

# 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

朱筱敏 李 洋 董艳蕾 赵东娜 王 欣 朱 茂

(中国石油大学(北京)地球科学学院,“油气资源与探测”国家重点实验室,北京 102249)

**摘要:**地震沉积学是当今国际沉积学研究热点,在薄层砂体勘探开发中已发挥了重要作用。本文根据地震沉积学的基本原理和陆相沉积盆地的研究实践,提出了适合中国陆相沉积盆地薄层砂体识别预测的地震沉积学研究流程,即在高频层序地层格架中,通过 90 度相位转换、分频处理、优选属性并开展地层切片、岩心刻度地层属性切片、识别薄层砂体、确定沉积体系类型和演化、预测岩性圈闭等工作。同时,以黄骅拗陷歧口凹陷沙河街组沉积体系和砂体预测为研究实例,开展地震沉积学研究,明确了沙河街组沙一段三角洲沉积体系及其演化,预测了有利岩性油气圈闭勘探地区。

**关键词:**地震沉积学;研究方法;歧口凹陷;沙河街组;沉积体系

**中图分类号:**P539.1~2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)01-0152-11

## 1 前 言

地震沉积学是在地震地层学和层序地层学的基础上发展起来的一门新兴交叉学科,最早由美国德州大学(Austin)Hongliu Zeng(曾洪流)教授提出创立。1998年,他和 Backus, Henry<sup>[1-2]</sup>等在《Geophysics》上发表利用地震资料制作地层切片的论文,首次使用了“地震沉积学”一词,认为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。2001年,曾洪流等<sup>[3-4]</sup>又将“地震沉积学”定义为利用沉积体系的空间反射形态和沉积地貌之间的关系来研究沉积相、沉积岩和沉积建造的学科。2006年,朱筱敏在全国古地理及沉积学学术会议上认为,地震沉积学是以现代沉积学、层序地层学和地球物理学为理论基础,利用三维地震资料及地质资料,经过层序地层、地层切片、地震属性分析、岩心岩性和沉积相刻度研究,确定地层岩石宏观特征、砂体成因、沉积体系发育演化、储层质量及油气分布的地质学科

(包含地震岩性学和地震地貌学研究内容)。

2005年和2010年先后在美国Houston召开了第一届和第二届国际地震沉积学学术会议,推动了地震沉积学的核心研究内容——地震岩性学和地震地貌学的发展。目前,在国际上已经掀起了地震沉积学的研究热潮,国外已有许多学者在北美、西非、东南亚等含油气盆地开展了一系列的地震沉积学研究,并在油气勘探和开发方面取得了显著的效果<sup>[5-12]</sup>。

中国石油地质研究人员正在将先进的地震沉积学理论方法引入到中国陆相沉积盆地沉积体系和薄层沉积砂体研究中,在岩性油气藏勘探与开发中发挥了积极作用并取得了良好效果<sup>[13-18]</sup>。《地震沉积学》(2011)译文集的出版推动了中国地震沉积学的发展<sup>[19]</sup>。

之所以地震沉积学近期得到国际石油勘探与开发研究人员的关注,是因为地震沉积学能够为含油气盆地精细勘探与开发提供高分辨率层序地层格架、沉积体系类型以及沉积砂体的精细分布特征。与

收稿日期:2012-11-14;改回日期:2012-12-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41272133);“中国西部叠合盆地深部油气复合成藏机制与富集规律”(2011CB201104);国家重大专项课题(2011ZX05001-002)及“油气资源与探测”国家重点实验室项目“地震沉积学与成藏组合评价”联合资助。

作者简介:朱筱敏,男,1960年生,博士,教授,主要从事沉积地质学、层序地层学和地震沉积学研究;E-mail:xmzhu@cup.edu.cn。

传统的地震地层学不同,地震沉积学除了利用盆地规模的地震反射振幅、连续性、内部结构和外部形态以及地震反射终止关系来进行层序和地震相的研究工作外,更为重要的是利用三维地震资料,进行地震属性处理(岩性学和地貌学研究)和沉积体形态解释,有效地识别薄层沉积砂体,在油藏规模上精细研究薄层砂体。

本文将在讨论地震沉积学研究现状和基本原理的基础上,探讨中国陆相盆地地震沉积学研究程序,并以黄骅坳陷歧口凹陷沙河街组为例,开展地震沉积学研究,建立层序地层格架,明确沙河街组沙一段沉积体系类型,确定沉积体系演化。

## 2 地震沉积学研究现状和科学难题

地震沉积学是继地震地层学、层序地层学之后的又一门由沉积学、地层学和地球物理学等学科交叉形成的边缘学科<sup>[1,2,18]</sup>。地震沉积学有别于传统的地震地层学。传统的地震地层学主要是利用地震资料的垂向分辨率和地震数据的纵向特征对地震属性进行刻画,很少考虑与沉积地貌和沉积模型相关的地震数据的横向特征。地震沉积学强调,通常沉积砂体具有沉积宽度远远大于厚度的特点,故可以利用地震资料的横向分辨率(菲涅耳带)、通过地震参数特殊处理识别岩性、利用不同成因类型沉积砂体的地貌形态恢复沉积类型和沉积演化历史<sup>[1,2,18]</sup>。

目前,地震沉积学(Seismic sedimentology)可细分为地震岩性学(Seismic Lithology)和地震地貌学(Seismic Geomorphology)。地震岩性学主要是建立岩性与地震速度关系,将三维地震数据体转换为测井岩性数据体,建立岩性测井与井旁地震道关系,以确保储层段井数据与地震数据的最佳匹配;地震地貌学就是依据不同沉积体系的几何形态和地貌特征,将经地震特殊处理的平面或立体地震数据体进一步转换成沉积类型、指出砂体成因和分布特征,分析沉积体系和砂体形态演化历史。

从地震地层学、层序地层学到地震沉积学的发展,意味着沉积学理论、地震信息和技术在地质学领域应用的逐步深入。

在碎屑岩地震地层学研究中,地质人员常通过地震反射同相轴定性分析寻找地层信息,利用反射振幅和内部结构等参数描述地震相,通过类比地下和露头资料赋予地震相地层和沉积含义。然而,为了

开展地震相分析,地层厚度应足够厚到能在一定程度上描述地震相,这就将地震相分析限制到了100 m厚的地层尺度。三维地震技术明显改善了地震资料的解释精度,可在真界面(或窄时窗)上解释沉积相,这明显提高了沉积相制图的精度(达到了10 m尺度)并减少了解释的多解性。

2001年,曾洪流和 Tucker F. Hentz<sup>[9]</sup>以美国墨西哥湾路易斯安娜海岸老虎滩中新统上部到上新统下部为例,开展了经典地震地层学的地震相分析与地震沉积学地层切片成像分析的对比研究。研究层段具有相似的地震反射特征,地震反射同相轴相互平行到轻微发散,无明显的前积或不整合反射特征。在地震剖面上,隐现的下切和充填特征难以进行区域编图,地震相单元厚度对应400~600 ms(480~720 m)。因为地震相单元分辨率的限制,地层解释常是区域规模的,只能通过类比或区域地震相组合推测地震相的沉积意义。基于高频层序地层学、地震沉积学地层切片原理,对老虎滩三维地震资料进行了再处理和解释,以最大洪泛面作为时间标志层,以3~5 ms旅行时间(据厚度梯度而变化)对三维地震资料进行地层切片采样,研究与不同沉积体系的地貌特征匹配的地震反射平面特征。地层切片表明,河道是最主要的图像特征。它们包括大规模的、顺直的下切谷和小规模的、弯曲的河流和分支河道,进而推断了由老到新的陆棚沉积体系变化。

地震沉积学的关键技术包括:(1)90°相位调整,将地震子波进行90°相位调整,可赋予地震道以岩性意义,有助于识别高级层序界面;(2)地震岩性学研究,建立地震数据与测井岩性关系;(3)地层切片和地震地貌学研究,地层切片的地震波频率取决于目的层的厚度,通过地貌特征的识别、分类,可以改进地震相分析技术,进而依据地貌学特征进行沉积体系的解释与成像。

地震地貌学是当今地震沉积学主要研究热点<sup>[9-12]</sup>。目前,地震地貌学的沉积相识别主要是利用地层切片人为地确定相类型和沉积模式。以地貌特征为基础的地震相自动识别可以大大提高工作效率及质量。曾洪流(2007)<sup>[9]</sup>指出,一个成功的地震地貌学研究不仅需要沉积学、地貌学的知识和区域地质背景的分析,更重要的是地震地貌的成像品质。充分理解地震波如何响应于沉积层序和沉积相的地貌特征至关重要。研究旨在利用地层切片展示地质时间界面

的地震信息。大量的地层切片及其动态演示可有效地研究沉积过程,也可以有效地避免地震信息的假象。

L.Wood<sup>[10]</sup>提出“定量地震地貌学”概念,即通过三维地震资料平面成像,量化分析沉积地貌,了解盆地的演化历史、沉积过程和充填结构。她利用定量地貌学研究南美加勒比海海底天然堤-水道体系,评估海底地貌与天然堤-水道形态之间的关系,建立储层预测模型并阐明了天然堤-水道形态的变化规律。研究表明,局部构造变化与海底坡度因素对水道地貌和分布产生的影响要大于海平面升降因素。坡度与弯度直接相关,水道弯度随着海底坡度的增加而增大。在海底坡度较小的区域,水下天然堤的高度和宽度向下游方向增加。水道弯度、水道宽度、河曲带宽度等参数向下游方向增加。进而建立了深水水道与天然堤结构之间的、可预测的几何形态模型。

地震沉积学在中国的传播和应用始于 2000 年前后,中国石油天然气集团公司勘探开发研究院、中国石油东方地球物理公司和中国石油大学(北京和华东)的研究人员将地震沉积学原理应用于中国陆相沉积盆地,进行了陆相沉积盆地地震沉积学探索性的研究,推动了地震沉积学在中国陆相沉积盆地中的应用<sup>[13-19]</sup>。目前,中国石油地质研究人员主要探索地震沉积学在中国不同类型陆相沉积盆地应用的适应性以及建立不同沉积成因类型的地震沉积学模型。

中国油气勘探已进入复杂油气藏(薄层、深层、非常规油气藏等)精细勘探阶段。在薄层砂体(砂体厚度小于 10 m,甚至厚度为 1 m)之中存有众多油气资源,目前采用常规地质学理论和方法识别薄层砂体是困难的,而当今地震沉积学却能通过地震岩性学和地震地貌学的综合分析,研究沉积岩性、识别薄层砂体,确定沉积类型及其演化。但由于地震沉积学起源于海相沉积盆地厚层砂岩的研究<sup>[1-2]</sup>,而中国陆相盆地研究案例尚不充分<sup>[13-18]</sup>,在中国陆相沉积体系和薄层砂体研究等方面还存许多诸如砂体储层薄、成岩演化历史复杂、岩性-速度关系变化大、地震分辨薄层砂体难等科学和技术难题。

加强地震沉积学在中国陆相沉积盆地中的应用,地震沉积学研究需要解决的科学、技术问题应该是:

1) 陆相沉积盆地岩性与速度关系复杂问题(地震岩性学)

陆相沉积盆地具有沉积体系类型多、沉积相变快、砂体厚度变化大、成岩作用和成岩序列复杂等地

质难题,会造成砂岩对应的声波测井速度或地震速度小于富钙泥岩的相应速度,并且这种特殊的岩性-速度关系会随着沉积类型和埋深而发生变化,这给利用地震速度资料预测沉积体系岩性、识别砂体(特别是薄层砂体)带来了极大困难。

2) 地层切片等时性的复杂性问题(地震地貌学)

在陆相沉积盆地中,复杂地质构造如地层倒转、复杂断裂/逆断层、构造不整合面、断陷盆地边界断层均会影响不同类型地层切片的等时性。地震振幅数据体中的地震同相轴反映的是地层界面反射系数的差异,对应的是地层界面(等时界面)的位置,地震沉积学研究的是等时界面之间的沉积特征和沉积演化规律。如果某些地震属性的地层切片是等时界面的响应,便可利用该属性的地层切片开展地震地貌学研究,否则就不能实现地震地貌学分析,也不能识别沉积体系类型以及薄层沉积砂体。

3) 不同沉积类型地球物理响应模型的多样化问题(沉积学解释)

陆相沉积盆地多变的沉积体系类型和不太连续的砂体分布,造成不同沉积类型的地球物理响应模型不同,所以不同成因类型的砂体地震沉积学特征也存在差异,这种差异既表现在地震响应特征上,也表现在研究方法、技术的差异上。目前尚缺少针对不同沉积类型砂体的地震沉积学研究方法体系以及提高沉积学解释精度的多种沉积类型的地震沉积学模型。

4) 地震解释陷阱问题(地震沉积学)

地震沉积学是对三维地震资料的一种精细解释,所要求的精度比地震地层学解释至少高出一个数量级。随之而来的问题是,一些过去在地震地层学解释中基本上可以忽略的地震假象,现在变成了可能影响地质分析结论的陷阱。若处理不当,它们会被当作沉积现象加以解释,导致错误的地质结论。因此,要不断提出多种成因类型的地震沉积学模型,不断消除地震沉积学解释的陷阱。

### 3 地震沉积学基本原理和基本流程

地震地层学是以海平面周期变化、二维地震资料研究为基础的。我们习惯于在地震剖面上识别同相轴和地震相,并在平面上进行沉积相解释。事实证明,许多高分辨率层序和薄层砂体在地震剖面上只是被检测,并未被分辨,所以这种方法对高分辨率层序地层和薄层砂体研究而言效率低下且易造成混淆<sup>[9]</sup>。地震

沉积学通过创新地震岩性学、地震地貌学和地震解释程序而提供了一种新的解决方法;在建立高分辨率层序地层格架基础上,先在平面上成像并解释沉积体系,然后在三维空间内研究沉积体系演化。

地震沉积学研究基于以下二个基本原理:(1)一般沉积体系都具有宽度远远大于厚度的特征(Galloway, 1983);(2)用地震垂向分辨率在垂向上无法识别的地质体,在平面上有可能通过地震横向分辨率被识别出来。

三维地震勘探技术的快速发展为薄层砂体成像提供了无与伦比的基础,在有些情况下,地震垂向分辨率可达到 2~3 m。以地震数据层面属性为基础,通过对大量层面属性研究,优选出振幅、方位角、相似性、方差等多种与沉积岩性(或其他岩性)、沉积体系层面几何形态有关的属性。结合层面三维可视化技术、地质历史时期构造形态恢复等技术,展现不同地质历史时期的沉积体系形态特征,依据沉积砂体形态和沉积模式对地震平面属性资料(地层切片)进行直观解释,开展平面沉积地貌分析。当地貌分析与地震平面分析结合后,可以得到重要的沉积地质信息。最后,通过岩心刻度、钻测井和实验数据的综合研究,可以进一步分析沉积岩性、沉积形态以及沉积体系发育演化等地质特征,建立高精度的沉积体系演化模式。

利用地震沉积学再造高分辨率层序地层格架、识别储层岩性、沉积体系、预测油气储层分布是三维地震解释方法的一个重要革新。地震沉积学提供了一种新的解释方法:考虑地震水平分辨率和地震平面属性特征,先在平面上成像并依据地层岩性、沉积地貌特征解释沉积体系,然后研究其空间层序地层学和沉积学意义。这种方法大大加快了地层岩性和沉积体系解释速度并能大幅提高解释精度。我们不再需要用肉眼追踪单个四级、五级层序界面,进而恢复高分辨率层序地层格架下的地层岩性和沉积体系分布演化。因为盆地沉积物的系列地层切片提供了地层岩性和沉积体系在高分辨率层序格架内发育演化和保存的映像。

经过 10 多年地震沉积学在中国陆相沉积盆地的探索应用<sup>[13-19]</sup>,地震沉积学已基本形成了较为规范的研究程序:即(1)利用 Vail、Cross、或 Galloway 的层序地层学原理<sup>[20]</sup>,尽可能在地震资料上高精度地识别高频层序地层、最大湖泛面、准层序组或准层

序界面,综合多种地质和地球物理资料建立高精度(或高频层序)等时地层格架,通过合成记录(VSP)建立并实现地震资料与井筒资料层序地层划分的一致性;(2)提高原始地震资料的质量,拓宽频带范围,提高地震资料的主频,开展提高地震分辨率的处理,对地震三维数据体,进行子波相位频率调整(常常是 90°相位调整)<sup>[1-2]</sup>,以建立薄层砂体与地震反射同相轴之间的对应关系,建立测井岩性数据体;(3)根据地层产状,优选地震数据的切片方法,因陆相沉积盆地具有地层分布差异大、沉积相变快的特点,常从时间切片、层切片和地层切片中选用美国学者曾洪流教授提出的地层切片方法<sup>[1-2]</sup>,来研究非水平、非等厚楔状地层的平面地震属性特征;(4)根据地震调谐厚度与地震频率之间的关系,开展分频地震参数处理和统计,优选能够反映薄层砂体的最佳频率,以便识别薄层砂体;(5)优选能够反映陆相沉积盆地地层岩性、厚度、砂体形态等沉积特征的地震属性,如振幅、波阻抗等多种地震参数,批量处理经 90°相位调整的地震资料,获得大量的地震属性切片(目前主流地震沉积学软件为美国 ReconTM 软件);(6)建立复杂岩性-速度关系模型,开展地震岩性学研究。①开展系列岩石物理实验,确定不同岩性与实验声波速度之间关系,建立实验声波速度与不同岩性之间的模型;②利用声波测井等资料,建立不同岩性与声波速度之间关系模型,确定不同岩性、声波速度随深度变化的规律,发现异常点;③对比研究实验声波速度、测井声波速度与不同岩性之间关系模型的差异性;通过成岩作用类型及其序列分析确定这种差异性的主要控制因素;④建立综合反映实验声波速度、测井声波速度与不同岩性之间关系的模型,实现不同岩性对地震波速度的标定,确定地震反射同相轴、最大地震振幅或波谷、波峰与岩性之间的关系,将三维地震数据体转换为测井岩性数据体,开展地层岩性综合研究;(7)根据岩性与地震反射同相轴之间关系,利用岩心资料,刻度地震属性切片的岩性和沉积相,进而开展井震对比以及多井对比检验,建立地震属性平面特征与关键井岩心之间的沉积对应关系;(8)应用地震地貌学,结合不同沉积体系的几何形态和地貌分析,可以将经地层切片等特殊处理的平面或立体地震数据体进一步转换成沉积砂体或沉积相类型,开展典型沉积体系的地貌特征及其与沉积体系关系研究,确定沉积体系类型和砂体形态,探

索定量研究地震地貌学特征;(9)利用多层段高精度地震岩性学和地震地貌学的研究成果,建立高精度沉积体系和沉积砂体演化模式,恢复沉积体系和砂体发育演化历史;(10)开展沉积盆地成藏要素、油气富集程度与层序地层格架、沉积体系、砂体类型之间关系研究,综合分析岩性圈闭勘探有利地区,为油气勘探开发提供精细的砂体分布演化格架。

#### 4 岐口凹陷沙河街组地震沉积学研究

经过近 40 年的石油勘探开发,黄骅坳陷不同程度地进入了油气精细勘探和开发阶段。与早期相比,油气勘探和开发的对象发生了根本变化,即由原来的厚层砂体勘探开发,转变成薄层砂体(常小于 5 m)的精细勘探开发。人们不仅要了解这种类型砂体的沉积成因,更重要的是要确定该类砂体的形态和厚度及其演化特征。地震沉积学为解决该问题提供

了新途径。故本文以黄骅坳陷岐口凹陷沙河街组沙一段为研究对象,针对沙一段沉积体系发育演化和砂体分布开展地震沉积学研究,建立地震沉积学模型,阐明在高分辨层序地层格架中沉积体系发育演化规律、明确薄层砂体的空间分布特征,为油气精细勘探开发提供地质依据。

##### 1)地质背景

黄骅坳陷位于燕山褶皱带以南,沧县隆起以东,埕宁隆起以西,大体呈南西-北东向展布,面积为 17 000 km<sup>2</sup>。黄骅坳陷经历了初始断陷、扩张断陷、稳定发展、衰减和坳陷五个发展阶段,形成了孔店潜山构造带、南大港潜山构造带、北大港潜山构造带及板桥断裂构造带等八个正向构造带和岐口凹陷、板桥凹陷、沧东凹陷、南皮凹陷、北塘凹陷等五个凹陷,构成了隆凹相间的构造格架(图 1)。

黄骅坳陷系由古生界、中生界和新生界 3 个沉

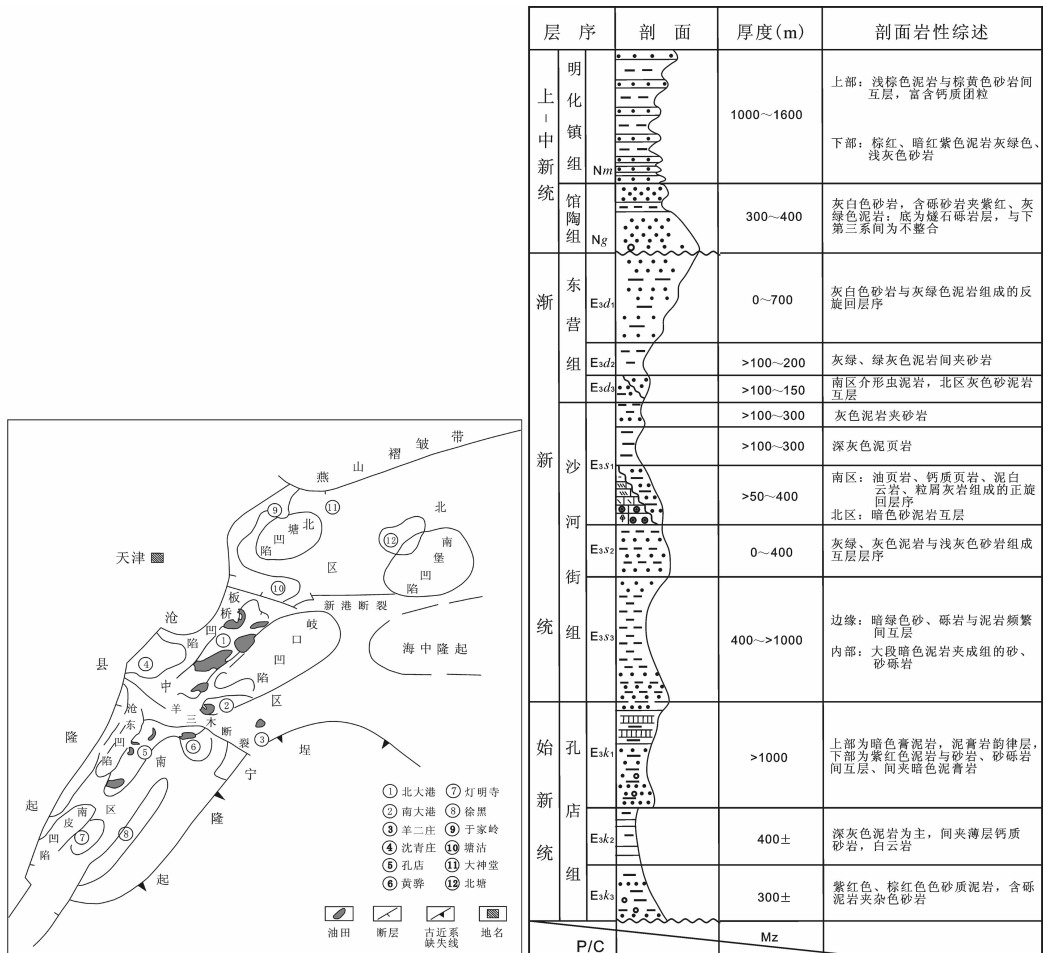


图 1 黄骅坳陷构造单元划分和地层序列(据大港油田, 1999)

Fig.1 Tectonic unit division and stratigraphic sequence of Huanghua depression (after Dagang Oil Field, 1999)

积层系组成的叠合盆地。新生界自下而上依次发育古近系的孔店组、沙河街组和东营组,新近系的馆陶组、明化镇组以及第四系(图 1)。沙河街组厚 500~3 500 m,从下到上可依次划分为沙三段、沙二段和沙一段。其中沙一段沉积分布范围较广,一般厚 100~1 000 m。沙一段上部为大片连续暗色泥岩,厚 300~400 m;中下部为多旋回砂、泥岩互层,并出现油页岩、钙质页岩、颗粒灰岩等特殊岩性。

2)建立高分辨层序地层格架,明确沙一段沉积类型

选用 14 条区域地震剖面 and 歧口凹陷 2 964 km<sup>2</sup> 三维地震剖面,90 余口井资料及其合成地震记录,综合考虑介形虫种属组合变化特征,依据层序和体系域界面的地震反射终止关系以及岩心序列特征,将沙河街组沙一段划分为 3 个三级层序(地质年代 45~40 Ma)(图 2)。进而依据沙河街组沙一段岩性、粒度、沉积构造、沉积序列、古生物组合、测井相和地震相的综合分析,确定歧口凹陷沙一段主要沉积类型为辫状河三角洲、重力流和湖泊沉积体系。三角洲的沉积物来自自西南侧埕宁隆起(图 3)。

3)90°相位调整,建立地震反射同相轴与砂岩之间关系

歧口凹陷沙一段地震沉积学重点研究工区(图 3 方框)的三维地震资料品质好、地震资料有效频率 12~50 Hz,主频 36 Hz。同时发育三角洲,不发育断裂系统。

众所周知,常规地震处理的最终成果常是零相位地震数据,它的优点包括子波对称、中心瓣(最大

振幅)与反射界面一致、具有较高的分辨率。但是,如果地震反射来自于薄层砂体,则薄层砂体与地震同相轴之间没有直接的对应关系,因此标准的零相位地震数据不适合做薄层砂体的岩性解释。采用 90°相位子波转换处理的地震数据就可以克服零相位子波数据的不足,即将地震响应的主瓣(最大振幅)移动使之与薄层中心相对应。这样,地震响应对应于薄层砂岩层,而不是对应于薄层砂岩的顶、底,从而使得主要的地震同相轴与地质上限定的砂岩层一致,解释工作也就变得相对容易。显然,经 90°相位转换调整后的地震数据使地震道近似于波阻抗剖面,从而提高了地震资料的可解释性(图 4)。

4)分频反演处理识别薄层砂体

由于薄层砂体厚度与地震主频之间关系多变,因此需要开展三维地震资料分频处理,以发现识别薄层砂体(最佳调谐厚度)对应的地震波频率范围。

歧口凹陷沙河街组沙一段砂体厚度一般在 3~5 m,地震资料垂向分辨率不能满足识别砂层顶、底的需要。因此,采用分频反演技术进行储层预测,具体研究思路是首先针对目的层段沿层开取小时窗,然后在单砂体厚度对应的地震分辨率附近进行频率成分扫描,直到获得最佳图像,即地质分析认为最可能的沉积模式时为止。

本次研究计算了频率 0~250 Hz 的频谱能量数据,每一个频率段得到一张能量平面分布图,从而得到一系列频率切片。在频率 24~36 Hz 时,三角洲砂体的能量最强,成像最清晰,而逐渐向高频方向或低频方向成像越来越模糊。这说明频率 24~36 Hz 为识

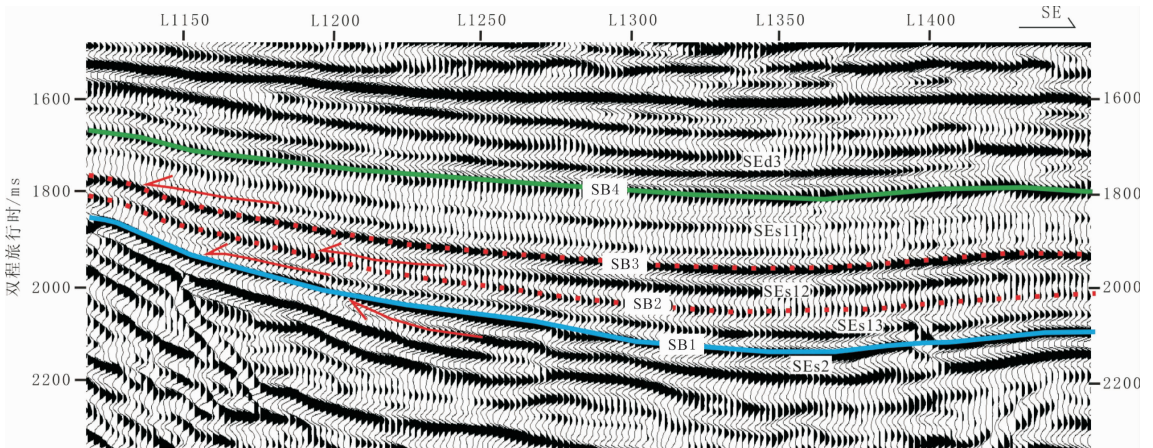


图 2 歧口凹陷沙河街组沙一段层序地层划分(T1732 测线)

Fig.2 Sequence stratigraphic division of S I member of Shahejie Formation in Qikou sag (T1732 survey line)

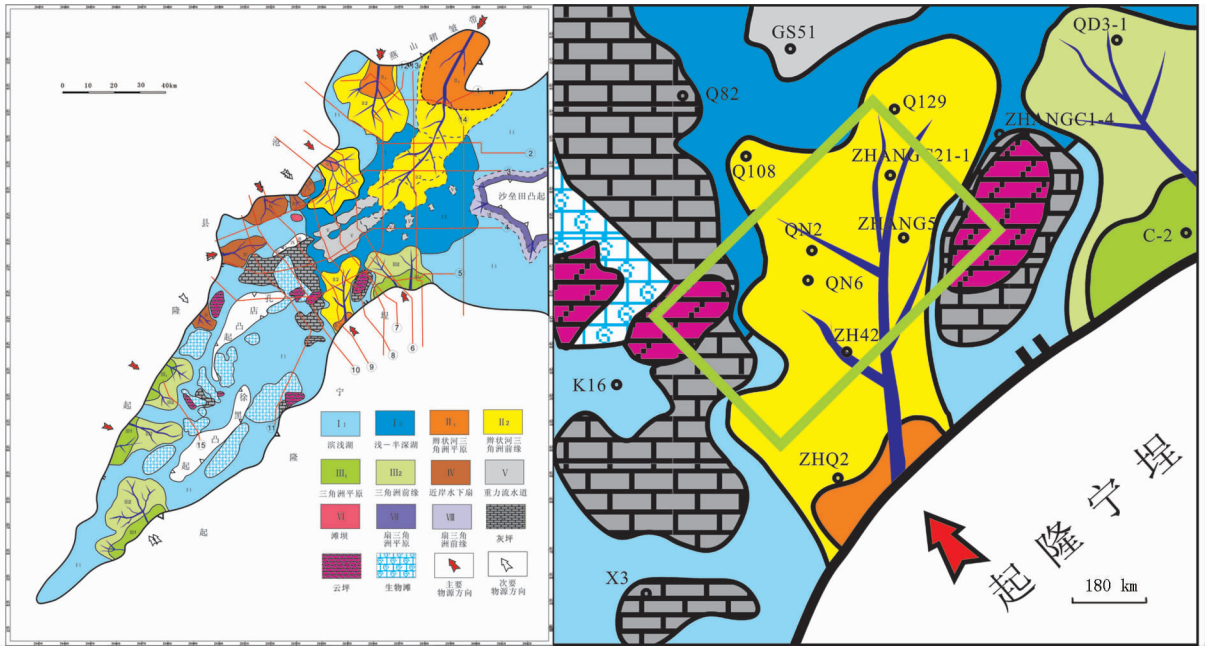
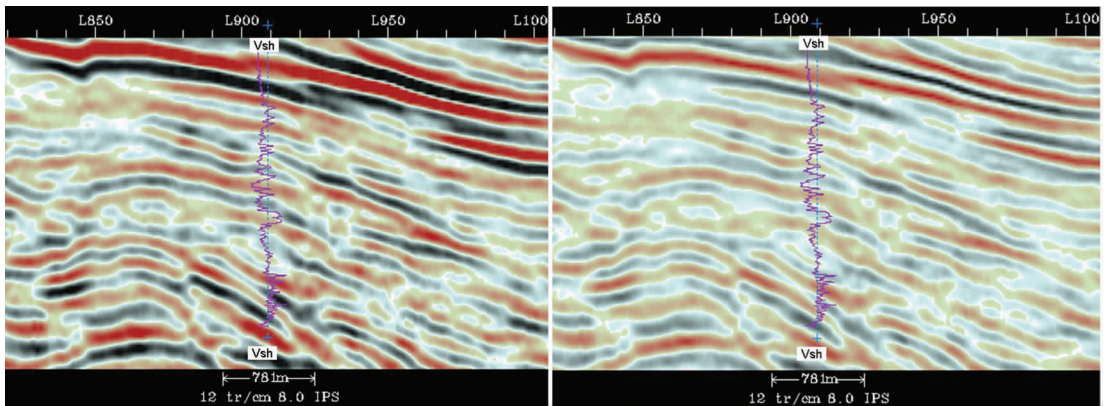


图3 黄骅拗陷(左)和岐口凹陷(右)沙一段沉积体系分布图(方框为三维地震工区)  
 Fig.3 The distribution of depositional systems of Huanghua depression (left) and Qikou sag (right)



a-标准零相位地震剖面

b-90°相位地震剖面

图4 岐口凹陷沙一段地震剖面90°相位调整  
 (Vsh为泥质含量曲线,向左表示砂岩,向右表示泥岩)

Fig.4 Phase shift of seismic cross section of Qikou sag  
 (Vsh- Volume of shale curve calculated from baseline-shifted GR or SP logs, left- Pure sandstone; right-Pure mudstone)

别薄层砂体的最佳地震频率。

5) 优选地震属性,开展地层切片技术处理

岐口凹陷沙河街组沙一段具有厚度横向变化较大的特征,因此要优选地层切片技术(图5)。考虑到岐口凹陷地质特征复杂,为了减少地层切片穿时现象,必须在精细的层序地层格架中进行内插,并在地震剖面上进行横向追踪闭合,获得较多的具有地质

时间界面意义的等时地震同相轴(图5)。然后利用地震沉积学专用 Recon 软件,提取相对敏感和稳定、并能反映地质特征及其变化规律的沿层振幅属性,获得系列地层切片平面图(图6)。

6) 岩心刻度地层切片,确定沉积类型及其演化在获得系列地层切片的基础上,要赋予地层切片上不同地震属性沉积学意义,必须对地层切片进

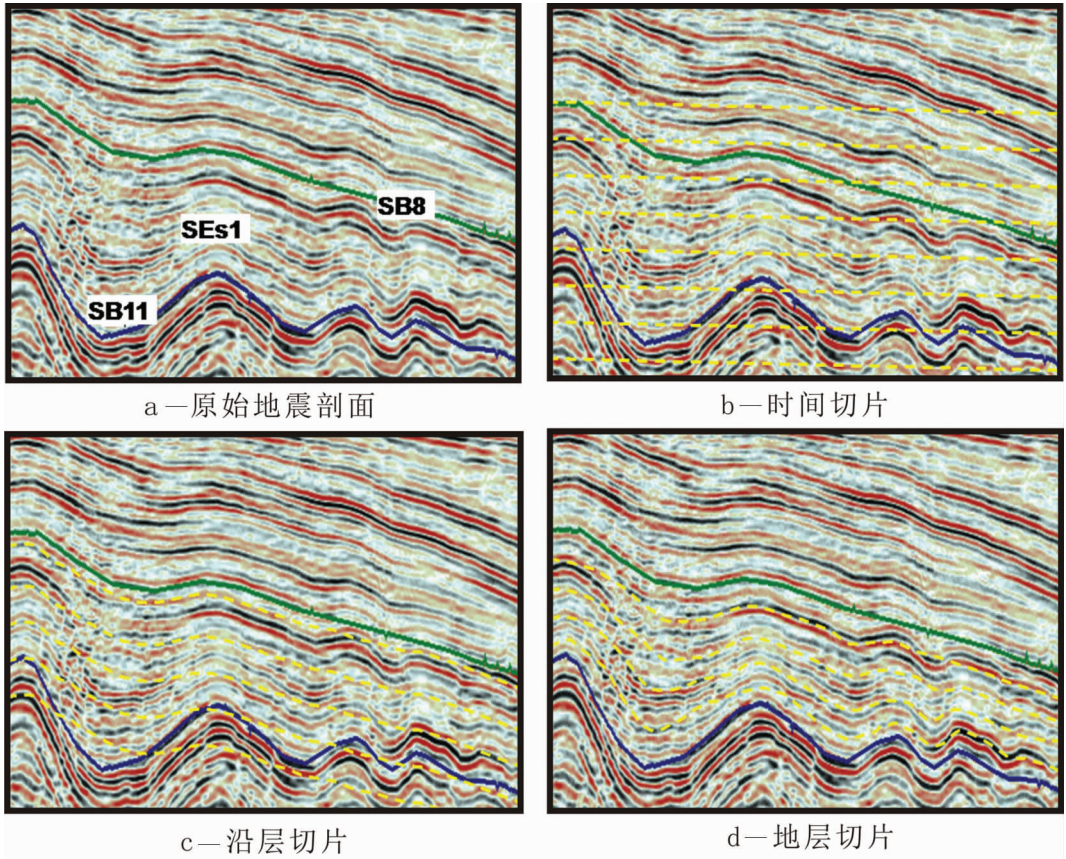


图 5 歧口凹陷沙一段典型地震测线不同切片方法示意图  
 Fig.5 Different slicing methods of typical seismic cross section in S I member of Qikou sag

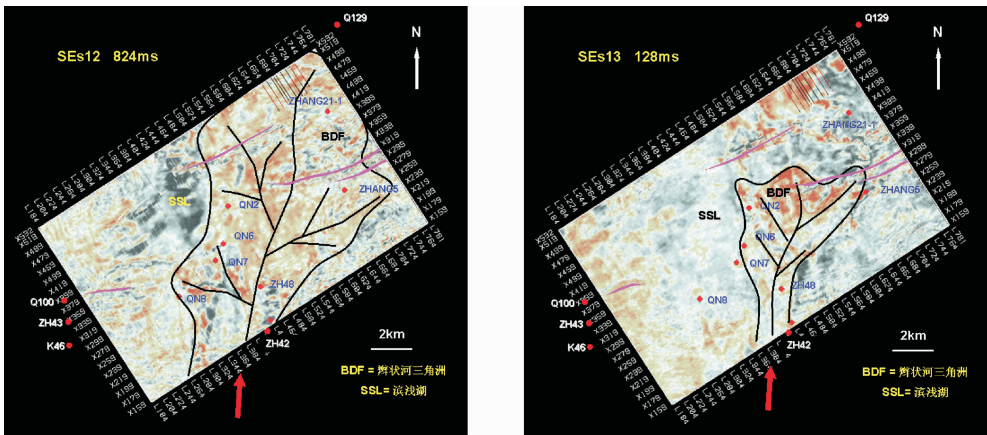


图 6 歧口凹陷沙一段典型地层切片(左位于沙一段中部,右位于沙一段下部)  
 Fig.6 Typical stratal slices of S I member of Qikou sag

行岩心标定和地震地貌学研究,才能对歧口凹陷沙一段典型地层切片进行沉积微相和砂体解释,从而获得砂体平面变化图谱。

歧口凹陷沙一段主要发育辫状河三角洲沉积,包括水下分支河道、河口坝及席状砂等沉积微相(图

3)。多井岩心资料分析表明,沙一段辫状河三角洲前缘岩性为互层灰色泥岩与浅灰、棕褐色砂岩,砂岩单层厚度多在 3~5 m,个别厚者达 10~20 m,沉积旋回主要表现为反韵律特征(图 7)。

由于已对地震剖面进行了 90°相位调整,从而



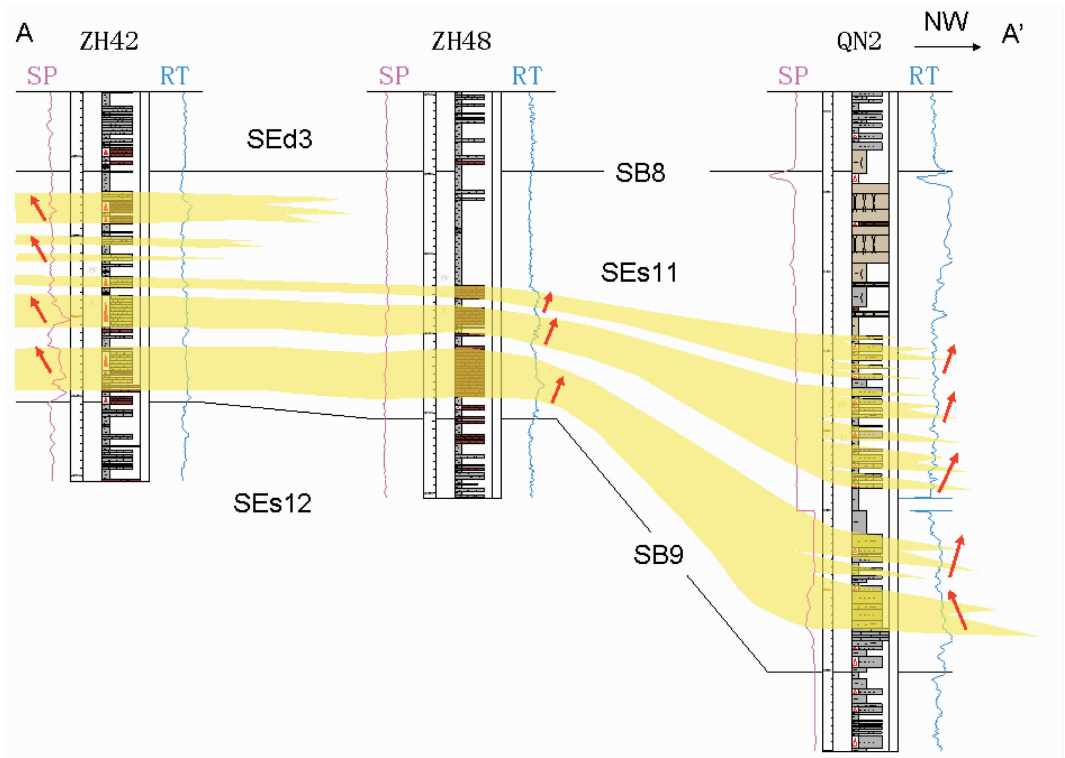


图 7 岐口凹陷沙一段关键井沉积韵律和砂体连通图

Fig.7 Sand bodies connectivity and sedimentary rhythm of key wells of S I member in Qikou sag

使得地震振幅与测井岩性之间具有了极好的对应关系。经过岩心刻度，确定地层切片中强的负振幅区(红色)对应较厚层砂岩，弱的负振幅值区(红色)代表的是薄层砂岩或泥质砂岩，而正的振幅值(黑色)对应的是泥岩层(图 6)。

图 6 是沙一段典型地层切片，可以看出，在沙一段沉积时期，受来自于西南方向埕宁隆起的物源影响，沙一段早期物源供给相对少，砂岩单层厚度较小(厚度多小于 3 m)(图 6 右)，泥岩含量相对多，砂地比较低，辫状河三角洲沉积的范围较小；沙一段中晚期物源供给相对充足，砂岩单层厚度较大(5 m 左右或更大)，砂地比值增高，辫状河三角洲沉积范围扩大。

显然，通过对沙一段地震属性进行动态解释，可以确定沙一段不同沉积时期砂体的高精度沉积演化过程，从而可以在小于地震 1/4 波长条件下获得沙一段沉积环境变化信息以及薄层砂体的形成过程、几何形态的信息。

## 5 结 论

岐口凹陷沙河街组沙一段地震沉积学研究表

明，构造背景相对简单、三维地震资料品质好是地震沉积学研究的基础。只有利用品质好的三维地震资料，才能制作反映陆相盆地多种沉积体系类型的地层切片，通过地震岩性学分析，在平面上赋予地震属性的岩性学和沉积学含义，在平面上勾勒出地质体或薄层砂体的分布形态(地震岩性学研究)，达到精细研究沉积微相的目的。

由于陆相沉积盆地发育多种相变快、砂体沉积厚度薄的沉积体系。不同沉积成因的沉积砂体在平面上具有不同的沉积几何形态，如三角洲砂体具有舌状、朵叶状或鸟足状外形，曲流河河道砂体具有蛇曲几何形态等。因此，可以通过岩性标定和几何形态分析，综合判断沉积体类型(地震地貌学研究)。

地震沉积学研究起始于 20 世纪 90 年代末期，目前仍处于发展阶段，还需要加强地震沉积学原理、识别薄层砂体技术和多种类型盆地沉积体系实际运用的研究，还要加强不同类型陆相盆地和不同沉积类型砂体的地震沉积学(地震岩性学和地震地貌学)研究，建立地震沉积学研究规范和陆相沉积盆地多种沉积体系的地震沉积学模板，不断开展定量地震

沉积学研究,以及开展不同储层岩性(含沉积岩、岩浆岩以及变质岩)地震沉积学图库的综合研究,以服务于中国陆相沉积盆地的油气精细勘探开发工作。

### 参考文献(References):

- [1] Zeng Hongliu, Backus M M, Barrow K T, et al. Stratal slicing: Part I. Realistic 3-D seismic model [J]. *Geophysics*, 1998, 63 (2):502-513.
- [2] Zeng Hongliu, Henry S C, Riola J P. Stratal slicing, part II: Real 3-D seismic data; *Geophysics*, 1998, 63(2):514-522.
- [3] Zeng Hongliu, Hentz T F, Wood L J. Stratal slicing of Miocene-Pliocene sediments in Vermilion Block 50-Tiger Shoal area, Offshore Louisiana [J]. *The Leading Edge*, 2001, 20(4):408-418
- [4] Zeng Hongliu. From Seismic Stratigraphy to Seismic Sedimentology: A Sensible Transition. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 2001, 11:413-420.
- [5] Carter D C. 3-D seismic geomorphology: Insights into fluvial reservoir deposition and performance, Widuri field, Java Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(6):909-934.
- [6] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. *Journal of Sedimentary Research*. 2003, 73(3):367-388.
- [7] Neuhaus D, Borgomano J, Jauffred J C. Quantitative Seismic Reservoir Characterization of an Oligocene-Miocene Carbonate Buildup: Malampaya Field, Philippines. *Seismic Imaging of Carbonate Reservoirs and System*, 2004, AAPG Memoir 81:169-183.
- [8] Zeng Hongliu, Backus M M. Interpretive advantages of 90°-phase wavelets: Part 2-Seismic applications [J]. *Geophysics*, 2005, 70(3):17-24.
- [9] Posamentier H W, Wood L J. *Seismic Geomorphology - Applications to Hydrocarbon Exploration and Production*. London: The Geological Society, 2007:1-263.
- [10] Wood L J, Kristine L. Quantitative seismic geomorphology of a Quaternary levee-channel system, offshore eastern Trinidad and Tobago, northeastern south America [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93 (1):101-125.
- [11] Hubbard S M, Smith D G., Nielsen H. Seismic geomorphology and sedimentology of a tidally influenced river deposit, Lower Cretaceous Athabasca oil sands, Alberta, Canada [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(7):1123-1145.
- [12] Zeng Hongliu, Loucks R, Janson X. Three-dimensional seismic geomorphology and analysis of the Ordovician paleokarst drainage system in the central Tabei Uplift, northern Tarim Basin, western China [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(12):2061-2083.
- [13] 林承焰, 张宪国, 董春梅. 地震沉积学及其初步应用 [J]. *石油学报*, 2007, 28(2):69-71.  
Lin Chengyan, Zhang Xianguo, Dong Chunmei. Concept of seismic sedimentology and its preliminary application. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2):69-71(in Chinese with English abstract).
- [14] 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. Seismic Sedimentology Study on Shayi Sequence in Qinan Sag, Huanghua Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*. 2008, 26(2):234-240(in Chinese with English abstract).
- [15] 张义娜, 朱筱敏, 刘长利. 地震沉积学及其在中亚南部地区的应用 [J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(1):74-79.  
Yina Zhang, Xiaomin Zhu, Changli Liu. Seismic sedimentology and its application in south of Central Asia [J]. *Petroleum Exploration and Development* [J], 2009, 36(1):74-79(in Chinese with English abstract).
- [16] 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 Yina, et al. On seismic sedimentology of lacustrine deltaic depositional systems [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27 (5):915-921 (in Chinese with English abstract).
- [17] 朱筱敏, 董艳蕾, 胡廷惠, 等. 精细层序地层格架与地震沉积学研究——以泌阳凹陷核桃园组为例 [J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(4):615-624.  
Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, Hu Tinghui, et al. Seismic sedimentology study of fine sequence stratigraphic framework: a case study of the Hetaoyuan Formation in the Biyang Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32 (4):615-624 (in Chinese with English abstract).
- [18] 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 等. 陆相坳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 post rift basins [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3):275-284(in Chinese with English abstract).
- [19] 朱筱敏, 曾洪流, 董艳蕾(译), 地震沉积学, 北京:石油工业出版社, 2011.  
Zhu Xiaomin, Zeng Hongliu, Dong Yanlei (translator). *Seismic Sedimentology* [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2011 (in Chinese).
- [20] 朱筱敏. 层序地层学, 东营:石油大学出版社, 2000.  
Zhu Xiaomin. *Sequence Stratigraphy* [M]. Dongying:University of Petroleum Press, 2000(in Chinese).

## The program of seismic sedimentology and its application to Shahejie Formation in Qikou depression of North China

ZHU Xiao-min, LI Yang, DONG Yan-lei, ZHAO Dong-na, WANG Xin, ZHU Mao

*(China University of Petroleum, Beijing 102249, China)*

**Abstract:** Seismic sedimentology has aroused much attention among geologies both in China and abroad in that it plays an important role in the exploration and production of thin reservoirs. According to the theory of seismic sedimentology and practices in continental basins, this paper puts forward a program of seismic sedimentology suitable for China's continental basins with lots of thin sand bodies: first, the high resolution sequence framework is built up and seismic data are converted to 90° phase, then seismic processing within different frequencies and stratal slicing with different seismic attributes were conducted, lithologies in cores are correlated with stratal slicing, thin sand bodies are determined in plane with seismic geomorphology so as to define depositional systems and their evolutions, and lastly, the favorable lithological traps are predicted. With the Shahejie Formation of Qikou depression as the studied object of seismic sedimentology, the authors determined the distribution of delta of Shahejie Formation in Qikou depression and forecasted the regions of beneficial lithologic traps.

**Key words:** seismic sedimentology; program; Qikou depression; Shahejie Formation; depositional system

---

**About the first author:** ZHU Xiao-min, male, born in 1960, doctor, professor, mainly engages in the study of sequence stratigraphy and seismic sedimentology; E-mail: xmzhu@cup.edu.cn.