流相沉积, 发育多期垂向叠置、横向迁移的河道砂体。区域构造位于川中古隆中斜平缓带与川北古中坳陷低缓带, 呈 SE—NW 向单斜, 西北部为金华、秋林两个较大的鼻状构造, 正断层发育。主力产层 6、8 号河道砂体厚度 8~40 m, 储层厚度 5~30 m, 具中低孔、低渗透特征, 非均质性强, 含气性差异大[19]。砂体和含气储层的地震响应均为顶谷底峰特征, 目前的常规地震资料难以区分, 随厚度变化, 顶底界面对应的相位发生移动(图 1)。

地震数据品质的好坏是影响导向精度的最关键因素, “两宽一高”地震数据采集及一体化处理解释是当前致密气勘探开发的主要技术[19-20]。为了提高河道砂体的地震勘探精度, 在金秋气田区开展“两宽一高”的三维采集, 对其进行处理解释一体化的“双高”(高保真、高分辨)处理, 并且通过高精度时深转换、三维河道空间雕刻、储层反演等解释技术进行综合解释, 提升了地震资料的品质, 为致密气水平井地震导向奠定了基础[19,21-24]。



(a) 井 1　　(b) 井 2

图 1　金秋气田区 2 口井的合成记录标定

Fig. 1　Synthesis record of 2 wells in Jinqiu gas field area

金秋气田沙溪庙组纵向发育 23 期河道砂组, 其中以 6、8 号河道砂含气性最佳。前期研究成果表明, 水平井开发面临几个难题: ①入靶导向阶段, 局部构造及岩性变化致使速度场横向变化快, 常规时深转换后地层埋深预测不准; 砂体厚度变化大(8~40 m), 地震分辨率不足(沙二段主频 30~35 Hz, 频带宽度 10~60 Hz), 难以辨别砂体顶界位置, 准确入靶较难。②水平段导向阶段, 断层发育引起时间偏移上地层产状畸变; 砂体叠置关系复杂, 薄泥岩夹层广泛发育影响储层的空间连续性; 储层非均质性强, 含气“甜点”预测困难。针对上述难题, 在前人研究的基础上, 结合不同的地质情况优选物探技术方法, 构建了一套基于入靶和水平段地震导向的技术体系, 在钻井过程中实时跟踪。该技术在金秋气田多口水平井的成功应用验证了其有效性。

2　致密气水平井地震导向关键技术

2.1　技术思路及流程

根据金秋气田区沙溪庙组河道砂体储层的地质特征, 以高品质地震资料为基础建立动态地震属性, 实现水平井的动态跟踪。在入靶阶段, 采用动态速度校正时深转换速度模型, 提高靶体埋深预测精度, 结合地质统计学反演提高分辨率, 指导入靶; 在水平段阶段, 分别采用处理解释一体化动态各向异性叠前深度偏移、动态地质统计学反演、叠前同时反演不断提升地层倾角、砂体和含气“甜点”的预测精度, 动态优化井轨迹, 指导后续钻进。图 2 为具体技术思路及流程。

2.2　入靶导向

井震联合建模所建立的区域层控速度场, 经其转换获得的构造图深度误差可控制在 10 m 以内[14]。然而, 该精度尚不能完全满足入靶导向需求。为此, 在初始区域层速度场基础上, 应用已钻导眼井和正钻水平井时深信息对局部速度进行实时校正(动态速度校正), 消除地下速度横向快速变化引起的叠前时间偏移速度模型建立不准的现象[25], 从而提升速度模型精度。

动态速度校正虽能压制速度异常的影响, 但受调谐厚度($\lambda/4$)限制, 预测砂岩顶界仍存在不确定

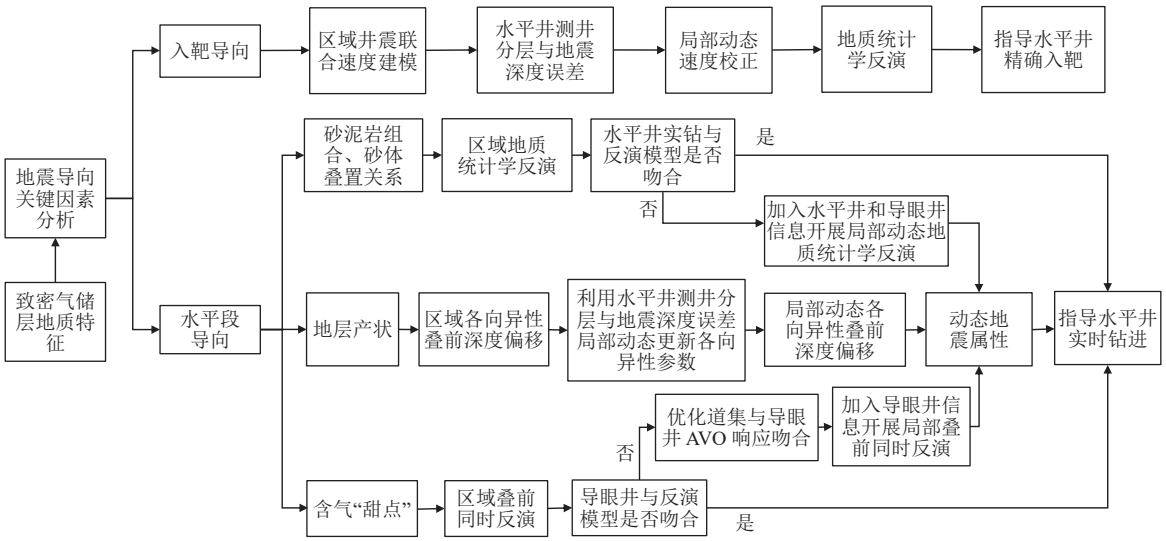


图 2　致密气水平井地震导向技术思路及流程

Fig. 2　Seismic steering technical process for tight gas horizontal well

性。采用地质统计学反演降低调谐影响，精确刻画砂体空间展布，进一步提升入靶精度。

2.3　水平段导向

2.3.1　处理解释一体化动态各向异性叠前深度偏移技术

在金秋气田西北部实施的实钻结果表明：常规变速成图技术将叠前时间偏移转换至深度域数据，会使实际地层产状与地震数据存在偏差。地层产状预测不准是造成该区域频繁穿出靶体的主要因素。

大量研究表明：在复杂构造区域，各向异性叠前深度偏移成像精度优于叠前时间偏移。此方法作为解释性处理技术，其偏移效果受模型精度制约，需依托处理解释一体化流程共同完成地质目标。本次采用不规则网格层析各向异性建模方法[26]，通过以下关键步骤构建高精度各向异性参数模型：首先，各向异性参数建模之前开展区域地震-地质综合研究，利用合成记录精准匹配地震同相轴与测井分层[27]；然后，解释人员协助处理人员构建各向异性参数标志层框架，融合测井与区域岩石物理规律，确定各向异性参数的空间分布规律[28-29]，创建一个符合压实趋势较为简单的低频初始各向异性参数模型；最后，利用测井分层和地震深度误差，逐层更新各向异性参数，结合区域地质认识，处理、解释共同质控各向异性参数并消除井震误差，建立地质约束的各向异性参数场。

水平井钻进过程中需多轮更新各向异性参数，因此压缩建模时间对随钻跟踪至关重要。基于前人研究[30]，制定了一套处理解释一体化动态各向异性叠前深度偏移技术流程（图 3）。

1）水平井地质设计时，在区域各向异性叠前深度偏移基础上，选取水平井附近区块进行精细层位

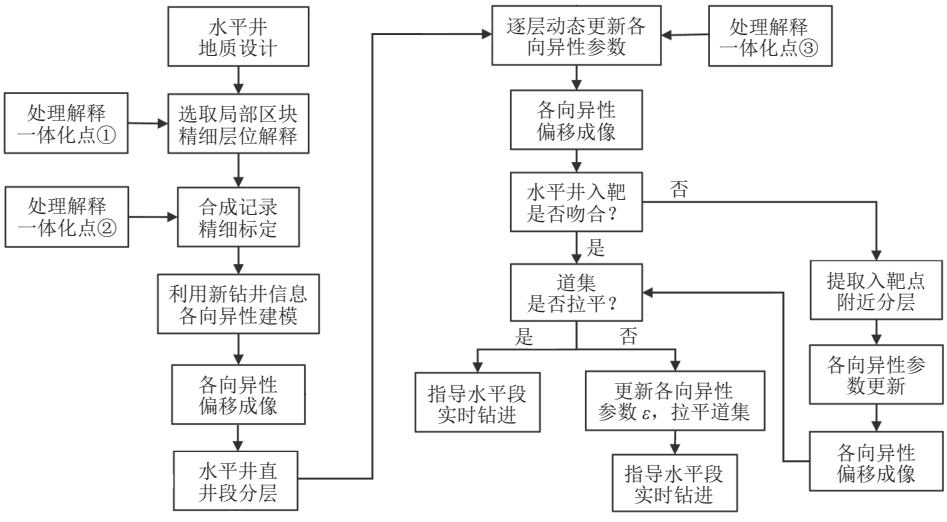


图 3　处理解释一体化动态各向异性叠前深度偏移技术流程

Fig. 3　Flow of integrated processing and interpretation dynamic anisotropy prestack depth migration

解释, 开展局部精细合成记录标定、各向异性建模、各向异性深度偏移等工作, 为后期动态叠前深度偏移提供更为准确的数据, 减少迭代次数。

2)水平井开钻后, 利用上部直井段分层与拾取的地震层位自上而下逐层动态更新各向异性参数(V_{p0}、δ、ε)。处理解释配合完成分层的标定质控, 确定其在同相轴准确位置。当完成第一个标志层各向异性参数(V_{p0}、δ)迭代后, 确保其空间变化符合地质和岩石物理规律, 然后质控 CIGs 道集, 更新各向异性参数ε, 逐层向下迭代, 消除井震误差。

3)若地震深度与实际入靶深度吻合, 检查偏移后的 CIGs 道集是否拉平, 若道集拉平, 则输出成果用于水平段地震导向; 若道集未拉平, 更新各向异性参数ε。拉平道集后输出成果用于水平段地震导向。

4)若地震深度与实际入靶深度不吻合, 选取离靶体最近的测井分层, 更新各向异性参数(V_{p0}、δ), 消除入靶点井震误差并偏移成像, 重复步骤 3。

将上述流程用于实际的水平井跟踪中, 选取水平井周围面积约 50 km^2 开展实验。当钻遇首个标志层后, 利用钻井间隙完成第一层各向异性叠前深度偏移处理, 耗时约 4~6 h。后续逐层迭代更新, 在直井段消除井震误差, 提高了建模效率和精度, 满足水平井地震导向的生产需求。

2.3.2　动态地质统计学反演技术

确定性反演受地震频带限制, 在河道砂体预测中纵向分辨率较低。地质统计学反演借助变差函数融合测井–地震多尺度数据, 更利于薄储层的预测[31], 但其精度依赖于样本数量, 且先验地质约束不足使得结果不确定性较高。

区内砂体具有多期叠置、横向变化快、薄泥岩夹层发育等特点, 导致水平井实钻与地质统计学反演结果存在差异。此时, 将实时钻探的水平井和导眼井信息加入局部构造模型以增加样本点, 并进行局部动态地质统计学反演得到动态反演属性, 以此提高砂体预测精度及砂体叠置关系辨识度, 从而支撑水平井段的实时地震导向。

2.3.3　叠前同时反演技术

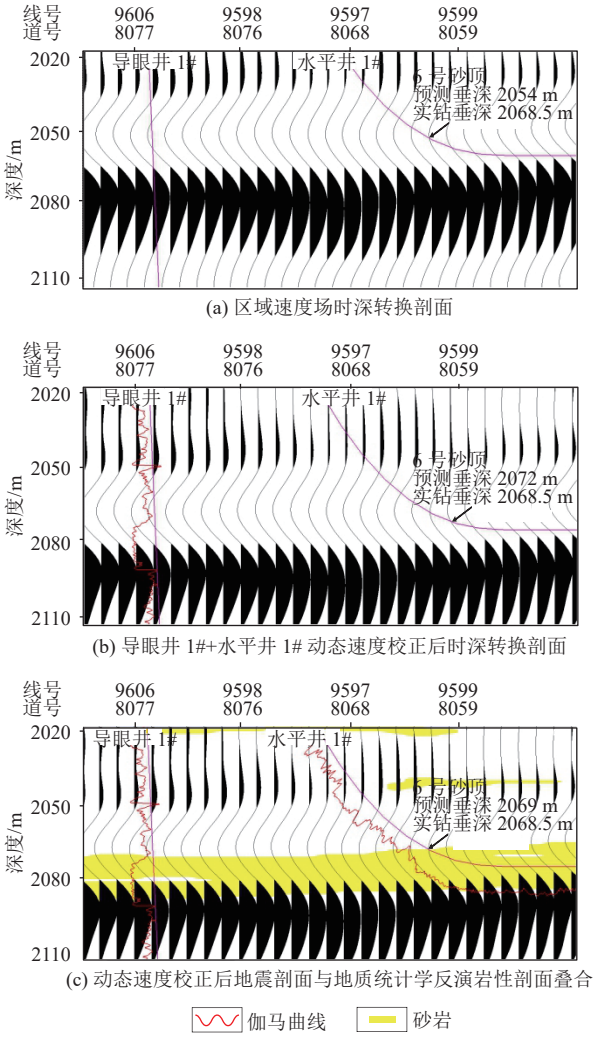
叠前同时弹性反演利用 AVO(振幅随偏移距的变化)信息约束弹性参数反演, 能保持纵波阻抗、横波阻抗和密度反演结果的一致性, 流体预测精度得到显著提高[32-33]。该技术的应用有两个关键条件: ①高精度地震道集; ②建立储层特性(岩性、物性、含油气性)与弹性参数之间的可靠关系。

通过面向储层预测的 AVO 特征低频保护“双高”(高保真/高分辨)处理技术[19], 可得到满足反演的道集, 同时岩石物理分析也表明, 研究区纵横波速度比可以有效区分干层和气层。水平井开钻前, 需验证区域叠前同时反演成果是否与导眼井吻合, 若吻合则直接用于地震导向; 若不吻合, 需局部动态优化地震数据, 使其与导眼井 AVO 响应匹配, 并利用更新的道集和导眼井信息开展局部叠前同时反演, 优化区域成果, 进一步提升含气“甜点”预测精度, 最终为水平段钻进提供可靠导向数据。

3　实际应用效果

3.1　入靶导向应用效果

图 4a 是水平井 1#区域速度场的时深转换深度剖面, 6 号砂体地震剖面上表现为顶谷底峰, 预测砂顶位于正波谷, 垂深为 2 054 m, 与实钻垂深 2 068.5 m 相差 14.5 m。图 4b 是导眼井 1#+水平井 1#动态速度校正后的时深转换深度剖面, 根据伽马曲线标定将砂顶下移约 3 m 至 2 072 m, 误差降至 3.5 m; 动态



(a) 区域速度场时深转换剖面

(b) 导眼井 1#+水平井 1# 动态速度校正后时深转换剖面

(c) 动态速度校正后地震剖面与地质统计学反演岩性剖面叠合

图 4　水平井 1#轨迹剖面

Fig. 4　Horizontal well 1# trajectory profile

速度校正后提升了速度模型精度。图 4c 为动态速度校正后的地震剖面与地质统计学反演岩性剖面的叠合图，从反演剖面上看，砂顶预测深度为 2 069 m，与实钻误差为 0.5 m；反演提高了纵向分辨率，确保了精确入靶。

3.2　水平段导向应用效果

3.2.1　地层产状

水平井 2#位于西北部金华鼻状构造上，沙溪庙组内部正断层发育，断距较小，延伸距离短。图 5a 为水平井 2#叠前时间偏移时深转换后剖面，据导眼井 2#伽马曲线标定 8 号砂体地震响应为顶谷底峰，受 F_2、F_3 断层影响，地层倾角失真，后半段轨迹偏离波峰（与实钻不符）。图 5b 为处理解释一体化动态各向异性叠前深度偏移剖面，水平井 2#轨迹与地震剖面同向轴趋势一致，钻至 4 310 m 时伽马曲线上升揭示触底（与导眼井标定吻合）。处理解释一体化动态各向异性叠前深度偏移技术提升了地层倾角预测精度，但其效果高度依赖各向异性参数模型，模型失准易引发误判。

3.2.2　砂泥岩组合、砂体叠置

图 6a 是水平井 3#地震+伽马反演叠合剖面，测深 2 226 m 和 2 752m 处与实钻存在偏差。图 6b 为水平井 3#地震+动态地质统计学岩性反演叠合剖面，揭示 2 226 m 处钻遇 2~3 m 的泥岩夹层（实钻验证）；测深 2 752 m 附近为砂体叠置区（受变差函数影响垂向厚度和横向展布不确定），据此调整稳斜钻进策略。该井最终 3 360 m 完钻，砂岩钻遇率达 96%（水平段 960 m/1 000 m）。

3.2.3　含气“甜点”

区内钻、测井资料表明沙溪庙组二段河道砂体不含水，含气饱和度较高。图 7a 是地震+伽马反演叠合剖面，砂体表现为顶谷底峰，位于伽马低值冷色区域，2 695~2 940 m 段虽钻遇砂岩但气测全烃值下降，传统方法难以识别流体。图 7b 是地震+叠前纵横波速度比反演叠合剖面，暖色区与高含气段匹配，显示 2 695~2 940 m 为两套含气砂叠置区，含气性差，据此实施降斜策略。叠前纵横波速度比反演提升了含气“甜点”的预测精度（岩性物性干扰较小），对钻遇砂岩储层到含气“甜点”的转变具有重要指导意义；但前提是保证叠前道集质量与岩石物理参数的可靠性，避免模型偏差引起的预测失效。

3.3　效果分析

金秋气田区致密砂岩储层和含气“甜点”钻遇率较低，开发难度大。应用前文所述的地震导向技术

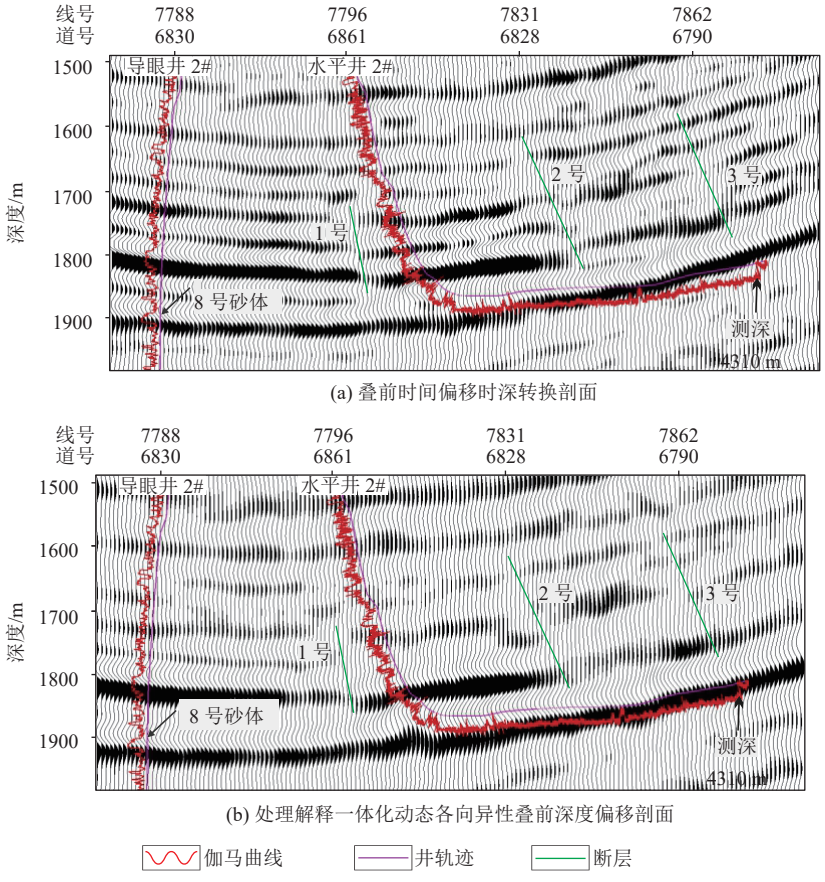
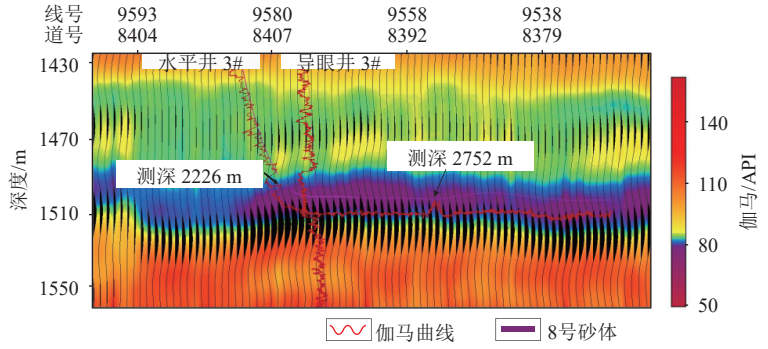
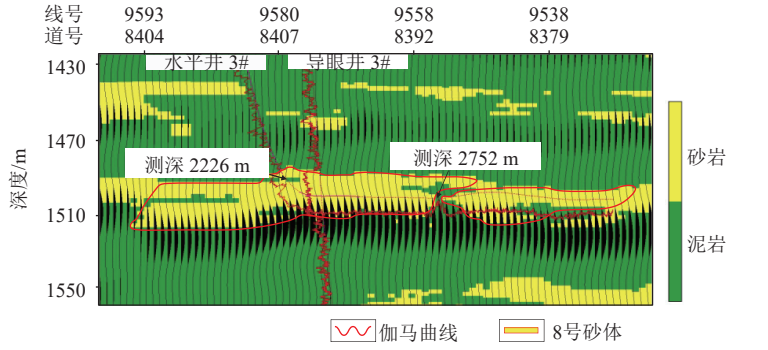


图 5　水平井 2#轨迹剖面

Fig. 5　Horizontal well 2# trajectory profile



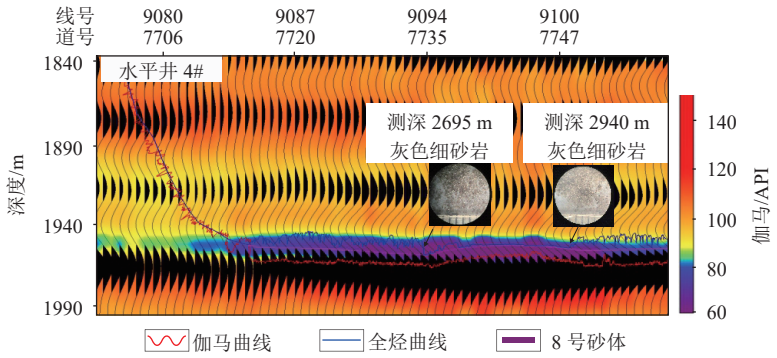
(a) 地震+伽马反演叠合剖面



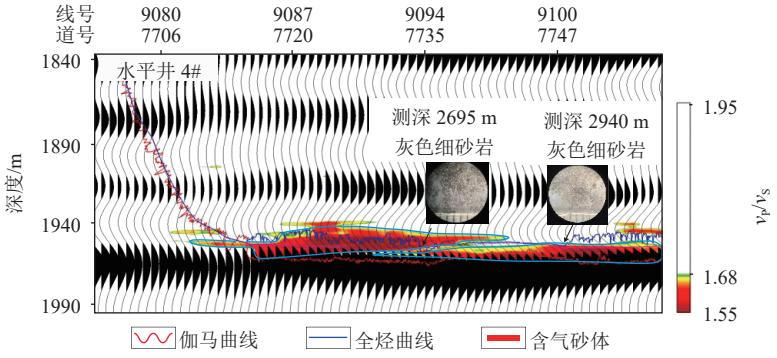
(b) 地震+动态地质统计学岩性反演叠合剖面

图 6　水平井 3#轨迹剖面

Fig. 6　Horizontal well 3# trajectory profile



(a) 地震+伽马反演叠合剖面



(b) 地震+叠前纵横波速度比反演叠合剖面

图 7　水平井 4 轨迹剖面

Fig. 7　Horizontal well 4# trajectory profile

后, 砂体入靶深度误差由 10 m 降至 5 m 以内, 砂岩储层钻遇率由 70% 提升至 90%, 含气“甜点”钻遇率由 60%~70% 提高至 80%。配合水平井工艺优化, 完试 40 余口井, 平均测试产量达 40.54×10^4 m^3/d(单井

日增产能 9×10^4 m^3)，钻井周期压缩至 20 d 左右。实际生产数据表明，该技术提升了致密气藏的开发效益，为同类区块提供了可借鉴的技术方案。

4 讨论

1)处理解释一体化各向异性叠前深度偏移成像精度高，但受建模和偏移算法制约，周期较常规时间偏移长 1~2 倍，人工经验的介入(如模型的建立与质控不合理)会引起较大倾角偏差。在西北部正断层发育的复杂地区，该技术优势明显。在中部断层欠发育的平缓区，其精度与叠前时间偏移时深转换结果相当，时效性较低，因此，不建议在此类地区应用。

2)地质统计学反演预测砂体纵向分辨率高，但其应用要遵循地质统计假设并具备足够的样本数据。在沉积环境稳定、砂泥岩空间规律分布且井网密集的成熟开发区，该方法预测精度高。对于井距较大地区或局部沉积相变化带，需要结合区内地质认识，以解决空间分布的多解性问题。

3)叠前同时弹性反演预测含气“甜点”较叠后反演分辨率更高，应用效果受地震数据品质(特别是AVO保真度)、岩石物理关系以及测井数据质量的制约。在满足上述条件下，该方法适用于厚度大于 10 m 的单一期次河道砂体的含气性预测。对于多期叠置的复合含气储层或厚度小于调谐厚度的薄储层，此方法可供参考，但预测精度下降，建议结合随钻测井、录井信息、地质认识等进行综合评估。

5 结论

1)致密气水平井地震导向技术在入靶导向阶段采用动态速度校正+地质统计学反演能够提高入靶精度，精准入靶；水平段导向阶段采用处理解释一体化动态各向异性叠前深度偏移、动态地质统计学反演、叠前同时反演预测地层产状、砂体、含气“甜点”，实现了砂岩储层与含气“甜点”钻遇率的大幅提升。

2)致密气水平井地震导向技术在金秋气田的成功应用，展示了地震勘探技术在油田开发中的应用前景，有力支撑了气田的高效开发。实践证明，该技术实用高效，可推广用于周边类似致密气藏开发。

参考文献(References)：

[1] 赵殿栋. 我国陆相页岩油勘探开发物探技术需求及对策分析 [J]. 石油物探, 2022, 61(6): 963−974.
Zhao D D. Considerations on application strategies of geophysical techniques for lacustrine shale oil exploration and development[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(6): 963−974.

[2] 杨春龙, 苏楠, 芮宇润, 等. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组致密气成藏条件及勘探潜力 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 98−109.
Yang C L, Su N, Rui Y R, et al. Gas accumulation conditions and exploration potential of tight gas reservoir of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 98−109.

[3] 宋林珂, 刘四兵, 曾青高, 等. 四川盆地川中—川西过渡带中侏罗统沙溪庙组致密砂岩相对优质储层成因机制 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2024, 54(2): 371−388.
Song L K, Liu S B, Zeng Q G, et al. Genetic mechanism of relatively high-quality reservoirs of Middle Jurassic Shaximiao Formation tight sandstone in transition zone between central and western Sichuan Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2024, 54(2): 371−388.

[4] 肖尧, 王锦西, 肖柏夷, 等. 四川盆地天府含气区侏罗系沙溪庙组一段致密砂岩储层特征及主控因素 [J]. 天然气地球科学, 2023, 34(11): 1916−1926.
Xiao Y, Wang J X, Xiao B Y, et al. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoir in the first member of Jurassic Shaximiao Formation in Tianfu gas-bearing area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(11): 1916−1926.

[5] 李云峰, 吴晓红, 李然, 等. 高 5 断块深层致密油水平井钻井关键技术实践 [J]. 石油机械, 2023, 51(11): 102−107.
Li Y F, Wu X H, Li R, et al. Practice of key technologies for drilling horizontal well in deep tight oil reservoir of Gao 5 fault block[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(11): 102−107.

[6] 王志文. 体控建模技术在水平井设计及地质导向中的应用 [J]. 物探与化探, 2016, 40(6): 1192−1197.
Wang Z W. The application of body-control modeling technology to horizontal well design and geological steering[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(6): 1192−1197.

[7] 张庆辉, 高发润, 谭武林, 等. 柴达木盆地英西地区水平井体积改造及缝网预测技术研究 [J]. 石油物探, 2022, 61(6): 1043−1052, 1089.
Zhang Q H, Gao F R, Tan W L, et al. Horizontal well volume reconstruction and fracture pattern prediction technology in the Yingxi area of Qaidam Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(6): 1043−1052, 1089.

[8] 范希彬, 张景, 丁艺, 等. 基于模板匹配技术的微地震事件检测在水平井立体开发井网中的应用 [J]. 石油物探, 2023, 62(5): 940−951.
Fan X B, Zhang J, Ding Y, et al. Application of micro-seismic event detection based on a template matching technique during horizontal well pattern development[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023, 62(5): 940−951.

[9] 任瑞川, 唐万宇, 贾欣磊, 等. 水平井地质导向技术在港西底水稠油油藏中的推广应用 [J]. 录井工程, 2023, 34(3): 113−118.
Ren R C, Tang W Y, Jia X L, et al. Application of horizontal well geosteering technology in heavy oil reservoir with bottom water in GX oilfield[J]. Lujing Gongcheng, 2023, 34(3): 113−118.

[10] 刘振武, 撒利明, 杨晓, 等. 地震导向水平井方法与应用 [J]. 石油

地球物理勘探, 2013, 48(6): 932−937, 1016, 850.
Liu Z W, Sa L M, Yang X, et al. Horizontal well drilling guided by a seismic-centered multi-discipline software platform[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(6): 932−937, 1016, 850.

[11] Qin Z, Tang B, Wu D, et al. A qualitative characteristic scheme and a fast distance prediction method of multi-probe azimuthal gamma-ray logging in geosteering[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 199: 1−10.

[12] 王俊, 李晓祥, 赵腾, 等. 气测录井技术在库车坳陷的研究与应用 [J]. 录井工程, 2021, 32(3): 97−101.
Wang J, Li X X, Zhao T, et al. Research and application of gas logging technology in Kuqa Depression[J]. Mud Logging Engineering, 2021, 32(3): 97−101.

[13] 查树贵, 刘利平, 廖朋, 等. 水平井地震地质导向技术及其在涪陵页岩气田的应用 [J]. 石油物探, 2018, 57(3): 369−377.
Zha S G, Liu L P, Liao P, et al. Seismic geo-steering technology of horizontal well and its application in Fuling shale gas field[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(3): 369−377.

[14] 郑建雄, 朱斗星, 袁立川, 等. 非常规水平井地震导向关键参数分析及预测方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(5): 1170−1179, 932.
Zheng J X, Zhu D X, Yuan L C, et al. Analysis and prediction method of key parameters for seismic steering of unconventional horizontal wells[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(5): 1170−1179, 932.

[15] 吴宝玉, 张树东, 阳大祥, 等. 地震属性在水平井地质导向中的应用 [J]. 测井技术, 2018, 42(6): 678−683.
Wu B Y, Zhang S D, Yang D X, et al. Application of seismic attributes in geo-steering of horizontal well[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(6): 678−683.

[16] 欧居刚, 王小兰, 杨晓, 等. 水平井地震导向技术探索与应用——以四川盆地复杂地区页岩气井为例 [J]. 物探与化探, 2021, 45(3): 551−559.
Ou J G, Wang X L, Yang X, et al. The exploration and application of horizontal well seismic guidance technology: A case study of shale wells in the complex area of Sichuan basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(3): 551−559.

[17] 李春梅, 彭才, 张旋, 等. 叠前深度偏移及储层精细预测技术在钻井轨迹调整中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(3): 656−665.
Li C M, Peng C, Zhang X, et al. Application of pre-stack depth migration and reservoir fine prediction technology in drilling trajectory adjustment[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(3): 656−665.

[18] 何英, 文健安, 曾令奇, 等. 川中秋林地区沙 2 段致密砂岩地震预测在水平井地质导向中的应用 [J]. 化工管理, 2023(12): 85−88.
He Y, Wen J A, Zeng L Q, et al. Application of seismic prediction of dense sandstone in the sumbmeber 2 of the Shaximiao Formation along the Qiulin area in central Sichuan to geological steering of horizontal wells[J]. Chemical Engineering Management, 2023(12): 85−88.

[19] 赵邦六, 张宇生, 曾忠, 等. 川中地区侏罗系沙溪庙组致密气处理和解释关键技术与应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(6): 1370−1380, 1201-1202.
Zhao B L, Zhang Y S, Zeng Z, et al. Key technology and application of processing and interpretation of tight gas in Jurassic Shaximiao Formation in Central Sichuan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6): 1370−1380, 1201-1202.

[20] 王华忠. “两宽一高” 油气地震勘探中的关键问题分析 [J]. 石油物探, 2019, 58(3): 313−324.
Wang H Z. Key problem analysis in seismic exploration based on wide-azimuth, high-density, and broadband seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(3): 313−324.

[21] 干大勇, 高宪伟, 朱丹, 等. 提高浅层地震成像品质的处理技术——以川中地区沙溪庙组为例 [J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(S1): 56−63, 6-7.
Gan D Y, Gao X W, Zhu D, et al. Processing workflow for improving shallow seismic image quality on GeoEast platform: A case study on Shaximiao Formation in central Sichuan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(S1): 56−63, 6-7.

[22] 关旭, 李建海, 唐青松, 等. 川中地区金秋气田侏罗系沙一段有利含气区预测 [J]. 大庆石油地质与开发, 2025, 44(1): 131−141.
Guan X, Li J H, Tang Q S, et al. Prediction of favorable gas-bearing areas in Jurassic Sha 1 Member of Jinqiu gas field in central Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2025, 44(1): 131−141.

[23] 陈康, 戴隽成, 魏玮, 等. 致密砂岩 AVO 属性的贝叶斯岩相划分方法——以川中地区侏罗系沙溪庙组沙一段为例 [J]. 岩性油气藏, 2024, 36(5): 111−121.
Chen K, Dai J C, Wei W, et al. Lithofacies classification of tight sandstone based on Bayesian Facies-AVO attributes: A case study of the first member of Jurassic Shaximiao Formation in central Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(5): 111−121.

[24] 晏勋. 川中秋林地区沙溪庙组河道砂体精细预测 [D]. 荆州: 长江大学, 2023.
Yan X. Fine prediction of river sand bodies in the Shaximiao Formation in the Qulin area of central Sichuan[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2023.

[25] 潘宏勋, 方伍宝. 地震速度分析方法综述 [J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(5): 305−311, 332.
Pan H X, Fang W B. Review of seismic velocity analysis methods[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(5): 305−311, 332.

[26] 徐嘉亮, 张冰. 基于层位约束的不规则网格层析速度建模方法 [J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2): 669−673.
Xu J L, Zhang B. One method of irregular grid tomography velocity modeling based on horizon constraint[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2): 669−673.

[27] 靳玲, 苏桂芝, 刘桂兰, 等. 合成地震记录制作的影响因素及对策 [J]. 石油物探, 2004, 43(3): 267−271.
Jin L, Su G Z, Liu G L, et al. Influencing factors in making synthetic seismogram and counter measures[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2004, 43(3): 267−271.

[28] 凌云, 郭向宇, 孙祥娥, 等. 地震勘探中的各向异性影响问题研究 [J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(4): 606−623.
Ling Y, Guo X Y, Sun X E, et al. Studies on the influence of

anisotropy in seismic exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(4): 606−623.

[29] 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, 897.
Yang Q Y, Guo K, Li B, et al. Application of TTI anisotropic seismic imaging in shale gas exploration[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(6): 882−889, 897.

[30] 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, 2021: 604-607.
Yang Z Q, Li H W, Han Y P, et al. Application of optimized anisotropic depth migration technology in shale gas drilling well[C]// Proceedings of the 2021 Geophysical Exploration Technology Seminar of the Chinese Petroleum Society, 2021.

[31] 程志国, 胡婷婷, 瞿建华, 等. 准噶尔盆地玛西地区致密砂砾岩优质薄储层预测 [J]. 物探与化探, 2015, 39(5): 891−896.
Cheng Z G, Hu T T, Qu J H, et al. High-quality and thin reservoir of tight conglomerate prediction in Maxi area of Junggar Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(5): 891−896.

[32] 邵林海, 王九拴, 张雷, 等. 叠前同时反演在低孔低渗型砂岩储层预测及含气性检测中的应用 [J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 145−150.
Shao L H, Wang J S, Zhang L, et al. Application of pre-stack simultaneous inversion in low porosity and permeability sandstone reservoirs predication and hydrocarbon detection[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(3): 145−150.

[33] 许金双. 基于叠前同时反演的致密砂岩储层预测方法——以宋站—汪家屯地区为例 [J]. 长江大学学报: 自科版, 2018, 15(19): 18−21.
Xu J S. Prediction method of tight sandstone reservoir based on prestack simultaneous inversion: Taking Songzhan-Wangjiatun area as an example[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2018, 15(19): 18−21.

Application of seismic steering technology for horizontal wells to the Jinqiu gas field

LI Yuan[1], LIU Wei[2], ZHANG Xiong[1], ZHANG De-Ming[1]

(1. *Southwest Geophysical Research Institute*, *BGP*, *Chengdu* 610213, *China*; 2. *Crude Oil Business Department*, *PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company*, *Chengdu* 610000, *China*)

Abstract: The Jinqiu gas field in the Sichuan Basin boasts abundant tight gas resources. However, the application of seismic steering technology for horizontal wells faces significant challenges associated with the following geological factors. Specifically, influenced by multistage tectonic movements, the Jurassic Shaximiao Formation exhibits widespread normal faults. Notably, the main target No. 6 and No. 8 channel sand bodies are characterized by vertical stacking, horizontal overlapping, rapid thickness variations, thin mudstone interbeds, and strong reservoir heterogeneity. Therefore, this study established a seismic steering technology system to guide tracking-while-drilling in horizontal wells of tight gas. According to different geological requirements, this study formulated seismic steering techniques corresponding to target entry and horizontal drilling based on high-confidence seismic data. First, based on regional velocity, a high-precision time-depth conversion was achieved using the dynamically calibrated velocity of pilot and drilling horizontal wells. This is then supplemented with geostatistical inversion to improve seismic resolution for guiding target entry. Afterwards, building upon regional results and integrating information from drilled pilot and horizontal wells, a series of techniques were employed to guide horizontal section drilling. These techniques include the dynamic anisotropic prestack depth migration coupled with processing-interpretation integration, dynamic geostatistical inversion, and prestack simultaneous inversion to predict formation attitudes, sand bodies, and gas-bearing sweet spots. The practice demonstrates the effectiveness of seismic steering technology in ensuring precise target entry and increasing the drilling rate of sand bodies and sweet spots, thus providing a reliable technical foundation for efficient development of tight gas.

Key words: tight gas; horizontal well; steering technology; integrated of data processing and interpretation; pre-stack seismic data; Jinqiu gas field

(本文编辑: 叶佩, 沈效群)