

2025年2月

石油地球物理勘探

第60卷 第1期

• 综合研究 •

文章编号:1000-7210(2025)01-0193-09

# 地震波相位重构方法 在缝洞型储层识别中的应用

常少英<sup>1,2</sup>,曾溅辉<sup>1</sup>,王孟修<sup>2</sup>,谢舟<sup>3</sup>,崔仕提<sup>3</sup>,杜一凡<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102200; 2. 中国石油杭州地质研究院,浙江杭州 310023;

3. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院,新疆库尔勒 841000)

**摘要:**超深层缝洞型碳酸盐岩油气藏已成为塔里木盆地重要的油气勘探开发领域,并展现了良好的勘探开发前景。塔里木盆地富满地区超深层断控缝洞型有效储层识别难,影响储层有效性评价及储层单元划分。为此,文中基于地震波相位重构方法开展缝洞型储层识别研究。首先,将原始地震数据在相位域开展分解;其次,进行一维、二维地质模型正演,优选对碳酸盐岩储层较为敏感的相位分量;最后,将敏感相位角度的分量数据体重构,产生新的相位地震数据体。研究结果表明:地震波相位重构方法可以较好地去除地层的其他因素产生的强地震波反射特征的屏蔽效应,去除无效信号,突出弱反射储层信号,可以有效地划分缝洞型储层的有利分布范围,为油气藏评价、开发部署提供有利区。地震波相位分解重构技术识别缝洞型碳酸盐岩储层可为其他类似储层特征的评价提供有益借鉴。

**关键词:**超深层,缝洞型储层,相位分解重构,强反射背景,储层有效性检测

中图分类号:P631 文献标识码:A DOI:10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.20230359

## Application of seismic wave phase reconstruction in identification of fracture-cavity reservoirs

CHANG Shaoying<sup>1,2</sup>, ZENG Jianhui<sup>1</sup>, WANG Mengxiu<sup>2</sup>, XIE Zhou<sup>3</sup>, CUI Shiti<sup>3</sup>, DU Yifan<sup>2</sup>

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102200, China; 2. PetroChina Hangzhou Institute of Geology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 3. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

**Abstract:** Ultra-deep fracture-cavity carbonate oil and gas reservoirs have become an important area for exploration and development in the Tarim Basin, showing promising prospects. The identification of effective ultra-deep fault-controlled fracture-cavity reservoirs in the Fuman area of the Tarim Basin is challenging, which affects the evaluation of reservoir effectiveness and the division of reservoir units. This paper conducts research on identification of fracture-cavity reservoirs with a seismic wave phase reconstruction method. First, the raw seismic data are decomposed in the phase domain. Then, the paper conducts one-dimensional and two-dimensional forward modeling of geological models. The phase component sensitive to the carbonate reservoir is selected. Finally, the component data volume with sensitive phase angle is reconstructed to generate a new phase seismic data volume. The research results show that seismic wave phase reconstruction technology can effectively remove the shielding effects caused by strong seismic reflections due to other factors in the strata, eliminating invalid signals and highlighting weak reflection signals from the reservoir. This technology can effectively delineate the favorable distribution range of fracture-cavity reservoirs, providing valuable information on favorable areas for reservoir evaluation and development planning. The use of seismic wave phase decomposition and reconstruction technology for identifying fracture-cavity carbonate reservoirs can serve as a useful reference for evaluating similar reservoir characteristics in other areas.

**Keywords:** ultra-deep, fracture-cavity reservoir, phase decomposition and reconstruction, strong reflection background, reservoir effectiveness detection

\* 浙江省杭州市西湖区西溪路 920 号中国石油杭州地质研究院,310023。Email: csy991@163.com

本文于 2023 年 9 月 28 日收到,最终修改稿于 2024 年 11 月 17 日收到。

本项研究受中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩专项“碳酸盐岩油气富集规律及有利区带研究”(2023ZZ16-01)、“海相碳酸盐岩油气规模增储上产与勘探开发技术研究”(2023ZZ16YJ02)和基础性前瞻性重大科技专项“叠合盆地中下组合油气成藏与保持机制研究”(2023ZZ02)联合资助。

常少英,曾溅辉,王孟修,等.地震波相位重构方法在缝洞型储层识别中的应用[J].石油地球物理勘探,2025,60(1):193-201.

CHANG Shaoying, ZENG Jianhui, WANG Mengxiu, et al. Application of seismic wave phase reconstruction in identification of fracture-cavity reservoirs[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2025, 60(1): 193-201.

## 0 引言

断控缝洞型油气藏在碳酸盐岩油气藏中占重要地位,特别是塔里木油田超深缝洞型碳酸盐岩地层已建成300万吨原油生产基地,其中超深断控缝洞型碳酸盐岩油气藏占主导地位。位于塔里木盆地塔北、中央隆起之间坳陷区的富满油田,由于储层埋藏深(6500~10000 m)、地震波衰减快、信噪比较低、断储关系复杂和含油气储层地震反射特征识别难等原因,影响了储层有效性评价、储量计算及油藏单元划分。目前,依据“强能量串珠”来评价储层规模的大小、产量的高低,取得了较大的成功<sup>[1]</sup>。然而,在生产实践中也发现强能量的“串珠”状地震反射并不全与高产油气井吻合,常常出现“小串珠大产量”、“大串珠小产量”的现象,困扰着该类储层的有效性评价及油藏单元准确划分。

在富满油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层油气勘探中,地震解释技术是评价深层缝洞储层有效性的关键手段<sup>[2]</sup>。前人研究并细致刻画了断溶体的总体形态,取得了一定进展。刘建新等<sup>[3]</sup>通过优选地震波相关分量属性对岩溶储层进行了预测;蔡露露等<sup>[4]</sup>利用频谱分解技术预测了岩溶储层的空间分布;李勇等<sup>[5]</sup>提出缝洞型储层频变AVO含气性检测方法;徐红霞等<sup>[6]</sup>利用多属性分析技术进行碳酸盐岩断溶体的预测。这些方法都是通过地震的振幅、频率属性对岩溶储层进行描述。然而,塔里木盆地富满地区鹰山组——间房组碳酸盐岩属于深层、超深层勘探开发领域(埋深超过7000 m),地震数据存在能量衰减较大的问题,单从地震波能量和频率信息来进行储层有效性评价存在着极大的不确定性。

近些年有学者从地震相位的角度开展研究,充分挖掘超深层地质信息。如通过瞬时相位信息识别剥蚀线、计算薄层厚度等<sup>[7]</sup>,主要用相位信息辅助进行地层结构的解释;罗红梅等<sup>[8-9]</sup>将相位域储层预测技术应用在胜利油田埕岛地区的河道砂识别,取得较好的应用效果。然而目前相位域储层预测方法主要应用于碎屑岩储层的预测,而对超深层缝洞型储

层含油气性的研究相对较少。相位分解重构对超深缝洞储层有效性评价是否有效,亟待需要从理论到实践予以论证说明。此外,如何从地震数据中有效地挖掘相位信息并用于超深缝洞储层预测是地震解释的难点,也是今后研究的热点。

本文采用地震波相位重构技术对塔里木盆地富满油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层进行预测。首先将原始地震数据在相位域开展分解;然后将特定相位角度的分量提取出来,并将该相位角度的相位分量数据体重构,产生新的相位属性。本文方法较好的突出缝洞储层的边界和含流体特征,提高了缝洞储层的识别精度,取得了较好的应用效果。

## 1 相位重构原理与方法

地震数据相位分解区别于常规的相位旋转,主要是将地震数据分解和重构为相位数据体。通过将原始数据在相位域上分解展开,然后将某一相位角度的分量提取出来,重构为该相位角度的相位分量数据体。

### 1.1 相位分解

地震波是振幅、频率、相位三个参数的函数。通常由孔隙流体以及岩性变化所导致的地震阻抗异常,并不都伴有明显的振幅异常,但是会引起明显的相位变化。将一个地震道分解成振幅与时间和相位的函数,这个过程可以称之为相位分解,特定地震波相位随时间的振幅变化称为相位分量<sup>[10]</sup>。在传统的地震道记录的谱分解中,相位谱的实用性不及振幅谱,因为相位作为因变量的物理意义和地质意义并不如振幅那么直观明了。因此,需要将相位结合到振幅谱中,让振幅从频率的一元函数变成频率和相位的二元函数,这样便无需去理解因变量相位的物理意义,而是直接将其作为自变量使用<sup>[11-12]</sup>。

具体方法是将振幅谱  $A(f, t)$  与相位谱的余弦函数  $\cos\theta(f, t)$  做乘积,得到

$$S(f, \theta, t) = A(f, t) \cos\theta(f, t) \quad (1)$$

将式(1)在频段上做积分,即

$$S'(\theta, t) = \int_{f_1}^{f_2} S(f, \theta, t) df \quad (2)$$

式中: $S'(\theta, t)$ 称为相位集,其依旧是振幅的物理意义; $S'(\theta_1, t_1)$ 就是在 $t_1$ 时刻所有相位谱上为 $\theta_1$ 的成分所对应的振幅大小的累加,为了确保积分的收敛性,再乘以相位 $\theta_1$ 的余弦值。若再对相位集在相位上做积分,得到的便是随时间变化的地震道。进而可以得到不同相位分量的地震数据,这些不同相位分量的数据可以从不同的角度反映地质体的特征,从而更好地凸显地质异常体。

## 1.2 相位重构

设定相位值 $\theta_d \in [-180^\circ, 180^\circ]$ ,式中 $\theta_d$ 表示待重构的相位值。将 $\theta_d$ 范围以外的相位值化为零,在 $\theta_d$ 范围内对频率信息积分,再进行傅里叶反变换,即可得到分相位重构地震道,即

$$D(\theta_d, t) = \int_{f_1}^{f_2} B(f, \theta_d, t) df \quad (3)$$

式中: $B$ 为地震数据的瞬时相位信息; $D(\theta_d, t)$ 为重构后只包含指定相位的地震数据;[ $f_1, f_2$ ]为积分的频率范围。进行分相位地震数据重构,可以得到只含有该相位的地震数据,如重构出 $-90^\circ, 90^\circ$ 相位分量<sup>[11]</sup>。

图1为地震道分相位重构示意图。由图1可见, $-90^\circ$ 相位分量只包含原始地震数据(图1a)的 $-90^\circ$ 相位成分,具有从波谷到波峰的变化特征(图1b);而 $90^\circ$ 相位分量只包含原始地震数据的 $90^\circ$ 相位成分,具有从波峰到波谷的变化特征(图1c)。如将所有

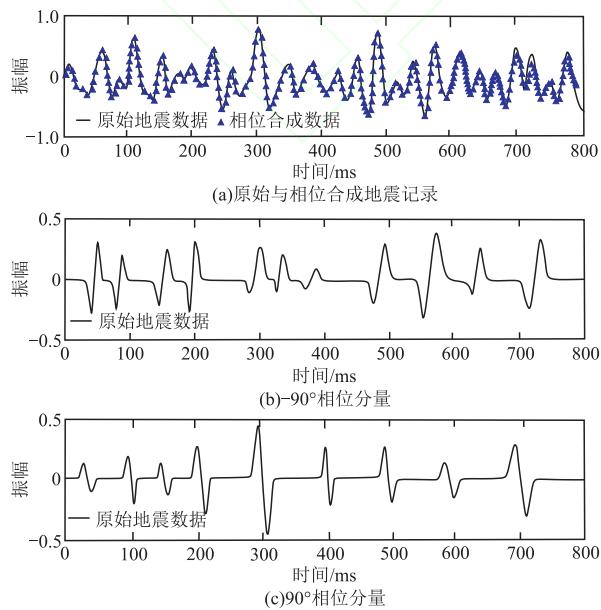


图1 地震道分相位重构

的分相位数据体进行叠加(图2),可以恢复到原始地震数据。

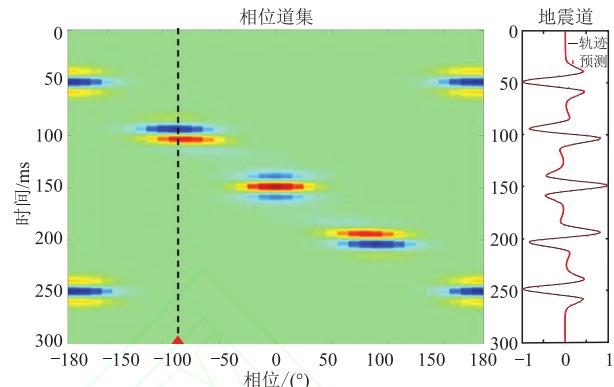


图2 相位道集(左)及其地震道(右)

## 1.3 敏感相位分析

确定研究区的敏感相位是相位域储层预测的关键技术之一。所谓敏感相位,是指确定研究区的储层参数变化敏感的相位值。敏感相位分析主要有两种思路:一是理论分析法,主要适用于速度或波阻抗信息能够较好地区分岩性的地区,首先进行速度分析,然后根据地震正演结果分析敏感相位;二是定性观察法,主要适用于速度和波阻抗信息难以区分岩性以及测井数据较少的地区,首先提取井旁地震道制作相位道集,然后在相位道集周围移动岩性曲线,观察并确定与岩性最匹配的敏感相位。

储层由于含烃引起的亮点特征,具有异常低阻抗的特点。在实际生产中,往往由于储层上方和下方的阻抗不同造成的强反射,掩盖了流体的影响,常规零相位地震资料无法展示含油气甜点的地震响应特征。当特定的相位分量被分离出来时,储集体的微小的横向阻抗变化可以在地震信号中被放大(图3),储集体可进一步得到识别。对于碎屑岩地层,甜点的波阻抗大于上下围岩,含油气甜点的地震响应一般对应着 $90^\circ$ 相位分量;对于碳酸盐岩地层,甜点的波阻抗小于上下围岩,含油气甜点地震响应一般对应着 $-90^\circ$ 相位分量<sup>[12-13]</sup>。

深层—超深层碳酸盐岩地层由于地震有效信号衰减快,能量不聚焦,储层和围岩边界不清晰,缝洞储层刻画不准确<sup>[14-16]</sup>。同时小尺度储层变化所导致的地震阻抗异常并不都伴有明显的振幅异常,但是会引起相应明显的相位变化。其中, $-90^\circ$ 相位分量对储层较为敏感,将 $-90^\circ$ 相位角度的分量提取出来,通过多道组合得到 $-90^\circ$ 相位角度的相位分量数

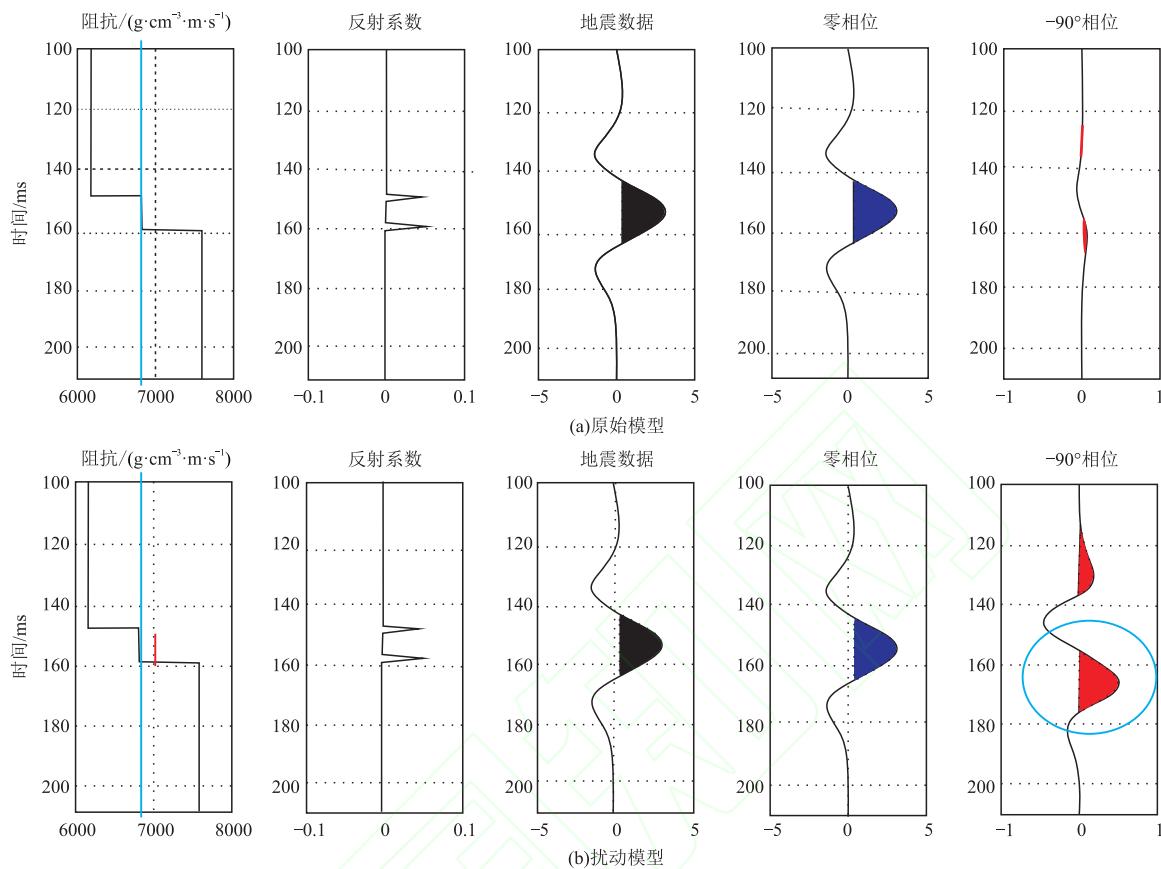


图3 地层甜点地震相位特征示意图

据体。所以,利用 $-90^\circ$ 相位分量对储层反映敏感这一特点,可开展强反射背景下缝洞储层预测。

## 2 模型验证

### 2.1 一维正演

在工区内选取一口井进行正演模拟。该井有两个异常响应特征段,上部发育火成岩不含油、下部为

碳酸盐岩储层含油段。由图4可见,合成地震剖面的上、下两段地震能量均较强,难以区分地层的含油气性(图4a);对合成地震道进行相位分解,抽取 $-90^\circ$ 相位分量重构地震道,剖面上部火成岩段的反射特征较弱,含油气段地震反射特征能量较强(图4b); $90^\circ$ 相位重构剖面中反射特征则相反,火成岩段为强反射,含油气段为弱反射特征(图4c)。因此, $-90^\circ$ 相位分量对储层反映较敏感,适用于强反射背景下缝洞储层预测。

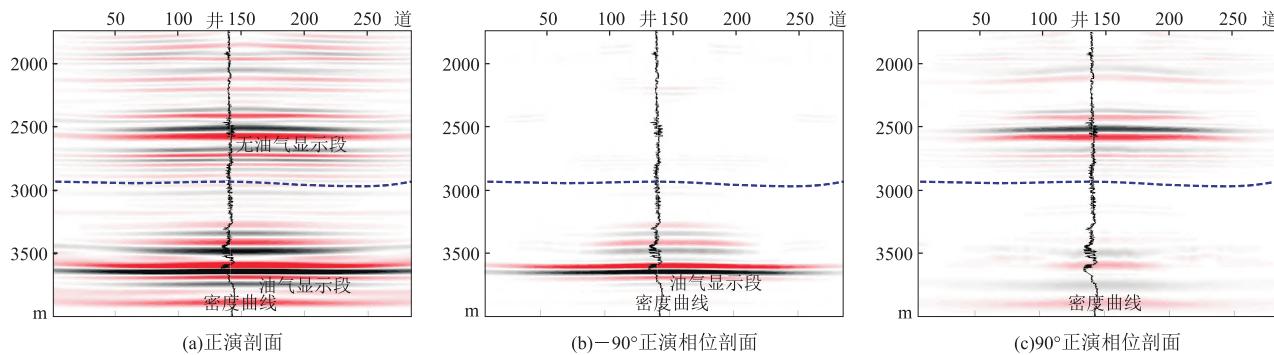


图4 一维正演相位分解剖面

### 2.2 二维正演

设计二维正演模型进行模拟(图5)。地质模型

上覆地层为泥岩,速度为3050 m/s,下伏地层为灰岩,速度为5000 m/s,在灰岩层中设置厚度为5 m、

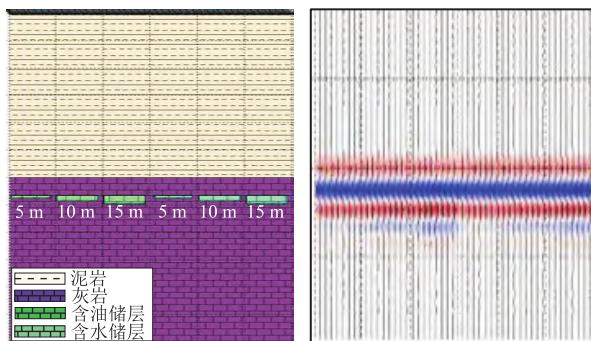


图5 二维地质模型(左)及正演剖面(右)

10 m、15 m 的含油层及含水层。常规地震剖面中含油层及含水层的地震响应特征均呈弱反射特征,难以区分油水层。

图6为二维剖面的吸收衰减及相位分解重构油气检测剖面。由图6可见,剖面中含油层和含水层的振幅差异较小,常规吸收衰减方法检测储层含油气性效果不理想;通过相位分解处理的剖面,不同厚度的储层(10 m、15 m)充填不同流体后的波阻抗微小差异被凸显,油层振幅强于水层,进一步证实相位分解重构方法对储层的含油气性检测更为敏感,相位分解数据对波阻抗差异变化具有放大效应。厚度为3 m的储层在常规地震数据以及频率吸收衰减数据上均无明显的响应,而相位重构体中薄储层的顶底响应特征较为明显。相位分解与重构方法在一定程度上能够提高地震数据的分辨率,降低薄层调谐效应。

因此,本文方法可有效应用于超深层断控缝洞型储层研究,同时可应用于其他类型的储层评价,如火成岩识别、薄砂层含油气性识别、天然气水合物识别等。

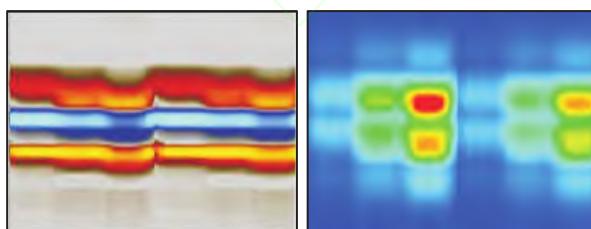


图6 吸收衰减(左)及相位分解重构(右)剖面

### 3 实际资料应用

研究区位于阿满过渡带,发育多期活动深大断裂,这些深大走滑断裂不仅为油气运移提供了良好通道,且可作为优质储集空间。该区长期处于阿满

过渡带的构造脊部,深层发育寒武系玉尔吐斯组烃源岩。主要目的层为奥陶系,中下奥陶系储层类型均为缝洞型碳酸盐岩,断裂带内部储层结构十分复杂,主要发育裂缝—洞穴型、裂缝—孔洞型和裂缝型三种类型储集体,规模储层受控于多期活动的走滑断裂破裂作用及溶蚀作用<sup>[17-19]</sup>。断裂带中上奥陶系地层发育齐全,巨厚桑塔木组泥质岩作为区域盖层,有利于晚期轻质油气运聚与保存。本文从有效储层识别、断储关系分析和储层单元划分三个方面分析本文方法的应用效果。

#### 3.1 有效储层识别

任意选取垂直走滑断裂走向的过井原始地震剖面(图7),其中wellA、wellB、wellC为产油井,wellD、wellE为产水井。由图7可见,五口井的靶点位置在地震剖面上呈“串珠”状强反射特征,可见2个以上“串珠”状反射目标<sup>[20-22]</sup>,原始地震剖面难以区分储层的含油气性(图7a);常规的频率域吸收衰减剖面中油井、水井均为强能量特征,也难以区分储层的含油气性(图7b);本文方法处理后的相位剖面中,含油层特征为强反射特征,含水层地震响应特征为弱反射(图7c)。由此表明,地震数据相位分解与重构方法的对储层含油气性的分辨能力较强。

图8为深度域过井剖面。由图8可见,目的层上覆地层为桑塔木组碎屑岩,与目的层碳酸盐岩地层的界面地震响应特征为一强反射地震轴,内幕上、下段地层由于岩性差异原因,地层界面同样呈现出一较连续的强反射特征(图8a),上部的强反射特征屏蔽了碳酸盐岩内幕中真实储层的含油气性响应特征。通过-90°相位数据重构,去除了地层界面的强反射特征,凸显了含油气储层的地震响应特征,与实钻井放空漏失的位置吻合(图8a红色箭头指示位置)。同时,含油气储集体的边界更加清晰(图8b黑色箭头指示位置),为容积法储量计算及下一步准确分析断储关系提供基础。

#### 3.2 断储关系分析

地震数据在相位分解与重构后,断裂特征清楚,缝洞储层刻画符合断控规律,断储关系表征更加清晰。研究区走滑断裂带整体表现为差异变形的特征,变形程度越大,断裂内部结构越复杂<sup>[23-24]</sup>,发育含油气储层,也发育被方解石、硅质充填的无效储层。根据断裂发育特征和有效储层预测结果的配置关系,识别出3种断裂—储层关系(图9)。

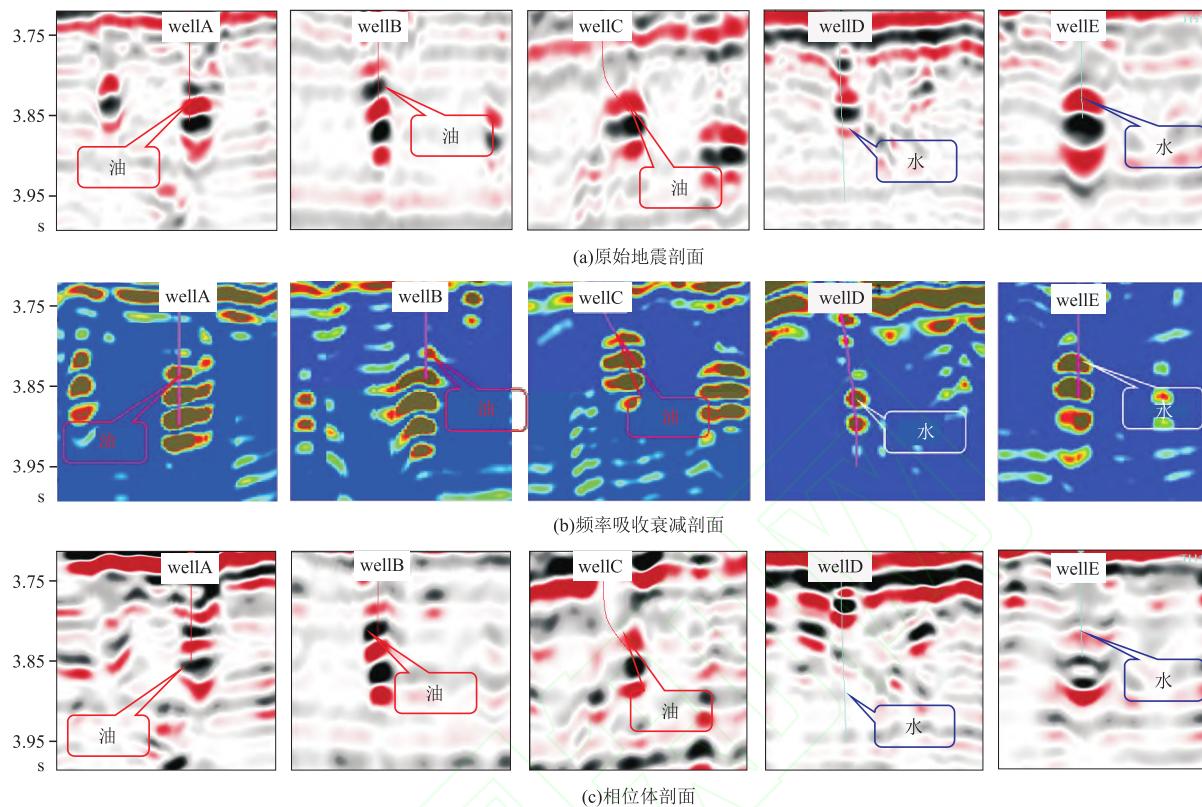


图7 油水层剖面特征

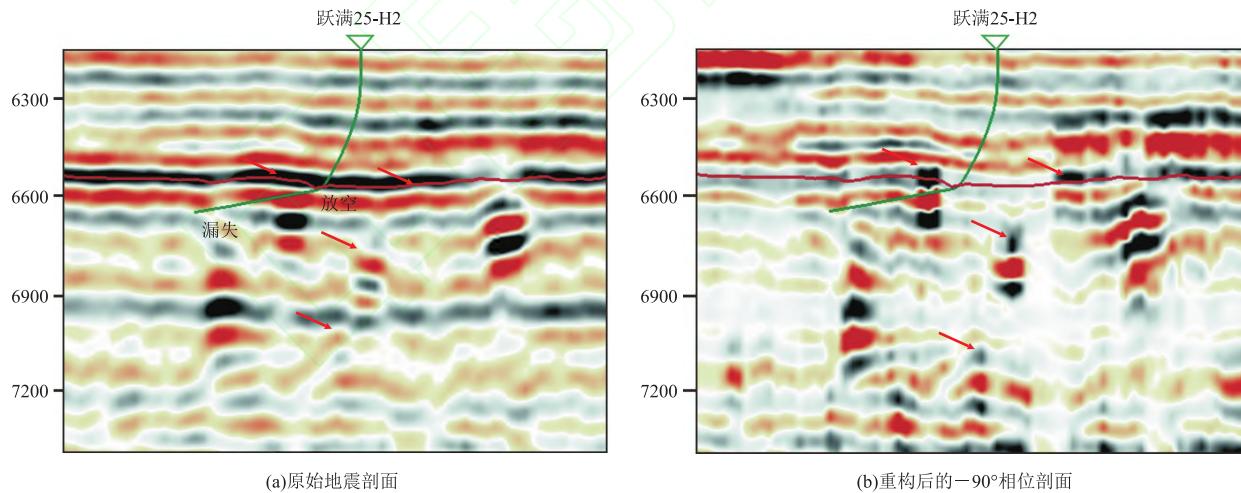


图8 油井剖面特征

(1) 压扭破碎型:受压扭应力作用,剖面上主断面呈隆起状,平面上呈辫状发育,在断裂变形程度大的一侧储层发育。跃满 20C 井区位于双断面叠接挤压段,主断面平面上呈叠接发育,紧邻主干断面储层发育,挤压强度越大,储层规模越大。

(2) 张扭空腔型:跃满 20-1X 等井区侧向拉分储层主要发育在主干右侧与分支断裂交汇区,张扭段拉伸下凹古地形为汇水区,有利于大气淡水下渗

岩溶;同时由于深大断裂泵吸作用热流体上涌从而对储层进行深成岩改造。

(3) 平移破碎型:主要发育在走滑断裂的平移段,断裂较陡直,规模不大,受下行及上行流体影响沿断裂发育溶蚀储层。主要发育在跃满 23-2X 等井区断裂,以单支弱平移为主,断裂纵向分段叠接,深部叠接处地层破碎,储层发育,造成储层发育较深。

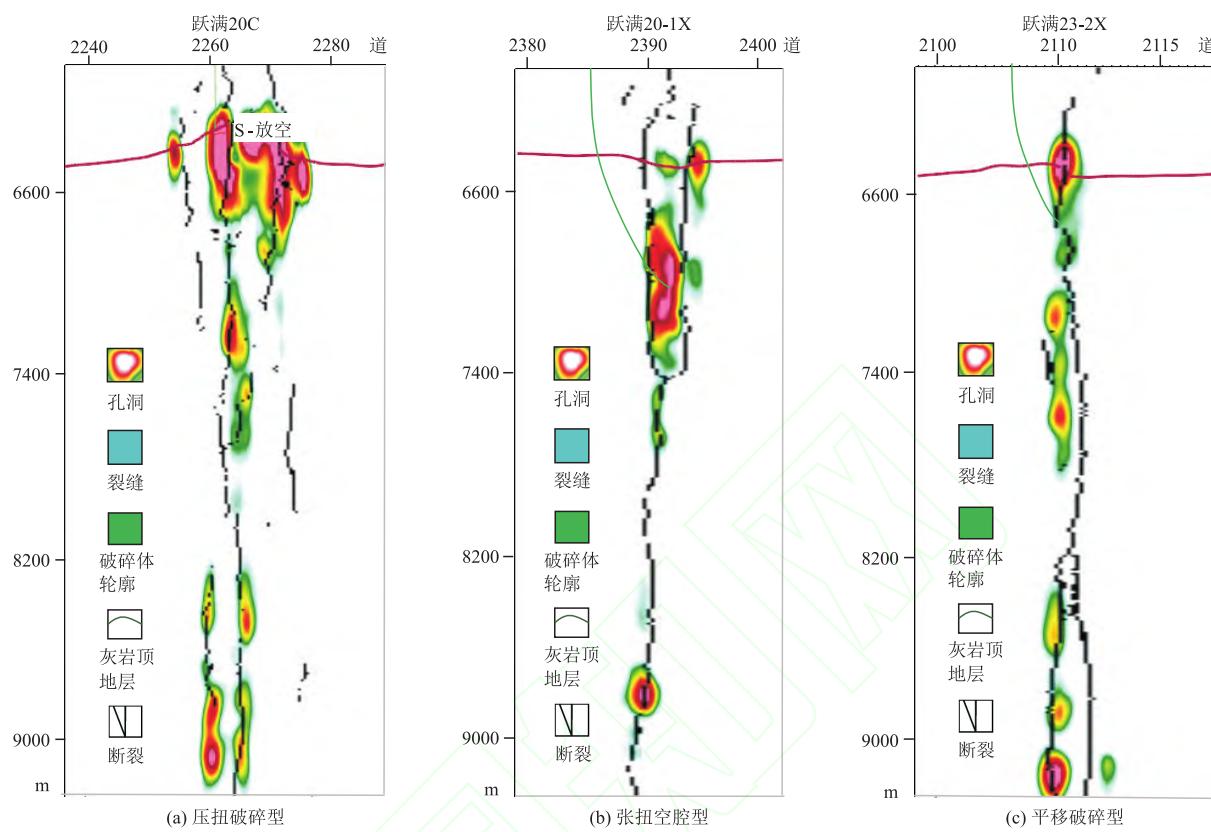


图9 断裂与储层关系剖面图

### 3.3 油藏单元划分

以前研究认为 ManS502-H2、ManS5-H10 与 ManS502H、ManS502-H1、ManS5-H11 井相互连通, 可划为一个连通单元; 通过对 $-90^\circ$ 相位重构体进行分析, 有效缝洞体的边界更加清晰(图 10)。由图 10

可见, ManS502-H2、ManS5-H10 与 ManS502H、ManS502-H1、ManS5-H11 井均不连通, 钻探生产动态结果也证实了这一点。在此基础上重新划分了缝洞体的油藏范围, 连通单元面积  $1.13 \text{ km}^2$ , 累产共 26.79 万吨。

因此, 基于本文方法的储层识别可为油藏单位划分提供较好的基础数据, 为油田优化开发方案的设计、提高采收率提供了科学依据。

## 4 结论

(1) 相位分解是一项新技术, 区别于常规的相位旋转, 该方法将地震数据分解和重构为相位数据体, 产生显著的相位属性, 可以突出储层边界和流体特征。理论和实际数据验证表明,  $-90^\circ$ 相位分量对储层较为敏感, 适用于超深层缝洞型碳酸盐岩储层的有效性识别研究。

(2) 相位分解重构技术可较好的刻画超深层断控缝洞储层内部结构, 根据断裂发育特征和有效储层预测结果的配置关系, 实际应用中识别出 3 种断裂—储层关系: 压扭破碎型、张扭空腔型、平移破碎

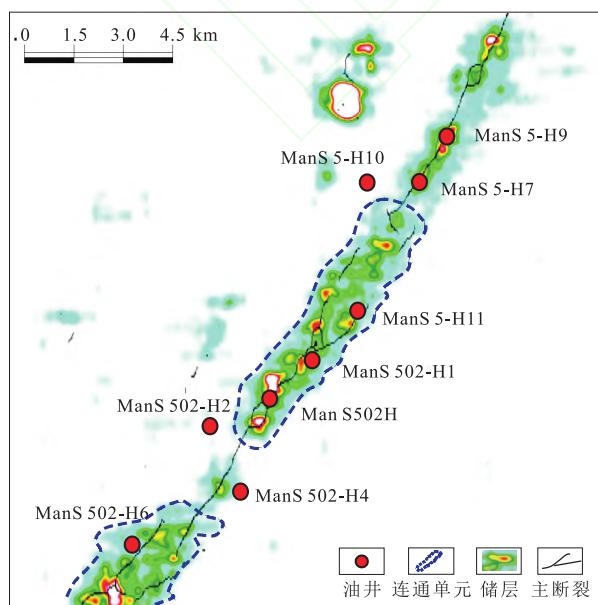


图10 ManS502井组油藏单元划分图

型,断储关系更加清晰,能够较好的支撑实际生产中超深缝洞储层识别的有效性。

(3)由地震—90°相位重构体分析可见,有效缝洞体的边界更加清晰,为储层单位的划分提供了较好基础数据,为提高采收率提供技术支持。

### 参考文献

- [1] 何治亮,云露,尤东华,等.塔里木盆地阿一满过渡带超深层碳酸盐岩储层成因与分布预测[J].地学前缘,2019,26(1):13-21.  
HE Zhiliang, YUN Lu, YOU Donghua, et al. Genesis and distribution prediction of the ultra-deep carbonate reservoirs in the transitional zone between the Awati and Manjiaer depressions, Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 13-21.
- [2] 马永生,何治亮,赵培荣,等.深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J].石油学报,2019,40(12):1415-1425.  
MA Yongsheng, HE Zhiliang, ZHAO Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [3] 刘建新,孙勤华,王锦喜,等.裂缝型储层预测技术优选——以塔北地区奥陶系为例[J].海相油气地质,2010,15(3):65-69.  
LIU Jianxin, SUN Qinhua, WANG Jinxi, et al. Technique optimum of prediction to fractured reservoirs: an example of Ordovician fractured reservoir in Tabei region, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2010, 15(3): 65-69.
- [4] 蔡露露,孙赞东,罗春树,等.频谱分解方法比较及其在轮古地区碳酸盐岩储层预测中的应用[J].石油天然气学报,2011,33(4):72-76.  
CAI Lulu, SUN Zandong, LUO Chunshu, et al. Frequency-spectral decomposition method and its application in carbonate reservoir prediction in Lungu area of Tarim Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(4): 72-76.
- [5] 李勇,刘芷彤,朱颜.缝洞型储层含气性检测方法及应用研究[J].矿物岩石,2014,34(2):106-112.  
LI Yong, LIU Zhitong, ZHU Yan. Methods of gas detection and applied research of fractured-vuggy reservoirs[J]. Mineralogy and Petrology, 2014, 34(2): 106-112.
- [6] 徐红霞,沈春光,李斌,等.多属性分析技术在碳酸盐岩断溶体预测中的应用[J].石油地球物理勘探,2017,52(增刊2):158-163.  
XU Hongxia, SHEN Chenguang, LI Bin, et al. Fault-karst carbonate reservoir prediction with comprehensive multi-attribute analysis[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(S2): 158-163.
- [7] 王鹏,胡向阳,魏水建.基于改进的相位目标函数估算薄层厚度[J].石油地球物理勘探,2018,53(1):178-185.  
WANG Peng, HU Xiangyang, WEI Shuijian. Thin bed thickness estimation based on an improved phase ob-
- jective function[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(1): 178-185.
- [8] 罗红梅,杨培杰,王延光,等.相位域储层预测技术——以胜利油田埕岛地区河道砂为例[J].石油地球物理勘探,2022,57(5):1129-1137.  
LUO Hongmei, YANG Peijie, WANG Yanguang, et al. Phase - domain reservoir prediction technology: a case study of channel sand in Chengdao area, Shengli Oilfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(5): 1129-1137.
- [9] 杨培杰,罗红梅,王金铎.地震数据分相位重构方法[J].石油地球物理勘探,2019,54(3):594-599.  
YANG Peijie, LUO Hongmei, WANG Jinduo. Seismic data phase reconstruction[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(3): 594-599.
- [10] CASTAGNA J, OYEM A, PORTNIAGUINE O, et al. Phase decomposition[J]. Interpretation, 2016, 4(3): SN1-SN10..
- [11] ABREU E S D, CASTAGNA J P, GIL G. Case study: Phase component amplitude variation with angle [J]. Geophysics, 2019, 84(4): B285-B297.
- [12] PURYEAR C I, PORTNIAGUINE O N, COBOS C M, et al. Constrained least-squares spectral analysis: Application to seismic data[J]. Geophysics, 2012, 77(5): V143-V167.
- [13] 王西文,刘全新,高静怀,等.地震资料在小波域的分频处理与重构[J].石油地球物理勘探,2001,36(1):78-85.  
WANG Xiwen, LIU Quanxin, GAO Jinghuai, et al. Frequency-shared processing and reconstruction of seismic data in wavelet domain[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 36(1): 78-85.
- [14] 李坤,印兴耀,宗兆云,等.基于快速匹配追踪的混合域地震稀疏反演方法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(1):50-59.  
LI Kun, YIN Xingyao, ZONG Zhaoyun, et al. Seismic sparse inversion in mixed - domain utilizing fast matching pursuit algorithm[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2018, 42(1): 50-59.
- [15] 李阳.塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(1):1-7.  
LI Yang. Ordovician carbonate fracture - cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(1): 1-7.
- [16] 李阳,范智慧.塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J].石油学报,2011,32(1):101-106.  
LI Yang, FAN Zhihui. Developmental pattern and distribution rule of the fracture-cavity system of Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 101-106.
- [17] 刘宝增,漆立新,李宗杰,等.顺北地区超深层断溶体储层空间雕刻及量化描述技术[J].石油学报,2020,41(4):412-420.  
LIU Baozeng, QI Lixin, LI Zongjie, et al. Spatial characterization and quantitative description technolo-

- logy for ultra-deep fault-karst reservoirs in the Shunbei area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 412-420.
- [18] 鲁新便, 杨敏, 汪彦, 等. 塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征——以塔河油田奥陶系油藏为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(4): 461-469.
- LU Xinbian, YANG Min, WANG Yan, et al. Geological characteristics of “strata-bound” and “fault-controlled” reservoirs in the northern Tarim Basin: taking the Ordovician reservoirs in the Tahe Oil Field as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 461-469.
- [19] 李国会, 袁敬一, 罗浩渝, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩缝洞型储层量化雕刻技术[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(4): 24-29.
- LI Guohui, YUAN Jingyi, LUO Haoyu, et al. Quantitative description technology for fracture-cavity carbonate reservoirs in Halahatang Area, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(4): 24-29.
- [20] 常少英, 曾溅辉, 徐旭辉, 等. 碳酸盐岩断溶体内部结构识别技术及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(2): 414-422.
- CHANG Shaoying, ZENG Jianhui, XU Xuhui, et al. Identification technology for internal structures of carbonate fault-karst and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(2): 414-422.
- [21] 常少英, 崔仕提, 曹鹏, 等. 碳酸盐岩断溶体构型地震表征关键技术及应用[J]. 海相油气地质, 2022, 27(2): 192-200.
- CHANG Shaoying, CUI Shiti, CAO Peng, et al. Key techniques and applications of seismic characterization of carbonate fault-karst configuration[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2022, 27(2): 192-200.
- [22] 李凡异, 魏建新, 狄帮让, 等. 碳酸盐岩溶洞的“串珠”状地震反射特征形成机理研究[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(3): 385-391.
- LI Fanyi, WEI Jianxin, DI Bangrang, et al. Formation mechanism research for bead-like seismic reflection of carbonate caves[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 385-391.
- [23] 常少英, 庄锡进, 邓兴梁, 等. 断溶体油藏高效井预测方法与应用效果——以 HLHT 油田奥陶系潜山区为例[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(增刊1): 199-206.
- CHANG Shaoying, ZHUANG Xijin, DENG Xing-liang, et al. Fault-karst carbonate reservoir prediction: a case study in Ordovician buried hills, HLHT Oilfield [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(S1): 199-206.
- [24] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347-355.
- LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst car-
- bonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347-355.
- [25] 常少英, 李世银, 乔占峰, 等. 碳酸盐岩风化壳岩溶地震弱振幅储层识别技术的应用——以塔里木盆地 TZ62 井区为例[J]. 海相油气地质, 2019, 24(3): 91-96.
- CHANG Shaoying, LI Shiyan, QIAO Zhanfeng, et al. Application of weak amplitude reservoir identification technology in karst reservoir of carbonate weathered crust: an example study of TZ62 well area in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(3): 91-96.
- [26] 王振卿, 王宏斌, 张虎权, 等. 分频波阻抗反演技术在塔中西部台内滩储层预测中的应用[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1847-1854.
- WANG Zhenqing, WANG Hongbin, ZHANG Huquan, et al. Frequency division inversion for the intraplatform shoal reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1847-1854.
- [27] 曹晓初, 常少英, 李立胜, 等. 碳酸盐岩孔洞储层地震岩石物理建模及应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(6): 2239-2246.
- CAO Xiaochu, CHANG Shaoying, LI Lisheng, et al. Seismic petrophysical modeling and application of carbonate porous reservoir[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(6): 2239-2246.
- [28] 常少英, 李昌, 陈娅娜, 等. 海相碳酸盐岩储层地震预测技术进展及应用实效[J]. 海相油气地质, 2020, 25(1): 22-34.
- CHANG Shaoying, LI Chang, CHEN Yanan, et al. Progress and application of seismic prediction technology for marine carbonate reservoir[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(1): 22-34.
- [29] 丁博钊, 孙贊东, 蔡加铭, 等. 纯纵波地震资料在高石梯地区灯四段储层研究中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(4): 854-863.
- DING Bozhao, SUN Zandong, CAI Jiaming, et al. Application of pure P-wave seismic data for studying Dn4 sub-member reservoirs in Gaoshiti area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(4): 854-863.

(本文编辑:张伟)

## 作者简介



常少英 高级工程师, 博士研究生, 1983 年生; 2006 年获得长江大学勘查技术与工程专业学士学位, 2009 年获得桂林理工大学地球探测与信息技术专业硕士学位, 现在中国石油大学攻读资源与环境专业博士学位; 现就职于中国石油杭州地质研究院, 主要从事油藏地球物理研究。