

doi: 10.12029/gc20200729001

钟广见, 强昆生, 杨建礼, 孙鸣, 赵静, 冯常茂, 王超, 易海, 赵忠泉, 阎贫, 刘大锰. 2024. 利用弹性参数反演预测潮汕坳陷目标构造的含油气性[J]. 中国地质, 51(5): 1748–1760.

Zhong Guangjian, Qiang Kunsheng, Yang Jianli, Sun Ming, Zhao Jing, Feng Changmao, Wang Chao, Yi Hai, Zhao Zhongquan, Yan Pin, Liu Dameng. 2024. Hydrocarbon prediction of Mesozoic target structure in Chaoshan Depression based on pre-stack elastic parameter inversion[J]. Geology in China, 51(5): 1748–1760(in Chinese with English abstract).

## 利用弹性参数反演预测潮汕坳陷目标构造的含油气性

钟广见<sup>1</sup>, 强昆生<sup>1,2</sup>, 杨建礼<sup>3</sup>, 孙鸣<sup>1</sup>, 赵静<sup>1</sup>, 冯常茂<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 易海<sup>1</sup>, 赵忠泉<sup>1</sup>,  
阎贫<sup>4</sup>, 刘大锰<sup>5</sup>

(1. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 510760; 3. 北京珠玛阳光科技有限公司, 北京 100083; 4. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 5. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:**【研究目的】潮汕坳陷构造隆起部位受砂岩储层发育程度和构造条件的双重控制, 其侧翼洼陷为其提供烃源, 是油气聚集最有利区。利用地震反演的弹性参数进行含油气性预测的潮汕坳陷中生界砂岩储层具有明显的低密度特征, 而其他岩性的密度偏高。【研究方法】利用叠前地震全道集资料直接反演密度、泊松比等弹性参数, 通过密度反演成果预测砂岩储层发育情况和烃类分布, 实现对中生界含油气性的预测。【研究结果】泊松比对烃类比较敏感, 储层含烃后具有明显的低泊松比特征。【结论】利用地震反演的弹性参数进行含油气性预测表明, 烃类异常特征明显, 预测构造隆起部位具有较好的含油气性。叠前弹性参数反演技术使无井区域储层预测的多解性与不确定性大大降低, 提高了反演结果的准确性和可靠性, 这项技术的应用对于类似研究新区的储层预测和烃类检测工作, 具有很好的应用推广价值。

**关键词:** 中生界; 叠前地震; 弹性参数反演; 油气勘查工程; 含油气性预测; 南海

**创新点:** 叠前弹性参数反演技术使勘探冷门区块的储层预测的多解性与不确定性大大降低, 提高了反演结果的准确性和可靠性。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2024)05–1748–13

## Hydrocarbon prediction of Mesozoic target structure in Chaoshan Depression based on pre-stack elastic parameter inversion

ZHONG Guangjian<sup>1</sup>, QIANG Kunsheng<sup>1,2</sup>, YANG Jianli<sup>3</sup>, SUN Ming<sup>1</sup>, ZHAO Jing<sup>1</sup>,  
FENG Changmao<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1</sup>, YI Hai<sup>1</sup>, ZHAO Zhongquan<sup>1</sup>, YAN Pin<sup>4</sup>, LIU Dameng<sup>5</sup>

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, Guangdong, China; 2. Key Special Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 510760, Guangdong, China; 3. Beijing Zhuma Sunshine Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China; 4. South China Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, Guangdong, China; 5. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

收稿日期: 2020–07–29; 改回日期: 2020–12–25

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190212)资助。

作者简介: 钟广见, 男, 1965年生, 教授级高级工程师, 主要从事海洋油气资源调查研究; E-mail: 2645078906@qq.com。

通讯作者: 强昆生, 男, 1980年生, 高级工程师, 主要从事海洋油气地质、储层地质学和裂缝预测等方面的研究; E-mail: qks80@163.com。

**Abstract:** This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

**[Objective]** The structural uplift of Chaoshan depression is controlled by the development degree of sandstone reservoir and tectonic conditions. Its flank depression provides a source of hydrocarbon, which is the most favorable area for zones of hydrocarbon accumulation. The Mesozoic sandstone reservoirs in the Chaoshan Depression have obvious low-density characteristics based on the elastic parameters of seismic inversion to predict the oil and gas properties, while the density of other lithologies is high.

**[Methods]** The elastic parameters such as density and Poisson's ratio were directly inverted from the pre-stack seismic data, and the development of sandstone reservoirs and the distribution of hydrocarbons were predicted through the density inversion results, so as to realize the prediction of the Mesozoic oil and gas content. **[Results]** The Poisson's ratio is sensitive to hydrocarbons, and the reservoir has obvious characteristics of low Poisson's ratio after hydrocarbons. **[Conclusions]** The elastic parameters of seismic inversion are used to predict the oil and gas properties, and the hydrocarbon anomalies are obvious, and the predicted structural uplift has good oil and gas properties. The pre-stack elastic parameter inversion technology greatly reduces the multi-solution and uncertainty of reservoir prediction in well-free areas, and improves the accuracy and reliability of inversion results.

**Key words:** Mesozoic; pre-stack seismic; elastic parameters inversion; oil and gas exploration engineering; oil-bearing sand prediction; South China Sea

**Highlights:** The pre-stack elastic parameter inversion technology greatly reduces the multi-solution and uncertainty of reservoir prediction in unpopular blocks, and improves the accuracy and reliability of the inversion results.

**About the first author:** ZHONG Guangjian, male, born in 1965, professor level senior engineer, mainly engaged in offshore oil and gas geology research; E-mail: 2645078906@qq.com.

**About the corresponding author:** QIANG Kunsheng, male, born in 1980, senior engineer, mainly engaged in offshore oil and gas geology research, reservoir geology, fault prediction research; E-mail: qks80@163.com.

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190212).

## 1 引言

海域海相中生界是目前中国油气勘探攻关的重要领域,南海北部中生代沉积区经历了多次隆升剥蚀,现今残留盆地面积超过 10 万 km<sup>2</sup>,是中国海域中生界油气勘探实现突破的最有利地区(张莉等, 2012; 钟广见等, 2022)。该区已开展了大量的油气勘探调查和研究,发现富含有机质海相沉积层段和多个中生界圈闭构造。中生界目标构造的含油气性预测对于油气勘探的突破极其重要,仅使用纵波阻抗反演预测储层在理论和准确性方面都存在不足,而反演的多解性是其致命缺陷。本文拟采用弹性参数反演方法预测潮汕坳陷中生界目标构造含油气性,利用一些敏感属性参数,通过各种反演结果,降低储层预测的多解性和不确定性,从而提高了反演结果的准确性和可靠性,为油气钻探提供可靠依据。

## 2 地质背景

### 2.1 区域地质背景

大量地球物理调查和钻探发现南海北部存在

海相中生界,如台西南盆地的多口井(CFC-1, A-1B 等)揭示了南海北部存在下白垩统(周蒂, 2002; 何家雄等, 2006; 钟广见等, 2007; 何敏等, 2023),潮汕坳陷的 LF35-1-1 井揭示了南海北部存在富含有机质的中—上侏罗统(邵磊等, 2007; 吴国璋等, 2007)。中生代盆地具有多期成盆、多期改造的特点,是具有不同演化特点的原型盆地叠加后形成的大型叠合盆地(钟广见等, 2011)。潮汕坳陷是南海北部最大中生界残留坳陷,经历了中—晚侏罗世的沉降、晚侏罗世末—早白垩世的隆升、早白垩世—晚白垩世的叠加埋深和晚白垩世后期的抬升剥蚀,面积超过 3.7×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,水深为 300~3000 m(图 1),其下构造层为中生代海相沉积,最大沉积厚度约 6000 m(图 2),具备生烃和形成多种类型油气藏的条件(王平等, 2000; 郝沪军等, 2001, 2004, 2009; 周蒂等, 2005; 王嘹亮等, 2009; 姚伯初等, 2011; 赵美松等, 2012; 张莉等, 2012; 段九春和米惠芬, 2012; 纪中云等, 2014; 张江阳等, 2014; 强昆生等, 2018; Liang et al., 2020; 曾婷等, 2024)。中国地质调查局广州海洋地质调查局将潮汕坳陷划分为东部凹陷、西部凹陷、中部低凸起和北部斜坡等次

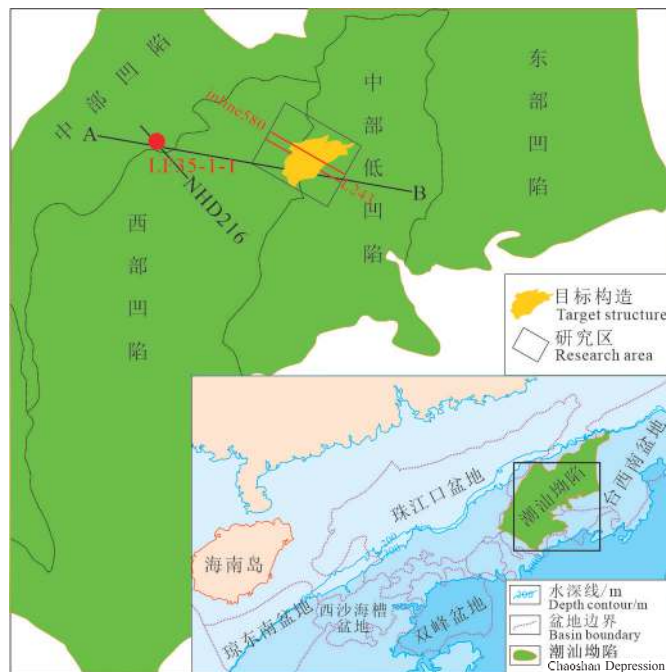


图1 潮汕坳陷位置图

Fig.1 Location of Chaoshan Depression

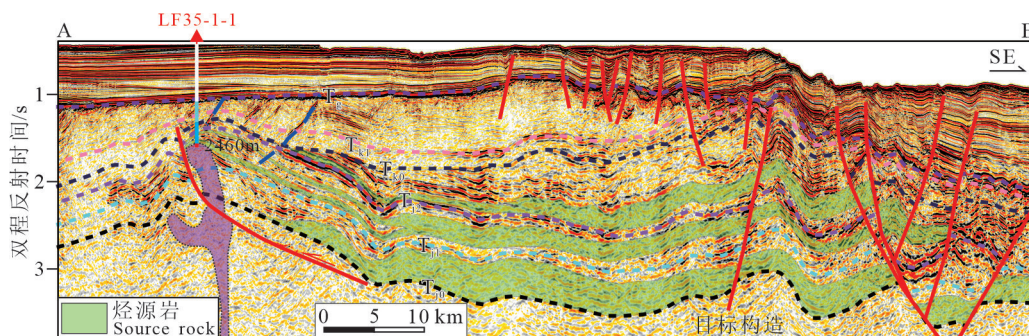


图2 潮汕坳陷过井地震解释剖面 AB(位置见图1)

Fig.2 Seismic interpretation section AB of Chaoshan Depression (Profile location shown in Fig.1)

级构造单元,并在中部低凸起优选了目标构造(图1)。

## 2.2 油气地质条件

LF35-1-1井钻探证实,潮汕坳陷充填白垩纪陆相沉积及中—晚侏罗世海相沉积,其中中—晚侏罗世海相沉积具有良好的石油地质条件(郝沪军等,2009)。

### 2.2.1 烃源岩条件

LF35-1-1井1940~2022 m井段和2100~2412 m井段揭示了两段烃源岩,地球化学指标见表1,其中1940~2022 m烃源岩为差—中等烃源岩,2100~2400 m烃源岩为中等—好烃源岩(杨树春等,

2008)。这两段烃源岩的有机质类型以Ⅲ型为主,少量为Ⅱ<sub>2</sub>型,都分布在中—上侏罗统的海相地层中,在相当大的范围内分布稳定。烃源岩的单层厚度最小6 m、最大超过40 m、平均约20 m,下部烃源岩的平均单层厚度要大于上部。

从潮汕坳陷地震资料解释看(图2),中生界发育三套烃源岩,其中上三叠统一下侏罗统烃源岩以半深海—浅海相为主,中侏罗统烃源岩以浅海相为主,上侏罗统烃源岩以半深海—浅海相为主。

### 2.2.2 储集条件

根据LF35-1-1井钻遇地层和地震资料分析,潮汕坳陷目标构造区发育3套储层,分别发育于上、



表 1 LF35-1-1 井暗色泥岩地球化学特征  
Table 1 Geochemical characteristics of dark mudstone in Well LF35-1-1

井段/m	层位	地层厚度/m	岩性	古地层厚度/m	有效烃源岩厚度/m	TOC/%		评价
						范围	平均(样品数)	
977~1369	K	392	暗色泥岩	0	0	0.05~0.54	0.10 (25)	非
			凝灰岩	33	0	0.06~0.30	0.15 (6)	非
1369~1698	K	329	暗色砂泥岩	45.5	0	0.06~0.11	0.08 (15)	非
			凝灰岩	215	0	0.14~0.63	0.27 (28)	非
1698~2412	J <sub>2+3</sub>	713	暗色砂泥岩 529.38 (去凝灰岩和砂岩)		82.87	0.5~1.15	0.70 (36)	差—中烃源岩
					46.16	1~1.48	1.32 (11)	中—好烃源岩

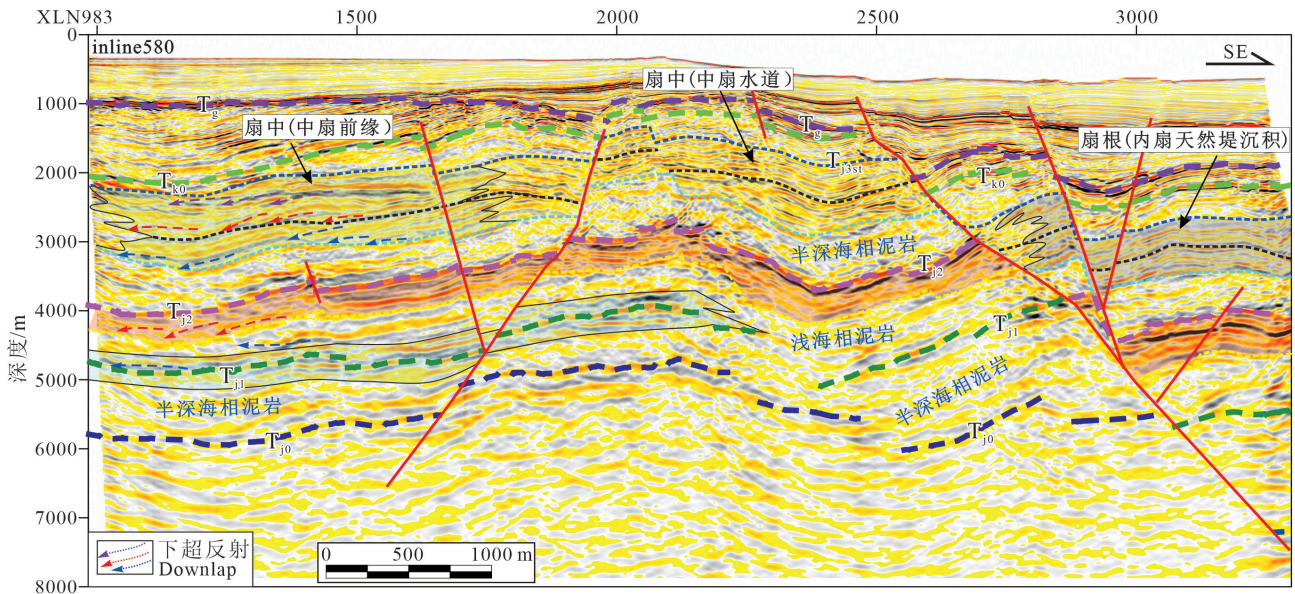


图 3 目标构造储层刻画剖面图(位置见图 1)  
Fig.3 Portray section of the target structure reservoir (Profile location shown in Fig.1)

中、下侏罗统。地震剖面(图 3)显示,中侏罗统顶部(T<sub>12</sub>界面)稳定分布有一套厚度稳定的灰岩层,上侏罗统顶部发育一套 SE 至 NW 推进的海底扇砂岩,剖面东南部主要发育扇根(内扇天然堤沉积),中部及西北部主要发育扇中,其中,中部主要为中扇水道沉积,该位置砂岩储层物性最好;西北部主要发育中扇前缘沉积。平面上,地震相分析结果表明,海底扇呈 SE-NW 向展布,目标构造位于中扇辫状水道区以及中扇无水道区,均是优质砂岩储层发育区。

2.2.3 盖层条件

晚渐新世及其之后广布全区的滨浅海相以及半深海—深海相泥岩,厚度大于 200 m 泥岩质地较纯,具有良好的封盖能力,可构成区域盖层。从 LF35-1-1 钻井资料看,该井所钻遇的多套泥岩单层厚度大,最大厚度达 40 m 以上,应具有良好的封盖能力,是该区重要的局部盖层。

### 2.3 地震反演研究现状

地震反演是获得储层性参数最有效的手段,根据地震波传播规律,地震反演可以分为波动方程反演和射线方程反演,其中基于 Zoeppritz 方程的射线理论反演方法是目前发展最成熟的反演方法(李春鹏等, 2017)。

叠后反演技术目前比较成熟,利用波阻抗数据体识别地下岩性及预测孔隙度,在油气勘探中占据重要角色。但因为其基于纵波垂直入射理论,掩盖了地震反射振幅随偏移距或入射角的变化(AVO 或 AVA)特征,削弱了地震资料反映储层变化特征的敏感性,模糊了构造、储层及油气信息,限制了叠后反演方法在构造复杂、岩性多变区域的应用效果(Gogoi and Chatterjee, 2019; Souza et al., 2020)。

叠前反演技术在地震数据体中保留了更加丰富的振幅变化特征。利用叠前反演能够获得除纵



波信息之外的更多对油气储层和地下流体敏感的参数,如横波速度、密度、吸收衰减参数、各向异性参数、物性参数以及岩石模量等。利用这些参数进行多参数联合分析,可以减少地震解释的多解性,有效地预测岩石物性和含油气性(刘玲等, 2016)。

物性参数是储层描述的重要参数(印兴耀等, 2014),在油气聚集程度较高的储层中,地震波速和地层密度都要变小,在储集层顶界面出现“暗点”反射、在储集层底界面出现“亮点”反射特征,利用“暗点”、“亮点”技术在国内多个油田获得油气发现(张德林, 2009)。在油气勘探中,形成了以“亮点”或传统 AVO 异常预测烃类的最常规方法,但该方法在南海深水勘探实践中遇到了挑战,人们发现“亮点”或传统 AVO 异常并不代表储层中一定含有高饱和

度烃类,含水、低饱和度含气甚至非储层都可能引起叠加振幅“亮点”或者 AVO 异常。有时含气砂岩并不一定表现为振幅“亮点”,可能为非“亮点”。

从潮汕坳陷 AVO 属性分析结果(图 4)可以观察到,在中生界 LF35-1-1 井位置 AVO 指示总体呈现一定异常,而 LF35-1-1 实际钻探未发现任何油气显示,AVO 异常对潮汕坳陷中生界含油气性预测效果不太理想。

为解决这一深水油气勘探难题,需要利用其他有效的地球物理预测方法降低油气勘探的风险。针对含气储层一般具有低弹性性质的特点,通过叠前(弹性)反演得到的敏感弹性参数,如横波速度、密度和泊松比等实现对烃类的预测,弥补 AVO 属性分析的不足。弹性参数反演在预测“亮点”或“甜

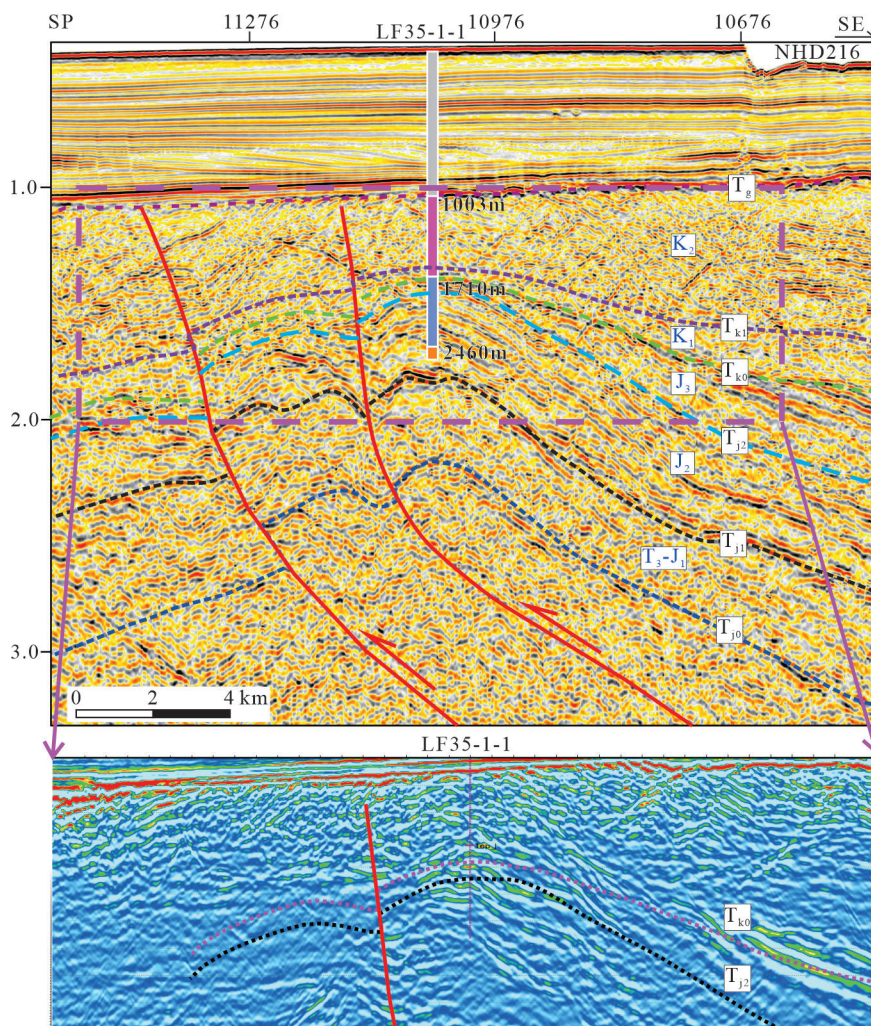


图 4 潮汕坳陷 AVO 指数特征图(位置见图 1)

Fig.4 Characteristic chart of AVO index in Chaoshan Depression (Profile location shown in Fig.1)

点”方面取得较好效果(潘光超等, 2016; 张林清等, 2017; 韩向义等, 2018)。

### 3 技术方法

岩石物理研究岩石的物理参数与地球物理观测之间的关系, 即通过诸如孔隙度、刚性、压缩性等物理性质(岩石物理参数)描述储层岩石, 旨在建立储层岩石的物理性质与观测到的地震响应之间的关系, 并且发展一套预测理论使得这些物理性质(岩石物理参数)能通过地震的技术探测到。

与常规的测井数据(如 GR 和电阻率)划分岩性和流体类似, 岩石物理数据(如泊松比和密度)同样可以划分岩性和流体, 泊松比曲线和 GR 曲线非常相似。二者所不同的是, 岩石物理参数可以从叠前地震资料反演得到, 而 GR 和电阻率等测井参数不能从地震数据中得到。

与叠前弹性反演有关的岩石物理研究的主要内容包括横波速度模拟, 测井曲线环境校正和标准化处理, 弹性参数计算, 弹性参数敏感性分析, 孔隙度与密度或声波速度关系研究, 含水饱和度与弹性参数的关系研究, 正演模型模拟及流体替换研究等。

叠前弹性波反演分为有井约束和无井约束自由反演, 由于 LF35-1-1 井未在研究区内, 本次研究采用无井约束自由反演。利用 LF35-1-1 井纵波速度与弹性参数关系为基础, 以地震速度为纽带, 建立无井区的敏感弹性参数反演模型; 优选出最具指示性的烃类预测弹性参数, 建立烃类弹性识别模式, 形成完整弹性预测。

#### 3.1 反演技术原理

地震勘探中的主要现象就是能量在分界面处的重新分配(图 5), 边界条件决定了能量如何在反射波和透射波之间进行分配, 用位移表达界面处能量的分配是最易理解的办法(宗兆云等, 2012)。

叠前弹性直接反演技术是指利用叠前时间偏移的 CRP 道集数据和速度数据, 直接反演得到不同的弹性参数反射率。在此反演过程中“计算角度, 但是不分角度”。

Gray 公式(1999)(Gray, 1999)

$$R_{pp}(\theta) \approx \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{2} \frac{V_s^2}{V_p^2}\right) \cdot (\sec^2\theta) \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \sec^2\theta - 2\sin^2\theta\right) \frac{\Delta\mu}{\mu} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \sec^2\theta\right) \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (1)$$

该公式可直接反演压缩模量( $\lambda$ )、剪切模量( $\mu$ )和密度( $\rho$ )3 个弹性参数反射率。

$$R_{pp}(\theta) \approx \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{3} \frac{V_s^2}{V_p^2}\right) \cdot (\sec^2\theta) \frac{\Delta k}{k} + \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{3} \sec^2\theta - 2\sin^2\theta\right) \frac{\Delta\mu}{\mu} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \sec^2\theta\right) \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (2)$$

该公式可直接反演体积模量( $k$ )、剪切模量( $\mu$ )和密度( $\rho$ )3 个弹性参数反射率。

Fatti 公式(1994)(Fatti, 1994):

$$R_{pp}(\theta) \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta I_p}{I_p} [1 + \tan^2(\theta)] - 4 \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 \frac{\Delta I_s}{I_s} \sin^2(\theta) - \left[\frac{1}{2} \frac{\Delta\rho}{\rho} \tan^2(\theta) - 2 \left(\frac{V_s}{V_p}\right)^2 \frac{\Delta\rho}{\rho} \sin^2(\theta)\right] \quad (3)$$

Fatti 公式可直接反演纵波阻抗( $I_p$ )、横波阻抗( $I_s$ )和密度( $\rho$ )3 个弹性参数反射率。

利用下列公式可求解杨氏模量 E。

$$R_{pp}(\theta) \approx \left(\frac{1}{4} \sec^2\theta - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2\theta\right) \cdot \frac{\Delta E}{E} + \left(\frac{1}{4} \sec^2\theta \frac{(2k^2 - 3) \cdot (2k^2 - 1)}{(4k^2 - 3) \cdot k^2} + 2k^2 \sin^2\theta \cdot \frac{1 - 2k^2}{3 - 4k^2}\right) \cdot \frac{\Delta\sigma}{\sigma} + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \sec^2\theta\right) \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (4)$$

利用下列公式可求解泊松比  $\sigma$ 。

$$R_{pp}(\theta) \approx a \cdot \frac{\Delta V_p}{V_p} + b \cdot \frac{\Delta\rho^2}{\rho^2} + c \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} \quad (5)$$

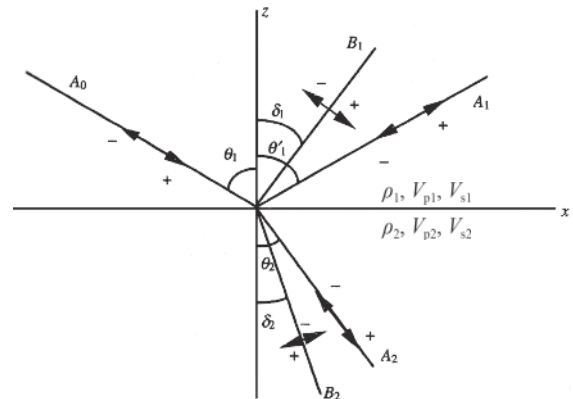


图 5 以非零入射角入射的 P 波在界面处能量分配  
Fig.5 Energy distribution of P-wave incident at non-zero incidence angle in the interface



$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tan^2 \theta - 4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta b = \left[ \frac{V_s^2}{V_p^2} - 1 \right] \sin^2 \theta c = \frac{1}{2} - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta \quad (6)$$

$$P = 1 - \sigma$$

反演可得纵波阻抗( $I_p$ )、横波阻抗( $I_s$ )、体积模量( $k$ )、剪切模量( $\mu$ )、压缩模量(拉梅系数 $\lambda$ )、密度( $\rho$ )、杨氏模量( $E$ )和泊松比( $\sigma$ ),这些弹性参数均可指示岩石物性,除横波阻抗( $I_s$ )外,其他7个弹性参数还能指示岩石中流体特性。反演结果有信噪比高、稳定性及可靠性强、精度较高的特点,非常适合勘探新区。

### 3.2 弹性参数及地震数据确立

本次研究的弹性参数是指从叠前地震资料中提取的参数,包括纵波速度、横波速度、密度、泊松比等,储层“甜点”与多种弹性参数和地震属性有

关。地震波作为一种能量,在地下传播时会对岩石产生应力,岩石对应会发生应变,由于这种应力变化比较快,岩石的反应接近弹性,岩石可以看成是弹性体。在弹性体的弹性形变区,应力与应变的比值定义为弹性模量。弹性模量是一个常量,表征岩石在应力作用下发生应变的难易程度。根据不同的应力及应变的情况,可以分为拉伸弹性模量(杨氏模量 $E$ )、剪切弹性模量(剪切模量 $\mu$ )、体积弹性模量(体积模量 $k$ ),以及常用的对烃类比较敏感的拉梅系数 $\lambda$ 。通过对纵波速度、横波速度、纵波阻抗、横波阻抗、密度、泊松比和杨氏模量进行了叠前弹性反演。

本次叠前反演使用的地震数据是叠前时间偏移CRP道集数据。整体看,无采集脚印及异常的振幅条带;最大偏移距达到4000 m以上,最大入射角在30°左右,因此,地震数据能够完全满足叠前反演的需要(图6,图7)。

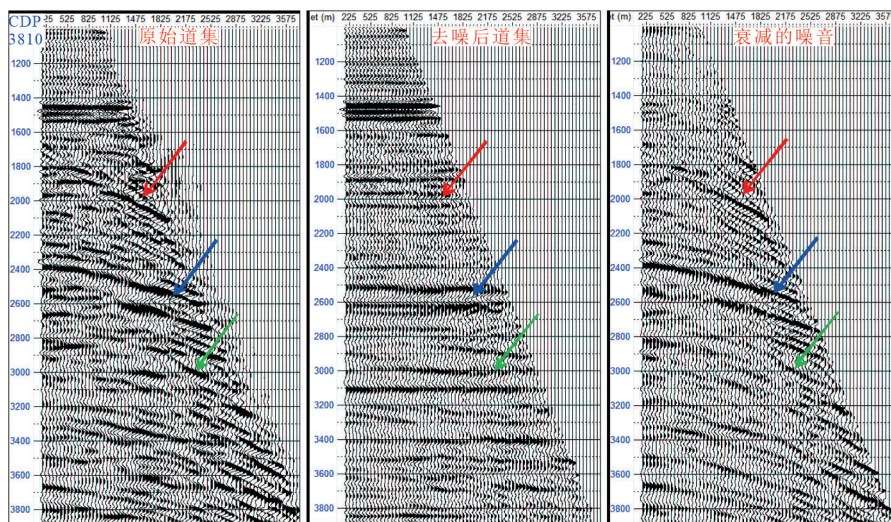


图6 CRP道集去噪  
Fig.6 CRP Gather denoising

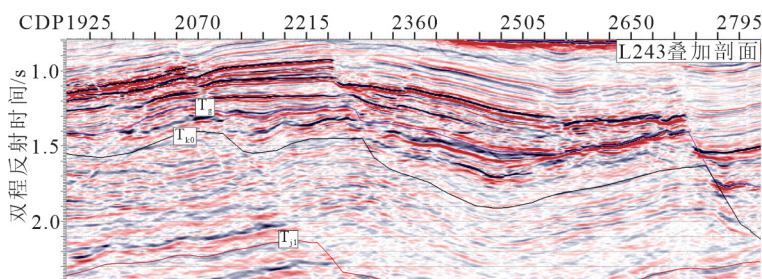


图7 L243线叠加剖面(剖面位置见图1)  
Fig.7 Line 243 stacked section (Profile location shown in Fig.1)



### 3.3 储层敏感性分析

作为地球物理反演的基础, 岩石物理弹性参数对岩石物性和含气性的敏感程度是反演能否解决研究区域地质问题或者能够多大程度地解决地质问题的关键。由于地质条件的千差万别, 不同研究区能准确划分物性和含气性的弹性参数也不同。通过岩石物理参数的交会分析可以从大量弹性参数中选取合适的敏感参数及门槛值(张林清等, 2017)。

图 8 为 LF35-1-1 井侏罗系砂泥岩段的岩性敏感性交会图, 其中红色样点代表的是砂岩, 蓝色样点代表的是泥岩。通过侏罗系砂泥岩段声波、速度、密度、波阻抗与伽马的交汇图可以看出, 该段砂岩速度比泥岩速度高, 但仍有一部分交织在一起; 砂岩密度比泥岩密度略低一些, 大部分散点交织在一起; 砂岩波阻抗比泥岩波阻抗稍高一些, 仍有部分散点交织。通过测井岩石物理分析发现密度属性能较好地识别优质储层, 运用反演技术得到密度从而进行地区的储层预测, 预测效果与该地区沉积特征和钻井结果比较吻合。

通过声波、速度、密度、波阻抗在砂泥岩直方图(图 9)上可以看出, 潮汕坳陷 LF35-1-1 井侏罗系砂泥岩段的砂岩速度主值为 5150 m/s, 泥岩速度主值为 4650 m/s, 砂岩比泥岩速度高 500 m/s; 砂岩密

度主值为  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , 泥岩密度主值为  $2.67 \text{ g/cm}^3$ , 砂岩密度比泥岩低  $0.02 \text{ g/cm}^3$ ; 由于砂岩相对于泥岩具有高速度与低密度的特点, 导致波阻抗值较为接近, 砂岩波阻抗主值为  $13800 \text{ g/(cm}^3 \cdot \text{m/s)}$ , 泥岩波阻抗主值为  $12500 \text{ g/(cm}^3 \cdot \text{m/s)}$ 。

LF35-1-1 井侏罗系中的砂岩与泥岩在密度上区分度不高, 砂岩仅有低密度趋势, 但是并不明显。这可能与研究区多次复杂的沉积过程有关: (1)成分不同。泥质粉砂岩成分主要为粉砂, 含少量黏土矿物及胶结物, 砂质泥岩主要成分为黏土矿物, 含少量砂质。(2)颗粒大小不同。砂岩结构呈颗粒状, 透水性能良好, 其砂粒粒径在  $1/16 \sim 2 \text{ mm}$ , 泥岩是黏土岩的一种, 由黏土物质经压实作用、脱水作用、重结晶作用后形成。其由微小矿物组成, 粒径在  $1/256 \text{ mm}$ , 具有页状或薄片状层理, 用硬物击打易裂成碎片, 透水性差。(3)手感质地不同。泥质砂岩的断口较沙质泥岩粗糙, 泥质砂岩的砂感更强些, 而沙质泥岩细腻些, 浸水后, 泥岩易软化。

### 3.4 烃类敏感性分析

由于南海北部缺少钻井资料, 潮汕坳陷和北黄海盆地同为中生代残留盆地(坳陷), 地层厚度都大于 5000 m, 均经历了侏罗纪末期和白垩纪末期隆升剥蚀, 具有相似的成盆演化史, 可以借鉴北黄海中

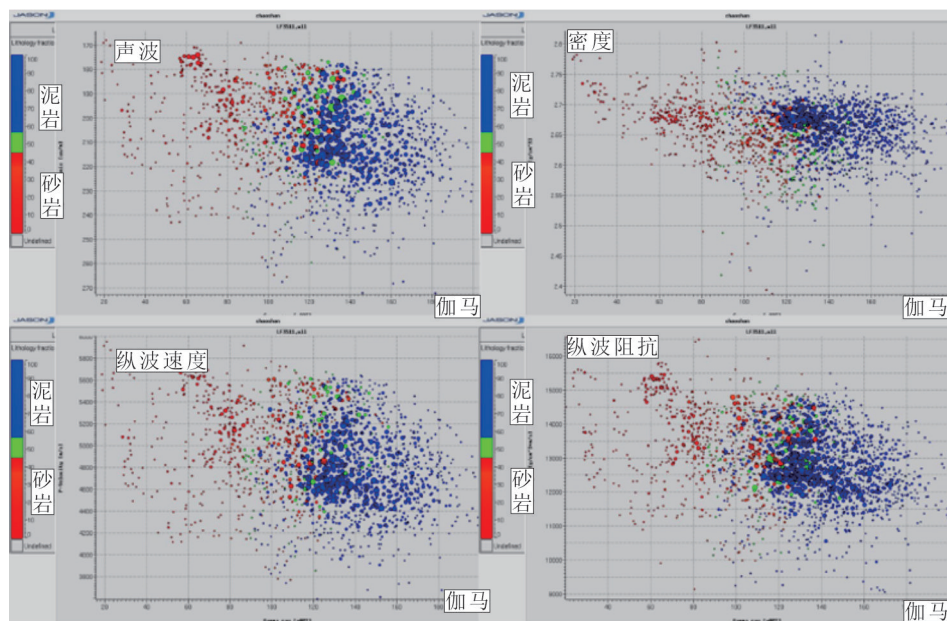


图 8 LF35-1-1 井侏罗系砂泥岩段岩性敏感性交会图

Fig.8 Intersection diagram of lithology sensitivity of Jurassic sand and mudstone section in Well LF35-1-1

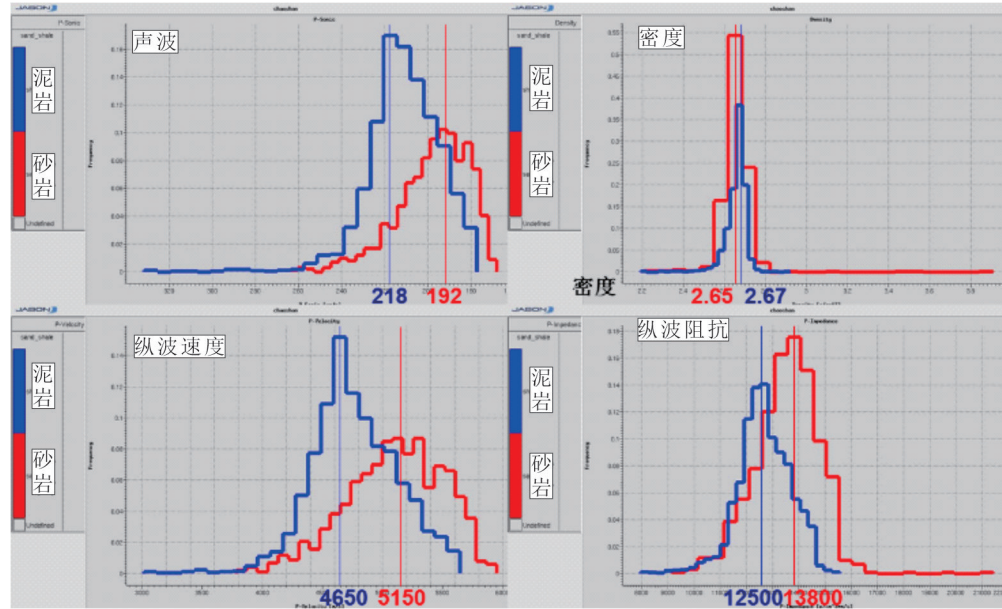


图 9 LF35-1-1 井侏罗系砂泥岩段岩性敏感性直方图

Fig.9 Histogram of lithology sensitivity of Jurassic sand and mudstone section in Well LF35-1-1

生界地层烃类敏感性分析的成果。刘金萍等(2015)认为纵、横波速度比在 1.65 以下储层含烃概率大,通过换算,纵、横波速度比小于 1.65 对应泊松比小于 0.21。含油气砂岩具有明显的低泊松比特征,可以用泊松比参数识别含油气砂岩,泊松比阈值定为 0.21。

## 4 反演结果

### 4.1 储层预测

图 10b 为 L243 线密度反演剖面(位置见图 1)

可见多套低密度异常出现在叠加剖面上“楔形体”处(图 10a),低密度异常整体能够反映扇体的形态和砂体发育情况,结合沉积相分析,这是一个深水扇。而其他弹性参数如纵波阻抗反演(图 10c)、横波阻抗反演(图 10d)等与叠加成果比较类似,并没有反映出沉积、储层的发育状态。结合岩石物理特征看,叠前密度反演能够较好预测中生界储层发育情况。

图 11 是利用密度反演结果转化的研究区上侏罗统砂岩时间厚度图(单程旅行时),取平均速度为

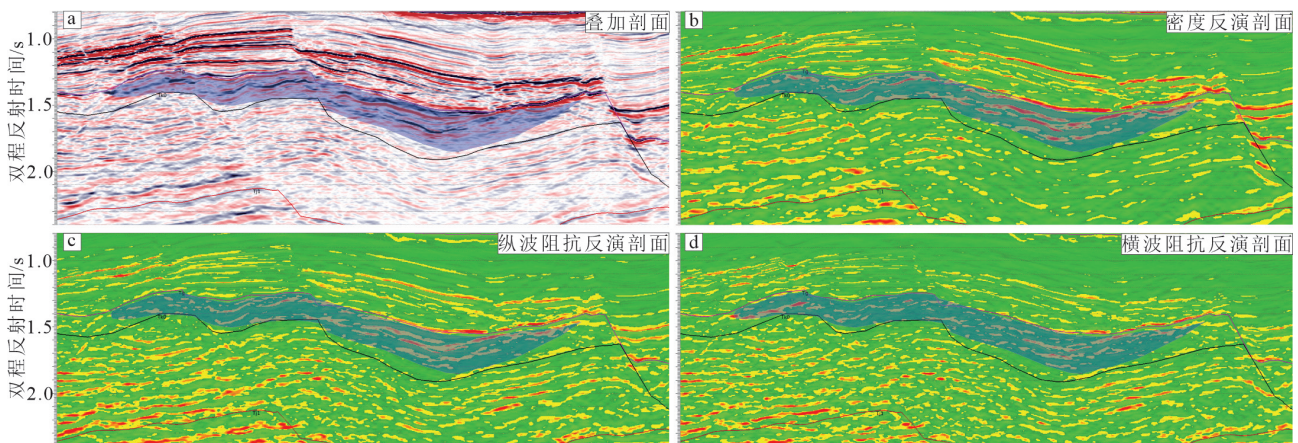


图 10 L243 线反演剖面

Fig.10 Inversion section of line L243



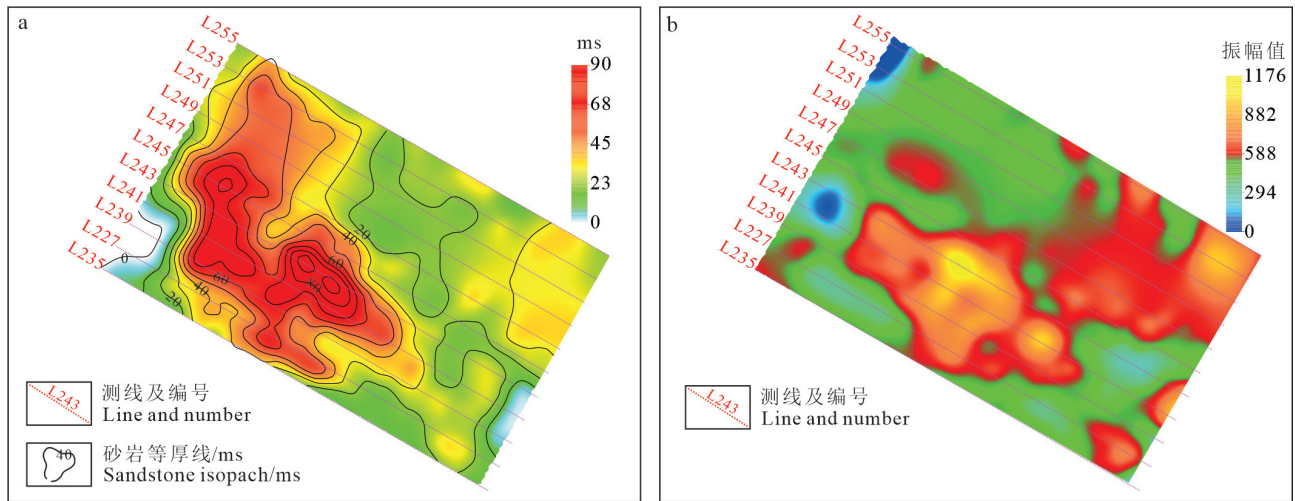


图 11 上侏罗统砂岩时间厚度图(a)及均方根振幅图(b)

Fig.11 Time-thickness map (a) and root mean square amplitude map (b) of Upper Jurassic sandstone

5000 m/s, 研究区西部砂体厚度最大部分区域厚度在 300 m 以上, 局部厚度可达 400 m 左右。中部区域砂岩厚度稍薄, 范围也相对较小, 整体在 150 m 左右, 且与均方根振幅异常图也能较好地对应。

#### 4.2 含油气检测

图 12a 为 L243 线泊松比反演剖面, 从图中可以看出, 叠加剖面上近物源的“楔形体”在泊松比反演剖面上有多套低泊松比异常出现, 低泊松比异常整体能够反映砂体中烃类聚集情况, 而且与密度反演结果的匹配关系较好。杨氏模量、P 属性两个参数为以往研究中用来反映烃类的参数。图 12b 为杨氏模量反演结果, 从剖面上看这几个参数成果与叠加振幅比较类似, 且与密度参数的匹配性不好。

根据岩石物理分析和叠前泊松比反演质量分析得出的认识, 预测潮汕坳陷具有低泊松比异常的烃类分布情况(图 13)。该区域砂岩储层发育厚度大, 总厚度在 400 m 以上, 砂体发育横向稳定性好。烃类检测该区域烃类异常明显。构造方面, 该

区域位于局部构造高点, 整体构造条件有利。

### 5 结 论

研究表明潮汕坳陷中生界砂岩储层具有明显的低密度特征, 其他岩性的密度偏高, 可以很好利用密度参数识别砂岩储层, 利用泊松比参数进行含油气性预测。密度、泊松比的门槛值分别为: 2.65 g/m<sup>3</sup> 与 0.21。研究区砂岩储层发育程度高、横向稳定性好且构造条件相对有利的情况下烃类聚集藏的可能性较大。通过研究对比发现, 烃类检测泊松比异常整体能够更好地反映砂体中烃类聚集情况, 而且与密度反演结果的匹配关系较好。受砂岩储层发育程度和构造条件的双重控制, 构造隆起部位的构造条件有利, 其侧翼洼陷可能为其提供烃源, 加之砂岩储层发育较好, 因此烃类检测异常明显, 烃类聚集的可能性较大。在实际应用中, 为了得到更多的储层流体信息, 需要充分利用高信噪比、高分辨率等高品质的叠前地震资料, 并要提高

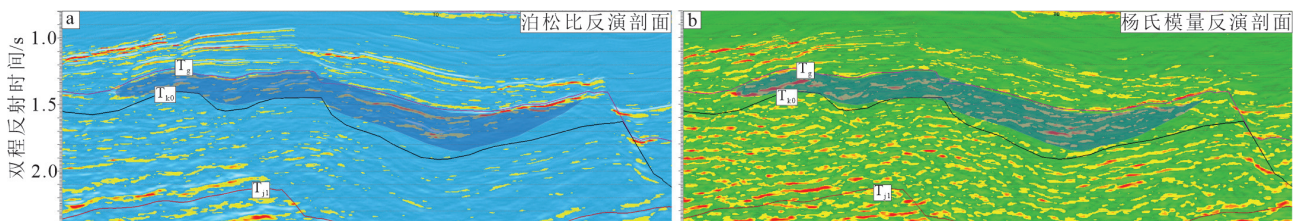


图 12 L243 线泊松比(a)和杨氏模量(b)反演剖面

Fig.12 Inversion profile of Poisson's ratio (a) and Young's modulus (b) of line L243



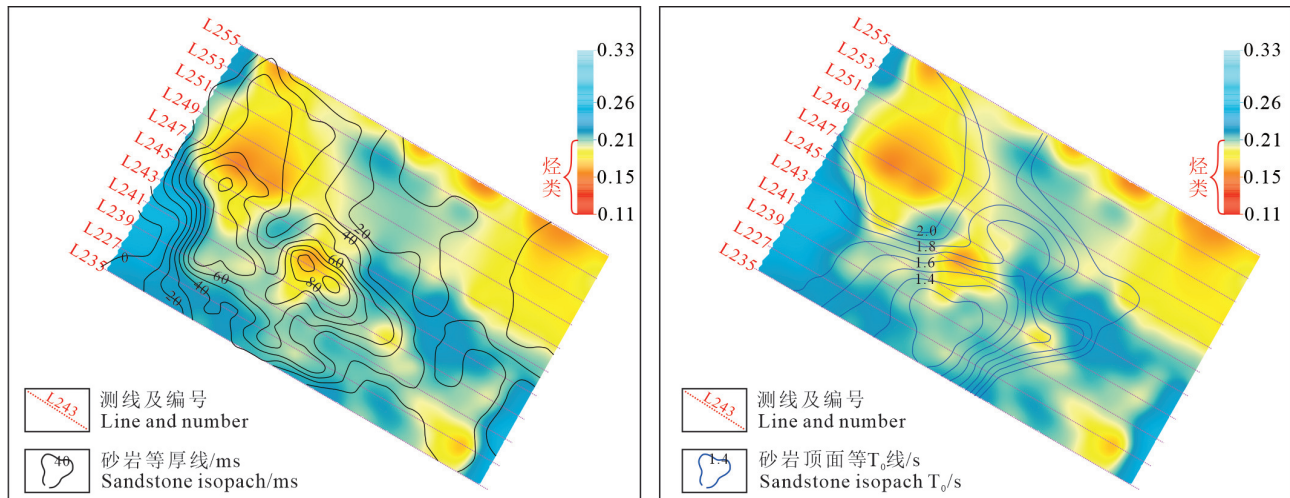


图 13 上侏罗统烃类分布图  
Fig.13 Distribution of hydrocarbons in Upper Jurassic

叠前道集的反射系数(振幅),纵横波速度与密度等弹性参数反演的精度。叠前弹性参数反演技术使无井区域储层预测的多解性与不确定性大大降低,提高了反演结果的准确性和可靠性,这项技术的应用对于类似研究新区的储层预测和烃类检测工作,具有很好的应用推广价值。

## References

- Duan Jiuchun, Mi Huifen. 2012. Seismic facies and sedimentary facies study of Mesozoic in Chaoshan Sag[J]. Resources and Industries, 14(1): 100–105 (in Chinese with English abstract).
- Fatti J L. 1994. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique[J]. Geophysics, 59(59): 1362–1376.
- Gogoi T, Chatterjee R. 2019. Estimation of petrophysical parameters using seismic inversion and neural network modeling in upper assam basin, India[J]. *Geoscience Frontiers*, 10(3): 1113–1124.
- Gray D. 1999. PS converted-wave AVO[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 22(1): 165–168.
- Han Xiangyi, Yan Jianguo, Zhu Douxing, Yao Jiarui, Wang Hongyang. 2018. Application of pre-stack elastic parameter inversion in the prediction of Longmaxi formation shale's brittleness[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 40(3): 337–344 (in Chinese with English abstract).
- Hao Hujun, Lin Heming, Yang Mengxiong. 2001. The Mesozoic in Chaoshan depression: A new domain of petroleum exploration[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 15(3): 157–163 (in Chinese with English abstract).
- Hao Hujun, Wang Ruiliang, Zhang Xiangtao, Xue Huaiyan, Chen Zhaoguang. 2004. Mesozoic marine sediment identification and distribution in the eastern Pearl River Mouth basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 16(2): 84–88 (in Chinese with English abstract).
- Hao Hujun, Shi Hesheng, Zhang Xiangtao, Jiang Tiancai, Tang Shouli. 2009. Mesozoic sediments and their petroleum geology conditions in Chaoshan Sag: A discussion based on drilling results from the exploratory Well LF35–1–1[J]. China Offshore Oil and Gas, 21(3): 151–156 (in Chinese with English abstract).
- He Jiaxiong, Xia Bin, Wang Zhixin, Sun Dongshan. 2006. Petroleum geologic characteristics and exploration base of Taixinan basin in eastern area of continental shelf in northern of the South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 17(3): 345–350 (in Chinese with English abstract).
- He Min, Zhu Xiaojun, Zhu Weilin, Zhang Qinlin. 2023. Characteristics and distribution prediction of Mesozoic source rocks in Chaoshan depression, northern South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 35(1): 40–49 (in Chinese with English abstract).
- Ji Zhongyun, Zhao Hanqing, Wang Haiping, Li Chunlei. 2014. Mesozoic petroleum system in Chaoshan Depression[J]. Petroleum Geology and Engineering, 28(3): 9–15 (in Chinese).
- Li Chunpeng, Liu Zhiguo, Yang Songling, Yin Chuan, Yan Qinghua, Tan Zhuo. 2017. Study of reservoir lithology prediction method in low exploration block[J]. Progress in Geophysics, 32(4): 1569–1573 (in Chinese with English abstract).
- Liang J Q, Deng W, Lu J A, Kuang Z G, He Y L, Zhang W, Gong Y H, Liang J, Meng M M. 2020. A fast identification method based on the typical geophysical differences between submarine shallow carbonates and hydrate bearing sediments in the northern South China Sea[J]. *China Geology*, 3(1): 16–27.
- Liu Jinping, Wang Liaoliang, Jian Xiaoling, Wang Xiaoming, Zhao Ran, Cheng Gu. 2015. Application of pre-stack synchronous inversion technology in the Mesozoic reservoir prediction in the Yellow Sea Basin[J]. Marine Geology and Quaternary Geology,

- 35(4): 141–148 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ling, Tang Dazhen, Wang Feng, Liu Lihui, Zhang Lingling, Liu Yi. 2016. Pre-stack elastic parameter inversion of ray parameters applied to reservoir prediction[J]. *Natural Gas Geoscience*, 27(8): 1541–1548 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guangchao, Zhou Jiaxiong, Han Guangming, Zhu Peiyuan, Liu Feng. 2016. Seismic prediction method of "sweet" reservoir in middle-deep zone: A case study from Wenchang A sag, western Pearl River Mouth Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 28(1): 94–100 (in Chinese with English abstract).
- Qiang Kunsheng, Zhang Guangxue, Zhang Li, Lü Baofeng, Zhong Guangjian, Feng Changmao, Yi Hai. 2018. Paleogeomorphic features and sedimentary facies model of Jurassic strata in Chaoshan sub-basin, northern South China Sea[J]. *Geology in China*, 45(6): 1251–1258 (in Chinese with English abstract).
- Shao Lei, You Hongqing, Hao Hujun, Wu Guoxuan, Qiao Peijun, Lei Yongchang. 2006. Petrology and depositional environments of Mesozoic strata in the Northeastern South China Sea[J]. *Geological Review*, 53(2): 164–169 (in Chinese with English abstract).
- Souza A M, Cirto L J L, Martins E O, Hollanda N L, Roditi I, Correia M D, Sá N, Sarthour R S, Oliveira I S. 2020. An application of quantum annealing computing to seismic inversion[J]. *Quantum Physics*, 27(8): 1–9.
- Wang Liaoliang, Cheng Rihui, Li Fei, Zhang Li, Xu Zhongjie. 2009. The Mesozoic sedimentary sequences, correlation and geological significance for petroleum of the north margin of South China Sea[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(2): 175–182 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ping, Xia Kanyuan, Huang Ciliu. 2000. Distribution and geological and geophysical characteristics of Mesozoic marine strata in northeastern part of South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 19(4): 28–35 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guoxuan, Wang Rujian, Hao Hujun, Shao Lei. 2007. Microfossil evidence for development of marine Mesozoic in the north of South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 27(1): 79–85 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shuchun, Tong Zhigang, He Qing, Hao Jianrong. 2008. Mesozoic hydrocarbon generation history and igneous intrusion impacts in Chaoshan depression, South China Sea: A case of LF35–1–1 Well[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 20(3): 152–156 (in Chinese with English abstract).
- Yao Bochu, Zhang Li, Wei Zhenquan, Yi Hai, Lin Zhen, Wang Ling, Wang Wanyin, Qiu Zhiyun, Li Chunfang. 2011. The Mesozoic tectonic characteristics and sedimentary basins in the eastern margin of South China[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 31(3): 47–60 (in Chinese with English abstract).
- Yin Xingyao, Cui Wei, Zong Zhaoyun, Liu Xiaojing. 2014. Petrophysical property inversion of reservoirs based on elastic impedance[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(12): 4132–4140 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Ting, Zheng Jinyun, Zhang Qinglin, Li Hongbo, Tao Wenfang, Li Jie, Ma Yixuan. 2024. Constraints on Mesozoic seismic imaging in the northern South China Sea[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 63(2): 318–335 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Delin. 2009. Principles and Practice of Seismic Data Oil and Gas Display Research[M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Zhang Jiangyang, Sun Zhen, Zhang Sufang. 2014. Analysis of Mesozoic tectonic deformation in the Chaoshan Depression of Pearl River Mouth Basin[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 33(5): 41–49 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Li, Geng Ansong, Wang Liaoliang, Liao Yuhong, Xu Guoqiang, Wei Zhenquan. 2012. Evaluation of Mesozoic hydrocarbon source rock conditions in the continental margin of South China[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 32(1): 99–108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Linqin, Zhang Huixing, Jiang Xiaodian, Xu Yue, Zhou Haiting. 2017. Application of elastic parameters inversion and attribute fusion technology in the "sweet spot" prediction[J]. *Natural Gas Geoscience*, 28(4): 582–588 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Meison, Liu Hailing, Wu Zhaohua. 2012. Mesozoic stratigraphic and structural features and collisional orogeny between the northern and southern continental margins of South China Sea[J]. *Progress in Geophysics*, 27(4): 1454–1464 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Guangjian, Yi Hai, Lin Zhen, Jin Huafeng, Liu Zhenhu. 2007. Characteristic of source rocks and Mesozoic in continental slope area of northeastern the South China Sea and east Guangdong of China[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 28(6): 676–680 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Guangjian, Wu Shimin, Feng Changmao. 2011. Sedimentary model of Mesozoic in the northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 30(1): 43–48 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Guangjian, Su Pibo, Feng Changmao, Liu Sheng, Sun Ming, Yi Hai, Zhao Jing, Zhao Zhongquan. 2022. Mesozoic tectonic characteristics and exploration prospects of the Chaoshan depression in the northeastern South China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(8): 2896–2905 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Di. 2002. Mesozoic strata and sedimentary environment in SW Taiwan basin of NE South China Sea and Peikang High of Western Taiwan[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 21(2): 50–57 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Di, Chen Hanzong, Sun Zhen, Xu Hehua. 2005. Three Mesozoic sea basins in eastern and southern South China Sea and their relation to tethys and Paleo-Pacific domains[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(2): 16–25 (in Chinese with English abstract).
- Zong Zhaoyun, Yin Xingyao, Zhang Feng, Wu Guochen. 2012. Reflection coefficient equation and pre-stack seismic inversion with Young's modulus and Poisson ratio[J]. *Chinese Journal of*

Geophysics, 55(11): 3786–3794 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 段九春, 米慧芬. 2012. 潮汕坳陷中生界地震相与沉积相研究[J]. *资源与产业*, 14(1): 100–105.
- 韩向义, 阎建国, 朱斗星, 姚佳芮, 王弘扬. 2018. 叠前弹性参数反演在龙马溪组页岩脆性预测中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 40(3): 337–344.
- 郝沪军, 林鹤鸣, 杨梦雄. 2001. 潮汕坳陷中生界——油气勘探的新领域[J]. *中国海上油气(地质)*, 15(3): 157–163.
- 郝沪军, 汪瑞良, 张向涛, 薛怀艳, 陈照光. 2004. 珠江口盆地东部海相中生界识别及其分布[J]. *中国海上油气*, 16(2): 84–88.
- 郝沪军, 施和生, 张向涛, 江天才, 唐守立. 2009. 潮汕坳陷中生界及其石油地质条件——基于 LF35-1-1 探索井钻探结果的讨论[J]. *中国海上油气*, 21(3): 151–156.
- 何家雄, 夏斌, 王志欣, 孙东山. 2006. 南海北部大陆架东区台西南盆地石油地质特征与勘探前景分析[J]. *天然气地球科学*, 17(3): 345–350.
- 何敏, 朱晓军, 朱伟林, 张青林. 2023. 南海北部潮汕坳陷中生界烃源岩特征及分布预测[J]. *中国海上油气*, 35(1): 40–49.
- 纪中云, 赵汗青, 王海平, 李春雷. 2014. 潮汕坳陷中生界含油气系统[J]. *石油地质与工程*, 28(3): 9–15.
- 李春鹏, 刘志国, 杨松岭, 尹川, 闫青华, 谭卓. 2017. 基于背景驱动的储层弹性参数反演方法研究[J]. *地球物理学进展*, 32(4): 1569–1573.
- 刘金萍, 王嘹亮, 简晓玲, 万晓明, 赵然, 成谷. 2015. 叠前同步反演技术在黄海盆地中生界储层预测中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 35(4): 141–148.
- 刘玲, 汤达祯, 王烽, 刘力辉, 张玲玲, 刘毅. 2016. 射线参数域叠前弹性参数反演在储层预测中的应用[J]. *天然气地球科学*, 27(8): 1541–1548.
- 潘光超, 周家雄, 韩光明, 朱沛苑, 刘峰. 2016. 中深层“甜点”储层地震预测方法探讨——以珠江口盆地西部文昌 A 凹陷为例[J]. *岩性油气藏*, 28(1): 94–100.
- 强昆生, 张光学, 张莉, 吕宝凤, 钟广见, 冯常茂, 易海. 2018. 南海北部潮汕坳陷侏罗系古地貌特征及沉积相模式[J]. *中国地质*, 45(6): 1251–1258.
- 邵磊, 尤洪庆, 郝沪军, 邵磊. 2007. 南海东北部中生界岩石学特征及沉积环境[J]. *地质论评*, 53(2): 164–169.
- 王嘹亮, 程日辉, 李飞, 张莉, 许中杰. 2009. 南海北部陆缘中生代沉积层序对比和油气地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(2): 175–182.
- 王平, 夏戡原, 黄慈流. 2000. 南海东北部中生代海相地层的分布及其地质地球物理特征[J]. *热带海洋学报*, 19(4): 28–35.
- 吴国璋, 王汝建, 郝沪军, 邵磊. 2007. 南海北部海相中生界发育的微体化石证据[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 27(1): 79–85.
- 杨树春, 全志刚, 贺清, 郝建荣. 2008. 潮汕坳陷中生界生烃历史及火成岩侵入影响分析——以 LF35-1-1 井为例[J]. *中国海上油气*, 20(3): 152–156.
- 姚伯初, 张莉, 韦振权, 易海, 林珍, 万玲, 王万银, 邱之云, 李春芳. 2011. 华南东部中生代构造特征及沉积盆地[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 31(3): 47–60.
- 印兴耀, 崔维, 宗兆云, 刘晓晶. 2014. 基于弹性阻抗的储层物性参数预测方法[J]. *地球物理学报*, 57(12): 4132–4140.
- 曾婷, 郑金云, 张青林, 李洪博, 陶文芳, 李杰等, 马艺璇. 2024. 南海北部中生界地震成像制约因素分析[J]. *石油物探*, 63(2): 318–335.
- 张德林. 2009. 地震资料油气显示研究原理与实践[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 张江阳, 孙珍, 张素芳. 2014. 珠江口盆地潮汕坳陷中生代构造变形分析[J]. *热带海洋学报*, 33(5): 41–49.
- 张莉, 耿安松, 王嘹亮, 廖玉宏, 徐国强, 韦振权. 2012. 华南陆缘中生界烃源岩条件评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 32(1): 99–108.
- 张林清, 张会星, 姜效典, 徐玥, 周海廷. 2017. 弹性参数反演与属性融合技术在“甜点”预测中的应用[J]. *天然气地球科学*, 28(4): 582–588.
- 赵美松, 刘海龄, 吴朝华. 2012. 南海南北陆缘中生代地层—构造特征及碰撞造山[J]. *地球物理学进展*, 27(4): 1454–1464.
- 钟广见, 易海, 林珍, 金华峰, 刘振湖. 2007. 粤东和南海东北部陆坡区中生界及烃源岩特征[J]. *新疆石油地质*, 28(6): 676–680.
- 钟广见, 吴世敏, 冯常茂. 2011. 南海北部中生代沉积模式[J]. *热带海洋学报*, 30(1): 43–48.
- 钟广见, 苏丕波, 冯常茂, 刘胜, 孙鸣, 易海, 赵静, 赵忠泉. 2022. 南海东北部潮汕坳陷中生代构造特征及其油气勘探潜力[J]. *地质学报*, 96(8): 2896–2905.
- 周蒂. 2002. 台西南盆地和北港隆起的中生界及其沉积环境[J]. *热带海洋学报*, 21(2): 50–57.
- 周蒂, 陈汉宗, 孙珍, 许鹤华. 2005. 南海中生代三期海盆及其与特提斯和古太平洋的关系[J]. *热带海洋学报*, 24(2): 16–25.
- 宗兆云, 印兴耀, 张峰, 吴国忱. 2012. 杨氏模量和泊松比反射系数近似方程及叠前地震反演[J]. *地球物理学报*, 55(11): 3786–3794.