doi: 10.11720/wtyht.2026.1337
李操, 杨春生, 刘宗堡, 等. 开发地震沉积学方法在松辽盆地 M2 区块扶余油层砂岩预测中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 43-52. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1337
Li C, Yang C S, Liu Z B, et al. Application of development-scale seismic sedimentology to sandstone prediction in the Fuyu oil layer, Block M2, Songliao Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 43-52. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1337

开发地震沉积学方法在松辽盆地 M2 区块扶余油层砂岩预测中的应用

李操[1,2], 杨春生[1,2], 刘宗堡[2,3], 陈国松[1,2], 史洪波[1,2]
(1. 大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712; 2. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江 大庆 163712; 3. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 松辽盆地北部长垣南地区扶余油层砂岩储层发育, 是大庆油田增储建产的重点区域, 孔隙度为 9.0%～13.6%, 渗透率为 0.1%～3.21%, 属于致密砂岩储层, 需要采用水平井+大规模体积压裂的方式开发动用, 因而对砂体预测提出了较高的精度要求。本区扶余油层的主要储层以扶Ⅰ油层组、扶Ⅱ油层组为主, 其沉积环境以三角洲平原亚相为主, 砂体分布具有平面变化快、单层厚度薄、纵向错叠分布的特征, 砂体的地震响应特征复杂, 储层预测难度大。针对扶余油层致密砂岩储层的沉积特点, 本文采用开发地震沉积学方法开展砂体预测, 通过基于本区井参数的地震正演分析明确了薄层致密砂岩的地震响应特征, 进而开展了地层切片自动优选、砂岩厚度平面定量预测等技术的综合应用。研究表明: 长垣南扶余油层地震振幅与小层砂岩厚度之间存在正相关关系; 开发地震沉积学技术的研究与应用能够定量描述小层砂体平面分布规律, 有力支撑了本区水平井开发先导试验区的井位成功部署与实施。长垣南 M2 区块扶余致密油水平井开发试验的成功, 为松辽盆地北部致密油开发提供了示范, 在后续的水平井设计与实施中应强化开发地震沉积学砂岩预测技术的应用, 保障砂岩和油层钻遇率, 为扶余油层致密油的成功开发提供技术保障。

关键词: 地震正演; 地层切片优选; 开发地震沉积学; 水平井; 致密砂岩储层
中图分类号: P31; P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)01-0043-10

0 引言

随着全球能源需求的持续增长和常规油气田的逐渐枯竭, 我国油气勘探开发已进入“常非并举”时代。松辽盆地北部扶余油层致密油资源潜力大, 是长垣外围油田增储建产的重要对象, 该油层具有低渗透(致密)、顶生式成油组合的特点。早在 2011 年, 随着垣平 1 井获高产突破, 大庆油田致密油勘探开发工作就进入了新篇章, 2013 年以来, 水平井开发一直是扶余油层致密油增储建产的重要手段。长垣南 M2 区块作为探明未开发的重点区块, 本区沿层孔隙度为 9.0%～13.6%, 渗透率为 0.1%～3.21%, 属于致密砂岩储层, 需要采用水平井+大规模体积压裂的方式开发动用。水平井的设计和实施, 首要面临的挑战在于对地下储层分布的精准识别。扶余油层发育大型河流—浅水三角洲沉积体系, 沉积环境以三角洲分流平原亚相为主, 砂体分布呈现出横向上单一砂体规模小、厚度薄、连续性差, 纵向上错叠分布、多期叠置的特点, 砂体复杂的横向变化是制约其效益动用的关键因素之一, 因此砂体预测技术攻关对扶余油层的勘探和开发具有重要意义[1-7]。

收稿日期: 2025-09-29; **修回日期:** 2025-11-14
基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目“火山和热液作用下古龙页岩黏土矿物转化机制对储层可压性的控制”(ZL2024D003); 中石油重大科技专项“中高渗油田特高含水期大幅度提高采收率技术研究”(2023ZZ22)
第一作者: 李操 (1980-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 就职于大庆油田勘探开发研究院开发地质研究室, 主要从事开发地震、开发地质、油藏评价研究与应用工作。Email: 125196901@qq.com
通讯作者: 刘宗堡(1982-), 男, 博士, 教授, 主要从事储层沉积学及油气成藏机理等方面的教学与研究工作。Email: lzbdqpi@163.com

扶余油层致密油砂岩预测难度大，一是长垣南扶余油层主要由多期次三角洲平原、三角洲前缘沉积组成，沉积物类型多样，结构复杂，砂体横向变化快、纵向组合多样，砂体对应的地震响应特征复杂；二是目的层砂体厚度低于地震理论识别纵向分辨率，受地震数据分辨率限制，传统地震储层预测技术难以准确预测有利储层的分布。

地震沉积学作为地震地层学与层序地层学的延伸发展，是综合地震岩性学、地震地貌学研究地层岩性、沉积成因、沉积体系和盆地充填历史的学科，自曾洪流等[8-9]1998 年首次定义以来，已形成以三维地震属性分析、90°相位转换和地层切片技术为核心的方法体系。进入 21 世纪后，地震沉积学的研究和技术应用不断深化[10]。例如，在墨西哥湾深水区的油气勘探中，通过地震沉积学技术成功预测了大型油气藏的存在。在我国，地震沉积学同样取得了显著进展，朱筱敏等[11-12] 在现代沉积学和地震沉积学理论指导下，确立松辽盆地齐家地区青山口组主要发育湖盆浅水三角洲沉积体系，利用地层切片刻画了浅水三角洲沉积砂体的枝状形态和大面积分布特征，指出近油源和邻近断层的三角洲前缘砂体为有利勘探开发目标。黄薇等[13] 在大庆油田的勘探过程中，应用该技术帮助揭示了油田的沉积层序和沉积环境，有效提高了勘探效率。地震沉积学在国内外油气精细勘探的成功应用表明，该方法可利用横向分辨率弥补地震垂向分辨率的不足，提高薄砂体识别精度。

近年来，地震沉积学在油气开发地质领域的应用逐渐成为研究热点，特别是在井间储层分布预测与沉积单元识别方面展现出显著优势。该方法主要依赖于地层切片技术来分析井间储层的分布情况，并能够识别出包括曲流河点坝、分流河道砂坝以及废弃河道在内的多种特殊沉积体。吴胜和等[14] 应用地震沉积学方法，结合三维地层切片与地震成像特征，系统研究了沉积单元的空间分布规律，并深入探讨了储层构型的地震响应机制及解释方法。张涛等[15] 利用地层切片技术解析曲流河沉积结构，成功构建了适用于开发尺度的曲流河内部结构地震沉积学解释技术，推动了该技术在油田开发中的实际应用。姜岩等[16]、郝兰英等[17] 在大庆长垣油田密井网开发区应用地震沉积学方法预测沉积单元的井间储层变化，利用在地层切片中“砂中找泥”和“泥中找砂”识别单一河道的思路，形成了“地震趋势引导、井点微相控制”的井震结合储层精细刻画方法。朱筱敏等[18] 对中国地震沉积学的研究现状进行了系统总结，首次提出“开发地震沉积学”的概念，强调了其在油气田开发阶段的应用潜力。李操等[19-20] 系统总结了大庆长垣油田开发地震沉积学研究进展，构建了大庆长垣油田开发地震沉积学技术的基本框架，指出开发地震沉积学储层预测方法注重于高效化、定量化。开发地震沉积学是地震沉积学理论和方法在油田开发领域的深入研究与应用的产物，针对厚度小于 1/4 波长的砂岩组、小层或沉积单元（单砂层）等地质目标，研究其井间储层厚度变化、储层边界分布、储层连通关系、沉积特征等问题。

本文在 M2 区块开展开发地震沉积学储层预测方法研究，在基于本区地质参数的地震正演模型分析基础上，明确不同厚度砂体的地震响应特征。通过地层切片自动优选，基于可信度的储层厚度定量预测方法，实现了研究区小层级砂体平面预测。上述研究成果有效支撑了本区的水平井部署和实施工作，该区块先导试验的 11 口水平井实施后，平均砂岩钻遇率达到 97.5%，投产后 10 t 以上稳产 238 d，取得了本区域致密油水平井开发试验的成功。

1　研究区地质背景

大庆长垣位于松辽盆地北部主要生油凹陷齐家古龙凹陷和三肇凹陷之间，是一个完整的二级构造单元，构造从下到上具有明显的继承性，上部地层更趋于平缓，均表现为一大型背斜构造。大庆长垣二级构造单元上共发育 7 个三级构造，研究区即位于大庆长垣南部敖南鼻状构造（图 1），研究目的层扶余

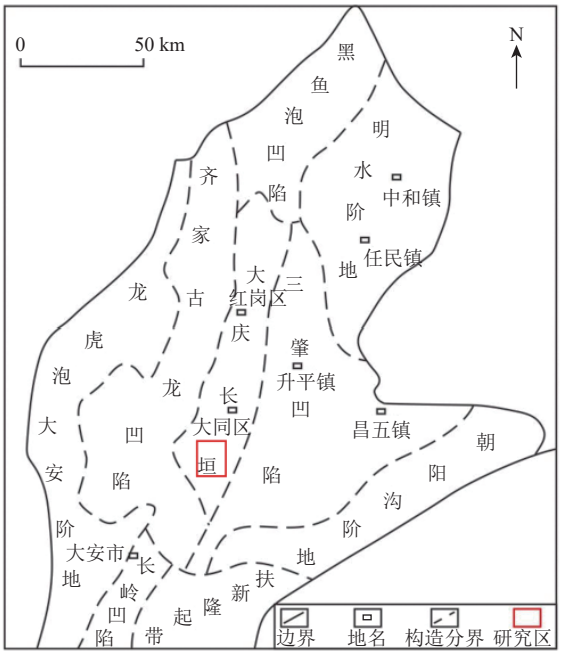


图 1　长垣南 M2 区块区域位置

Fig. 1　Location of the M2 block, southern Changyuan

油层位于白垩系下统泉头组四段及泉头组三段上部。

扶余油层分为扶Ⅰ(FⅠ)、扶Ⅱ(FⅡ)和扶Ⅲ(FⅢ)3 个油层组, 本研究区扶Ⅲ油层组以干层和水层为主, 本文研究目的层为扶Ⅰ和扶Ⅱ油层组。长垣南部地区致密砂岩储层以水平井开发动用方式为主, 地质研究需要精细到小层级别, 扶Ⅰ和扶Ⅱ油层组共计 12 个小层。

研究区扶余油层地层厚度整体变化不大, 一般为 150~165 m, 扶Ⅰ组地层厚度一般为 90~100 m, 平均 95 m; 扶Ⅱ组地层厚度一般为 65~75 m, 平均 70 m。扶余油层储集层具有砂岩层数多、单层厚度薄、层间差异大、层间连续性差等特点。单砂岩厚度统计分析表明, 砂岩厚度以 6 m 以下为主, 占比 84.1%, 大于 6 m 合计占比仅 15.9%, 不发育厚度超过 14 m 的单砂岩。研究区地震资料频带 4~64 Hz, 主频为 40 Hz, 资料品质能够满足构造解释、储层预测的需求。

2　扶余油层开发地震沉积学方法

本文应用开发地震沉积学方法开展扶余油层储层预测工作, 在收集整理本区钻井、测井、地震、地质数据的基础上, 利用层序地层学方法开展小层级的地质层位划分, 确定油层组级的地震标准层, 以此为基础开展地震地质层位标定。依据层位标定结合和地震标准层波组特征开展地震层位解释工作, 建立地震地质等时地层格架。应用油层组级的等时地层格架等比例剖分地震数据得到地层振幅切片集。根据井点坐标提取井点位置的地层切片振幅值与基于测井解释的砂岩厚度数据开展目标小层的井震数据相关性分析, 得到井点处目的层砂岩厚度与地层切片集上各个切片地震振幅数据直接的统计关系, 绘制出地层切片优选曲线, 依据峰值优选出该目的层井震关系匹配最佳的地层切片位置。抽取出该位置的地层切片绘制平面图, 分析该切片所蕴含的沉积信息, 结合井曲线沉积相分析和区域沉积环境, 得到目的层的沉积特征。为了更准确地开展储层描述工作, 需要开展井震结合储层定量预测工作。首先, 利用楔状体理论模型和基于实际测井曲线去砂处理的不同厚度砂体模型开展地震正演分析, 明确砂岩厚度与地震振幅强弱之间的关系, 给出井震结合砂岩厚度定量预测的理论基础; 其次, 在前面抽取的目的层地层切片上, 提取井点砂岩厚度和地震振幅数据, 统计目的层井震参数之间的函数关系和不同平面位置地层切片上地震振幅的可信度, 据此开展井震结合砂岩厚度定量预测。基于上述目的层地层切片的沉积特征分析和井震结合砂岩厚度定量预测结果开展研究区井位的设计与实施工作, 具体技术流程如图 2 所示。

2.1　地震响应特征分析

本区地震反射特征表现为同相轴横向不连续、高频等时地层界面不清楚、地震响应特征复杂。为了探究不同砂体的地震响应特征, 建立了不同的砂岩厚度的理论模型进行正演模拟, 建立地震响应特征与砂岩厚度之间的关系, 进而依据地震响应特征

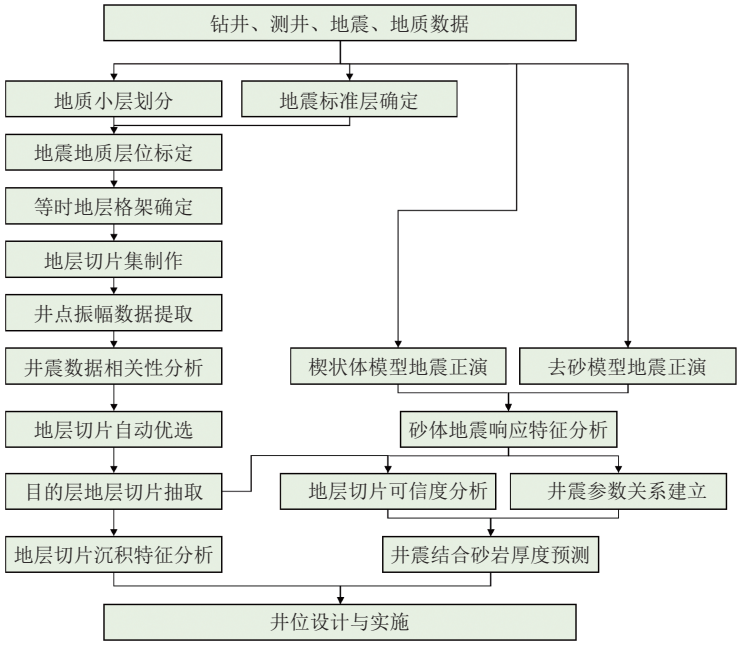


图 2　开发地震沉积学技术流程

Fig. 2　Workflow of development seismic sedimentology

开展砂岩厚度预测。

2.1.1　楔状体理想模型地震正演

统计本区扶余油层砂泥岩速度、密度参数，砂岩速度约为 4 000 m/s，密度约为 2.48 g/cm^3；泥岩速度约为 3 500 m/s，密度约为 2.47 g/cm^3。依据此参数建立经典的楔状体模型，以地震主频 40 Hz 开展正演模拟，分析不同厚度的独立砂体的地震响应特征。扶余砂岩为高阻抗地层，在楔状体理论模型中，砂岩顶面对应一套波峰反射特征。按照地震理论分辨率计算，本区砂体波形可分辨的纵向理论分辨率四分之一波长（λ/4）约为 20 m，薄于 λ/4 的砂岩地震振幅与砂岩厚度应具有正相关关系。统计表明本区小层级砂体厚度通常低于 14 m，薄于地震理论分辨率。提取波峰振幅值，建立波峰振幅与砂岩厚度的交会图（图 3），地震振幅与砂岩厚度具有很好的正相关关系，在 0～λ/4 时振幅能量随厚度增大逐渐增强，呈单调递增关系，符合 Widess 准则的理论规律。

2.1.2　测井曲线去砂模型地震正演

为了进一步分析实际砂岩的地震响应特征，利

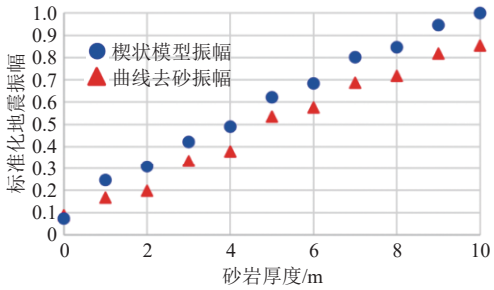
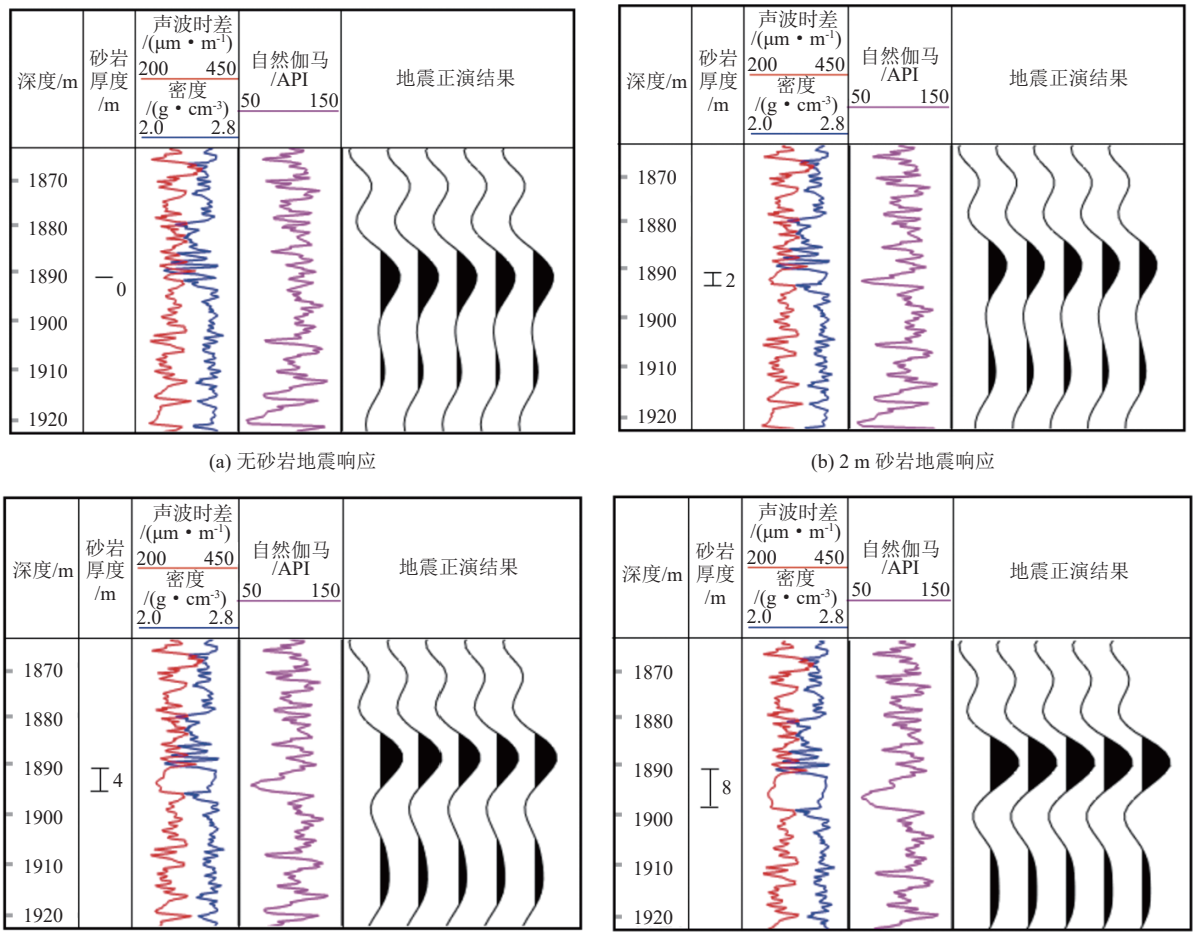


图 3　不同正演模型振幅与砂岩厚度交会

Fig. 3　Crossplot of amplitude versus sandstone thickness for different forward models

用本区的实际测井曲线建立不同厚度砂体的去砂实验正演模拟。选择扶余油层上部的一套 4.8 m 厚的河道砂岩开展该项研究。利用 FORTRAN 语言编制算法程序将该套 4.8 m 的砂岩声波和密度测井曲线比例化为 0、1、…、10 m 厚度的砂岩对应的测井曲线，镶嵌到原曲线砂岩部位，通过制作不同砂岩厚度的单井合成地震记录，正演出该套砂岩不同厚度变化对应的地震波形响应特征（图 4）。该套砂岩顶面原始的地震反射为波峰反射，去砂实验正演模拟结



(a) 无砂岩地震响应　(b) 2 m 砂岩地震响应

(c) 4 m 砂岩地震响应　(d) 8 m 砂岩地震响应

图 4　不同厚度砂岩地震波形响应特征

Fig. 4　Seismic waveform responses of sandstones with different thicknesses

果表明, 振幅强度随砂岩厚度增大而增大(图 3), 曲线去砂地震响应特征与楔状模型规律一致, 说明在实际的地层中, 在围岩条件不变或者变化不大的情况下, 目的层的砂岩厚度(小于 λ/4 时)与地震振幅存在正相关的对应规律, 单层砂体厚度越大, 地震响应振幅能量越强。

2.2　等时地层格架建立

松辽盆地扶余油层所在地层为泉头组泉三段、泉四段, 处于盆地持续坳陷阶段湖侵体系域, 层序沉积明显受古地形的控制, 河流携带的大量泥沙对古地形起填平补齐作用。高分辨率层序地层学强调层序单元的二分性 (基准面下降和上升旋回), 适用于扶余油层内部分层。根据中期基准面旋回性将扶余油层划分为 2 个中期基准面旋回, 分别为扶Ⅲ组—扶Ⅱ组中期基准面下降旋回和扶Ⅰ组中期基准面上升旋回。依据超短期基准面旋回, 将扶Ⅰ油层组细分为 FⅠ1、FⅠ2、FⅠ3、FⅠ4、FⅠ5、FⅠ6、FⅠ7, 共计 7 个小层; 扶Ⅱ油层组细分为 FⅡ1、FⅡ2、FⅡ3、FⅡ4、FⅡ5, 共计 5 个小层; FⅠ和 FⅡ油层组共计 12 个小层。

扶余油层地层接近水平层状, 在储层预测工作中, 首先要确定标志层的地震响应, 然后在单井标定的基础上, 利用过井、连井剖面进行多井联合标定, 实现井间地质分层、地震层位的全区统一。

合成记录标定是将地震资料与测井资料相结合的纽带, 本次研究通过正确选择子波频率、波长、相位极性、时窗, 将合成地震记录与井旁地震道反复对比, 不断调整速度, 使得二者波组能量、相位对应良好、波形特征尽可能一致, 最终确定了扶余油层组顶界面在地震剖面上的准确位置。共完成 59 口已钻井精细合成记录标定, 合成记录相关系数集中在 0.6~0.8 之间。

通过多井合成地震记录标定, 明确了扶余油层组地震反射特征。区块内 T_2 地震反射层相当于扶余油层的顶面, 也是扶Ⅰ油层组顶面, 主要为青山口组暗色泥岩与泉四段砂岩地层强反射界面的地震响应, 测井的声波时差曲线具有明显的反映, 声波时差突然变小, 速度增大。阻抗由低到高, 为正反射系数, 对于零相位子波来说, 地震剖面上表现为连续性较好的强波峰反射特征, 阻抗界面明显、相位稳定、连续性好, 可作为标志层进行全区闭合追踪。T_{2y1} 反射层相当于扶余组内部扶Ⅰ油层组与扶Ⅱ油层组的分界面, 即扶Ⅱ油层组底界, 全区表现为弱振幅、中连续的波峰同相轴, 较难追踪对比。T_{2F3} 地震反射层为扶Ⅱ油层组底界, 全区表现为弱振幅、低连续的波峰同相轴, 较难追踪对比。扶Ⅰ油层组顶面、扶Ⅱ油层组顶面、扶Ⅱ油层组底面可作为等时界面, 建立两个油层组的等时地层格架。本区扶Ⅰ油层组、扶Ⅱ油层组地层的时间厚度均为 40～80 ms, 为了尽量保留地震样点信息, 两个油层组各制作 120 份地层切片, 制成地层切片集。

2.3　地层切片自动优选

2.3.1　地层切片自动优选方法

地震沉积学地层切片优选可采用专家优选法和自动优选法, 在开发地震沉积学中, 因具有井多、层薄(目的层为小层)、层数多的特点, 专家优选法会存在工作量大、标准不统一的问题, 因此, 本次研究利用井震样本数据丰富的优势, 采用自动优选法方法。地层切片自动优选是采用皮尔逊相关分析方法, 通过相关系数反映井震数据变量之间的相关程度。

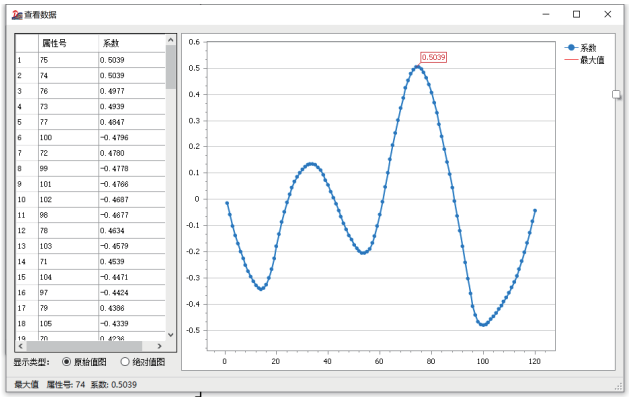
地层切片自动优选方法的应用基于以下两个前提条件: 一是在深度序列有序分布的小层砂体, 其地震响应在时间序列也具有有序分布特征; 二是在优选时窗内能够找到一个与小层砂体达到最优匹配的地层切片。在此前提下, 利用井点坐标在地层切片集中提取井点处的各份地层切片的地震振幅数据。统计目的层的砂岩厚度数据, 与各份地层切片的振幅数据形成数据对, 利用皮尔逊相关分析方法计算单一地层切片振幅数据与砂岩厚度的相关系数, 自第 1 份切片开始, 至最大份数(如 120)结束, 得到了最大份数(如 120)个井震参数的相关系数, 据此绘制出地层切片优选曲线。曲线中相关系数最高且与小层位置关系符合时深对应序列逻辑关系的为地层切片优选结果, 从而实现该小层地层切片的自动优选。该套方法集成于笔者自主开发的井震结合储层预测软件(简称 iRPS 软件)之中, 应用地层切片自动优选软件模块, 可快速建立各小层地层切片与砂岩厚度的自动优选曲线, 实现各小层地层切片的自动优选。

2.3.2　地层切片自动优选结果分析

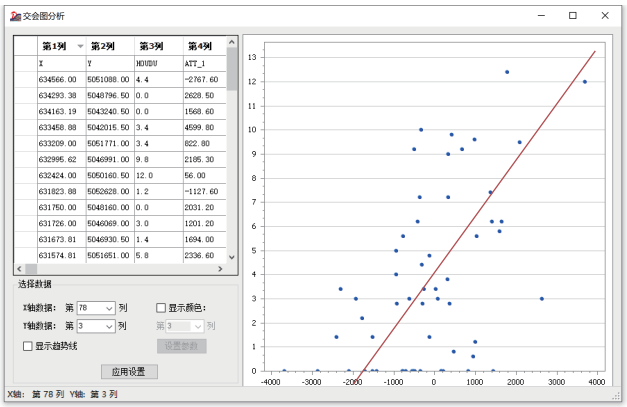
以 FⅡ3 小层为例, 在以扶Ⅱ油层组顶底对应的地震反射层为等时地层格架等比例劈分的 120 份地层切片中, 自动优选出第 75 份切片(图 5a), 该切片位置与井震标定位置基本吻合, 井震交会分析, 砂岩厚度与地震振幅的相关系数达到 0.50, 井震信息匹配效果好, 地震振幅与砂岩厚度具有明显的正相关关系(图 5b)。

从优选的 FⅡ3 小层地层切片平面图(图 5c)开展沉积特征分析, 可以明显看到 3 条曲流型分流河

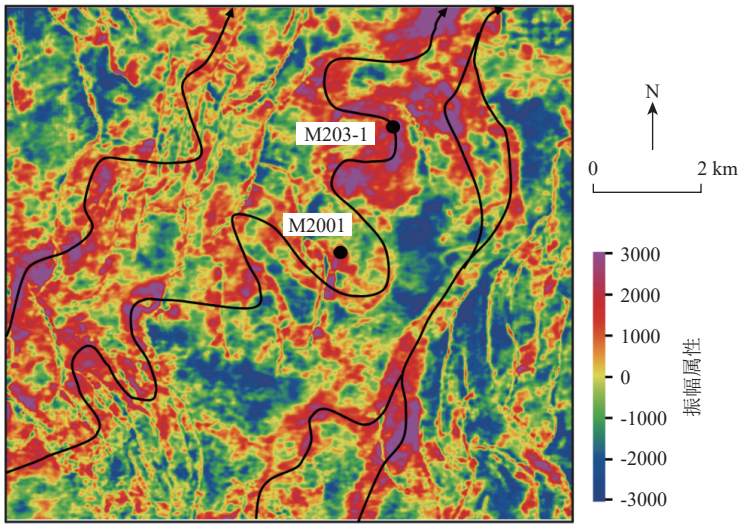
道的展布，河道自工区 SW 方向流入，NE 方向流出，中部河道规模最大，曲流形态最为明显；东部河道相对顺直，呈现两条河道分叉合并的特征；西部河道在工区内发育范围较小，呈单一曲流形态。钻遇这 3 条河道主体部位的 21 口井测井曲线具有明显的河道特征，例如：M203-1 井（图 5d）为主体分流河道微相，测井曲线为箱型，高幅，低幅差，砂岩厚度大，达到 10 m；M2001 井（图 5e）为分流河道微相，测井曲线为钟型，明显正韵律，高幅，低幅差，砂岩厚度较大，为 8.2 m，河道底部有冲刷面特征。



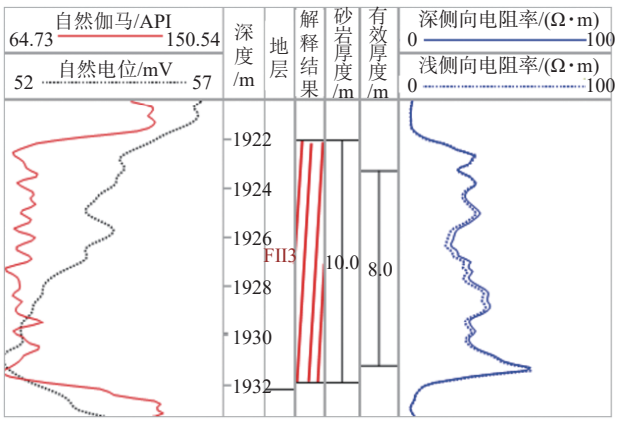
(a) 地层切片优选曲线



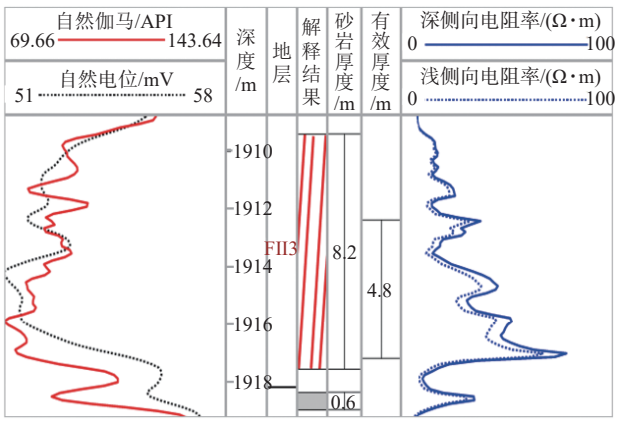
(b) 砂厚与振幅交会图



(c) 地层切片优选结果及地质特征分析



(d) 陆上主体分流河道(M203-1)



(e) 陆上分流河道(M2001)

图 5　F Ⅱ 3 小层地层切片自动优选

Fig. 5　Automatic optimization of stratigraphic slicing for the F Ⅱ 3 sublayer

2.4　井震结合砂体预测

本区扶余油层下层砂岩厚度小于 14 m(低于 1/4 地震波长(25 m)), 满足 Widess 准则的应用条件, 为本区基于地震振幅开展砂岩厚度预测提供了理论基础。楔状体理想模型地震正演结果和曲线去砂模型地震正演结果均反映出本区扶余油层小层级地震振幅与砂岩厚度存在近似线性相关关系, 这为基于地震振幅开展砂岩厚度预测提供了模型基础。由于薄互层上下岩层的影响, 简单的线性拟合难以准确表征地震振幅与砂岩厚度复杂的函数关系, 因此通过引入地层切片可信度参数, 可进一步提高井震结合砂岩厚度预测精度。该方法通过调整不同可信度区域的井、震数据预测权重(在高可信度区域地震数据参与的权重大, 在低可信度区域井数据参与的权重大), 建立基于地层切片可信度的井震结合厚度预测方法:

$$RT = CL \times RT_{\mathrm{SEIS}} + (1 - CL) \times RT_{\mathrm{WELL}}, \qquad (1)$$

式中: RT 为基于可信度的储层厚度预测值; CL 为地震数据可信度; RT_{SEIS} 为基于地震数据的储层厚度预测值; RT_{WELL} 为基于井数据插值的储层厚度预测值。

由多个地层切片数据应用多元回归方法计算 RT_{SEIS}, 基于井数据应用克里金插值方法得到 RT_{WELL}, 应用式(1)得到 RT。基于地震可信度的砂岩厚度定量预测方法, 可削弱薄互层砂泥组合关系、隔层厚度等多种因素的影响, 进一步修正井震参数间的函数关系, 提高砂岩厚度预测精度。

应用该方法利用井震信息匹配最佳的地层切片时窗范围内的地震数据和井点对应的砂岩厚度信息, 井震结合预测各小层砂岩厚度, 得到扶Ⅰ油层组、扶Ⅱ油层组 12 个小层的井震结合砂岩厚度预测图。经过 8 口预留后验井验证, 3 m 以上砂岩厚度井震结合砂体厚度预测符合率为 80%(表 1)。

表 1　单井单层井震结合砂体厚度 *h* 预测符合率统计

Table 1　Statistics of sandstone thickness *h* prediction conformity from well-seismic integration for individual wells and layers

井号	符合率/%		
	$h \geq 3$ m	$1 \leq h < 3$ m	$h < 1$ m
M203-1	80	100	67
CF273-298	83	0	50
CF272-268	67	100	60
C290-276	100	60	50
C292-283	75	33	100
M2-G1	83	100	50
C276-252	83	75	67
C276-248	67	67	67
平均符合率/%	80	67	64

3　应用效果

3.1　井位部署

在研究区的成藏分析基础上, 在成藏有利区域, 综合单井储层发育情况、各小层地震沉积学地层切片、井震结合砂岩厚度预测成果、地震剖面波形特征等信息, 部署了 11 口开发先导试验水平井。例如 FP10 井部署在 FⅡ3 小层中部河道砂体发育区, 其参考井 C283-274(图 6a)FⅡ3 小层砂岩厚度 9.2 m, 有效厚度 7.4 m, 测井曲线呈箱型, 为明显的主体河道砂特征, 含油显示以油浸为主。在地震沉积学地层切片(图 6b)上, 井震信息匹配好, 对应强振幅发育区, 呈半月型, 曲流河点坝特征明显, 点坝砂体南部长 1.5 km、东西宽 1.2 km。在地震砂岩厚度平面预测图(图 6c)上, FⅡ3 小层砂岩规模发育, FP10 井设计区为点坝砂体, 砂岩厚度 6.3~8.8 m, 砂体规模与地层切片一致, 水平井轨迹顺河道方向部署。

3.2　钻井及投产效果

M2 区块开发先导试验设计的 11 口井均已完钻, 井位运行过程中应用井震结合砂体预测成果, 指导完钻水平井导向, 平均完钻水平段长度 1 119 m, 钻遇砂岩长度 1 090 m, 钻遇油层长度 1 043 m, 砂岩钻遇率 97.5%, 油层钻遇率达 93%。上文设计的 FP10 井, 实钻水平段长 1 356 m, 砂岩长 1 356 m, 含油砂岩 1 356 m, 砂岩钻遇率 100%, 油层钻遇率 100%。

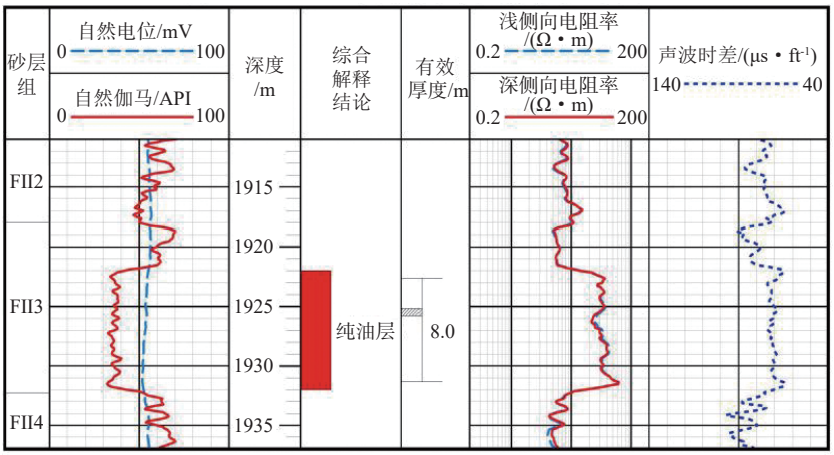
开发地震沉积学储层预测成果支撑了水平井压裂方案设计, 11 口井全部完成压裂施工, 进入投产阶段, 压后自喷生产, 10 t 以上稳产 238 d, 11 口井初年累产油超 3×10^4 t, 投产效果好, 取得了松辽盆地北部致密油水平井开发试验的突破。

4　结论

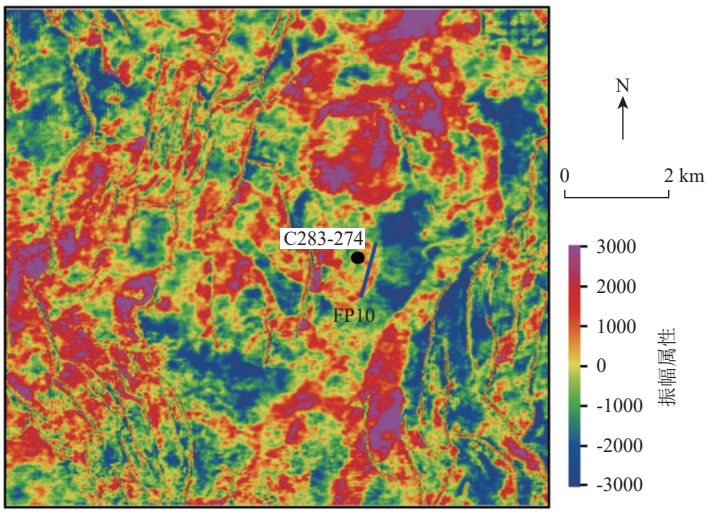
1) 通过楔状体理想模型和测井曲线去砂模型地震正演分析, 证实了本区扶余油层地震振幅与砂体厚度存在正相关关系, 为基于地震振幅进行砂体预测提供了理论基础。

2) 综合应用地层切片自动优选与分析技术、基于可信度的井震结合砂岩厚度定量预测技术, 从定性分析和定量描述角度实现了扶余油层小层级砂体平面展布规律的精细刻画, 明确了砂体的展布形态、规模及厚度变化, 为水平井部署提供了可靠的地质依据。

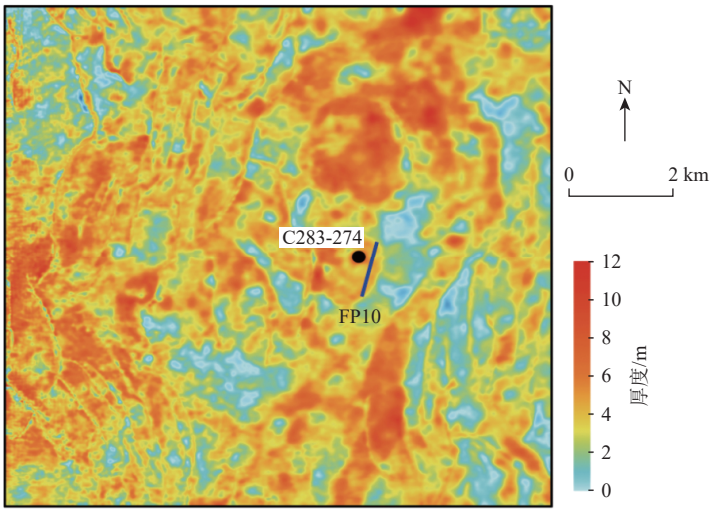
3) 基于开发地震沉积学的高精度砂体预测成



(a) C283-274井FII3小层单井曲线



(b) 地层切片平面



(c) 砂岩厚度预测平面

图 6　FP10 井位部署

Fig. 6　Well location proposal for FP10

果，有力支撑了 M2 区块水平井开发先导试验区的井位部署与实施。现场 11 口水平井的钻井结果表明，平均砂岩钻遇率高达 97.5%，投产后均取得良好开发效果，验证了该技术的可靠性和有效性。

参考文献（References）：

[1]　白雪峰，陆加敏，李军辉，等. 松辽盆地北部全油气系统成藏模式与勘探潜力 [J]. 大庆石油地质与开发，2024，43(3)：49−61.

Bai X F，Lu J M，Li J H，et al. Hydrocarbon accumulation patterns

and exploration potential of whole petroleum systems in northern Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(3): 49−61.

[2] 王小军, 白雪峰, 李军辉, 等. 松辽盆地北部下白垩统扶余油层源下致密油富集模式及主控因素 [J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 248−259.
Wang X J, Bai X F, Li J H, et al. Enrichment model and major controlling factors of below-source tight oil in Lower Cretaceous Fuyu reservoirs in northern Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 248−259.

[3] 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 等. 中国致密油气发展特征与方向 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1015−1026.
Sun L D, Zou C N, Jia A L, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1015−1026.

[4] 黄薇, 梁江平, 赵波, 等. 松辽盆地北部白垩系泉头组扶余油层致密油成藏主控因素 [J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 635−644.
Huang W, Liang J P, Zhao B, et al. Main controlling factors of tight oil accumulations in the Fuyu Layer of Cretaceous Quantou Formation in northern Songliao Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 635−644.

[5] 胡素云, 朱如凯, 吴松涛, 等. 中国陆相致密油效益勘探开发 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 737−748.
Hu S Y, Zhu R K, Wu S T, et al. Profitable exploration and development of continental tight oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 737−748.

[6] 蒙启安, 白雪峰, 梁江平, 等. 松辽盆地北部扶余油层致密油特征及勘探对策 [J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(5): 23−29.
Meng Q A, Bai X F, Liang J P, et al. Fuyu tight oil characteristics and exploration countermeasures in north Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(5): 23−29.

[7] 朱筱敏, 潘荣, 朱世发, 等. 致密储层研究进展和热点问题分析 [J]. 地学前缘, 2018, 25(2): 141−146.
Zhu X M, Pan R, Zhu S F, et al. Research progress and core issues in tight reservoir exploration[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(2): 141−146.

[8] 曾洪流. 地震沉积学在中国: 回顾和展望 [J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 417−426.
Zeng H L. Seismic sedimentology in China: A review[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 417−426.

[9] 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 等. 陆相坳陷型盆地地震沉积学研究规范 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 275−284.
Zeng H L, Zhu X M, Zhu R K, et al. Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 275−284.

[10] 撒利明, 甘利灯, 黄旭日, 等. 中国石油集团油藏地球物理技术现状与发展方向 [J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(3): 611−626, 420.
Sa L M, Gan L D, Huang X R, et al. The status and development direction of reservoir geophysics in CNPC[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(3): 611−626, 420.

[11] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 等. 中国地震沉积学研究现状和发展思考 [J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 397−411.
Zhu X M, Dong Y L, Zeng H L, et al. Research status and thoughts on the development of seismic sedimentology in China[J]. Journal of Palaeogeography: Chinese Edition, 2020, 22(3): 397−411.

[12] 朱筱敏, 赵东娜, 曾洪流, 等. 松辽盆地齐家地区青山口组浅水三角洲沉积特征及其地震沉积学响应 [J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 889−897.
Zhu X M, Zhao D N, Zeng H L, et al. Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of shallow-water delta of qingshankou formation in Qijia area, Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 889−897.

[13] 黄薇, 王始波, 张玉鹏, 等. 地震沉积学在薄储层岩性油藏勘探中的应用 [J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(1): 1−8.
Huang W, Wang S B, Zhang Y P, et al. Application of seismic sedimentology in the exploration of the lithological oil reserovirs in the thin layer[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(1): 1−8.

[14] 吴胜和, 翟瑞, 李宇鹏. 地下储层构型表征: 现状与展望 [J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 15−23.
Wu S H, Zhai R, Li Y P. Subsurface reservoir architecture characterization: Current status and prospects[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 15−23.

[15] 张涛, 林承焰, 张宪国, 等. 开发尺度的曲流河储层内部结构地震沉积学解释方法 [J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 74−80.
Zhang T, Lin C Y, Zhang X G, et al. Method for seismic sedimentology interpretation of reservoir architectures on development scale in meandering river[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 74−80.

[16] 姜岩, 杨春生, 李文艳, 等. 利用地震主分量分析和 Fisher 判别预测窄小河道砂体 [J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(6): 1283−1290.
Jiang Y, Yang C S, Li W Y, et al. Narrow-channel sand prediction with seismic principal components and Fisher discriminant analysis [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(6): 1283−1290.

[17] 郝兰英, 郭亚杰, 李杰, 等. 地震沉积学在大庆长垣密井网条件下储层精细描述中的初步应用 [J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 81−86.
Hao L Y, Guo Y J, Li J, et al. Preliminary application of the seismic sedimentology to reservoir refined description under the condition of high density well-pattern in Daqing placanticline[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 81−86.

[18] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 等. 沉积地质学发展新航程——地震沉积学 [J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 189−201.
Zhu X M, Dong Y L, Zeng H L, et al. New development trend of sedimentary geology: Seismic sedimentology[J]. Journal of Palaeogeography: Chinese Edition, 2019, 21(2): 189−201.

[19] 李操, 姜岩, 樊晓东, 等. 大庆长垣油田开发地震沉积学研究 [J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(4): 916−925.
Li C, Jiang Y, Fan X D, et al. Seismic sedimentology for development of Daqing Changyuan Oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(4): 916−925.

[20] 李操. 基于优势振幅的储层预测方法研究及应用 [J]. 石油天然气学报, 2014, 36(7): 80−83, 6.
Li C. Research and application of reservoir prediction method based on dominant seismic amplitude[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(7): 80−83, 6.

Application of development-scale seismic sedimentology to sandstone prediction in the Fuyu oil layer, Block M2, Songliao Basin

LI Cao [1, 2], YANG Chun-Sheng [1, 2], LIU Zong-Bao [2, 3], CHEN Guo-Song [1, 2], SHI Hong-Bo [1, 2]

(1. *Daqing Oilfield Exploration and Development Research Institute*, *CNPC*, *Daqing* 163712, *China*; 2. *State Key Laboratory of Continental Shale Oil*, *Daqing* 163712, *China*; 3. *School of Earth Sciences*, *Northeast Petroleum University*, *Daqing* 163318, *China*)

Abstract: The Fuyu oil layer, located in the southern Daqing Placanticline within northern Songliao Basin, contains well-developed sandstone reservoirs, holding significant potential for increasing the reserves and productivity of the Daqing Oilfield. These reservoirs are characterized by porosity ranging from 9.0% to 13.6% and permeability between 0.1 mD and 3.21 mD, representing tight sandstone reservoirs. Their development requires horizontal wells and large-scale volume fracturing, thus placing high requirements on the accuracy of sand body prediction. These reservoirs are primarily concentrated in the Fuyu I and II oil formations, deposited predominantly in a deltaic plain subfacies. In these formations, the sand bodies are characterized by frequent lateral variations, small single-layer thickness, and a staggering and overlapping vertical distribution pattern. These characteristics result in complex seismic responses, posing great challenges to reservoir prediction. In view of the sedimentary characteristics of tight sandstone reservoirs in the Fuyu oil layer, this study employed development-scale seismic sedimentology for sand body prediction. Specifically, through seismic forward modeling based on well parameters, the seismic responses of thin tight sandstones were identified, followed by the integrated application of automated optimization of stratal slices and planar quantitative prediction of sandstone thickness. The results reveal a positive correlation between seismic amplitude and the thickness of sub-layer sandstones in the Fuyu oil layer, southern Daqing Placanticline. The development-scale seismic sedimentology technology quantitatively characterizes the planar distribution of sub-layer sand bodies, strongly supporting the successful well placement and implementation in the horizontal well pilot area. The success in the trial development of tight oil via horizontal wells in the Fuyu oil layer, Block M2, southern Daqing Placanticline, sets an example for tight oil development in the northern Songliao Basin. Therefore, the development-scale seismic sedimentology for sandstone prediction shall be given a high priority in the subsequent horizontal well design and implementation. This ensures a high penetration rate of sandstones and oil layers and provides technical support for developing tight oil resources in the Fuyu oil layer.

Key words: seismic forward modeling; stratal slice optimization; development-scale seismic sedimentology; horizontal well; tight sandstone reservoir

(本文编辑: 叶佩)