

# Methodology for Low Amplitude Tectonic Studies of Ultra-deep Thin Interbedded Reservoirs

Rui Du<sup>1,2</sup> Xiaochuan Yang<sup>2</sup> Guangliang Zhao<sup>3</sup> Songyuan Li<sup>2</sup> Yaozu Han<sup>2</sup>

1. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

2. Korla Institute of BGP, CNPC, Korla, Xinjiang, 841000, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development in Tarim Oilfield, PetroChina, Korla, Xinjiang, 841000, China

## Abstract

As a typical representative of the exploration and development history of fractured rock reservoirs in the Tarim Basin, China, area X has entered the middle and late stage of development, and is in the stage of low-rate exploitation and extra-high water content, with fast decreasing production and difficulty in stabilizing production. The main oil-bearing sand layer in this area is a thin sand layer in the middle mudstone section of the Carboniferous System, which is a typical super-deep, ultra-thin, low-amplitude back-slope type stratified marginal water oil reservoir. Due to the large burial depth ( $> 5100\text{m}$ ), small single layer thickness ( $0.5\sim 1.5\text{m}$ ), low reservoir tectonic amplitude (closure amplitude  $10\sim 28\text{m}$ ), and the dual influence of overlying special lithology and underlying unconformity, resulting in high velocity variation and low accuracy of base mapping formation, which restricts the degree of tectonic refinement, the conventional low amplitude tectonic study method is difficult to meet the tectonic implementation under the influence of such complex conditions. Starting with the interpretation of seismic data and combined with geological research, this paper looks for effective solutions. By making full use of seismic data, the standard layer not affected by surrounding rock is screened and integrated into map; make full use of the law of well seismic velocity error to eliminate the illusion of low amplitude structure; on the basis of spatial thinking, the inheritance of multi-layer structure is studied to solve the problem of depth inversion. A set of fine tectonic mapping methods under joint well-surface constraints has been developed to solve the problem of low-amplitude tectonic mapping studies under complex conditions in the region, and to promote the technology for low-amplitude tectonic studies of complex ultra-deep thin interbedded reservoirs in the Tarim Basin.

## Keywords

ultra deep; thin interbedding; low amplitude structure; well seismic combination

# 超深薄互层油藏低幅度构造研究方法

杜睿<sup>1,2</sup> 杨小川<sup>2</sup> 赵光亮<sup>3</sup> 李松元<sup>2</sup> 韩耀祖<sup>2</sup>

1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 中国·陕西 西安 710065

2. 中国石油东方地球物理公司研究院库尔勒分院, 中国·新疆 库尔勒 841000

3. 中国石油塔里木油田勘探开发研究院, 中国·新疆 库尔勒 841000

## 摘要

X地区作为中国塔里木盆地碎屑岩油气藏勘探开发历程的典型代表, 目前已进入开发中后期, 处于低速开采、特高含水阶段, 产量递减快, 稳产困难。该区主力含油砂层为石炭系中泥岩段薄砂层, 属于典型的超深、超薄、低幅度的背斜型层状边水油藏。由于埋深大( $> 5100\text{m}$ )、单层厚度小( $0.5\sim 1.5\text{m}$ )、储层构造幅度低(闭合幅度 $10\sim 28\text{m}$ ), 且受上覆特殊岩性体和下伏不整合的双重影响, 造成速度变化大、基础成图层位精度低, 制约了构造精细程度, 常规的低幅度构造研究方法难以满足该类复杂条件下影响下的构造落实。论文从地震资料解释入手, 结合地质研究, 寻找有效解决方法。充分利用地震资料, 筛选性地寻找不受围岩影响的标准层进行整合成图; 充分利用井-震速度误差规律关系, 消除低幅度构造假象; 在空间思维基础上进行多小层构造继承性研究, 解决深度反转的问题。形成一套井-震联合约束下的精细构造成图方法, 解决了该地区复杂条件下的低幅度构造成图研究问题, 也为塔里木盆地复杂超深薄互层油藏的低幅度构造研究形成技术推广。

## 关键词

超深; 薄互层; 低幅度构造; 井震结合

## 1 引言

在中国新疆塔里木盆地发现了大批低幅度构造圈闭,

【作者简介】杜睿(1989-), 女, 中国河北保定人, 本科, 工程师, 从事油气田开发地震综合研究。

且存在着如下的特点: 目的层埋藏较深, 幅度低、面积小, 地表条件复杂, 表层静校正难度较大; 区域速度场变化复杂; 地下地质条件复杂, 岩体、火山岩等地质异常体的存在, 不同程度地影响了其下部构造的发现和落实。因此, 研究低幅度构造成图技术方法, 成为低幅度构造落实与评价的

关键。

X地区薄砂层油藏位于塔里木盆地满加尔凹陷北部的哈得构造带上,该地区主力含油砂层为石炭系中泥岩薄砂层,属于典型的超深、超薄、低幅度的背斜型层状边水油藏<sup>[1]</sup>。由于埋深大(>5100m)、单层厚度小(0.5~1.5m)、储层构造幅度低(闭合幅度10~28m),且受上覆特殊岩性体和下伏不整合的双重影响,导致地震轴波形产生畸变,常规的低幅度构造研究方法难以满足该类复杂条件影响下的构造落实。迫切需要运用新的研究方法来提高低幅度构造的精度。

## 2 薄互层地震地质特征

### 2.1 地质情况

X地区石炭系自上而下钻遇含灰岩段、砂泥岩段、上泥岩段、标准灰岩段、中泥岩段、角砾岩段和东河砂岩段共7个岩性段,与下伏志留系为不整合接触。中泥岩段厚度一般在65~80m之间,横向上南部较厚,厚度可达80m,北部厚度较薄,仅为60m左右;纵向上中泥岩段上、下部均为厚层泥岩或粉砂质泥岩,中部为泥岩、粉砂质泥岩夹细砂岩,出油层为中部厚层泥岩中所夹的细砂岩薄层,与粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩呈频繁互层特征。据资料统计,中泥岩段中的细砂岩薄层单井砂层数一般为11~13层,厚度为0.07~2.15m<sup>[2]</sup>,大多在0.3m左右,厚度大于0.6m、分布范围相对较广的主要有5层,地质上一般按照沉积的先后顺序称为1~5号薄砂层,出油层主要为2、3、4号层。储层平面上均具有由南向北逐渐变薄的分布特征。

### 2.2 地震特征

为实现地震信息的地质化解释,首先需要确定地震地质的对应关系。地震资料的井震关系一致性较好,以X4-34井合成地震记录标定结果为例,在石炭系的井震标定结果相关性可达0.88,在地震剖面上整个中泥岩段反射特征仅为一个波谷到波峰响应,内幕薄砂层段在标定结果上位于零相位附近,响应特征更加微弱,单个薄层不能实现与地震一一对应(见图1)。中泥岩段薄砂层埋深超过5100m,钻井证实X地区薄砂层平均厚度仅0.5~1.5m,储层厚度小于地震资料垂向分辨率,通过井震联合标定可知,中泥岩段内幕的薄砂层主要发育在半个地震同相轴内,也就是说地震资料无法直接反映薄砂层的特征。

三维地震资料虽然不能分辨薄砂层的展布,但能够清晰地分辨东河砂岩顶底、中泥岩顶底、标准灰岩顶底的反射特征。如图2所示,中泥岩段底部为波峰反射,中泥岩段顶部为波谷反射,中泥岩段的几套薄砂层发育在零相位附近。在地震资料上可以精细地解释出东河砂岩顶底、中泥岩段顶底、标准灰岩顶底以及中泥岩段之间可以代表薄砂层的沉积的零相位等一系列地震同相轴。经历东河砂岩填平补齐沉积作用之后,地势相对平缓,在高水位的情况下沉积的中泥岩较为稳定,中泥岩之后沉积的标准灰岩也为一套区域性稳定

的沉积。对比分析多个联井标定结果,发现地震资料与钻井地质分层具有较好的对应关系。地震地质之间的对应关系的确定为进一步利用层位构造成像分析奠定了基础。

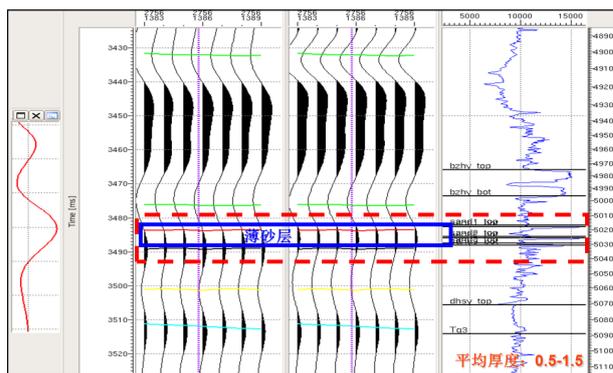


图1 X4-34井合成地震记录标定

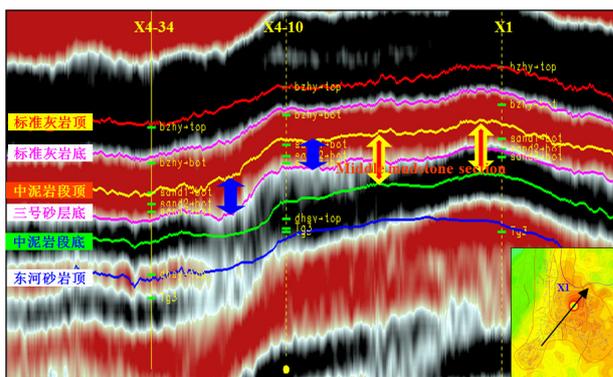
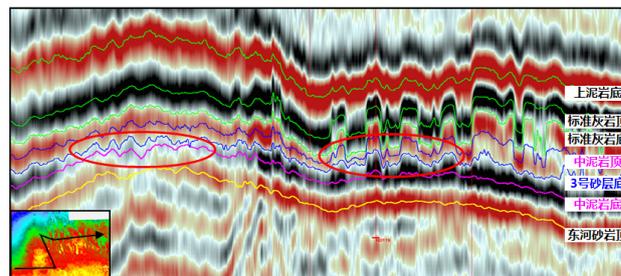


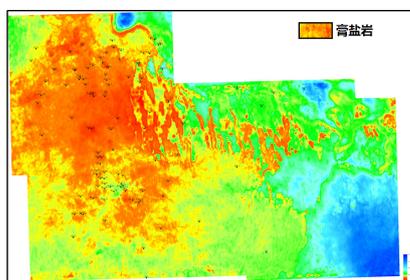
图2 X4-34~X4-10~X1井地震剖面联井对比

塔里木特殊岩性体类型很多,如火成岩、膏、盐岩等。它们在作为上覆地层时常表现为厚度不均,分布不一、速度变化大等特点,严重影响了下覆地层低幅度圈闭的落实。X地区受上覆特殊岩性体和下伏不整合的双重影响,如图3(a)所示,导致层位不能直接用来成图,增大了构造落实的难度。中泥岩顶-薄砂层段既受东部膏盐岩影响,薄砂层-中泥岩底段又受东河砂岩油藏区超覆沉积的影响,如图3(b)所示。这两个因素导致薄砂层的成图非常困难,不能够像其他地区一样找一个明显的可靠的地震反射层位直接成图,这个难点也导致了常规低幅度构造成图研究思路不能适用于X地区薄砂层的构造成图,必须寻找一套新的适用方法。



(a) 受上覆特殊岩性体和下伏不整合影响的典型剖面

图3



(b) 石炭系膏盐岩地震属性平面图

续图 3

### 3 研究方法

本次从地震解释入手，结合地质研究，寻找有效解决方法。主要从井震两方面结合，借助具有较高横向分辨能力的地震信息来搭建区域地质认识和钻井信息之间的联系<sup>[3]</sup>。

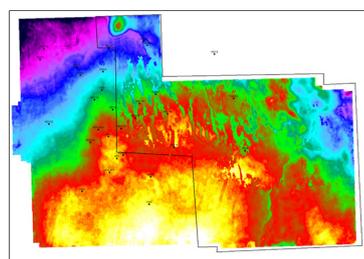
#### 3.1 目标层位的研究

层位是落实构造圈闭的基础<sup>[4]</sup>。对于低幅度构造，反映在地震资料上表现为反射同相轴平直而变化幅度很小，构造不易识别<sup>[5]</sup>。在进行构造解释和成图的时候相应地需要采取不同于常规构造解释的一些思路和技术，既要保证有效和准确地识别低幅度构造，又必须保证在解释和成图的过程中不产生假构造。为了消除低幅度构造假象，需要筛选性地寻找不受围岩影响的标准层进行整合成图。由上述分析中可知，中泥岩顶层能真实反映油藏内部细节特征，中泥岩底层全区分布稳定不受膏盐岩影响。通过对两套标志层的层位自动追踪及加密解释，如图4(a)(b)所示，捕获同向轴的轻微变化幅度，再充分利用井-震的速度规律关系，将中泥岩顶底两层通过一致性时空校正，形成一套初始可靠可信且在全区稳定分布的目标层位，如图4(c)所示，在此基础上单独对井区进行构造落实。

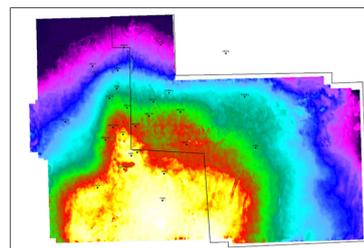
#### 3.2 提高无井控制区误差质量

薄砂层段的构造成图主要存在以下两个方面的技术难点：一是油藏外围缺少对应的薄砂层分层，导致大面积无井控制区误差形态无规律。资料成图范围大，面积达到2560km<sup>2</sup>，微构造落实程度的高低对后期井位部署与井网优化具有重要影响。

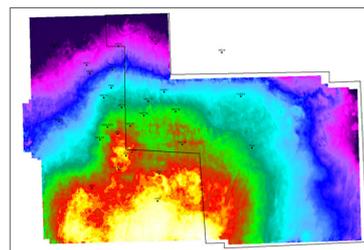
工区内共有井284口，且全部划分出中泥岩段，以2号薄砂层为例，全区资料范围内钻井上能直接划分出2号薄砂层分层的井仅有215口，而且主要密集在主油藏区，从井分布图5(a)来看，研究区整个东部新增资料区900km<sup>2</sup>范围之内，只有X7一口井控制。直接利用原始分层数据进行构造图校正，得到原始误差图5(b)，从误差分布的形态可以看出，资料东部构造形态由于缺少控制井点，存在明显的误差持续外推现象。如图5(c)所示，如果在该误差基础上对原始构造图进行校正，会导致最终成果图的实际构造误差严重偏大，制约了该区构造落实的精度。



(a) 中泥岩顶平面图

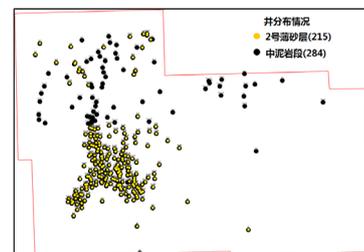


(b) 中泥岩底平面图

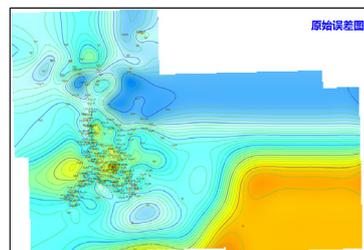


(c) 目标层平面图

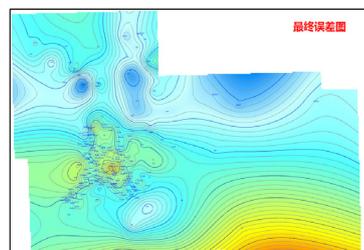
图 4



(a) X地区有CI-2号层的井平面分布图



(b) CI-2号层顶原始误差图



(c) CI-2号层顶最终误差图

图 5

薄砂层间的泥岩隔层厚度分布很稳定<sup>[6]</sup>。2、3号砂层间的泥岩隔层厚度在2.0~6.0m之间,平均3.4m,在含油区基本稳定在3.0~4.0m;3、4号砂层间的泥岩隔层厚度在0.5~2.1m之间,平均1.4m,在含油区基本稳定在1.2~1.6m。各砂层间均具有一套厚度稳定的泥岩,可作为划分开发层系的依据。因此,薄砂层间稳定的泥岩隔层底面可作为薄砂层的顶面。

为了更好地控制全区的构造形态,采用以下方法对基础分层数据重新处理,进一步完善分层数据。第一步:以2号薄砂层为例,工区范围内,有CI-2顶分层的井共215口,没有CI-2只有MS1-2底的井共31口,用MS1-2的底面海拔当成2号薄砂层顶面分层。第二步:工区内总共有井284口,据上一步的统计结果,有CI-2顶或MS1-2底的井共246口,余下的38口井只分出了中泥岩段等大套地层,在上述工作基础上,先根据全区有CI-2或MS1-2分层数据作出全区中泥岩底面到2号薄砂层顶面厚度图(见图6)。第三步:从全区中泥岩底面到2号薄砂层顶面厚度图中预测这38口井的中泥岩底面到2号薄砂层顶面的厚度,并通过厚度来反算出这38口井2号薄砂层顶面分层(见表1),用来控制整体形态。

采用上述方法得到的预测数据作为对研究区周缘误差趋势的约束井。经过重新筛选与处理,全区参与约束的达到284口井。利用处理后的284口井进行校图,得到误差图,从处理井数据后最终误差图5(c)来看,在资料东部得到有效约束后,误差形态消除了系统自动外推插值的影响。由此得到X地区石炭系2号薄砂层顶面构造图,更加真实地反映了目标区域的实际深度。主油藏区构造形态与井上实钻吻合程度较高,外围细节变化更符合地区实际情况。基于目标层的井-地联合约束下的构造图,展现出更多细节变化规律。

### 3.3 提高薄互层间构造精度

单砂体厚度薄(0.5~1.5m),不同砂层之间的隔层厚度薄(2~6m),研究区外围控制井点少,相邻薄砂层构造容易在空间上出现交叉与叠置。2、3、4、5、6号砂层薄而且离得近,在平面分布极不均匀,仅用一层校多层相邻薄砂层构造易穿层。用常规方法成图得到的4号薄砂层构造图减去3号薄砂层构造图(见图7),理论上4砂比3砂深,相减后应该全是负值,但是在结果上看到局部多处出现正值。

从3号和4号薄砂层井分布情况来看(见图8),有3、4号层分层的井是不一致的,导致无法求取两层之间的厚度关系。因此,首先需要通过之前提到的方法,反算出工区内所有井的3、4号层的分层。然后,根据重新处理后相邻两套薄层之间的厚度关系,以全区实钻分层数据最全,地震成像受膏盐岩影响较小的CI-2号小层为基础,在空间思维基础上,采用逐级剥离成图的方法,进行多小层构造继承性研究,解决深度反转的问题。确保相邻两套砂体之间的构造不

交叉、不叠置,提高薄砂层成图的精度与质量。使用上述方法依次得到3号、4号、5号和6号薄砂层的构造图。

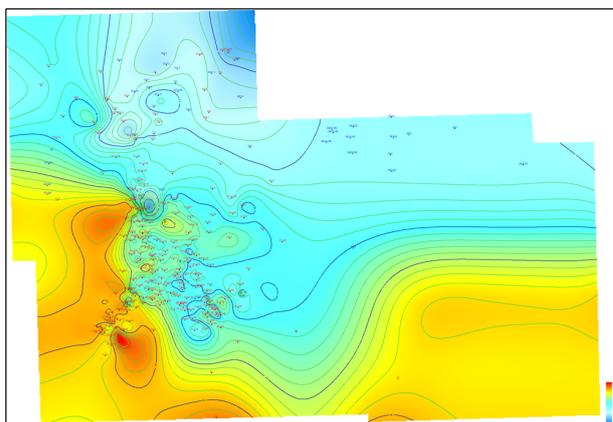


图6 全区2号薄砂层顶面-中泥岩底面厚度图

表1 38口井预测厚度统计表

NO.	WELL	LAYER	Thickness	NO.	WELL	LAYER	Thickness
1	X25-H10	2top-ZNYbot	43	20	X281C	2top-ZNYbot	32
2	X25-H6	2top-ZNYbot	46	21	X301	2top-ZNYbot	34
3	X25-H8	2top-ZNYbot	47	22	XK1	2top-ZNYbot	34
4	X24-1	2top-ZNYbot	35	23	XK101	2top-ZNYbot	31
5	X24-1C	2top-ZNYbot	35	24	XK201-H4	2top-ZNYbot	35
6	X24-3	2top-ZNYbot	32	25	XK201-H6	2top-ZNYbot	35
7	X24-5	2top-ZNYbot	34	26	XK201-H8	2top-ZNYbot	35
8	X23-4-4	2top-ZNYbot	33	27	XK202-H2	2top-ZNYbot	35
9	X23-4-H1	2top-ZNYbot	34	28	XK202-H4	2top-ZNYbot	35
10	X23-5-1	2top-ZNYbot	31	29	XK202X	2top-ZNYbot	35
11	X4-17-1X	2top-ZNYbot	40	30	XK3	2top-ZNYbot	35
12	X29-2	2top-ZNYbot	33	31	XK3-H1	2top-ZNYbot	35
13	X2-1C	2top-ZNYbot	38	32	XK3-H2	2top-ZNYbot	36
14	X301	2top-ZNYbot	34	33	XK301	2top-ZNYbot	35
15	X23-1	2top-ZNYbot	31	34	XK401H	2top-ZNYbot	35
16	X23-2	2top-ZNYbot	32	35	XK5	2top-ZNYbot	35
17	X231	2top-ZNYbot	33	36	XK6	2top-ZNYbot	29
18	X23C2	2top-ZNYbot	32	37	XW4	2top-ZNYbot	40
19	X27	2top-ZNYbot	34	38	XW5	2top-ZNYbot	35

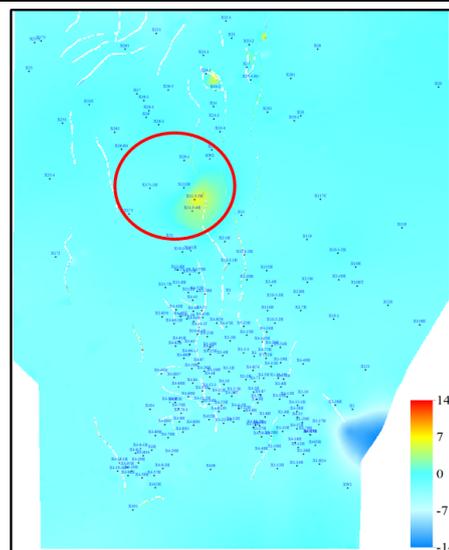


图7 常规方法4号-3号薄砂层顶构造图

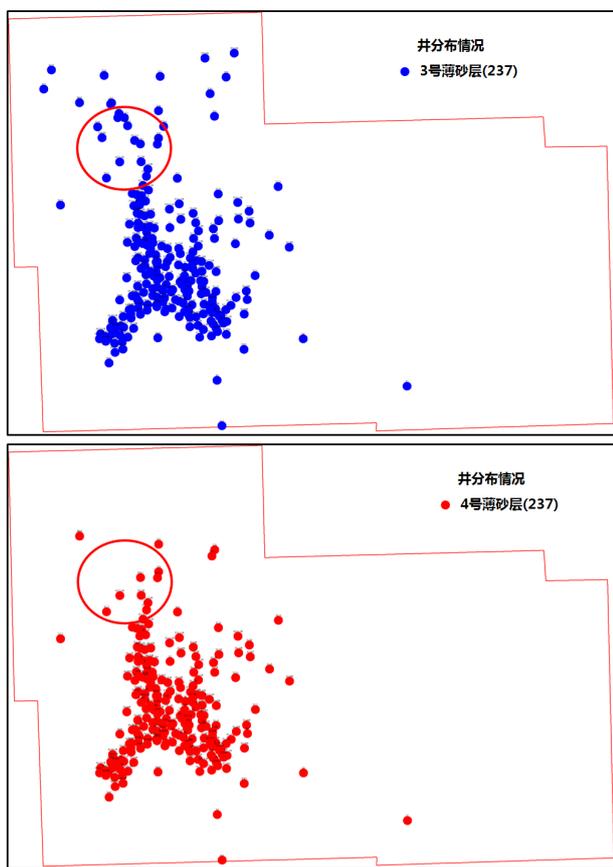


图8 CI-3 分层井位 (左) 和 CI-4 分层井位 (右) 分布图

#### 4 结论

基于上述结果和讨论, 得到结论如下: ①随着老油田全面进入开发中后期, 现阶段滚动评价研究以超深、超薄、

低幅度目标为主, 因此精细井震标定、精细层位解释是落实构造的基础, 持续推进精细构造成图技术是关键。②薄层、薄互层的解释一直是地震勘探的重点与难点, 应根据实际地质条件, 选择合适的方法技术及应用参数。在对地震层位、地质背景、井资料等多方面分析的基础上, 开展目标层的筛选, 通过建立正确的井-震关系, 让井数据得到充分合理的最大化利用, 优化校正量, 从而使构造形态更加可靠, 以便有效地识别薄层、薄互层油气藏。

#### 参考文献

- [1] 徐程宇,王珊,孙海航,等.塔里木盆地某超深超薄油藏高含水期开发调整方案优化研究[A].2018油气田勘探与开发国际会议 (IFEDC 2018) 论文集[C].西安华线网络信息服务有限公司,2018:8.
- [2] 王延光,李皓,李国发,等.一种用于薄层和薄互层砂体厚度估算的复合地震属性[J].石油地球物理勘探,2020(1):9.
- [3] 常玮.井震结合构造层面精细描述方法研究[J].内蒙古石油化工,2015,41(15):152-153.
- [4] 闫瑞萍.井震结合提高低幅度构造解释精度[J].中国石油和化工标准与质量,2014,34(1):181.
- [5] 李宗杰.塔里木盆地低幅度构造成图技术方法研究[A].中国地球物理学会年刊2002——中国地球物理学会第十八届年会论文集[C].中国地球物理学会,2002:2.
- [6] 刘艳,赵海涛,徐红霞,等.利用叠后提频及多属性分析预测砂泥岩薄互层——以轮南石炭系砂泥岩段为例[J].石油地球物理勘探,2018(A1):6.