

珠江口盆地文昌 13-1 油田 ZJ2-1U 砂组 沉积微相地震刻画

张宪国^① 张涛*^② 林承焰^① 袁辉^③ 晁彩霞^③ 张守秀^④

(^①中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580; ^②山东科技大学地球科学与工程学院,山东青岛 266590;

^③中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江 524057; ^④中国石化胜利油田东辛采油厂,山东东营 257000)

张宪国,张涛,林承焰,袁辉,晁彩霞,张守秀. 珠江口盆地文昌 13-1 油田 ZJ2-1U 砂组沉积微相地震刻画. 石油地球物理勘探,2014,49(5):964-970.

摘要 针对珠江口盆地文昌 13-1 油田井网稀疏,不同微相砂体厚度及组合特征差异等制约井间砂岩分布及沉积微相刻画的难题,从井点出发通过岩心资料确定了井点沉积微相类型;利用地震属性和地震相分析方法对沉积微相的平面展布规律进行了刻画。通过构建“地震基准弧长对数”属性,并利用该属性进行砂岩厚度定量预测,从而建立了研究区砂坪主体和砂坪侧缘的地震相模式;利用砂岩厚度分布和地震相落实了沉积微相边界。研究结果揭示,该区 ZJ2-1U 砂组沉积期经历了“泥坪—混合坪—砂坪”的沉积演化,砂坪主体呈北东向条带状展布,主要分布在研究区中、西部,砂坪侧缘面积大,呈互层状在全区分布。上述认识为油藏开发调整提供了地质依据。

关键词 潮坪 沉积微相 地震属性 地震相

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 引言

自 20 世纪 60 年代以来,人们一直利用地球物理技术研究沉积相。随着三维地震采集、处理和解释技术的不断发展以及研究成本的降低,三维地震技术在沉积相研究中发挥了更大作用。始于 20 世纪 70 年代的地震地层学关注地震反射同相轴及其组合关系,揭示了地震反射同相轴指示的等时地层及其沉积相意义^[1~4]。Vail 等^[2,3]提出了地震相概念和不同的地震相模式,在地震反射特征与沉积相之间建立了直接对应关系,迈出了利用反射地震学刻画沉积相的关键一步,其概念和方法一直沿用至今。自 20 世纪 70~80 年代以来,人们开始利用丰富的三维地震资料从三维空间认识沉积相^[4],开创了利用地震时间切片研究河流沉积体系的先河^[5],国内外学者利用地震切片开展了河流、三角洲、扇体

等沉积相类型的大量研究^[6~14],如地层切片技术被提出并分别应用于墨西哥湾和西德克萨斯州的三角洲和碳酸盐岩台地沉积相研究^[15,16]。自本世纪以来,各种地震切片技术在沉积体系研究中发挥了很大作用,为解释沉积相的平面展布提供了依据^[17~21]。

钱荣钧^[22]、张军华等^[23]先后对利用地震切片(包括时间切片、地层切片等)研究沉积相的方法进行了理论和实际的分析探讨,指出了地震切片解释技术存在的问题及适用条件,从地球物理原理和实践的角度为利用地震切片开展沉积相解释提供了指导。

自 20 世纪 90 年代以来,地震属性分析和地震反演技术发展迅速,为储层预测和沉积相研究提供了有力支持,单一属性分析、多属性分析、地震波形分类等地震属性相关技术被广泛应用于沉积相地震解释研究^[24]。2005 年 2 月,沉积地质学会(SEPM)

* 山东省青岛市开发区前湾港路 579 号山东科技大学地质学院,266590。Email:dzzs1982@163.com

本文于 2013 年 8 月 11 日收到,最终修改稿于 2014 年 7 月 25 日收到。

本研究受国家科技重大专项课题(2011ZX05009-003)、国家自然科学基金项目(41202092)和中国博士后科学基金项目(2012M521366)联合资助。

与美国地质学会联合召开了地震地貌学的专题讨论会,对利用地球物理技术研究古地貌和沉积相的方法进行了总结^[25]。

2 研究区概况

文昌 13-1 油田位于珠江口盆地珠三拗陷琼海凸起,是在基底隆起上发育的新近系珠江组低幅度披覆背斜构造(图 1)。研究区自下而上发育前古近系基底、古近系、新近系和第四系,其中新近系发育珠江组、韩江组、粤海组和万山组^[26,27],其中珠一段的 ZJ1-4U 砂组、ZJ1-4M 砂组和珠二段的 ZJ2-1U 砂组是文昌 13-1 油田主要的油气储层(表 1),而目的层段 ZJ2-1U 砂组又分为三个小层。珠江组发育于断拗转换阶段,从珠江组沉积末期开始,盆地转入拗陷阶段。在这一构造演化背景下,珠江组沉积期伴随持续海进,沉积环境从潮坪、滨岸到浅海环境演化。

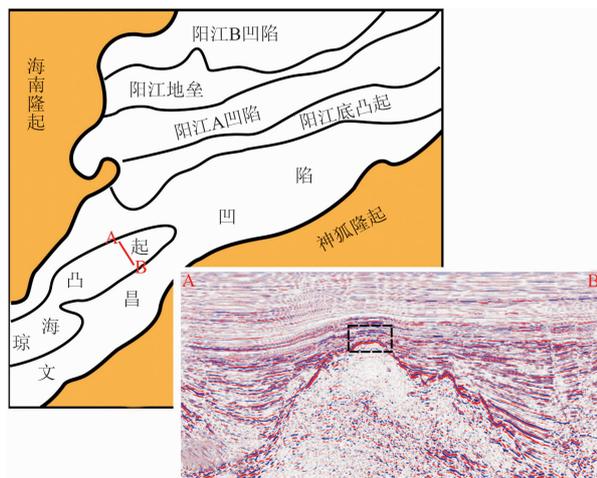


图 1 研究区位置(地震剖面上的虚线框位置)

文昌 13-1 油田自 2002 年投入开发,目前完钻 12 口井,采出程度达到 43%,是文昌油田群中地质条件和开发状况最好的油田。但随着开发的深入,垂向上沉积环境演化及其造成的储层砂体展布和储层特征差异对开发的影响越发显现,严重影响了油藏高效开发,表现为剩余地质储量的挖潜难度越来越大。此外,该油田开发受工程因素的制约,井点稀疏且井网分布不均匀,传统的基于井点的沉积相研究方法已不能满足该油田开发后期沉积微相研究的需要^[28],因此利用三维地震及其配套解释技术开展

储层沉积特征的精细刻画是提高油气采收率的地质关键。本文以珠江口盆地琼海凸起珠江组 ZJ2-1U 砂组海相沉积地层为例,探索海上油田在稀井网条件下的井震结合沉积微相刻画方法。

表 1 研究区珠江组地层发育表

段	亚段	油层组	砂层组
珠 江 组 一 段	上亚段	ZJ1-1	ZJ1-1U
			ZJ1-1L
		ZJ1-2	ZJ1-2U
			ZJ1-2L
		ZJ1-3	ZJ1-3U
			ZJ1-3M
	ZJ1-3L		
	下亚段	ZJ1-4	ZJ1-4U
			ZJ1-4M
			ZJ1-4L
		ZJ1-5	ZJ1-5U
			ZJ1-5M
			ZJ1-5L
		ZJ1-6	ZJ1-6U
ZJ1-6M			
ZJ1-6L			
ZJ1-7	ZJ1-7U		
	ZJ1-7L		
珠 江 组 二 段	上亚段	ZJ2-1	ZJ2-1U
			ZJ2-1L
	下亚段	ZJ2-2	ZJ2-2U
			ZJ2-2L

3 井点沉积特征

研究区 ZJ2-1U 砂组沉积时期为潮坪环境,发育砂坪、混合坪和泥坪沉积,砂坪是最主要的油气储层沉积类型,根据其厚度和平面相带发育关系进一步细分为砂坪主体和砂坪侧缘。砂坪沉积以细砂岩为主,石英含量较高,结构成熟度为中等—高,具有稳定沉积环境的特征,砂岩中广泛发育菱铁矿胶结物,常表现为菱铁矿以微晶或隐晶状出现,呈团块状充填于碎屑颗粒之间(图 2),形成于早成岩期,反映了富含有机质的半氧化—半还原微咸水环境;同时,W1 井岩心显示,生物钻孔和贝壳化石发育(图 3),反映水体较浅、动荡富氧的环境,均指示了潮坪环境特征。

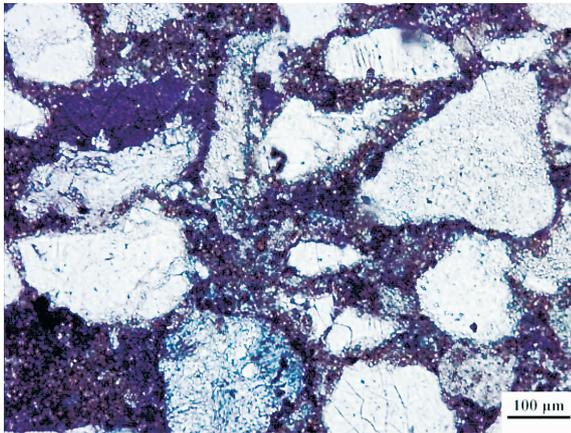


图2 目的层段砂岩中发育菱铁矿胶结

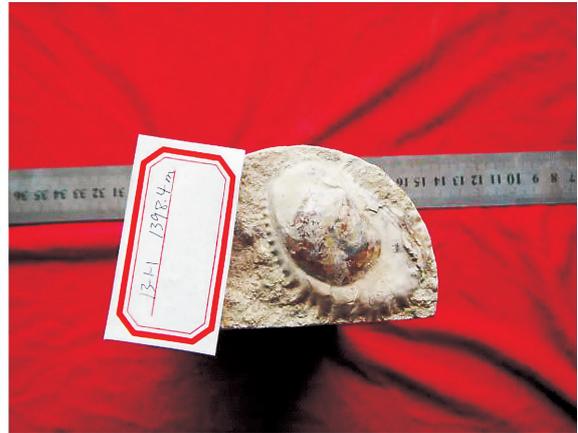


图3 W1井双壳类化石

研究区潮坪沉积的粒度概率曲线以两段式为主,由跳跃次总体和悬浮次总体组成,发育两种不同粒度特征类型(图4,表2):高截点两段式跳跃次总体含量大于60%,斜率角为45°~60°,反映砂坪沉积环境(图4a);低截点两段式跳跃次总体含量很少,斜率较大,反映沉积时水动力条件较弱,反映混合坪沉积(图4b)。

砂坪沉积的砂岩厚度大,具有高截点两段式粒

度特征(图4a),发育块状层理(图5a)。混合坪水体反复动荡,薄泥质层和砂质层频繁互层,压扁层理和透镜状层理发育(图5b,图6),具有低截点两段式粒度特征(图4b)。泥坪中发育紫红色泥岩,含少量黑色植物炭屑,具有近岸浅水氧化环境特征(图5c)。取心及测井资料显示,在ZJ2-1U砂组沉积时期研究区自下而上经历“泥坪—混合坪—砂坪”的沉积演化(图7)。

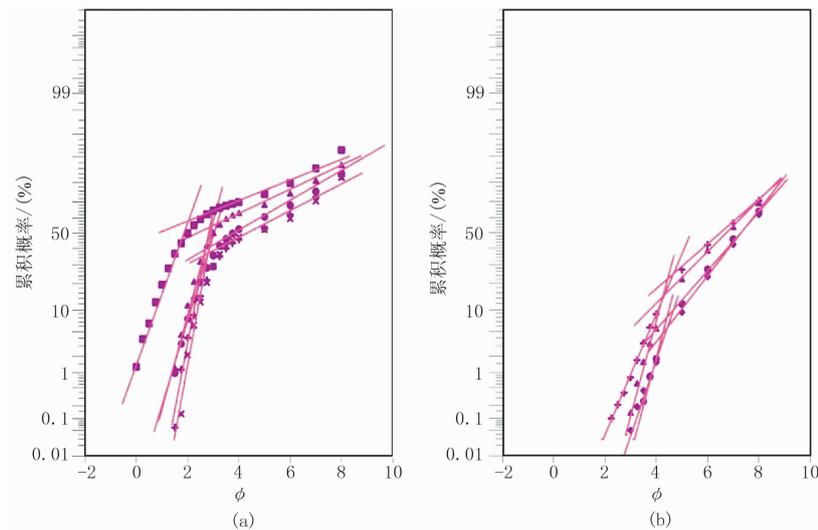


图4 砂岩粒度概率曲线特征
(a)高截点两段式; (b)低截点两段式

表2 ZJ2-1U砂组砂岩粒度概率特征

	粒度区间/ ϕ	次总体交截点/ ϕ	跳跃组分		悬浮组分含量/%	水动力特征及沉积环境
			含量/(%)	斜率角/(°)		
高截点两段式	0~8	2~4	>60°	45°~60°	30	砂坪
低截点两段式	3~8	4~6	少	>60°	>70	水动力条件较弱混合坪

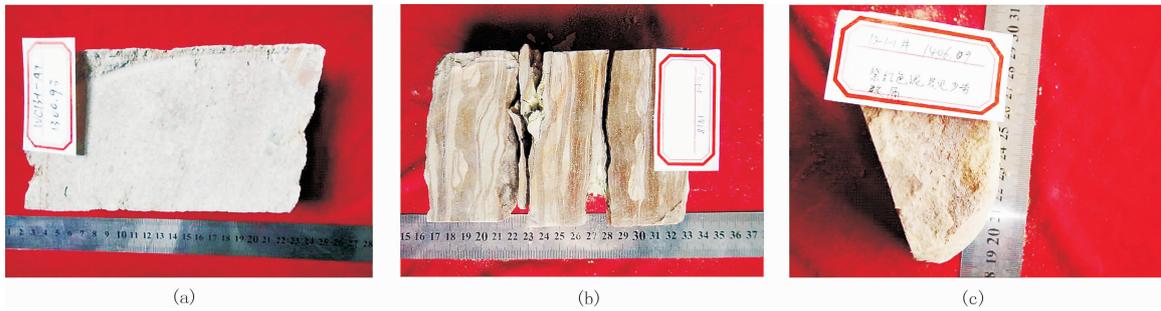


图 5 ZJ2-1U 砂组潮坪沉积典型沉积构造
(a)块状层理; (b)透镜状层理; (c)紫红色泥岩中见炭屑



图 6 W1 井 ZJ2-1U 砂组混合坪岩心照片

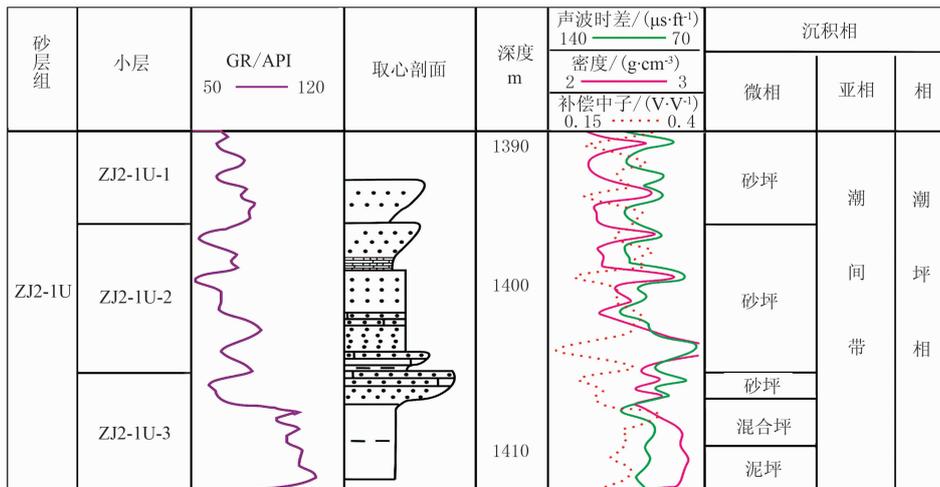


图 7 研究区 W1 井 ZJ2-1U 砂组取心段沉积微相

4 井间沉积微相研究

井间沉积微相刻画是储层精细研究的关键,考虑到研究区海上油田开发中井点少且井网不规则、

井点集中在长轴背斜中部的特点,在井点的约束下,利用地震属性分析和地震相分析方法,对井间沉积微相分布进行刻画。

4.1 基于地震属性分析的砂岩厚度预测

作为从地震资料中提取地质信息的一种有效方

法,从 20 世纪 90 年代起地震属性分析技术得到了快速发展,并在沉积相研究中得到广泛应用^[24]。研究区发育的砂坪主体、砂坪侧缘和混合坪沉积中砂岩厚度差别较大,采用基于地震属性的砂岩厚度预测方法对砂岩厚度进行定量预测,在现代潮坪沉积模式的指导下开展 ZJ2-1U 砂组沉积微相刻画。

4.1.1 新地震属性的构建

Widess^[29]研究表明,对于厚度小于 $\lambda/4$ (λ 为波长)的薄砂体,地震反射时间厚度不能反映砂岩真实厚度,但反射振幅与砂岩厚度近似成正比,也就是说,随着砂岩厚度的增加,反射时间厚度没有明显变化,但振幅增大,因此反射弧长与砂岩厚度呈正相关关系;根据砂岩楔状模型,对于厚度为 $(1/4 \sim 1/2)\lambda$ 的砂岩层来说,随着厚度的增加,振幅值有减小的趋势,但是砂岩顶、底面之间地震反射时间厚度增加,地震反射弧长也相应变大。

研究区砂体厚度小于 0.4λ ,跨越了厚度调谐曲线上的振幅单调区间,传统振幅法在砂岩厚度定量预测中受到制约,因此文中采用地震弧长类属性对砂岩厚度分布进行预测。为了提高地震弧长属性对砂岩厚度的敏感性,笔者对地震弧长属性进行了改进——将弧长减去基准值,再进行对数变换,便有

$$S = \ln \left\{ \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N \sqrt{[a(i+1) - a(i)]^2 + T^2} - P \right\} \quad (1)$$

将这种改进后的弧长类地震属性称为“地震基准弧长对数”。式中: S 为地震基准弧长对数; $a(i)$ 为第 i 个采样点的采样值; T 为采样周期; N 为属性提取时窗内的采样点数; P 为基准弧长值。

4.1.2 井点标定的属性定量分析

如何确定地震属性与砂岩厚度之间的关系是利用地震属性进行砂岩厚度预测的基础和关键,文中利用井点砂岩厚度对地震属性进行标定,通过读取井点砂岩厚度和地震属性值,建立地震基准弧长对数属性 S 与砂岩厚度 H 之间的定量关系(图 8)

$$H = 1.5S + 1.77 \quad (2)$$

根据式(2)可以将地震基准弧长对数属性平面分布转换为砂岩厚度平面分布。从砂岩厚度分布等值线图来看(图 9),研究区中部和西部砂岩较厚,砂体整体呈北东向延伸的条带状分布,这种条带状分布特征在该区中、东部最为明显,指示了砂坪的平面展布规律。

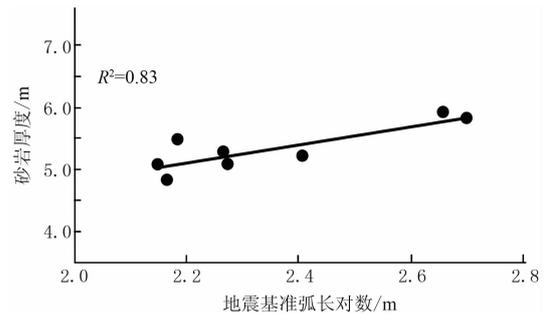


图 8 地震基准弧长对数属性与砂岩厚度之间的关系
 R 为相关系数

4.2 砂坪边界的地震相解释

地震相综合反映了地质体的地震剖面反射特征,该概念自从 20 世纪 70 年代提出以来一直作为地层和沉积相解释的依据而被广泛应用,在井点的标定下建立研究区砂坪沉积的地震相,以指导砂坪沉积微相边界的刻画。

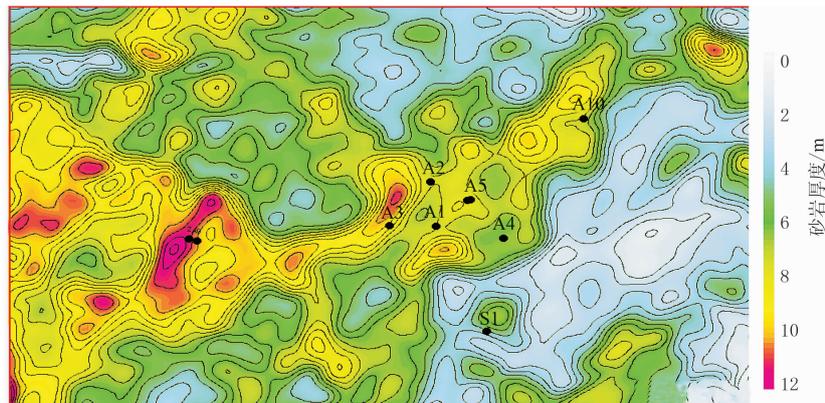


图 9 ZJ2-1U 砂组砂岩厚度平面分布预测

* 专利号为 201310088179

在 ZJ2-1U 砂组顶面之下连续性较好的复合波形地震同相轴反映了典型潮坪沉积的地震反射特征(图 10),即:①整体上具有强振幅、中—高连续性、平行或亚平行反射特征;②内部存在由砂岩厚度和组合特征的横向变化引起的振幅的横向变化,这是区分砂坪主体和砂坪侧缘的依据;③从复合波形来看,可见加积形反射形态,这是由在平面上观察到的砂坪在垂向上的多期叠加引起的。

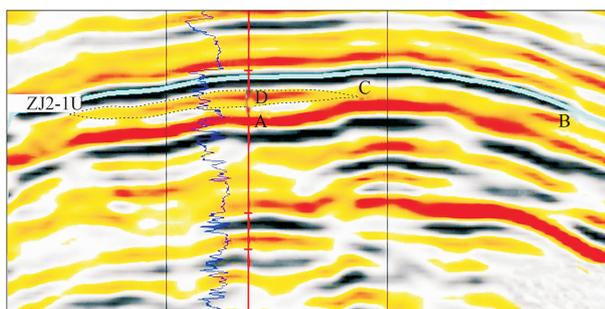


图 10 砂坪典型地震反射特征

A 点处高连续平行强反射是砂坪主体的反映,B 点和 C 点则是振幅由强变弱的位置,复合波形中的反射同相轴时间厚度也变小,井点标定揭示该处砂岩厚度变小和岩性变细,是高连续、强反射同相轴在横向上的延伸,显示了砂坪侧缘的反射特征。D 点处振幅较强,向两侧振幅逐渐减弱,同相轴时间厚度逐渐变小,直至反射消失,根据薄层厚度调谐曲线特征,这种振幅变化反映了单期砂坪主体向侧缘过渡的反射特征

利用地震相识别了多期砂坪叠加形成厚砂岩的内部结构,避免了将砂坪侧缘多期叠加形成的厚层砂岩误解释为砂坪主体的情况,从而在地震反射剖面上进一步落实了砂坪主体和砂坪侧缘。

图 11 为研究区 ZJ2-1U 砂组沉积微相图,由图中可见,研究区发育大面积连片砂岩,以砂坪沉积为主,混合坪仅在边部分布。ZJ2-1U 砂组发育 4 个砂坪主体,均呈北东向条带状延伸,延伸方向垂直于水流方向,单个砂坪主体最大面积达 5km^2 ,最小仅为 0.4km^2 ,主要位于该区中、西部。

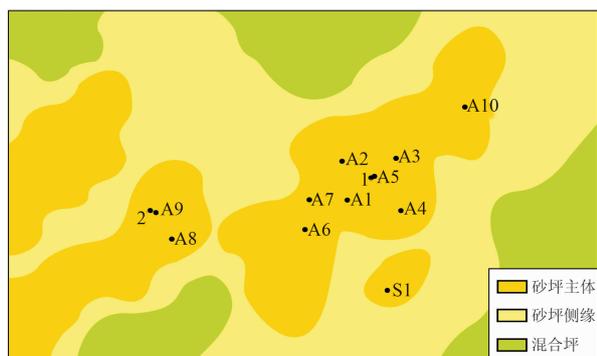


图 11 研究区 ZJ2-1U 砂组沉积微相图

5 结论

文中以珠江口盆地琼海凸起珠江组 ZJ2-1U 砂组海相沉积地层为例,探索了海上油田在稀井网条件下的井震结合沉积微相刻画方法,并得到以下认识:

(1)ZJ2-1U 砂组沉积时期文昌 13-1 油田位于潮间带,自下而上经历“泥坪—混合坪—砂坪”的沉积演化。砂坪主体呈北东向条带状分布,主要分布于研究区中、西部,单个砂坪主体最大面积达 5km^2 ,最小为 0.4km^2 ,砂坪侧缘面积大,呈薄互层状在全区分布。

(2)通过改进传统的地震弧长属性,提出了“地震基准弧长对数”这一新的地震属性,并建立了地震基准弧长对数与砂岩厚度间的定量关系,实现了对研究区薄层砂岩厚度的定量预测,为沉积微相研究提供了依据。

(3)潮坪沉积具有砂岩分布范围广、岩性分布相对稳定的特点,但是砂体的沉积微相类型和内部结构存在差异,表现出非均质性,在油藏开发中后期,充分利用地震资料开展沉积微相刻画,从而揭示这种海相地层的非均质性特征,可以为油田高效开发提供地质依据。

参考文献

- [1] Veeken P. Seismic Stratigraphy, Basin Analysis and Reservoir Characterization. Handbook of Geophysical Exploration, Seismic Exploration, Elsevier, 2007, 37, 111.
- [2] Vail P R and Mitchum R M Jr. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 1: Overview. Edited by Payton C E, Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir 26, 1977, 51-52.
- [3] Mitchum R M Jr, Vail P R and Sangree J B. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. Edited by Payton C E, Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir 26, 1977, 117-133.
- [4] Brown A R. Interpretation of Three-dimensional Seismic Data (Sixth edition). AAPG Memoir 42 and SEG Investigations in Geophysics, 2004, 4(9).
- [5] Zeng H. Frequency-dependent seismic stratigraphy for high-resolution interpretation of depositional sequences. AAPG Annual Convention and Exhibition, Denver, Colorado, USA, June 7-10, 2009.
- [6] Hardage B A, Levey R A, Pendleton V et al. 3-D seismic imaging and interpretation of fluvially deposi-

- ted thin-bed reservoirs. Edited by Weimer P and Davis T L, AAPG Studies in Geology No. 42 and SEG Geophysical Developments Series No. 5, AAPG/SEG, Tulsa, 27-34.
- [7] Dunlap D B, Wood L J, Weisenberger C et al. Seismic geomorphology of offshore Morocco's east margin, Safi Haute Mer area. AAPG Bulletin, 2010, 94(5):615-642.
- [8] Posamentier H W, Davies R J, Cartwright J A et al. Seismic geomorphology: an overview. Seismic Geomorphology: Applications to Hydrocarbon Exploration and Production, 2007, 2.
- [9] Posamentier H W and Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(3):367-388.
- [10] Wood L J. Quantitative Seismic Geomorphology: The Future of Reservoir Characterization. Bulletin of Houston Geological Society, 2004, 13-17.
- [11] Miall A D. Architecture and sequence stratigraphy of Pleistocene fluvial systems in the Malay Basin, based on seismic time-slice analysis. AAPG Bulletin, 86(7):1201-1216.
- [12] Carter D C. 3-D seismic geomorphology: Insights into fluvial reservoir deposition and performance. Widuri field, Java Sea. AAPG Bulletin, 87(6):909-934.
- [13] Wood L J. Quantitative seismic geomorphology of Pliocene and Miocene fluvial system in the Northern Gulf of Mexico, USA. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77:713-730.
- [14] 三维地震勘探研究组. 陆上三维地震勘探的实践. 石油物探, 1983, 22(1):2-23.
- 3-D Seismic Research Group. 3-D land operations. GPP, 1983, 22(1):2-23.
- [15] Zeng H, Henry S C and Riola J P. Stratal slicing, part II: Real 3-D seismic data. Geophysics, 1998, 63(2):514-522.
- [16] Hentz T F and Zeng H. High-frequency Miocene sequence stratigraphy, offshore Louisiana: Cycle framework and influence on production distribution in a mature shelf province. AAPG Bulletin, 2003, 87(2):197-230.
- [17] Zhang Xianguo, Lin Chengyan, Dong Chunmei. From amplitude to architecture of braided channel bars: the sedimentological interpretation of stratal slices in a shallow-sea seismic survey, DaGang. CPS/SEG 2009 International Geophysical Conference & Exposition, 2009, 24-27.
- [18] Sawyer D E, Flemings P B, Shipp R C et al. Seismic geomorphology, lithology and evolution of the late Pleistocene Mars-Ursa turbidite region, Mississippi Canyon area, northern Gulf of Mexico. AAPG Bulletin, 91(2):215-234.
- [19] 董艳蕾, 朱筱敏, 曾洪流等. 歧南凹陷地震沉积学研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(4):7-12.
- Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Zeng Hongliu et al. Study of seismic sedimentology in Qi'nian Sag. Journal of China University of Petroleum(Natural science edition), 2008, 32(4):7-12.
- [20] Posamentier H W, Dorn G A, Cole M J et al. Imaging elements of depositional systems with 3-D seismic data: A case study. Gulf Coast Section SEPM Foundation, 17th Annual Research Conference, 1996, 213-228.
- [21] Miall A D. Reconstructing the architecture and sequence stratigraphy of the preserved fluvial record as a tool for reservoir development: A reality check. AAPG Bulletin, 2006, 90(7):989-1002.
- [22] 钱荣钧. 对地震切片解释中一些问题的分析. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4):482-487.
- Qian Rongjun. Analysis of some issues in interpretation of seismic slices. OGP, 2007, 42(4):482-487.
- [23] 张军华, 周振晓, 谭明友等. 地震切片解释中的几个理论问题. 石油地球物理勘探, 2007, 42(3):348-352.
- Zhang Junhua, Zhou Zhenxiao, Tan mingyou et al. Several theoretical issues on seismic slice interpretation. OGP, 2007, 42(3):348-352.
- [24] 印兴耀, 周静毅. 地震属性优化方法综述. 石油地球物理勘探, 2005, 40(4):482-489.
- Yin Xingyao, Zhou Jingyi. Review on seismic attribute optimization method. OGP, 2005, 40(4):482-489.
- [25] Davies R J, Posamentier H W, Wood L J et al. Seismic Geomorphology: Application to Hydrocarbon Exploration and Production. Geological Society Special Publication 277, the Geological Society Publishing House, 2007.
- [26] 陈维涛, 杜家元, 龙更生等. 珠江口盆地海相层序地层发育的控制因素分析. 沉积学报, 2012, 30(1):73-83.
- Chen Weitao, Du Jiayuan, Long Gengsheng et al. Analysis on controlling factors of marine sequence stratigraphy evolution in Pearl River Mouth basin. Acta Geologica Sinica, 2012, 30(1):73-83.
- [27] 赵中贤, 周蒂, 廖杰. 珠江口盆地第三纪古地理及沉积演化. 热带海洋学报, 2009, 28(6):52-60.
- Zhao Zhongxian, Zhou Di, Liao Jie. Tertiary paleogeography and depositional evolution in the Pearl River Mouth basin of the northern South China Sea. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(6):52-60.
- [28] Zhang Xianguo, Lin Chengyan, Zhang Tao. Seismic sedimentology and its application in shallow sea area, gentle slope belt of Chengning Uplift. Journal of Earth Science, 2010, 21(4):471-479.
- [29] Widess M B. How thin is a thin bed? Geophysics, 1973, 38(6):1176-1180.

(本文编辑:刘勇)

作者简介



张宪国 讲师, 硕士生导师, 1982年生; 2010年毕业于中国石油大学(华东)地质资源与地质工程专业, 获博士学位。目前在中国石油大学(华东)地球科学与技术学院从事教学与科研工作。