

# 地震沉积学在识别重力流沉积体系中的应用<sup>①</sup>

张晶<sup>1,2</sup> 李双文<sup>1,2</sup> 袁淑琴<sup>3</sup> 龙礼文<sup>1,2</sup> 姚军<sup>1,2</sup> 王菁<sup>1,2</sup>

(1.中国石油勘探开发研究院西北分院 兰州 730020;2.中国石油天然气集团公司油藏描述重点实验室 兰州 730020;  
3.中国石油大港油田公司 天津 300280)

**摘要** 探讨地震沉积学方法在识别陆相断陷盆地重力流沉积体系的研究思路。以歧口凹陷歧南斜坡沙一段的深水厚层砂岩为研究对象,在现代沉积学和地震沉积学理论和方法的指导下、分频解释和时频分析技术建立高频等时格架的基础上,通过岩芯相精细描述确定沙一段主要发育重力流水道沉积体系。形成了以古地貌和地震属性约束物源方向,预测重力流水道的宏观展布;地层切片、反演与三维可视化相结合刻画砂体空间展布形态的断陷湖盆沟道型重力流地震沉积学识别方法和技术。应用该方法对歧南斜坡重力流水道砂体进行了精细刻画,为在歧口凹陷广泛发育的湖相泥岩中寻找岩性油气藏开辟新的勘探领域,并在歧口凹陷油气勘探中取得了良好的应用效果,同时也丰富和发展了断陷盆地重力流沉积体系的地震沉积学研究成果。

**关键词** 断陷盆地 地震沉积学 重力流水道 地层切片 沙一段 歧口凹陷

**第一作者简介** 张晶女 1977年出生 博士 工程师 沉积储层和地震沉积学 E-mail:jing\_zhang@petrochina.com.cn

**中图分类号** P512.2 P631.4 **文献标识码** A

## 0 引言

1998年,曾洪流等首次提出了“地震沉积学”概念<sup>[1]</sup>,标志着这门学科的诞生。2004年,曾洪流教授提出地震沉积学是“利用地震资料来研究沉积岩及其形成过程的一门学科;地震岩石学与地震地貌学组成了地震沉积学的核心内容”<sup>[2]</sup>。之后,曾洪流、Schlgaer、林承焰、董春梅、朱筱敏等国内外学者对地震沉积学的概念、方法及技术进行了研究,地震沉积学理论体系逐渐丰富和完善<sup>[3-7]</sup>。近年来,国内学者针对中国陆相复杂储集层开展地震沉积学研究,在油气勘探与开发中取得了显著的效果,但多集中在三角洲和曲流河沉积体系地层中<sup>[8-10]</sup>。湖相重力流体系的地震沉积学研究无论国外还是国内均较少涉及。本文基于歧口凹陷采集、连片处理的高精度三维地震资料,以黄骅坳陷歧口凹陷歧南斜坡沙一段( $E_{s1}$ )的深水厚层砂岩为研究对象,应用地震沉积学的理论和方法,分析了断陷湖盆以沟道型砂砾质碎屑流为主体的重力流沉积的地震相模式,探讨了地震沉积学研究方法在重力流砂体形态刻画和储层预测中的应用,形成了一套适合本地区重力流水道储层预测的思路和方

法,试图丰富和发展地震沉积学研究成果。

## 1 地质背景

黄骅坳陷歧南斜坡是目前大港油田岩性地层圈闭勘探的重点地区之一,主要勘探目的层为沙河街组沙一段( $E_{s1}$ )。歧南斜坡位于渤海湾盆地歧口凹陷西南部,其南部围限于埕宁隆起和羊三木凸起之间,北部夹持于沙三段和沙一段均强烈断陷的南大港断层和张北断层之间<sup>[11]</sup>,总体上为向东北方向倾伏的单斜,面积大约900 km<sup>2</sup>。在歧口凹陷沙一段和沙三段底部构造图上,研究区均位于东西两侧正向构造之间的低洼部位,表明研究区为继承性发育的沉积凹槽,油田上俗称“歧南水道”,同时,区内赵北、张北、南大港等控盆断裂强烈活动,断层落差均在300 m以上,湖盆深陷扩张,沉积坡度陡,具备形成重力流的动力学背景(图1)。

歧南斜坡为三维地震覆盖区,地震资料品质较好,沉积现象丰富,构造相对较简单,地层岩性以砂泥岩为主,比较适合开展地震沉积学的研究工作。因此,笔者在建立高频等时地层格架基础上,应用地震沉积学研究方法和技术,对研究区沙一段进行地震地

<sup>①</sup>中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(编号:2008-030504)与国家重大科技专项(编号:2011ZX05001-003-004)联合资助  
收稿日期:2014-03-26;收修改稿日期:2014-08-04

貌恢复、属性提取、90°相位转换、地层切片及三维可视化等综合研究,并结合岩芯、钻测井资料,精细刻画了重力流水道沉积体的平面展布形态和规模,明确了砂体的分布规律,为研究区油气勘探奠定了坚实基础,并取得了良好的地质效果。

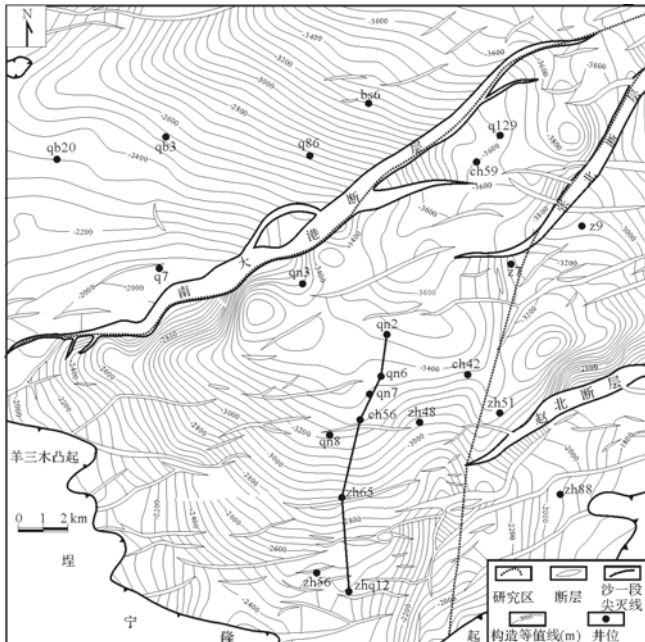


图1 研究区构造平面位置图

Fig.1 Sketch map of structural location in the study area

## 2 高频等时地层格架的建立

### 2.1 结合分频技术和时频分析,建立高频等时格架

建立等时地层格架既是层序地层学的精髓,也是地震沉积学中一系列关键技术应用的前提<sup>[12]</sup>。

区域层序地层学研究表明,黄骅拗陷沙一段为一个完整的二级层序,内部可进一步划分为3个三级层序,分别对应沙一上亚段( $E_{s1}^3$ )、沙一中亚段( $E_{s1}^2$ )和沙一下亚段( $E_{s1}^1$ )<sup>[13-14]</sup>。地震沉积学认为原始地震剖面上同相轴不完全是等时的,其等时性受地震频率控制,对地震剖面进行分频后,产状和位置在不同的分频剖面上表现一致的同相轴其等时性较可靠<sup>[12]</sup>。本文运用小波变换计算不同频率地震体来识别层序界面,通过对地震反射同相轴等时性分析,揭示沙一段( $E_{s1}$ )顶、底界面,沙一中亚段( $E_{s1}^2$ )顶部、底部稳定泥岩具有很好的等时性,可作为地震沉积学研究的参考界面。在识别三级层序界面的基础上,由于不同级别的地质层序体对应着地震剖面上的不同频率特征,利用时频分析技术对关键井按不同频率进行扫描分析可以识别出由大到小的各级层序体,纵向上频率

变化的方向性代表了岩性粗细的变化<sup>[15]</sup>,如图2a中显示了沙一中亚段砂泥岩频谱变化的关系、层序转换点和频率变化点的相对应,将沙一中亚段进一步划分为4期中期旋回砂组,在关键井高频层序划分的基础上,井震结合,对骨架剖面进行基准面旋回划分与对比,并在30 Hz高频地震数据体上识别追踪四级层序界面。通过时频分析的地震旋回划分方法所识别和标定的层序界面与地震资料中的高频成分和测井高频层序划分及旋回分析都吻合的较好,提高了旋回界面识别的准确性,从而建立了研究区高频等时地层格架(图2b)。

### 2.2 最小等时研究单元的确定

最小等时单元是地震相、测井相和岩芯相三者结合时,井震统一对比的最小研究尺度<sup>[12]</sup>。歧南地区沙一段地震反射波主频为20 Hz,频带范围7~35 Hz,砂岩层速度4 400 m/s左右,可以识别的砂岩厚度在25 m左右,沙一中亚段砂组厚度大约在40~70 m左右,砂组正韵律下部、反韵律上部砂组厚大于20 m可分辨,从图2a可以看出,测井上可以划分到准层序或更小的层序单位,但由于地震分辨率较低,准层序界面在地震剖面上无法追踪,为了达到井震研究尺度的统一,将准层序组作为最小等时研究单元<sup>[12]</sup>。

## 3 重力流水道沉积特征及模式

重力流水道砂体是指由重力流或浊流在湖盆内的断凹或沟槽中所形成的带状碎屑砂体,它可以堆积在浅水和深水中<sup>[16-17]</sup>。研究区内重力流水道砂体分布在赵北断层及其以北,主要见于沙一段,是来自南部埕宁隆起物源的辫状河三角洲前缘砂体沿歧南水道滑动、滑塌,在坡折带的下倾方向深水区形成的条带状粗碎屑岩体。

### 3.1 沉积特征

通过对5口取芯井进行系统岩芯观察,结合实验数据和测井相分析,认为沙一段属于典型的重力流水道沉积,具有以下沉积特征:

(1) 沙一中的泥岩以灰色、深灰色为主,平面分布稳定,具有质纯,有机质含量低的特点。而且在构造图上(图1),研究区两侧地势较高地区均为湖相泥岩,表明地势较低的歧南水道处于深水沉积环境。

(2) 岩芯观察沙一段岩石类型以细砂岩和含砾砂岩为主,进一步研究发现,沙一段厚层块状砂岩是由3种不同成因类型的砂岩相互叠置构成:一种为砂砾质碎屑流,以qn6井3 399~3 411 m井段为代表,

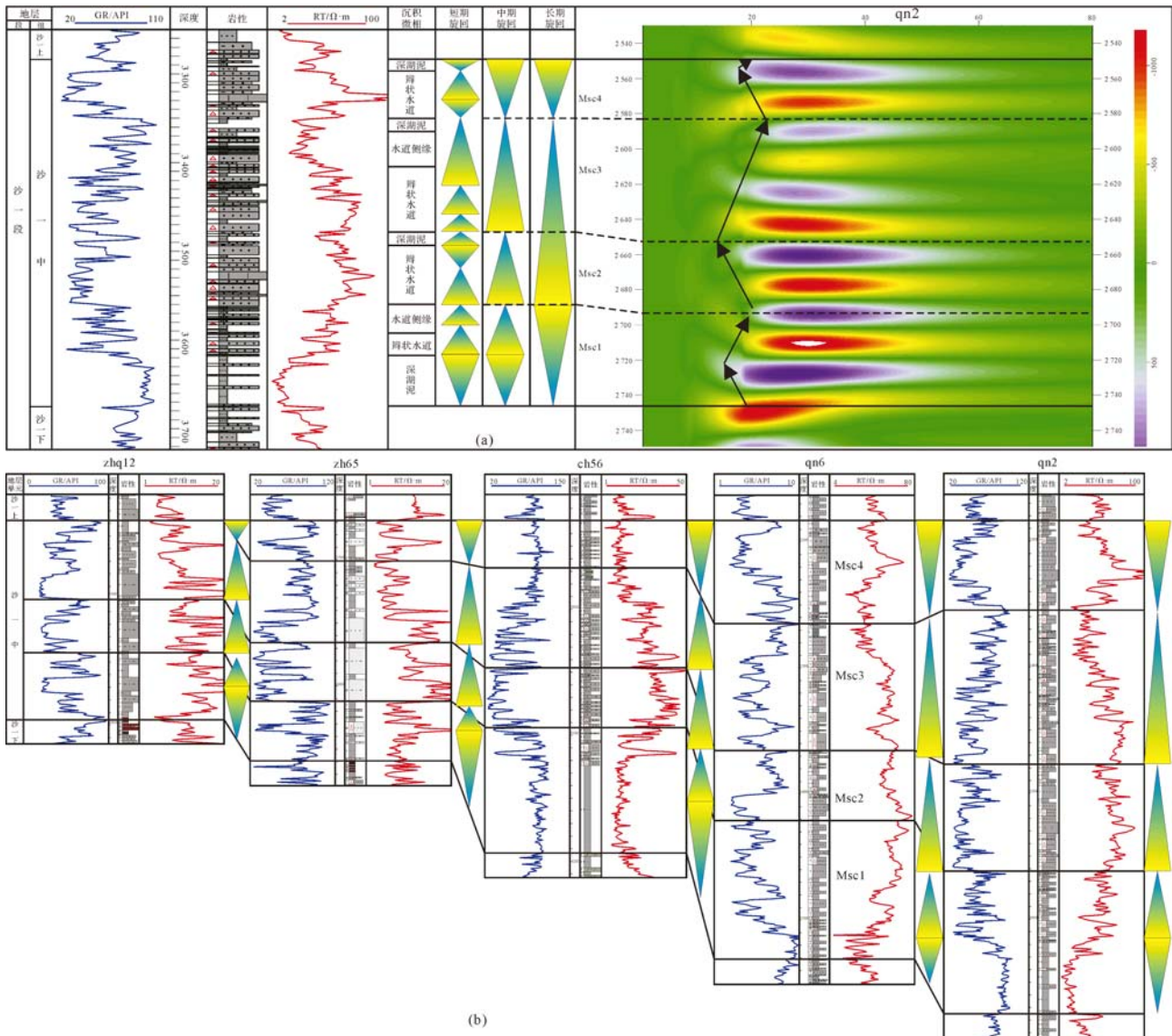


图2 歧南斜坡沙—中亚段高频层序地层格架(平面位置见图1)

a.qn2井时频分析;b.连井等时地层格架

Fig.2 High frequency sequence stratigraphic framework of  $Es_4^1$  in Qi'nan slope

粒度粗,砾石无分选、无粒序漂浮于较细的砂质基质中,砾石成分以碳酸盐为主,偶见直径2~5 cm的紫红色泥砾,沉积构造以块状构造为主(3 410.12 m),显示在重力作用下以基质和杂基(水、泥及砂质颗粒)支撑的块体搬运机制以及以“冻结式”快速卸载堆积的沉积特点<sup>[11]</sup>,在伽马测井曲线上表现为微齿化块状箱型,与下伏岩性呈突变接触,单砂层厚度较大,一般大于1m,主要为4~7 m,在重力流水道水道中心微相中最为常见。第二种为滑塌岩,以qn6井3 293~3 310 m取芯井段为代表,岩性主要为细砂岩、粉砂岩和粉砂质泥岩,表现为砂泥混杂并发生强

烈的同沉积变形,常见包卷层理(3 294.6 m)、泥岩撕裂屑(3 295.00 m)、滑塌变形层理(3 307.86 m)及重荷构造(3 410.12 m)等,其电测曲线齿化明显,单砂层厚度主要为1~3 m,表现为多期钟形、漏斗形或指形的叠加。第三种为浊积岩,典型识别标志为递变层理,本区不太发育,常以砂、泥岩薄互层形式出现,在qn6井3 404.27 m井段岩芯可见平行层理,单砂层厚度为2~4 cm,由于层薄,测井曲线反映微弱(图3a,b)。

(3) 根据岩性和沉积构造特征,研究区的重力流水道沉积常见6种岩相类型,宏观上重力流水道砂体的沉积剖面主要为大套暗色泥岩中发育厚层块状砂



岩相和具变形层理砂泥岩相,总的剖面结构显示出中间粗、上下细的逆—正粒序结构,下部为反旋回、上部为正旋回(图3b)。

(4) 沉积物粒度概率曲线以圆弧形为主,悬浮组分比例高,占30%~40%。据3 200.79~3 403.9 m井段的粒度统计结果显示,C值为120~1 200 μm,M值为35~330 μm,样点在C-M图上大致平行于C=M基线集中分布<sup>[11]</sup>。

### 3.2 沉积模式

歧南斜坡沙一段沉积时期,受张北、南大港断裂构造影响,歧南斜坡发育地势相对较低的断槽或沟槽,发育于盆地缓坡边缘的辫状河三角洲沉积体系顺

着缓坡向湖盆中心大幅推进;到达深湖后,在地震、火山喷发或水动力机制的诱导下,早期沉积的辫状河三角洲前缘沉积物就会顺着这些断槽进行搬运并发生沉积,从而在较深水环境中形成一系列平行盆地长轴方向的、顺断层走向分布的条带状重力流水道沉积,在水道末端地形较平坦的湖盆中心部位还会发育多期叠置的朵体(图3c)。在湖盆内部因大断裂而产生的断凹或沟槽对重力流水道砂体的形成和分布起着重要的控制作用。

通过对歧南斜坡沙一段重力流水道沉积特征分析及沉积模式的建立,为开展地震沉积学研究奠定了基础。

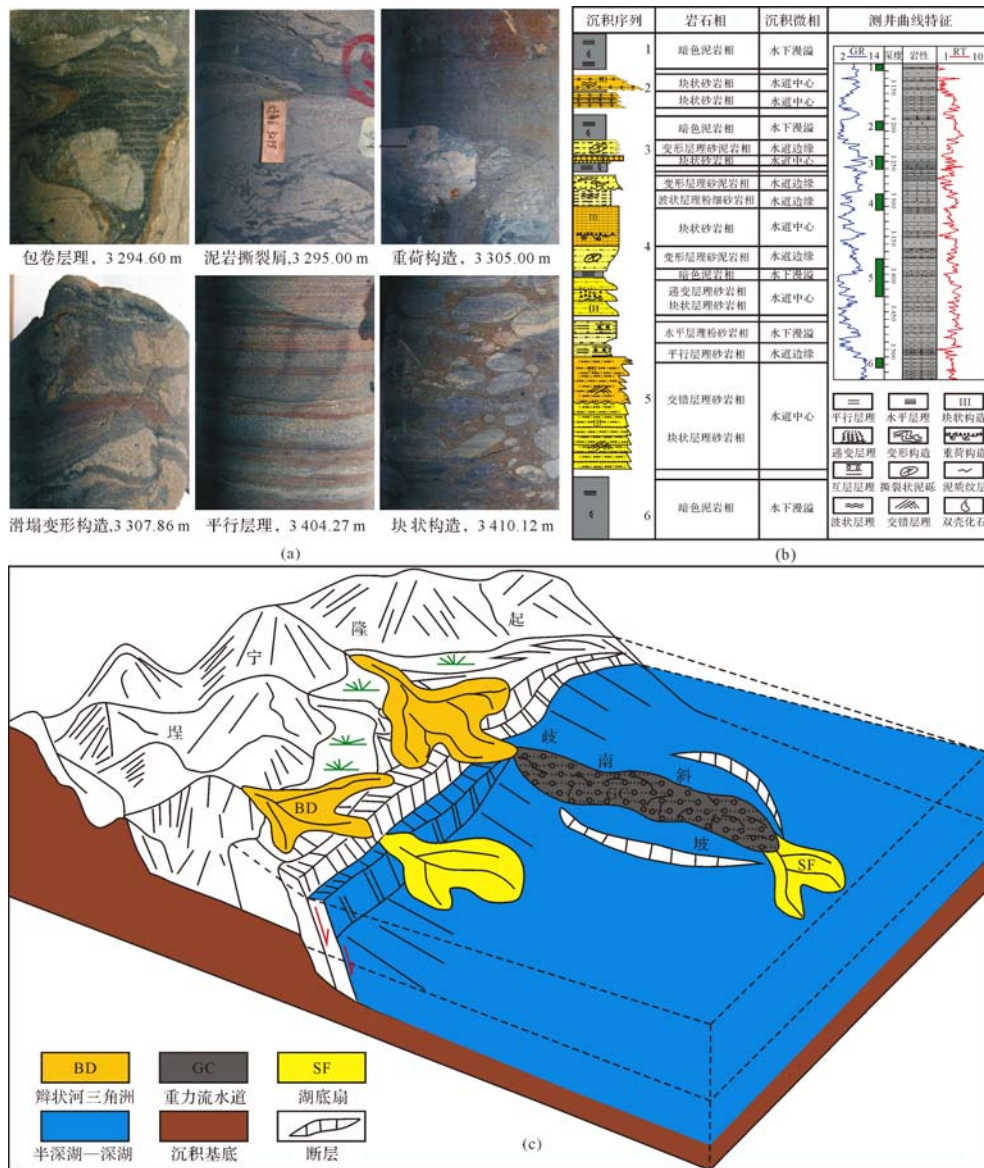


图3 歧南斜坡重力流水道砂体沉积特征及沉积模式

a.重力流水道沉积构造(qn6井);b.重力流水道沉积序列;c.歧南斜坡重力流水道沉积模式示意图

Fig.3 Sedimentary characteristics and depositional sequence of gravity-flow channel in Qi'nian slope

## 4 地震沉积学综合分析解释

地震沉积学研究已经形成了较为规范的流程<sup>[18]</sup>,目前应用最多的是90°相位转换、地层切片和分频技术等。本文在建立高频等时格架的基础上,应用地震沉积学的思路和方法对重力流水道砂体进行精细刻画。

### 4.1 古地貌和地震属性预测重力流水道的宏观展布

在地震反射等时性分析约束下完成了沙一中亚段地震地貌学研究。古地貌恢复对沉积体系配置及储集砂体的展布的研究具有重要意义。常用的方法主要有残余厚度法、印模法、地球物理法、高分辨率层序地层法、沉积学方法等<sup>[19-21]</sup>。目前,古地貌恢复的方法主要从构造恢复和地层恢复两方面入手<sup>[21]</sup>,笔者主要针对研究区地层的恢复,由于古生物是确定古水深的可靠标志,研究区缺乏古生物资料,没有进行古水深校正,本文主要采用去压实校正和正断层断面厚度补偿相结合恢复歧南斜坡沙一中沉积前的相对古地貌,而不是绝对古地貌。由于歧南斜坡沙一段沉积时期构造相对稳定,是一较连续沉积过程,没有长时期的剥蚀,剥蚀量相对较小,研究中仅对斜坡边缘高部位剥蚀厚度明显的井点用地层横剖面对比法进行估算。主要基于压实前后地层骨架体积不变原理,首先分岩性建立压实曲线方程,采用回剥法进行单井地层厚度压实校正,并在钻井压实校正的基础之上,利用地震资料进行井间古地貌趋势补偿<sup>[22]</sup>。同时,对正断层断面厚度进行补偿,避免因断面影响地震地貌出现假的古隆起,主要依据断层上、下盘最远端断点位置,删除断层区域,再应用克里格插值法恢复断层位置地层厚度。

古地貌恢复结果表明,沙一中亚段沉积时期,沿ch59—qn2—qn6—zh65—zh56井一线发育一个大型沟槽,沟槽内地层厚度较大,沙一中地层厚200~400 m,沟槽以外地层厚度减薄<sup>[16]</sup>。大致在zh65—zh47井一带,相当于赵北断层的位置,发育古地形突然变陡的坡折带,在古地貌图上,该带沉积厚度等值线较密集(图4a)。坡折带控制沉积相带分异<sup>[23]</sup>,钻井取芯及测井资料证实,坡折带以南为辫状河三角洲沉积,坡折带之下于qn8—qn6—qn2井一带大规模发育重力流砂体。古地貌恢复可在宏观上预测重力流水道砂体的有利发育区,并且随着古地貌在沉积期上的变化,沉积物的卸载区也发生变化。沙一中沉积早期,研究区赵北断层下降盘qn8井以东的zh48—qn2

井区古地貌上呈现明显的低洼,沉积物在此聚集(图4b),而到沙三中沉积晚期,南大港等控盆断层的强烈活动,沉积中心向西迁移,此时低洼区域主要位于qn8—qn2井区(图4c)。

研究区沙一中地层岩性以砂、泥岩为主,通过对地震属性提取与分析,优选出振幅类、统计类、方位角等多种属性与地层岩性、沉积体系的平面展布细节匹配较好,各属性之间也具有较好的相关性,与钻井资料吻合较好。这主要是由于沙一中以湖相为主体的沉积环境中砂岩波阻抗大于泥岩,砂体具有较高的波阻抗值,在水道两侧,均为低阻抗的湖相泥岩,在沙一中亚段的均方根振幅图上,重力流水道发育区为明显的强振幅的反射特征,大体上存在两个振幅高值条带。主水道一支位于qn8—qn3与qn6—qn2井之间,一支位于zh47—zh48井区(图4d)。

地震地貌与宏观属性相结合显示歧南斜坡沙一中亚段以南部埕宁隆起物源体系为主,古沟槽和坡折带控制沉积体系发育。沙一中砂体分布局限,水道砂体位于赵北断层下降盘或三角洲前方沟槽内,由南向北呈条带状延伸。

### 4.2 水道砂体的标定

对关键井水道砂体进行精细标定,从过qn8井垂直重力流水道的90°相位地震剖面可以看出,qn8井位于水道砂体侧翼,通过井震标定,清晰刻画了水道砂体的地震响应特征:横剖面上多期河道侧向迁移叠置,具有典型水道冲刷-充填反射特征,整体表现为顶平下凸的透镜体,其下伏层的湖盆泥岩遭受侵蚀冲刷,复合砂体内部结构清晰,单期水道表现为短轴状、不连续、强振幅的特征,水道间往往被较厚的泥岩隔层分开。根据地震反射外形的不同可进一步细分为“透镜状”、“梭状”和“蠕虫状”。其中,“透镜状”地震相呈底凹顶凸型,为下切水道的典型地震响应特征,通常对应于水道中心微相。“梭状”地震相呈“顶凹底凹”或“顶平底凹”的“梭状”外形特征,反映单期或多期突发性高能碎屑流对下伏地层的侵蚀冲刷。“蠕虫状”地震相中强振幅、断续、首尾相连呈叠瓦状排列,反映不同时期水道由于垂向叠加,侧向迁移形成的侧向加积式反射特征(图5a)。

### 4.3 地层切片水道砂体识别

依据地震沉积学的基本原理,在垂向上无法识别的地质体,在平面上有可能通过横向分辨率被识别出来<sup>[7]</sup>。通过90°相位地震资料基础上的地层切片技术可以较准确地分析沉积体的沉积特征,能



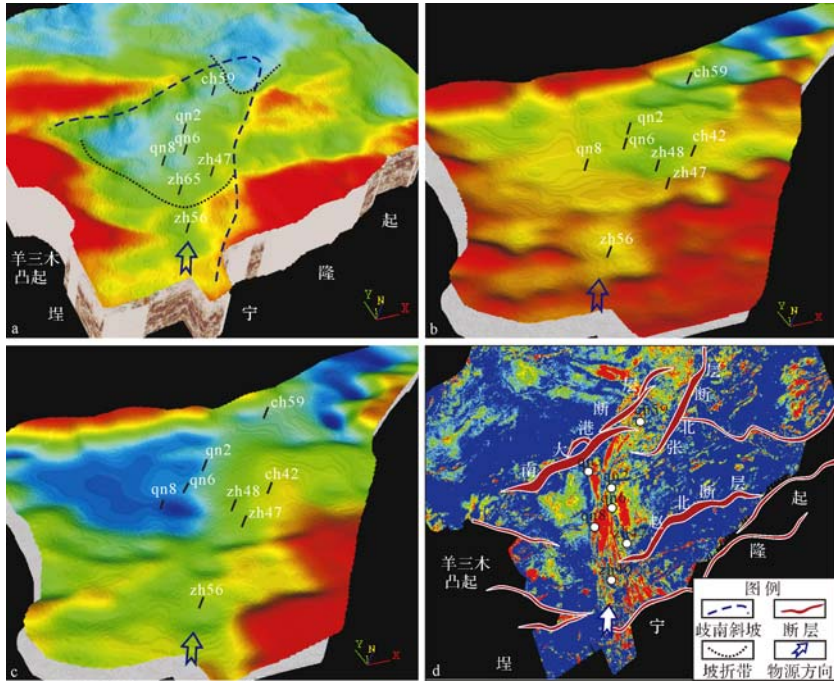


图 4 歧南斜坡沙一中亚段古地貌图和均方根振幅属性图  
 a. 沙一中沉积前古地貌图; b. 沙一中沉积早期古地貌图; c. 沙一中沉积晚期古地貌图; d. 沙一中均方根振幅属性图

Fig.4 Paleogeomorphic map and RMS amplitude attribute of  $Es_1^2$  in Qi'nan slope

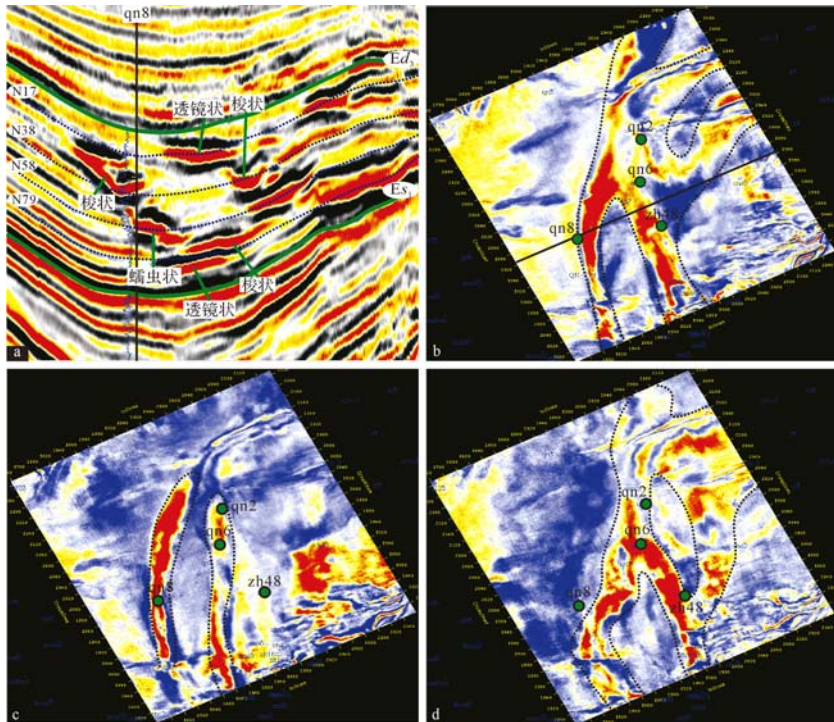


图 5 90° 相位地震剖面与典型地层切片 (沙一段)  
 Fig.5 90° phase and interpretation of stratal slices in Qi'nan slope

更好地研究厚度比地震分辨率薄的沉积体。  
 利用地层切片技术对重力流水道砂体进行精细

刻画,最关键的一步是选出具有地质时间界面意义的参照同相轴<sup>[14]</sup>。因此,在该研究区内,在对地震数据

滤波基础上,应用中石油西北分院研制的 Geosed1.0 软件的地震反射同相轴等时性分析技术,优选出沙一段的顶、底界面及沙一中亚段顶、底界面为等时层界面,在对关键层序界面进行追踪解释的基础上,以 $90^\circ$ 相位化地震数据体为基础,在沙一段内部等比例内插,制作 100 张地层切片,目的是反映自沙一层序底部至顶部地震相的纵向变化特征,结合钻井岩芯校正,开展井震对比检验,明确重力水道沉积微相平面分布与空间演化规律。

从层位上看,研究区重力水道砂体主要位于沙一上底部与沙一中亚段<sup>[16]</sup>。现对挑选的 3 张典型地层切片进行沉积相解释。由于区内沙一段 $90^\circ$ 相位化地震数据体的振幅信息与砂、泥岩具有较好对应关系<sup>[11]</sup>。经过钻测井、岩芯资料证实了地层切片中红色与较厚层砂岩对应,黄色代表薄层砂岩或泥质砂岩,而蓝色对应的是泥岩层。在 No58 地层切片上(图 5b),对应于沙一中下部沉积,此时处于初始湖泛期,来自南部埕宁隆起的物源供给充足,半深湖区重力水道贯穿工区南北,规模大,对下伏地层侵蚀作用显著,是突发事件所致,重力水道明显分为两支,自南向北发育,主水道位于 qn8 以东与 qn6—zh48 井区,到 qn6 井以北两支水道开始合并。到 No38 地层切片上(图 5c),对应于沙一中上部地层切片,已达到最大湖泛期,主水道位于 qn8 和 qn2 井区,规模减小,两条水道近平行呈南北向顺直延伸,前端终于 qn2 井附近,延伸长度约 9.5 km,与 No58 地层切片相比,qn8 井已由水道侧翼到水道中心位置,表明水道向西迁移,而且由于大规模湖侵,砂体分布较为局限。在 No17 地层切片上(图 5d),对应于沙一上中下部沉积,为高水位沉积期,水动力强,而且物源供给充分,重力流砂体发生大规模进积,发育三条辫状水道,水

道较沙一中沉积期明显向东迁移,规模较大,水道砂体形成分叉,合并,连片,并行等多种组合形式。

与常规的沉积相研究结果相比,地层切片更为精细地刻画了重力水道在不同时期的分布范围与演化规律。切片显示,随着时间的推移,水道主体经历了由东而西、再由西而东的演化规律。结合沙一中早晚期的微古地貌分析(图 4b,c),揭示湖盆古地貌沙一中沉积早期较平坦,沉积中心在偏东部 qn6—zh48 井区,到沙一中沉积晚期南大港等控盆断层的强烈活动,导致湖盆最低洼处向西迁移,到沙一上亚段沉积时期,由于构造活动减弱及填平补齐作用,湖盆底形又复平坦的过程<sup>[11]</sup>。

#### 4.4 沉积微相特征

在反演剖面图上,重力水道单砂体形态表现为孤立状,强振幅的特征,单河道边界清晰,垂向上叠置迁移,河道间普遍存在泥质隔层(图 6a)。在透视图上,重力水道砂体规模巨大,为多期水道叠加复合而成,由南向北呈条带状展布(图 6b)。研究区在建立高频等时格架的基础上,应用地震沉积学技术和方法明确了沉积环境、沉积体系宏观展布特征,并对重力水道砂体的内、外部特征进行精细刻画和描述。在此基础上,结合岩芯相、测井相的综合研究成果,得出沉积微相平面分布图。结果表明,沙一中亚段重力水道砂岩体主要分布在张北、南大港断裂带形成的凹槽内和缓坡带辫状河三角洲砂体的前端,顺断层走向呈长条状或带状分布,单期水道宽度约 1~2 km,长度为 5 km 以上,平均厚度 3 m 左右。按照重力流成因机制<sup>[24]</sup>,歧南斜坡重力水道可进一步划分为水道中心、水道边缘和水下漫溢等 3 种沉积微相(图 6c)。通过钻井检验,应用该方法进行沉积微相预测精度和符合率较高,较好的指导了沉积微相平面展布

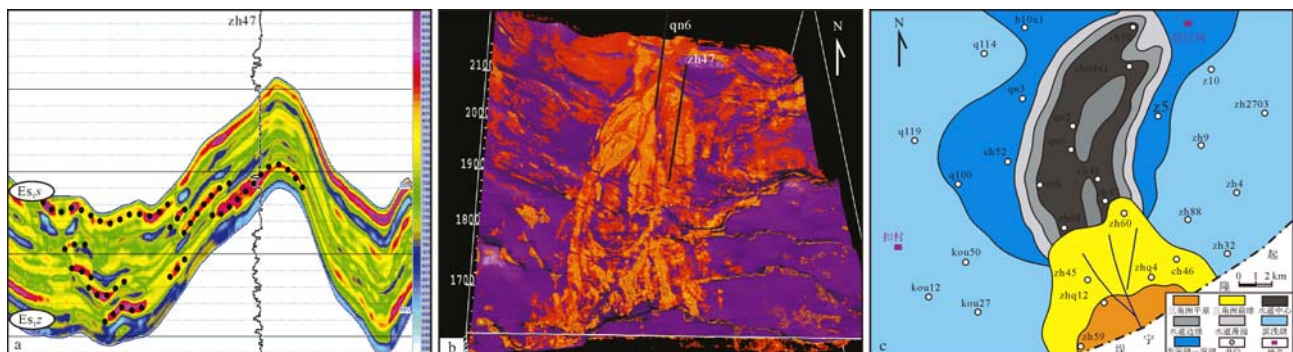


图 6 歧南斜坡沙一中亚段重力水道展布特征

Fig.6 Distribution of gravity-flow channel in mid-Es<sub>1</sub> member in Qi'nan slope

a.过 zh47 井波阻抗反演剖面;b.重力水道立体透视图;c.沉积微相平面分布图

特征研究。

## 5 油气勘探意义和主要结论

研究黄骅坳陷大型陆相断陷湖盆发育的重力流水道砂体的分布对在湖相泥岩中寻找岩性油气藏具有一定的指导意义。

重力流水道呈条带状多期次发育,纵向上叠加、横向上连片,配合歧南斜坡背景,可在上倾方向形成岩性尖灭,或由于断层的遮挡形成岩性、构造—岩性圈闭。砂体为大段暗色泥质岩所夹持,生储盖组合等条件配置良好,又处于油气运移方向上,具备形成岩性油气藏的条件,是歧南斜坡重要的储油砂体类型。近几年研究区以沙一段为主要目的层系,采用地震沉积学的方法进行砂体预测和描述,圈定不同层系岩性圈闭的边界。在此基础上,分批部署钻探 ch59、ch64x1 井均获得工业油气流,砂体预测结果得到了钻井资料的进一步证实。重力流水道是一种重要的深水储层,qn6 井的平均孔隙度为 16.7%,ch59 井的平均孔隙度为 10.9%,且歧南斜坡沙一中亚段埋深处于晚成岩 A 亚期,次生孔隙较发育,相对优质储集层主要分布在水道中心微相<sup>[17]</sup>。目前此类砂体并未大规模钻探,研究区是一个重要的油气勘探区域。

本文以歧南斜坡沙一段发育的带状重力流水道砂体为研究对象,在地震沉积学理论和方法的指导下,形成了以古地貌和地震属性约束物源方向,预测重力流水道的宏观展布;地层切片、反演与三维可视化相结合刻画砂体空间展布形态的断陷湖盆沟道型重力流地震沉积学识别方法和技术,较准确刻画了沙一段重力流水道储层空间展布和内部结构特征,取得了良好的地质效果,具有推广应用价值。同时,重力流水道的发现对深水重力流沉积体系研究具有重要意义,且可为研究区的油气勘探提供新的油气勘探目标。

### 参考文献 (References)

- Zeng Hongliu, Henry S C, Riola J P. Stratal slicing, PartII: Real 3-D seismic date[J]. Geophysics, 1998, 63(2): 514-522.
- Zeng Hongliu, Hentz T F. High frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology: Applied to Miocene, Vermilion Block 50, Tiger Shoal area, off-shore Louisiana[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(2): 153-174.
- Zeng Hongliu, Loucks R G, Frank B L. Mapping sediment-dispersal patterns and associated systems tracts in fourth- and fifth-order sequences using seismic sedimentology: Example from Corpus Christi Bay, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(7): 981-1003.
- Schlager W. The future of applied sedimentary geology [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70(1): 2-9.
- 林承焰,张宪国. 地震沉积学探讨[J]. 地球科学进展, 2006, 21(11):1140-1144. [Lin Chengyan, Zhang Xianguo. The discussion of seismic sedimentology [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(11): 1140-1144.]
- 董春梅,张宪国,林承焰. 地震沉积学的概念、方法和技术[J]. 沉积学报, 2006, 24(5):698-704. [Dong Chunmei, Zhang Xianguo, Lin Chengyan, et al. Conception, method and technology of the seismic sedimentology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(5): 698-704.]
- 朱筱敏,李洋,董艳蕾,等.地震沉积学研究方法和歧口凹陷沙河街组沙一段实例分析[J].中国地质, 2013, 40(1): 152-162. [Zhu Xiaomin, Li Yang, Dong Yanlei, et al. The program of seismic sedimentology and its application to Shahejie Formation in Qikou depression of North China[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 152-162.]
- 张宪国,林承焰,张涛,等.大港滩海地区地震沉积学研究[J].石油勘探与开发, 2011, 38(1): 40-46. [Zhang Xianguo, Lin Chengyan, Zhang Tao, et al. Seismic sedimentologic research in shallow sea areas, Dagang [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(1): 40-46.]
- 李秀鹏,曾洪流,查明. 地震沉积学在识别三角洲沉积体系中的应用[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2008, 35(6): 625-628. [Li Xiupeng, Zeng Hongliu, Zha Ming. Mapping deltaic depositional systems using seismic sedimentology[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2008, 35(6): 625-628.]
- 朱筱敏,刘长利,张义娜,等. 地震沉积学在陆相湖盆三角洲砂体预测中的应用[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 915-921. [Zhu Xiaomin, Liu Changli, Zhang Yi'na, et al. On seismic sedimentology of lacustrine deltaic depositional systems[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 915-921.]
- 刘化清,洪忠,张晶,等. 断陷湖盆重力流水道地震沉积学研究——以歧南地区沙一段为例[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(4): 784-794. [Liu Huaqing, Hong Zhong, Zhang Jing, et al. Seismic sedimentology of gravity -flow channels in a rifted basin: Oligocene Shahejie Formation, Qinan slope, Huanghua depression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(4): 784-794.]
- 刘保国,刘力辉. 实用地震沉积学在沉积相分析中的应用[J]. 石油物探, 2008, 47(3): 266-271. [Liu Baoguo, Liu Lihui. Application of applied seismic sedimentology in sedimentary facies analysis [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(3): 266-271.]
- 苗顺德,冯有良,李秋芬. 黄骅坳陷歧口凹陷古近系层序地层格架及其特征分析[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 697-704. [Miao Shunde, Feng Youliang, Li Qiufen. Sequence stratigraphic framework and characteristics of Palaeogene in the Qikou sag, Huanghua depression [J]. Geoscience, 2007, 21(4): 697-704.]
- 董艳蕾,朱筱敏,曾洪流,等. 黄骅坳陷歧南凹陷古近系沙一层序地震沉积学研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 234-240. [Dong Yanlei, Zhu Xiaomin, Zeng Hongliu, et al. Seismic sedimentology study on Shayi sequence in Qinan sag, Huanghua depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 234-240.]



- 15 陈旭,陈红汉,董玉文,等.地震沉积学研究方法评析[J].沉积与特提斯地质,2010,30(1):54-60. [Chen Xu, Chen Honghan, Dong Yuwen, et al. Methods and application of seismic sedimentology: An overview[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(1): 54-60.]
- 16 刘正华.歧南凹陷沙河街组水道砂体储集性能差异性分析[D].武汉:中国地质大学,2007. [Liu Zhenghua. Study on differential reservoir quality of channel sandbody in Shahejie Formation, Qinan depression[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2007.]
- 17 刘正华,杨香华,汪贵峰,等.歧南凹陷沙河街组重力流水道砂体成岩作用和孔隙演化模式[J].沉积学报,2007,25(2):183-191. [Liu Zhenghua, Yang Xianghua, Wang Guifeng, et al. Diagenesis and pore evolution of gravity-flow channel sandbody in Shahejie Formation, Qinan depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(2): 183-191.]
- 18 曾洪流,朱筱敏,朱如凯,等.陆相拗陷型盆地地震沉积学研究规范[J].石油勘探与开发,2012,39(3):275-284. [Zeng Hongliu, Zhu Xiaomin, Zhu Rukai, et al. Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 275-284.]
- 19 赖生华,李晓宏.断陷盆地沉积体系研究新思路:从古地貌、岩性变化、水体深度到沉积体系[J].沉积学报,2007,25(5):663-670. [Lai Shenghua, Li Xiaohong. A new approach in studying depositional system within rift-subsidence basin: from paleogeomorphology, lithologic change and water depth to depositional system[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 663-670.]
- 20 赵俊兴,陈洪德,时志强.古地貌恢复技术方法及其研究意义——以鄂尔多斯盆地侏罗纪沉积前古地貌研究为例[J].成都理工大学学报,2001,28(3):43-47. [Zhao Junxing, Chen Hongde, Shi Zhiqiang. The way and implications of rebuilding palaeogeomorphology Taking the research of palaeogeomorphology of the Ordos Basin before Jurassic deposition as an example[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(3): 43-47.]
- 21 冯磊,吴伟.井震结合古地貌恢复方法及应用——以辽河滩海西部地区沙一段为例[J].物探化探计算技术,2012,34(3):326-330. [Feng Lei, Wu Wei. Methods and application of paleotopography reconstruction by integration well data with seismic data[J]. Geophysical Computing Technology, 2012, 34(3): 326-330.]
- 22 李绍虎.关于地层骨架体积质量不变压实校正方法——回答漆家福等对这一方法的讨论[J].石油实验地质,2001,23(3):357-360. [Li Shaohu. The compaction correction based on the principle keeping framework grain volume and mass constant[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(3): 357-360.]
- 23 刘桂珍,鲍志东,王英民.松辽盆地西斜坡古沟谷—坡折带特征及其对储层分布的控制[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(6):12-16. [Liu Guizhen, Pao Zhideng, Wang Yingmin. Characteristics of valley-slope break zone in the western slope of Songliao Basin and its control over reservoir distribution[J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(6): 12-16.]
- 24 李顺明,沈平平,严耀祖.沾化凹陷桩西油田古近系东营组重力流水道的沉积特征及形成条件[J].沉积学报,2010,28(1):83-90. [Li Shunming, Shen Pingping, Yan Yaozu. Depositional features and controls on gravity flow channel of Dongying Formation of Paleogene system, Zhanhua sag, Jiyang depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(1): 83-90.]

## Mapping Gravity Flow Depositional Systems using Seismic Sedimentology

ZHANG Jing<sup>1,2</sup> LI ShuangWen<sup>1,2</sup> YUAN ShuQin<sup>3</sup> LONG LiWen<sup>1,2</sup> YAO Jun<sup>1,2</sup> WANG Jing<sup>1,2</sup>

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Northwest Branch, Lanzhou 730020;

2. Key Laboratory of Reservoir Description, CNPC, Lanzhou 730020;

3. Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280)

**Abstract:** This paper discusses the research idea of mapping gravity flow depositional systems based on seismic sedimentology method. Case study on the thick layer sandstone of the first member of Shahejie Formation in Qinan slope, according to the theory and method of seismic sedimentology, this paper puts forward a program of seismic sedimentology suitable for China's continental fault basins with gravity flow depositional systems: first, the high frequency sequence stratigraphic framework are performed through time-frequency analysis and frequency decomposing technology; then application of seismic geomorphology and macroscopic attribute constraint source direction; Combining with core calibration to determine sedimentary facies types; and lastly, stratal slicing, seismic inversion and 3D visualization showing the spatial and temporal distribution of the gravity flow channel, application of this method and techniques to seismic sedimentology study, gravity flow channel sand body is clearly characterized. This study provides favorable exploration areas for finding hydrocarbon reservoirs in lacustrine mudstones in Qikou sag, good results have been produced and enriched fundamental research of seismic sedimentology.

**Key words:** rifted lake basin; seismic sedimentology; gravity flow channel; stratal slices; the first member of Shahejie Formation ( $E_{s1}$ ); Qikou sag