

## 渤海湾盆地歧口凹陷南部沙河街组 浊积扇储层综合预测

谭建财<sup>1</sup>, 张春华<sup>2</sup>, 张明伟<sup>1</sup>, 刘田<sup>1</sup>, 邵远<sup>1</sup>

1 中海石油(中国)有限公司湛江分公司; 2 中国石油集团经济技术研究院

**摘要** 渤海湾盆地歧口凹陷南部古近系沙河街组发育一套湖相浊积扇沉积,砂岩储层以分布范围小、变化快、砂泥岩薄互层发育为特点。基于层序地层格架和储层成因类型的认识,利用纵向精细的测井资料和横向密集的地震资料,综合开展地震属性分析、测井约束反演和地质统计反演“三步骤”储层预测。研究表明:顺物源方向砂体呈前积叠置,分布较连续;而垂物源方向,砂体分布变化快,多呈透镜状分布。受浊积扇南部断层下降盘的控制,南部砂体总体上较厚,浊积水道砂体也相对较厚。应用效果表明:地震属性分析、测井约束反演和地质统计反演“三步骤”储层综合预测技术比较适合稀井网、大井距条件下的储层精细预测。

**关键词** 浊积扇; 地震属性分析; 测井约束反演; 地质统计反演; 储层预测; 沙河街组; 歧口凹陷

**中图分类号**:TE122.2<sup>4</sup> **文献标识码**:A

浊积扇是湖盆断陷期形成的一种重要的油气储集体,其储层具有物性好、厚度大等特征,多发育于深湖、半深湖,一般分布于暗色泥岩之中。圈闭靠近烃源岩,有利于油气聚集,从而易形成岩性油气藏。近几年来,在东营凹陷、惠民凹陷和泌阳凹陷等凹陷获得了诸多浊积扇油气藏的重大发现<sup>[1-4]</sup>。因此,浊积扇油气藏作为岩性油气藏的重要组成部分,已经成为诸多凹陷的重点勘探开发目标,浊积扇储层预测也成为了研究热点<sup>[5-7]</sup>。

### 1 概况

本文研究区位于渤海湾盆地黄骅拗陷歧口凹陷南部,北靠歧南次凹,南依埕宁隆起,为羊山木一扣村潜山与埕北断阶带的结合部位(图1)。研究区东西长约30 km,南北宽约20 km,面积为600 km<sup>2</sup>,共有探井、开发井10余口,并且三维地震资料满覆盖。经过40多年的勘探开发,研究区目前仍是歧口凹陷进一步寻找剩余油气的有利区。区内在构造油气藏勘探程度较高的情况下,近几年油气勘探的目标逐渐转向岩性油气藏。

通过钻井和地震资料分析,认为研究区古近系沙河街组为断陷湖盆沉积,垂向上由低位域、水进域和高位域旋回组成。受南部埕宁隆起物源供给的影响,在沙河街组沉积期浊积扇成群发育,并以其有利的成藏条件成为研究区最具潜力的勘探开发目标。但是研究区目前处于勘探开发初级阶段,由于井网稀、井距大,尤其是海上井的资料又少,因此,充分利用地震资料进行地震储层预测具有十分重要的意义<sup>[8]</sup>。

已钻井揭示研究区沙河街组浊积扇砂岩发育,但砂岩非均质性强,而且海上勘探初期钻井资料少、井距大,导致难以有效预测浊积扇储层的分布。针对这些难题,本文利用纵向精细的测井资料和横向密集的地震资料,在构造解释、钻井资料分析的基础上,通过井震结合开展地震属性分析、波阻抗反演和地质统计反演“三步骤”储层综合预测研究,在横向上预测储层分布范围和厚度大小,在纵向上预测储层几何形态和变化规律,以期为歧口凹陷南部岩性油气藏勘探开发提供地质依据。

收稿日期:2018-03-08;改回日期:2020-03-11

**第一作者**:谭建财,石油地质工程师,主要从事油气地质勘探方面的研究工作。通信地址:524057 广东省湛江市坡头区12号信箱;E-mail:tanjc1@cnoc.com.cn

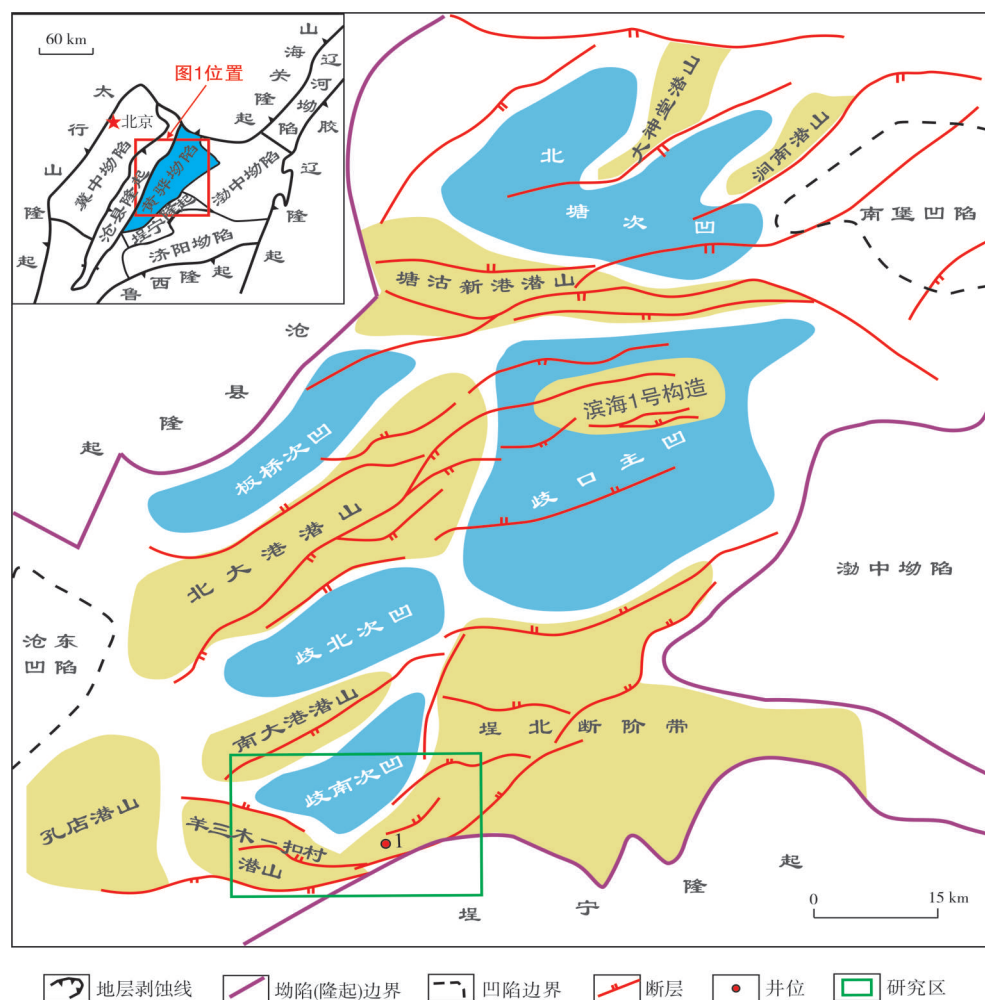


图1 研究区构造位置图

Fig. 1 Tectonic location of the study area

## 2 储层预测思路及方法

地震储层预测是在地震信息采集和处理的基础上,应用地质认识规律,综合地质、测井和录井等资料,预测地下地质目标的空间几何形态、储集物性等参数展布特征的一门综合性的技术<sup>[5]</sup>。在勘探阶段,对于井网稀、井距大的地区,还没有十分成熟的储层预测技术。

针对研究区勘探开发存在的实际问题,本文以沉积岩石学、储层地质学、地震反演理论为指导,充分应用地质、测井、三维地震等资料,首先提取并优选多参数地震属性,在地震属性标定的基础上,结合单井储层评价结果,预测有利沉积相带及储层平面分布;然后应用基于模型的测井约束反演方法,以测井高频信息补充地震信息频宽的不足,求取出反映储层分布的波阻抗;最后,为进

一步提高储层反演识别精度,在测井约束反演的基础上,以地质统计学原理为指导,应用地震测井协同模拟方法进行地质统计反演,开展储层空间分布规律研究,分析储层平面、剖面 and 空间展布规律,对目的层段的浊积扇储层进行综合评价,为浊积扇油气藏勘探开发提供参考依据。综上所述,地震属性分析、测井约束波阻抗反演和地质统计反演是研究区“三步骤”浊积扇储层综合预测的关键技术。

## 3 综合地震储层预测

### 3.1 地震属性分析

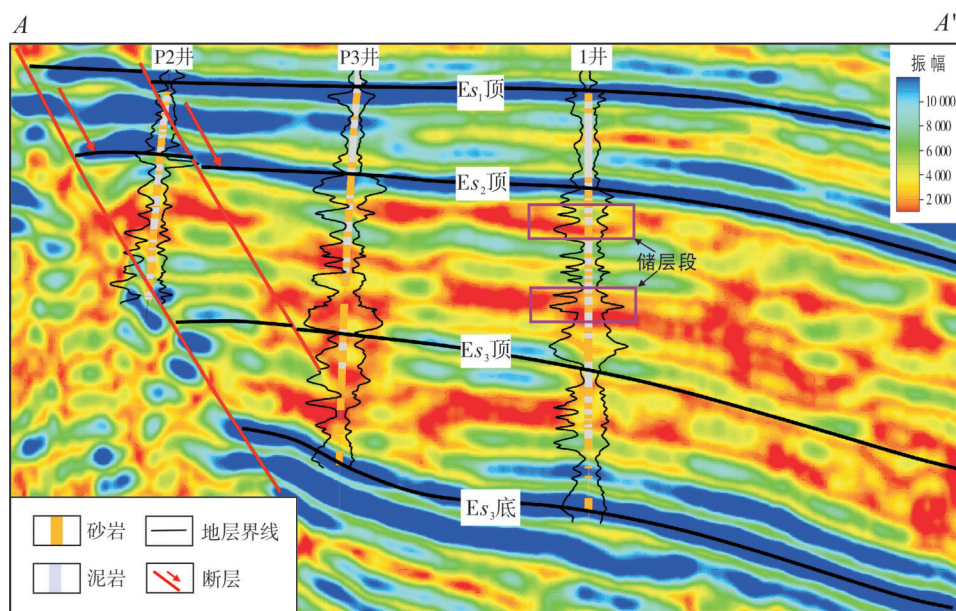
地震属性是对地层地质特征变化的综合反映,经过数学公式变换而导出的地震属性可以反映地震波的几何学、运动学和动力学等特征。振幅类属

性是浊积扇地震预测的重要属性之一,这主要是因为研究区目的层“泥包砂”的岩性特征使得储层中的地震波传播速度高于围岩<sup>[9]</sup>。因此,在本次研究过程中,通过地震属性优化及地层标定,建立井点处振幅属性与地质参数之间的定量关系,将地震振幅属性分布转化为沉积相分布,从而可以识别宏观的沉积特征。

受地震资料品质的影响,振幅属性的纵向分辨率较低。以沙河街组二段(简称沙二段)为例(图2),

剖面上只能识别出2套厚层储层(厚度为30~50 m的砂层),无法与高分辨的测井曲线相比。但是在横向上,地震振幅信息具有连续密集的特点,包含着丰富的地层岩性和物性信息,因此地震振幅属性的顺层切片可以反映岩性或沉积相等地质特征在平面上的分布规律(图3)。

图3a是沙二段地震振幅属性平面图,振幅属性平面分析表明:砂岩厚度和砂地比高值区(红黄色)整体上呈南东—北西向展布,分布范围主要位于中

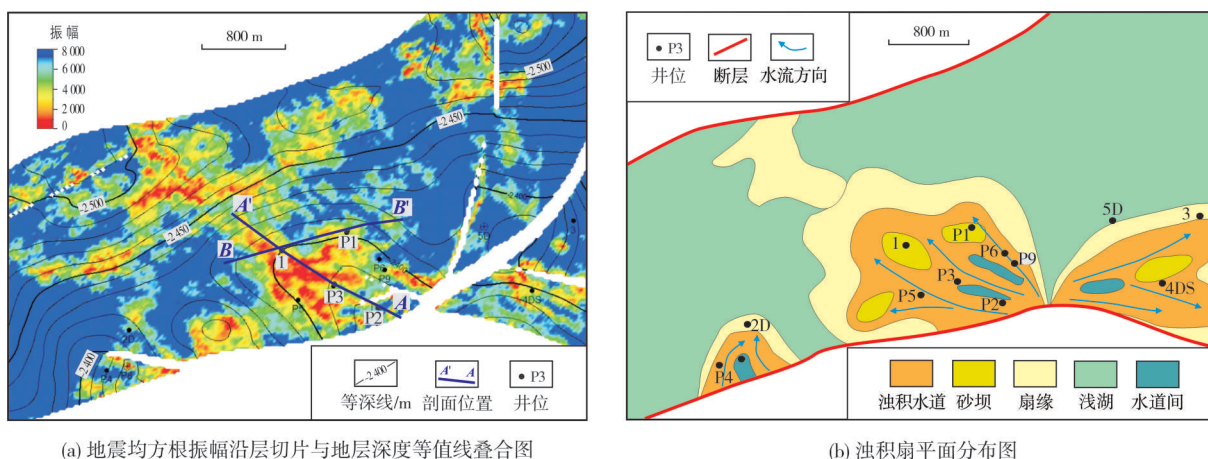


Es<sub>1</sub> 沙河街组一段; Es<sub>2</sub> 沙河街组二段; Es<sub>3</sub> 沙河街组三段

注: 剖面上的井柱子左侧为自然伽马曲线, 右侧为电阻率曲线。

图2 渤海湾盆地歧口凹陷南部沙河街组浊积扇振幅属性剖面(剖面位置见图3a)

Fig. 2 Amplitude attribute profile of turbidite fan of Shahejie Formation in the south of Qikou Depression, Bohai Bay Basin (the location is shown in Fig. 3a)



(a) 地震均方根振幅沿层切片与地层深度等值线叠合图

(b) 浊积扇平面分布图

图3 渤海湾盆地歧口凹陷南部沙河街组二段地震属性与浊积扇平面分布

Fig. 3 Seismic attributes and plane distribution of turbidite fans of the Shahejie Formation Member 2 in the south of Qikou Depression, Bohai Bay Basin

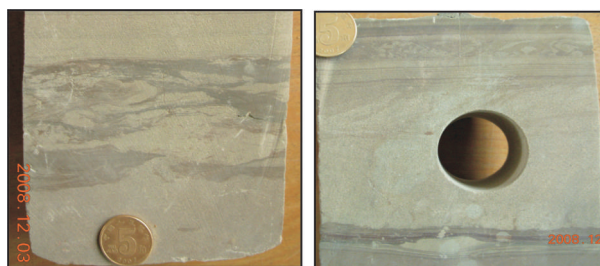


部的1井—P3井—P2井一带,同时在东部、西部的近物源端也有少部分振幅异常显示;而砂岩厚度和砂地比低值区(蓝绿色)主要位于研究区相对远离物源端的西北部和东北部。

在平面振幅属性分析的基础上,结合单井沉积相特征,将地震属性分布转化为沉积相分布(图3b)。已钻井揭示研究区沙二段主要发育浊积扇沉积,岩石类型为岩屑长石砂岩、长石砂岩,粒度概率曲线以弧形为主。通过岩心观察,沉积构造可见浊积构造的透镜状层理、球枕构造和典型鲍马序列(图4)。例如1井在深度3 056 m发育透镜状层理、球枕构造(图4a),岩性为粉砂岩,中间见泥质条带,夹透镜状砂体,反映沉积物滑塌再沉积的特征;1井在深度3 054 m发育鲍马序列(图4b),岩性为粉砂岩,可以清晰看到5个沉积构造单元组合,这是浊流沉积的典型特征。在地震属性及单井沉积特征分析的基础上,认为沙二段发育了3个浊积扇(图3b),整体表现为南依边界断层,呈北西向扇状展布。3个扇体中的中部扇体面积最大,东部扇体较大,西部扇体最小,物源均来自南部边界断层上盘的三角洲前缘砂体。

### 3.2 测井约束反演

测井约束地震反演的思路 and 过程为:在构造精细解释的基础上,将高分辨率测井信息与低频地震有机结合起来,建立起符合地质特征的、分辨率较高



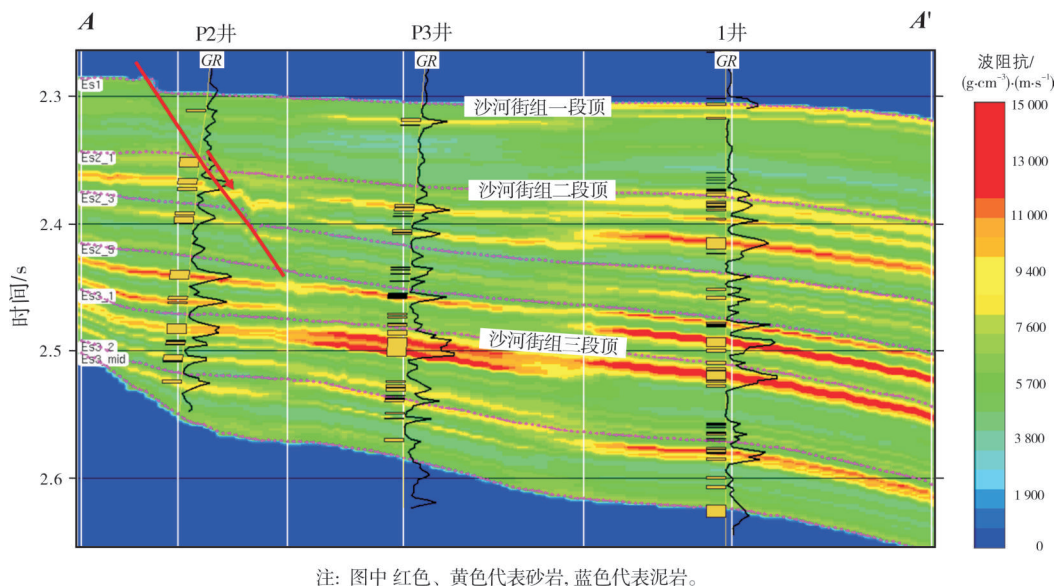
(a) 粉砂岩。球枕构造, 见透镜状层理。1井3 056 m (b) 粉砂岩。鲍马序列, 见透镜状层理。1井3 054 m

图4 渤海湾盆地歧口凹陷南部沙河街组二段碎屑岩沉积构造特征

Fig. 4 Sedimentary structural characteristics of clastic rocks of the Shahejie Formation Member 2 in the south of Qikou Depression, Bohai Bay Basin

的初始模型;然后对初始模型进行正演,计算出合成地震剖面,通过反复修改模型参数以更新初始模型,使得合成地震剖面与实际地震剖面最为接近,最终推算出高分辨率的波阻抗反演数据。然后结合岩石地球物理常数,在划分砂泥岩波阻抗的基础上,实现储层的空间分布预测<sup>[10]</sup>。测井约束反演可为浊积扇油气藏精细描述(包括沉积相、储层物性、井间的储层分布以及连通性等)提供可靠的地质依据<sup>[11]</sup>。

图5为顺着物源方向的波阻抗反演连井剖面,通过岩性曲线和波阻抗之间的砂泥岩交会图分析,将红色高值条带标定为有利储层,波阻抗低值区标



注: 图中 红色、黄色代表砂岩, 蓝色代表泥岩。

图5 渤海湾盆地歧口凹陷南部沙河街组二段浊积扇测井约束反演剖面(剖面位置见图3a)

Fig. 5 Log constrained inversion profile of turbidite fan of the Shahejie Formation Member 2 in the south of Qikou Depression, Bohai Bay Basin (the location is shown in Fig. 3a)

定为泥岩。从图5可以看出钻井上的砂岩(井柱子上显示暗黄色)与反演剖面上红色和黄色高值条带对应关系较好,说明模型建立精度较高,能够识别出主力储层。主力储层在剖面上呈层状,但是井间变化快,P2井—P3井—1井的主力砂体多期叠置,预测结果与浊积扇的地质特征相符合。

基于模型的测井约束反演结果既表现了地质沉积规律和地震趋势特征,又提高了储层的识别精度,一般可以反演出厚度15~20 m的储层,但是对小于15 m的薄砂体识别能力较差,说明测井约束反演的精度还不能满足浊积扇油气藏精细描述的需求,尤其是不能满足指导开发井部署的需要,因此有必要开展地质统计反演,从而进一步提高储层预测精度。

### 3.3 地质统计反演

地质统计学反演由于数据运算量大、运算时间长而一直未得到推广,直到近几年计算机技术的高速发展,推动了该方法的广泛应用<sup>[12]</sup>。地质统计反演是将随机模拟算法与地震储层反演结果相结合,对随机模拟过程以及模拟结果进行优化,使之符合地震测井数据的过程。地质统计反演利用随机模拟技术,综合了不同尺度的数据资料,尽管随机模拟的实现各不相同,但其特点是在预测储层参数时确保了预测结果在井点处的准确性,井点以外则根据波阻抗数据空间变化规律及参数分布概率等进行预测<sup>[13]</sup>。目前较为成熟和广泛应用的地质统计反演是将随机模拟与基于模型的测井约束反演相结合<sup>[14]</sup>。

变差函数是地质统计学用来描述区域化变量的空间相关性的数学工具。为了表征区域中地质特征的空间变化规律,在充分考虑地质特征的空间相关性和随机性的基础上,用反映地质特征区域变化的随机函数——变差函数作为表征工具,来研究统计各种地质现象的分布规律<sup>[14]</sup>。变差函数分析分3个主要方向:主变程、次变程和垂向变程,不同方向变差函数的变程不同,分别反映了不同方向地质特征变量相关性的差异。由于地震反演波阻抗数据体样本点多,井数据样本点少,故对波阻抗数据分析的水平方向变差函数的准确度要明显高于利用井数据计算的变差函数结果。

图6为研究区沙河街组有利储层变差函数分析图,图中的变程参数主要是根据地震反演波阻抗数

据体得到的结果。其中,图6a为有利储层主变程分析图,主变程方向60°,主变程为965.5 m;图6b为有利储层次变程分析图,次变程方向300°,次变程为326.5 m;图6c为有利储层垂向变程分析图,垂向变程为10 m。各个高点基本相当,基本上是扇体单砂体厚度。这些参数的确定为之后协同波阻抗结果的地质统计反演提供了变程分析数据。

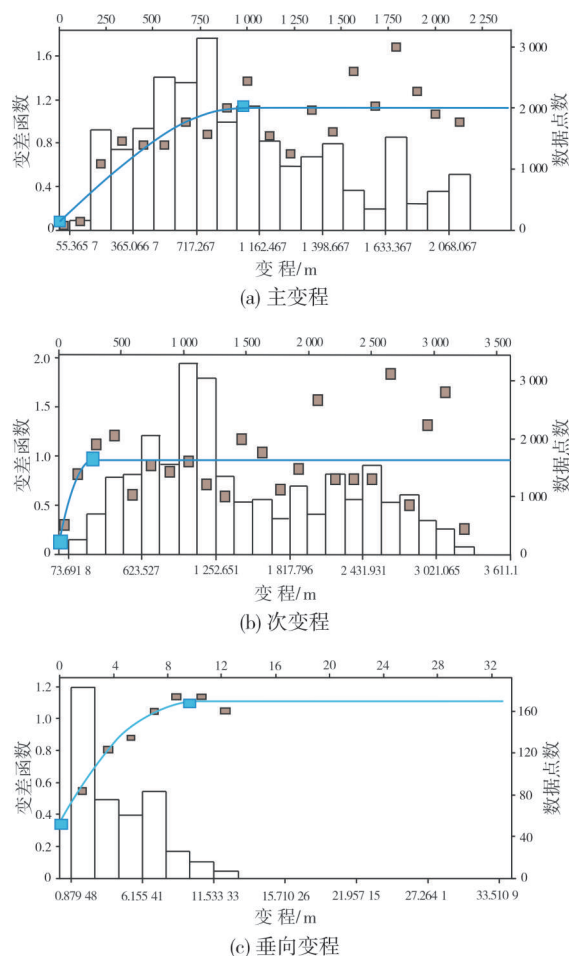


图6 渤海湾盆地歧口凹陷南部沙河街组有利储层变差函数分析图

Fig. 6 Variogram analysis diagram of favorable reservoir of Shahejie Formation in the south of Qikou Depression, Bohai Bay Basin

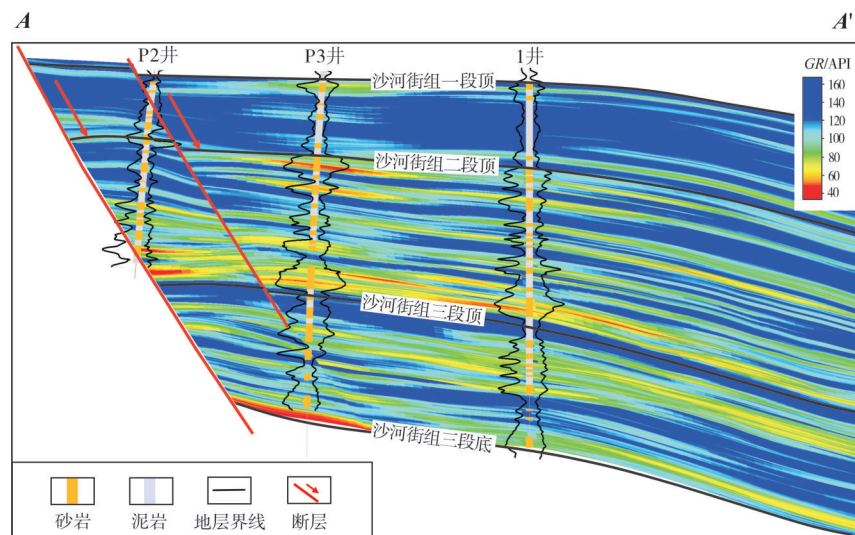
从测井约束反演结果(图5)可以看出,预测结果不能完全分辨出研究区沙河街组浊积扇油藏的砂泥岩薄互层,而自然伽马的地质统计反演结果(图7)不仅能预测薄砂体的分布,还能分析储层的空间接触关系及展布规律。

图7所示是基于波阻抗反演结果的地质统计学反演剖面,为自然伽马属性剖面,可以看出其垂向分辨率较基于模型的测井约束反演有了很大提高,同



时井点处与测井资料基本吻合,井间分布符合地震反演结果,在井间尤其是井距较大时,顺着物源方向的剖面可以识别出砂体尖灭、叠置现象。可见在基于模型的测井约束反演中不能识别的薄砂体和砂体叠置现象在地质统计反演中可以得到识别,因此可

将第2次实现的测井-地震协同模拟的自然伽马数据体用来分析研究区浊积扇储层,尤其是厚度小于15 m的薄砂体的分布规律。这证明了地质统计反演精度可以满足浊积扇油气藏精细描述的需求,可以为油田开发井的部署钻探提供地质依据。



注: 剖面上的井柱子左侧为自然伽马曲线, 右侧为电阻率曲线。

图7 渤海湾盆地歧口凹陷南部沙河街组基于波阻抗反演结果的地质统计反演剖面(剖面位置见图3a)

Fig. 7 Geostatistical inversion section based on the result of wave impedance inversion of Shahejie Formation in the south of Qikou Depression, Bohai Bay Basin (section location is shown in Fig. 3a)

## 4 综合预测效果分析

本文从已钻井测井资料出发,综合振幅属性顺层切片、测井约束反演及地质统计反演储层预测成果,对浊积扇油藏储层进行精细解释,追踪描述储层并对井间储层进行预测,最后对综合预测结果的应用效果进行分析。

### 4.1 储层结构与样式

从图8a顺物源方向剖面来看,沙三段和沙二段储层发育,沙一段储层相对不发育,储层向上变少主要是受到水体上升和物源减少的控制。整个沙河街组由从低位域、水进域过渡到高位体系域的一个完整旋回组成,其中沙三段和沙二段处于低位域,砂体发育,具有前积叠置样式,单个砂体变化快,延伸距离较短,符合浊积扇储层变化快、非均质性强的沉积特征;而沙一段处于水进域至高位域,砂体以薄层为主,发育大套泥岩,反映高水位期沉积物源逐渐减弱的特征。从图8b垂直物源方向的储层剖面可以看出,在垂直物源方向,砂体侧向叠置,延伸更短,变化更快。在1井

和P1井之间的构造高点位置上,储层厚度比两侧构造低部位的要大,说明扇体沉积的主体区位于构造高点处,构造低点处是扇体的边部,储层相对不发育。

可以看出,地质统计反演的结果比波阻抗反演更加精细、更加符合地质特征,因此相对于测井约束反演,地质统计反演有利于歧口凹陷南部浊积扇储层的精细描述。

### 4.2 储层平面分布

研究区沙河街组浊积扇的物源来自南部断层之上的三角洲沉积,南部靠近断层的近物源端的砂体厚度较大,以浊积水道沉积为主,北部远离物源端的砂体逐渐减薄直至尖灭。以沙二段浊积扇为例(图9),沙二段浊积水道的砂体展布与物源、水流方向一致,呈北西向扇状分布,受控于3个大小不一的扇体:西部扇体发育面积最小,尖灭于2D井以北一带,砂体平均厚度为15 m;东高点扇体发育面积较大,尖灭于3井、5D井以北一带,砂体平均厚度与西部扇体相当,平均厚度为15 m;中部高点扇体面积和厚度均最大,尖灭于1井、P1井以北一带,砂体厚度最大为40 m。

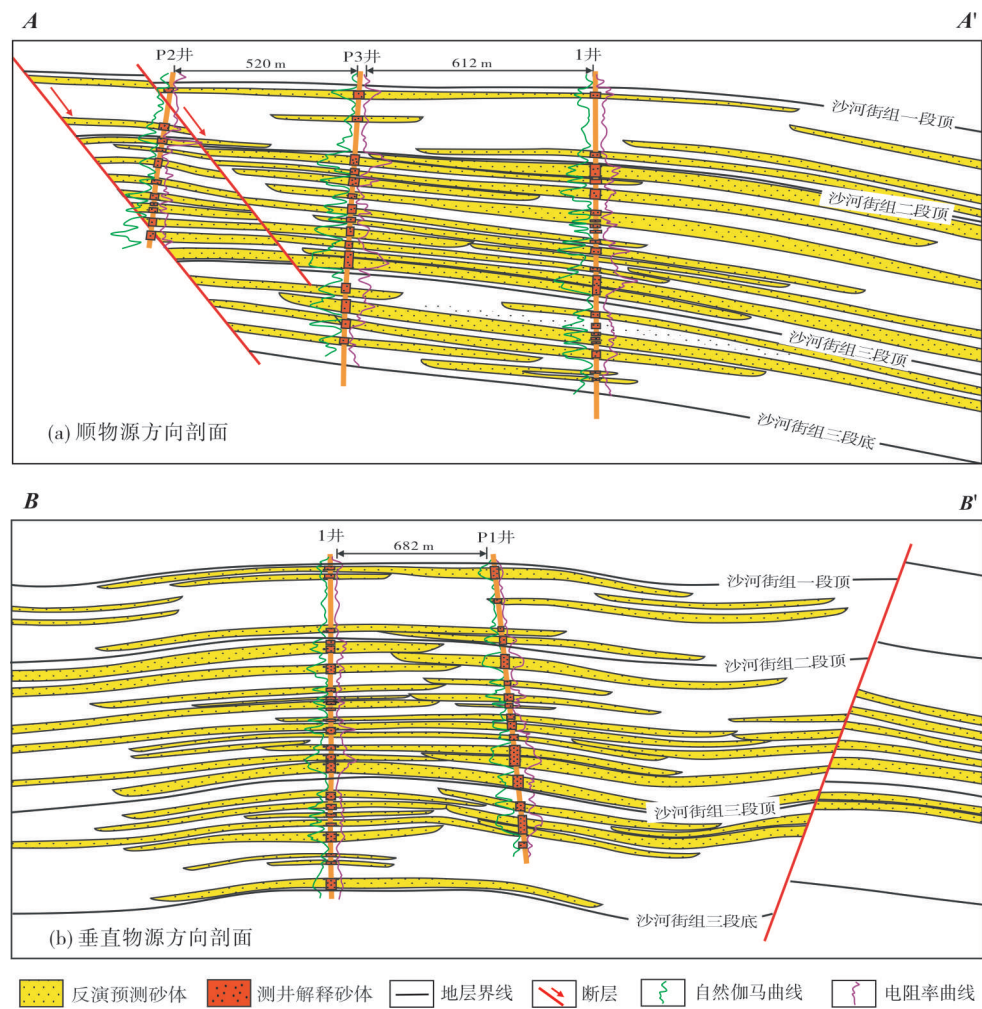


图8 渤海湾盆地歧口凹陷南部沙河街组优质储层分布剖面(剖面位置见图 3a)

Fig. 8 Distribution profile of high-quality reservoir of Shahejie Formation in the south of Qikou Depression, Bohai Bay Basin (the location is shown in Fig. 3a)

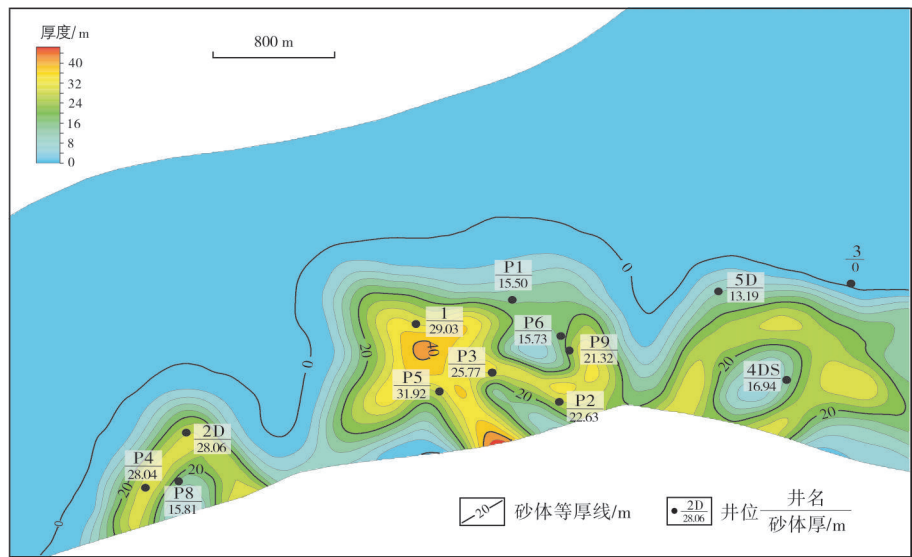


图9 渤海湾盆地歧口凹陷南部沙河街组二段浊积扇砂体等厚图

Fig. 9 Isopach map of sand body of turbidite fans of the Shahejie Formation Member 2 in the south of Qikou Depression, Bohai Bay Basin

## 5 结 论

(1)歧口凹陷南部沙河街组发育一套湖相的浊积扇沉积,砂岩发育但非均质性强,储层砂体范围小、变化快。应用地震顺层切片及地震属性分析技术可以基本确定浊积体呈南东—北西向扇状展布,进一步结合测井约束反演和地质统计反演结果,明确顺物源方向砂体呈前积叠置,分布较连续,垂物源方向砂体分布变化快,多呈透镜状分布。

(2)测井约束的波阻抗反演将高分辨测井信息与低频地震属性信息结合起来,地质统计反演将随机模拟算法与地震储层反演结果相结合,其反演精度可以满足浊积扇油气藏精细描述的需求。本文提出的结合地震属性分析、波阻抗反演和地震测井协同模拟“三步骤”储层预测的技术思路比较适合应用于横向非均质性强而且井网稀、井距大的储层精细预测研究,预测结果可为油田开发井的部署钻探提供地质依据。

### 参 考 文 献

- [1] 李金磊,陈祖庆,王良军,等.相控技术在低勘探区生屑滩相储层预测中的应用[J].岩性油气藏,2017,29(3):110-117.
- [2] 袁红军,高振平,刘民,等.东营凹陷博兴洼陷浊积岩特征及油气藏类型[J].石油地球物理勘探,2010,45(增刊1):167-171.
- [3] 赵密福,信荃麟,刘泽容.惠民凹陷临南洼陷滑塌浊积岩分布规律及其控制因素[J].油气地质与采收率,2001,8(5):14-17.
- [4] 刘建峰,朱筱敏,王敏,等.泌阳凹陷核桃园组三段上亚段滑塌浊积扇沉积特征[J].石油与天然气地质,2011,32(5):743-750.
- [5] 谭俊敏.埕南地区砂砾岩储层储层的预测及效果[J].石油地球物理勘探,2004,39(3):310-313.
- [6] 王庆华.渤南洼陷沙三段浊积岩储层预测技术[J].油气地质与采收率,2014,21(3):48-51.
- [7] 宋宁,林春明,于正军,等.东营凹陷坨71块近源浊积扇沉积特征[J].西安石油大学学报(自然科学版),2005,20(4):39-42.
- [8] 周连德,田晓平,时新磊,等.海上大井距条件下河流相窄薄储层预测:以渤中34-X油田北块1井区明化镇组下段V油组为例[J].长江大学学报(自然科学版),2017,14(11):22-26.
- [9] 郝志伟,朱定蓉,高秋菊,等.济阳坳陷渤南地区沙三段浊积扇体油藏综合描述[J].油气地球物理,2008,6(3):40-43.
- [10] 许崇宝.测井约束地震反演分辨率及反演策略探讨[J].中国煤炭地质,2010,22(8):39-41.
- [11] 吕双兵,张秀丽.测井约束地震反演技术分析与应用[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2009,31(1):207-209.
- [12] 庞崇友,张亚东,章辉若,等.地质统计反演在苏里格气田致密薄砂体预测中的应用[J].物探与化探,2017,41(1):16-21.
- [13] 张一伟,熊琦华,纪发华,等.地质统计学在油藏描述中的应用[M].东营:石油大学出版社,1992.
- [14] 李弘艳,杨子川,韩强,等.属性分析和地质统计反演在塔里木盆地深层薄砂体识别中的联合应用[J].工程地球物理学报,2017,14(2):159-164.

编辑:黄革萍

## Comprehensive prediction of turbidite reservoir of Shahejie Formation in the south of Qikou Depression, Bohai Bay Basin

TAN Jiancai, ZHANG Chunhua, ZHANG Mingwei, LIU Tian, SHAO Yuan

**Abstract:** A set of lacustrine turbidite fan deposit was developed in the Paleogene Shahejie Formation in the south of Qikou Depression, Bohai Bay Basin. The sandstone reservoir is characterized by small distribution range, rapid change and thin interbedding of sandstone and mudstone. Based on the recognition of sequence stratigraphic framework and reservoir genetic type, combined with the vertical fine logging data and lateral intensive seismic data, the “three-step” seismic reservoir prediction was comprehensively carried out, including seismic attribute analysis, well logging constrained inversion and geostatistical inversion. It is shown that sandbodies are superimposed and distributed continuously along with the direction of sediment source, but change rapidly and are mostly lenticular while being perpendicular to the direction of sediment source. Under the control of the footwall in the south of the turbidite fan, the sandbodies in the south are generally thick, and the turbidite channel sandbodies are also relatively thick. The application effect shows that the “three step” reservoir comprehensive prediction technology of seismic attribute analysis, well logging constrained inversion and geostatistical inversion, is more suitable for fine reservoir prediction under the condition of sparse well network and large well spacing.

**Key words:** turbidite; seismic attributes analysis; well logging constrained inversion; geostatistical inversion; reservoir prediction; Shahejie Formation; Qikou Depression

**TAN Jiancai,** First author: Engineer, engaged in the research of oil and gas exploration. Add: P.O. Box 12, Potou District, Zhanjiang, Guangdong 524057, China