

# 页岩油“甜点”地震预测方法研究 ——以中国吉木萨尔地区芦草沟组为例

## Research on Seismic Prediction Method of Shale Oil “Sweet Spot” —Taking Lucaogou Formation in Jimusar Sag, China As an Example

周东言<sup>1,2</sup> 林聪<sup>2</sup> 王晓辉<sup>2</sup> 戴云捷<sup>2</sup> 曹洋<sup>2</sup> 王智鹏<sup>2</sup>

Dongyan Zhou<sup>1,2</sup> Cong Lin<sup>2</sup> Xiaohui Wang<sup>2</sup> Yunjie Dai<sup>2</sup> Yang Cao<sup>2</sup> Zhipeng Wang<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 中国·新疆 乌鲁木齐 830016

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

2. Geophysical Research Institute of BGP, CNPC, Urumqi, Xinjiang, 830016, China

**摘要:** 中国吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油资源丰富,页岩油已成为准噶尔盆地油气勘探开发的重要领域,但由于“甜点”纵向薄,横向变化快,非均质性强,造成分布特征预测难度大,制约该区页岩油勘探开发进程。论文通过测井和地震联合分析,探索形成一套系统的页岩油薄层“甜点”地震预测方法:①结合正演模拟,优选波形聚类作为敏感地震属性,实现“甜点”定性评价;②采用波形聚类属性体作为约束,通过基于核磁有效孔隙度的波形指示模拟方法,提高“甜点”预测的分辨率和稳定性,实现5米“甜点”定量表征。该方法的预测成果与地质规律一致性好,并经钻井验证精度高、可靠性强,为页岩油产能有效动用提供了物探技术支持,同时丰富陆相页岩油地震预测技术体系。

**Abstract:** The Permian Lucaogou Formation in the Jimusar Sag, China is abundant in shale oil resources, and shale oil has become an important area of oil and gas exploration and development in the Junggar. It is difficult to predict the distribution characteristics due to the thin vertical thickness, rapid horizontal change and strong heterogeneity of “sweet spot”, which restricts the process of shale oil exploration and development. Through the combined analysis of logging and seismic, this paper forms a set of systematic “sweet spot” seismic prediction method for shale oil thin layer: ① Relying on forward modeling, selecting waveform clustering as sensitive seismic attribute to realize “sweet spot” qualitative evaluation; ② Using the waveform cluster as the constraint, conducting waveform indication simulation based on NMR effective porosity, to improve the resolution and stability of “sweet spot” prediction and realize the quantitative characterization of 5m “sweet spot”. The prediction results have good consistency with geological laws. Verified by drilling, it has high precision and strong reliability, which provides geophysical technical guarantee for the effective production of shale oil, and enriches the seismic prediction technology system of continental shale oil.

**关键词:** 吉木萨尔凹陷; 页岩油“甜点”; 波形聚类; 地震预测方法

**Keywords:** Jimusar Sag; shale oil “sweet spot”; waveform clustering; seismic prediction method

**DOI:** 10.12346/se.v4i1.6409

## 1 引言

一直以来,中国原油对外依存度居高难下,国家石油安全生命线面临严峻挑战。常规老油田已进入稳产后期,增产潜力有限,寻找新的有利勘探目标越来越困难,亟需另辟蹊

径,利用非常规石油资源,实现战略接替。目前,页岩油作为非常规油气之一,已成为非常规油勘探开发最为现实的领域。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组已发现10亿吨级页岩油储量规模,勘探开发前景广阔、潜力巨大,有望

【作者简介】周东言(1988-),男,中国山东烟台人,本科,工程师,从事石油地质、物探综合研究。

成为石油增储上产的重要基地<sup>[1]</sup>。

研究发现,“甜点”分布特征的预测对于页岩油勘探开发井位选区及部署意义重大,越来越多的学者在页岩油“甜点”预测方法研究上取得进展和突破。如利用地质、测井及工程等信息,将预测的地质甜点与工程甜点进行综合评价,以地质需求为导向来确定“甜点”分布有利区<sup>[2]</sup>;基于各项敏感参数分析,开展地震地质统计学模拟的“甜点”预测方法,使“甜点”钻遇率从87%提高到92%<sup>[3]</sup>;综合地震、地质等信息,在地震响应岩石物理分析基础上,通过叠前、叠后等多种优势地震属性来预测“甜点”分布特征<sup>[4]</sup>;前人研究成果对本区页岩油勘探具有重要指导意义,但随着开发程度加深,对于纵向薄、横向变化快、平均厚度小于五米的“甜点”层段,早期“甜点”预测分辨率和精度难以满足高效勘探开发需求。

本次研究,在地震响应特征分析和“甜点”组合模型正演的基础上,明确不同“甜点”组合的地震波形特征,优选波形聚类属性来实现“甜点”分布规律的定性预测;此外,以波形聚类属性体为约束,采用基于核磁孔隙度曲线的波形指示模拟方法,实现了5m厚度“甜点”精确表征,从而建立高精度“甜点”模型,为提升水平井油层钻遇率提供有力支撑。

## 2 页岩油“甜点”特征

### 2.1 页岩油地质特征

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部,为一简单的单斜构造,构造背景相对稳定,页岩油开发主体区埋藏适中,埋深为1500~3500m。

区内芦苇沟组发育典型咸化湖相页岩油,早期的沉积环境为滨浅湖—半深湖,晚期变为闭流湖盆的细粒沉积。烃源岩以泥质岩类为主,储层主要为云质类粉~细砂岩,两者在空间上相互叠置,形成独特的“源储一体、局部富集”格局<sup>[1]</sup>。受咸化湖盆沉积环境影响,烃源岩和储集层分布广泛且连续,具备页岩油的形成和富集物质基础,可以富集大面积较高成熟度的页岩油。

### 2.2 “甜点”储层评价标准

芦苇沟组主要分为上、下两套“甜点”体,连井剖面揭示,上“甜点”横向连续性相对较好,而下“甜点”横向变化较快,连续性较差。前人通过持续技术攻关,已基本明确上“甜点”展布特征,但是对下“甜点”分布特征落实程度低<sup>[3]</sup>,本次重点围绕下“甜点”,探索形成一套高分辨率地震预测方法。

以核磁有效孔隙度12%、8%及下限4%作为“甜点”的分类评价标准<sup>[2]</sup>,进一步可以将“甜点”划分为I类、II类和III类(见表1),目前,I类和II类“甜点”是主要的开发类型。下“甜点”体主要集中在 $P_2I_1^{2-1}$ 、 $P_2I_1^{2-2}$ 、 $P_2I_1^{2-3}$ 砂层,平均厚度约为25米,优势岩性主要为云屑砂岩;其中 $P_2I_1^{2-1}$ 主要为II类“甜点”,平均厚度约为2米,横向连续性差;

$P_2I_1^{2-2}$ 为I类“甜点”,平均厚度约为5m,横向连续性较好,是水平井部署的重点目标层段; $P_2I_1^{2-3}$ 主要为III类“甜点”,平均厚度约为2m,横向连续性较差。

表1 芦苇沟组页岩油“甜点”评价标准表

甜点类型	有效孔隙度/%	“甜点”特征			工业油流压裂规模
		孔隙	含油性	饱和度	
I	> 12	较大	较好	较高	常规
II	8~12	中	中等	中等	中等
III	4~8	小	差	差	大

## 3 “甜点”地震预测方法

### 3.1 地震响应特征分析

不同品质储层在地震上呈现振幅、频率以及同向轴连续性等反射特征差异,本区芦苇沟组下“甜点”I类和II类优质储层在地震相主要表现为“中弱振幅、中等连续性、中频”响应特征。

### 3.2 模型正演

在明确优质储层地震响应特征基础上,通过模型正演,开展不同品质“甜点”组合的纵向和横向波形差异分析。其中,粉色填充部分表示I类和II类优质储层,a为模拟储层品质横向发生变化时,地震的响应特征<sup>[4]</sup>;b为模拟优质储层位于目标层顶部时,地震的响应特征;c为模拟优质储层位于目标层中部时,地震的响应特征;d为模拟优质储层位于目标层底部时,地震的响应特征(见图1)。

对比发现,虽然受分辨率限制,地震资料无法直接识别薄层“甜点”,但是当“甜点”组合横向及纵向发生变化时,地震波形的振幅、相位及连续性均会发生变化,说明地震波形能够反映“甜点”纵横向变化特征,是“甜点”预测的敏感地震属性。

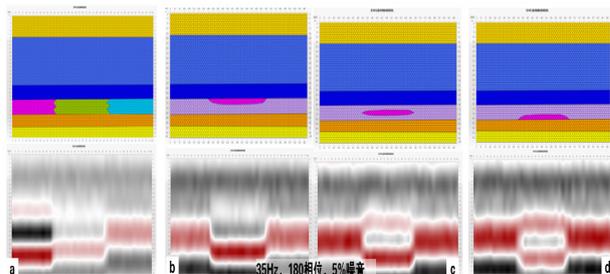


图1 不同品质“甜点”组合模型正演模拟图

### 3.3 波形聚类属性

目前,由于3~5m的“甜点”体远小于地震资料理论分辨能力,常规地震属性预测已无法实现有效预测,需要采用非常规的预测手段<sup>[5]</sup>。

波形聚类技术主要是依托神经网络技术,对实际地震道开展学习训练,把各种类型地震道的波形进行分类,并对比井点处目标层段储层组合与波形之间的关系,明确该波形相

对应的储层沉积特征，借助薄储层对波形的影响变化，从而通过波形变化特征间接预测薄储层，优势在于包含振幅、频率、相位的综合信息，能较全面反映薄储层的地质特征。

本次优选波形聚类属性完成下“甜点”定性预测（见图2），“甜点”分布受西物源及沟谷地貌控制，优质储层主要在J36井西广泛发育，并且分布相对稳定，J36井东区域相对分散，横向变化较快。以上预测成果，对于J36井西区块页岩油预探井部署具有重要指导意义。

### 3.4 “甜点”定量表征

基于波形聚类属性的预测成果基本明确“甜点”宏观分布规律，可以指导低勘探程度区“甜点”选区及勘探井位部署，但是无法满足精细评价及开发阶段水平井设计、轨迹跟踪优化的需求，为此，需进一步开展“甜点”定量表征方法研究。

首先，开展“甜点”敏感参数分析，由纵波阻抗与核磁有效孔隙度曲线交会表明：纵波阻抗能够区分I类“甜点”，总体表现为低纵波阻抗特征，但是对于II、III类“甜点”及非甜点区分能力较弱；核磁有效孔隙度不仅可以区分甜点与非甜点，而且能够有效表征不同品质“甜点”（见图3）。为此，首选核磁有效孔隙度作为“甜点”表征的

敏感参数。

为获取高分辨率预测成果，目前常规方法多采用基于核磁有效孔隙度的波形指示模拟方法开展“甜点”表征。该方法采用地震波形指示的蒙特卡罗（SMCMC）算法，利用地震波形差异特征来约束低频的空间结构，以此代替变差函数（变程）来反映储层的空间变化，在并样本优选的基础上，结合样本的平面分布距离，对高频成分完成无偏差的最优化估计。

对于纵向薄、横向变化快的页岩油“甜点”，该方法可最大限度地提高分辨率，但同时预测成果具有随机性，多次预测成果有所差异。为降低预测成果的随机性，本次创新性地采用波形聚类属性体作为约束，来开展核磁孔隙度曲线波形指示模拟，从而有效保障预测的可靠性和精度。

相比常规方法，上述方法有三大优势：一是在井震精细标定的基础上建立了地震波形和“甜点”间的相关关系，利用地震波形横向变化特征作为预测的宏观规律约束，充分挖潜地震资料信息；二是通过井震联合分析，明确最佳截至频率，突破地震分辨率限制，实现高分辨率预测；三是通过引进波形聚类属性体作为约束，开展波形指示模拟，可提高预测分辨率的同时降低随机性和多解性。

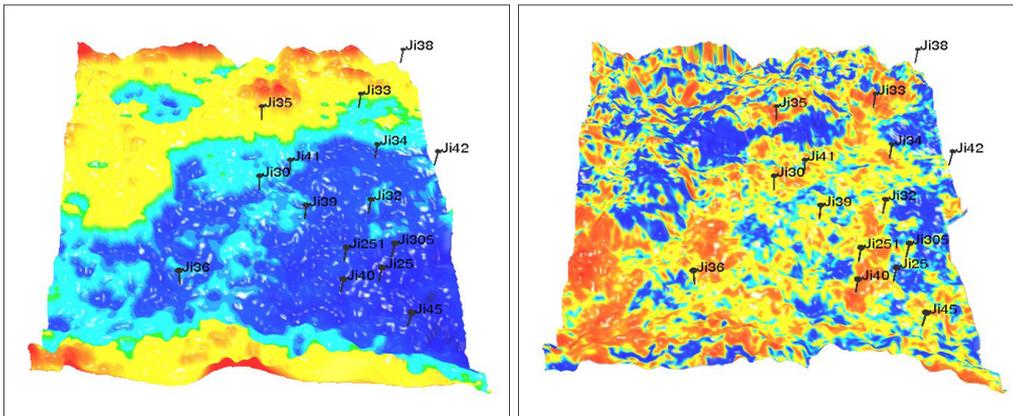


图2下“甜点”沉积古地貌图（左）与波形聚类属性叠合图（右）

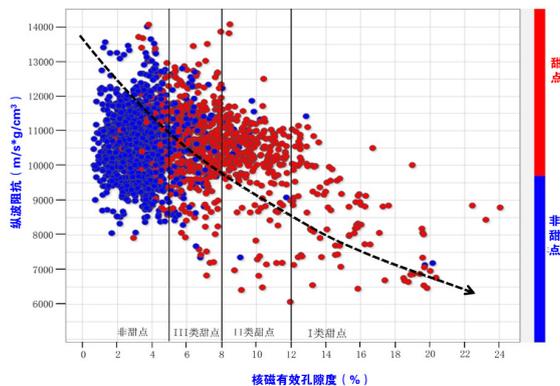


图3目标层段纵波阻抗与核磁有效孔隙度交会图

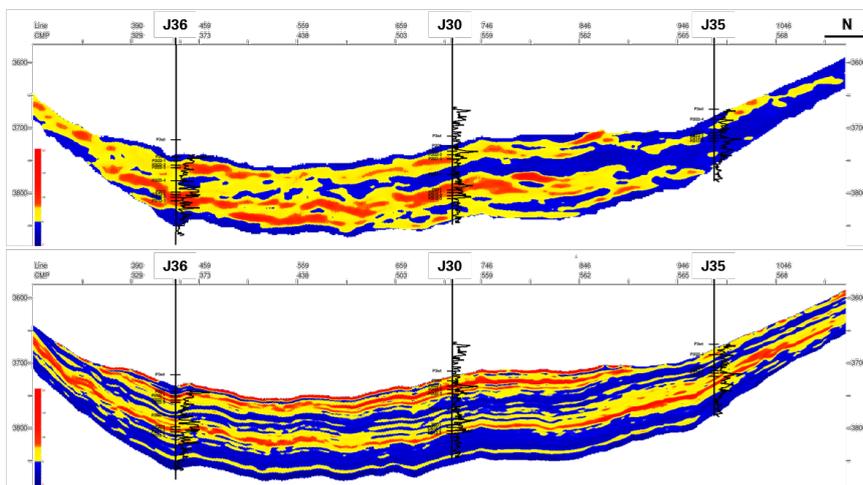


图4 过 J36-J30-J35 连井核磁有效孔隙度模拟剖面 (上: 常规方法; 下: 本次方法)

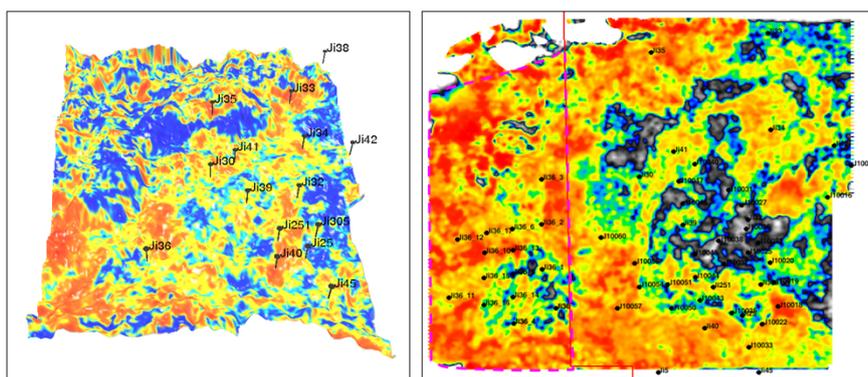


图5 下“甜点”属性图(左)和模拟预测平面图(右)

### 3.5 应用效果

将本方法与常规方法的预测结果进行对比,剖面上看,整体宏观变化趋势基本一致,但本方法纵向分辨率大幅提升,井震结合分析发现,该方法实现5m厚度“甜点”定量识别(见图4);平面上看,分布特征与沉积期微古地貌吻合较好,符合沉积规律,同时与地震属性预测成果趋势一致性好(见图5),实现下“甜点”分布的三维立体精细表征,锁定有利面积83km<sup>2</sup>为评价井及水平井方案部署和设计提供依据。

此外,为验证结果的可靠性,选取三口未参与预测的井作为盲井进行验证,将提取的伪井曲线与实测数据进行交会分析,吻合度高达95%,说明该方法分辨率高、精度高、可靠性高,能够满足精细评价以及开发阶段水平井部署、轨迹优化跟踪的生产需求。

## 4 结论与认识

论文探索形成一套针对吉木萨尔页岩油薄层“甜点”地震预测方法:

①通过明确“甜点”储层地震响应特征、开展不同品质“甜点”组合模型正演模拟,采用波形聚类技术,可以实现“甜点”储层的定性预测,这种方法适用于低勘探程度区的“甜点”选区及勘探井位部署。

②针对高精度评价及开发需求阶段,在上述基础上,进一步将波形聚类体作为约束,开展基于核磁有效孔隙度的波形指示模拟,模拟结果可靠性和精度均有明显提升。

上述“甜点”地震预测方法,有效提高了吉木萨尔地区“甜点”预测结果分辨率和确定性,实现5m厚度“甜点”定量表征,且预测成果与沉积规律一致、验证井吻合度高,说明该方法可靠性较高、实用性较强,为页岩油高效开发提供物探技术支撑。

### 参考文献

- [1] 章敬.非常规油藏地质工程一体化效益开发实践——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油为例[J].断块油气田,2021,28(2):151-155.
- [2] 郭旭光,何文军,杨森,等.准噶尔盆地页岩油“甜点区”评价与关键技术应用——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J].天然气地球科学,2019,30(8):12.
- [3] 董岩,徐东升,钱根葆,等.吉木萨尔页岩油“甜点”预测方法[J].特种油气藏,2020,27(3):6.
- [4] 贾曙光,王军,王玲玲,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油甜点地震预测方法[J].新疆石油地质,2020,41(5):7.
- [5] 张亚奇,马世忠,高阳,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层沉积相分析[J].沉积学报,2017,35(2):358-370.