

文章编号: 1000-0747(2012)03-0275-10

# 陆相拗陷型盆地地震沉积学研究规范

曾洪流<sup>1</sup>, 朱筱敏<sup>2</sup>, 朱如凯<sup>3</sup>, 张庆石<sup>4</sup>(1. 美国德克萨斯大学奥斯丁分校; 2. 中国石油大学(北京); 3. 中国石油勘探开发研究院;  
4. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院)

基金项目: 中国石油天然气集团公司国际合作项目“中国松辽盆地地震沉积学工业化应用研究”(2009B-0102-01)

**摘要:** 总结近年来中国陆相地震沉积学研究经验, 结合松辽盆地齐家地区研究实例, 探讨陆相拗陷型盆地地震沉积学研究规范。地震沉积学所用基础资料包括三维叠后数据体、周边二维区域地震测线和地质背景资料以及工区钻井、测井资料。工作流程强调地震、地质资料综合解释以及地震沉积学分析、层序地层学分析和地震地层学分析的相互配合。工作流程包括井震对比建立层序地层格架、子波相位调整、追踪等时标志层、地震分辨率分析、岩石物理关系分析、地震参数筛选、地层切片处理、地震沉积相分析以及综合评价等基本步骤。要求的成果图件则包括联井基于地震剖面、层拉平相对地质时间剖面、地层切片、沉积相图等十余种。这些步骤在松辽盆地齐家地区白垩系青山口组的实例研究中得到了充分体现, 其研究思路、分析资料和成果图件可作为在其他陆相盆地, 尤其是拗陷型盆地进行地震沉积学研究的参照。图 11 参 29

**关键词:** 拗陷型陆相盆地; 地震沉积学; 研究规范; 工作流程; 薄层; 浅水三角洲

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

## Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins

Zeng Hongliu<sup>1</sup>, Zhu Xiaomin<sup>2</sup>, Zhu Rukai<sup>3</sup>, Zhang Qingshi<sup>4</sup>

(1. Bureau of Economic Geology, Jackson School of Geosciences, The University of Texas at Austin, Texas 78712, USA; 2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration &amp; Development, Beijing 100083, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing 163712, China)

**Abstract:** This study summarizes the research experiences of non-marine seismic sedimentology in recent years in China and uses Qijia area, Songliao Basin, as a template to establish general guidelines for seismic sedimentology. Basic data sets include stacked 3D seismic volumes, 2D regional seismic lines, data for regional geologic settings, and well data. The workflow emphasizes the integration of seismic and geologic interpretations and balanced use of seismic sedimentology, sequence stratigraphy and seismic stratigraphy. Basic steps include well-to-seismic tie for the establishment of sequence framework, wavelet-phase adjustment, picking of geologic-time parallel seismic events, seismic resolution analysis, petrophysical analysis, selection of seismic attributes, stratal slicing, seismic depositional facies analysis, and applications to exploration and development. Expected maps range from key interpreted well-seismic sections, flattened relative geologic-time sections, stratal slices, and depositional facies maps, etc. The workflow is applied in the study of the Cretaceous Qingshankou Formation in the Qijia area, Songliao Basin, which can be used as a reference for seismic sedimentologic study in non-marine basins, especially in postrift depression-type basins in China.

**Key words:** non-marine postrift basin; seismic sedimentology; guidance; workflow; thin bed; shallow-water delta

## 0 引言

地震沉积学是继地震地层学和层序地层学之后出现的一个新的学科<sup>[1-3]</sup>, 它是通过地震岩性学、地震地貌学的综合分析, 研究地层岩性、沉积成因、沉积体系和盆地充填历史的学科<sup>[4]</sup>。近年来, 地震沉积学在中国得到了较为广泛的应用<sup>[5-21]</sup>, 但由于其仍处在发展阶段, 早期研究主要讨论国外海相盆地研究实例和工作流程<sup>[3,22-23]</sup>, 而中国陆相盆地研究案例较少<sup>[9,15,21]</sup>。而且, 中国非海相盆地与海相盆地相比, 无论在盆地层

序充填模式、沉积体系特征, 还是在岩石物理和地震反射特征上都有显著差别, 因而地震沉积学的研究方法和工作流程也应有所不同。

近年来, 笔者以松辽盆地齐家地区 600 km<sup>2</sup> 三维工区为研究对象, 开展了高分辨率层序地层学、沉积学、成岩作用、地震岩性学、地震地貌学等方面研究, 为制定地震沉积学研究规范提供了参考。

## 1 地震沉积学方法

根据地震沉积学的定义, 地震岩性学和地震地貌

学是地震沉积学的两个核心组成部分。利用地震岩性学方法可将一个三维地震数据体转化为一个地层岩性数据体,对这种地层岩性数据进行地震地貌学分析,可以将物理意义上的地震属性参数转换为含有岩性标记的高分辨率沉积相平面图。对多层沉积相平面图按地质时间顺序综合分析,可得出有关盆地沉积史、有利砂体分布的地质信息。

地震岩性学主要利用地震资料确定或预测主要沉积岩性。在目前技术条件下,实现常规地震资料岩性标定最经济、最有效的方法是地震道  $90^\circ$  相位化<sup>[24-25]</sup>。 $90^\circ$  相位子波将地震响应的主波瓣最大振幅点移至薄层中间点,此时的地震响应对应于薄层中点,这使主要地震同相轴对应地质上定义的储集层单元,如砂岩层。如此,在  $0\sim 1$  个波长范围,地震极性即可与岩性相对应。虽然当地层厚度小于四分之一波长时准确度不高,但地层的顶底面可以被确定在振幅过零点上。当将上述方法应用于实际资料时,地震同相轴和薄地层岩性单元之间将建立一一对应关系,这将使沉积岩性的地震解释工作变得更容易<sup>[3]</sup>,如区分砂岩和泥岩。这些优点是零相位及其他相位地震资料所不具备的。另外,地震资料的岩性转换也可通过地震反演技术、地震参数分析和时频分析技术实现。

地震地貌学主要依据现代沉积学和主要沉积砂体的地貌形态,推断沉积类型。沉积体系作图要借助合适的地层切片工具以及以此为基础的地质体追踪和三维显示工具。建立准确的时间地层格架是地震地貌学作图成功的关键,应选择产状基本不随地震资料频率变化而变化的同相轴,或至少是来自最大洪泛面或特殊岩性的地震反射作为等时地层格架中的标志同相轴;避免将角度不整合面用作标志界面或使角度不整合面出现在两个标志界面之间;避免不经检验将任何已追踪层位直接当作标志界面使用。至于具体地层切片方法,应根据特定的构造和地层条件选择:如果地层是席状且平卧的,时间地层切片可能足以满足需要;如果地层是席状但不平卧,沿层切片是适合的;如果地层既不是席状也不是平卧的,则必须选择地层切片,或两个标志层之间的等分切片<sup>[1-2]</sup>。在实际应用时,地层切片法是首选方法,因为其对所有上述 3 种情况都适用。在地层简单、地震资料质量很好的情况下,有时也可以用地震异常体自动追踪的方法直接获取地震参数平面图。

## 2 资料准备和预处理

地震沉积学强调利用可获得的所有地质、地球物

理资料进行综合解释。三维地震数据体是地震沉积学研究的基本资料。钻井资料可用于地层标定,在地震解释中至关重要。区域地质资料和其他地球物理资料也可提供有价值信息,应充分利用。总之,进行地震沉积学研究时一般应收集下列资料:①叠加偏移三维地震数据体,若无三维数据体,密集二维地震数据网亦可,地震资料信噪比应达中等以上,避开地质构造复杂区,如泥底辟、盐底辟、密集断层带等;②周边地区的区域二维地震测线以及井位分布图;③地震测井及垂直地震剖面(VSP)资料;④区域地质资料,包括工区及邻区的地层、古生物、岩性、大地构造分区等资料;⑤工区钻井资料,包括岩心、实验室分析数据(岩性、组分、速度、密度、孔隙度、渗透率、成岩矿物和胶结物等)、岩屑录井、测井曲线(伽马、自然电位、电阻率、声波、密度、地层倾角、井壁成像等)、油气层解释及试油资料等;⑥已有地震参数数据体(如“三瞬”、相干地震处理成果)和反演波阻抗数据体。如有必要,测井资料和地震资料在使用前应进行预处理,以实现资料标准化,改善资料信噪比和分辨率,从而提高工作效率和研究质量。具体内容包测井曲线校正和标准化,计算泥质含量曲线、波阻抗曲线、拟声波曲线,地震子波零相位标定,地震资料去噪处理和提高分辨率处理等等。

## 3 地震沉积学工作流程

常规高分辨率层序地层学和沉积学研究主要依靠高分辨率(厘米级别)的钻井和测井资料,传统的地震地层学研究利用的则是低垂向分辨率( $10\sim 30\text{ m}$ )地震剖面,二者在分辨率上的巨大差异是造成资料综合解释困难的主要原因。地震沉积学的关键作用在于利用三维地震薄层( $1\sim 10\text{ m}$ )检测能力强的优点,弥补二者的不足。因此,在实际工作流程中(见图 1),除进行地震沉积学研究外,还应进行层序地层学/沉积学、地震地层学方面研究,以使各种资料互相补充。

①建立联井基于地震剖面网。井-震剖面设计应包括沿盆地倾向和走向 2 个方向的剖面,其数量视盆地构造、沉积复杂程度而定,以能满足地震沉积相研究要求为原则。如果条件允许,亦应参考周边大地构造及区域二维地震解释成果。这些联井基于地震剖面除用于地震沉积学研究外,亦可用于层序地层学/沉积学研究 and 地震地层学研究。

②测井-地震联合对比,建立高精度层序地层格架。测井曲线与地震剖面的对比包括制作典型井地震

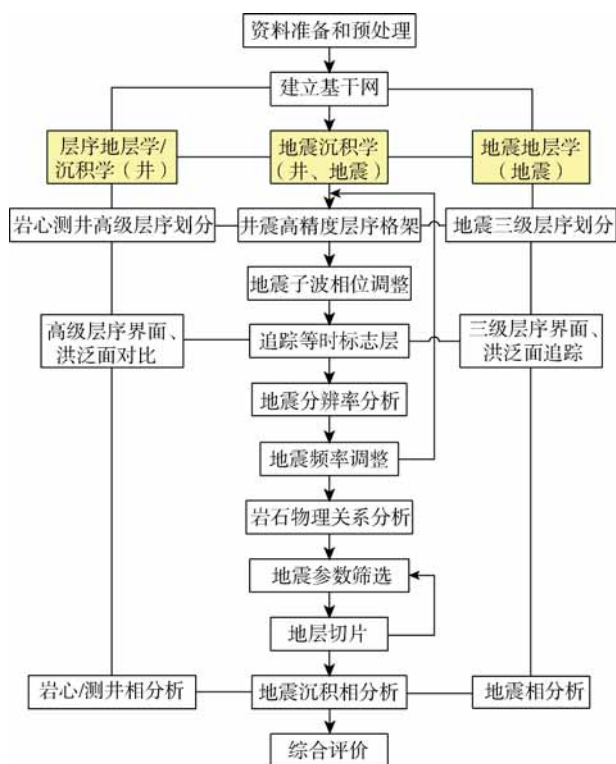


图1 陆相盆地地震沉积学工作流程

合成记录和进行测井曲线深-时转换。如果有可能，应参考使用地震测井及垂直地震剖面资料。在基干剖面上同时标注岩心-测井资料高级层序划分、地震资料三级层序划分以及地震资料频率成分调整结果，经综合分析后得出高精度层序格架。由于地震频率调整(步骤⑥)滞后于本步骤，因此这是一个逐步迭代的过程。

③地震子波相位调整。根据储集层相对厚度决定最佳子波相位，对地震意义上的薄层(单层厚度小于四分之一波长)，子波相位应调整到 $90^\circ$ ；对地震厚层段(单层厚度大于四分之一波长)，子波相位调整到零相位。

④追踪地震地质等时标志层。选择与地震波频率变化无关的同相轴所代表的地质标志层，如最大洪泛面凝缩层、平行不整合和特殊岩性层(煤、薄层灰岩)等进行追踪，形成地震地质时间格架。追踪时应参考测井曲线层序地层对比时识别的标志层和地震层序划分时使用的地震标志层。

⑤地震分辨率估算。包括用频谱分析估计地震波有效频率范围和主频；用井资料制作正演模型以确定薄层时间分辨厚度极限(即地震分辨率极限，它是地震沉积学最小作图单元)以及地震切片检测最小厚度(即地层切片上薄层识别的最小厚度，或切片检测率极限)；与用测井曲线识别的高级层序对比，以评估用地震沉积学研究高级层序的可行性。

⑥地震频率调整。为实现高等级层序地层格架与地震资料的最佳配合，应尽可能将地震沉积学最小作图单元调整到高级层序或高级层序体系域的平均厚度范围。这一配合可用调整地震资料主频的手段来实现。当地震资料主频增大时，地震沉积学最小作图单元将变薄；反之则变厚。为避免旁瓣增大，保持地震子波地层分辨能力，处理中应尽量保持子波宽频特征。

⑦岩石物理关系分析。用岩心的实验室测定数据或关键井测井曲线统计目的层段不同岩性间的波阻抗对应关系及极性/振幅对应关系；确定用地震参数预测岩性的可行性。

⑧地震参数筛选。对多种地震参数进行试验，以确定预测岩性和沉积相的最佳地震属性参数或参数组合。如可能，还应对反演数据体进行试验。结果需在地层切片上对比验证。

⑨地层切片处理。用专用软件或用简单内插法制作地层切片；建立地层切片和高级层序的对应关系；必要时将处理结果反馈到步骤⑧。以地层切片或等时反射上的振幅异常为种子，在一定时窗内进行地质异常体自动追踪也属这类处理。

⑩地震沉积相分析。根据地层切片上显示的地震岩性学信息和地震地貌特征，以及岩心-测井相标定结果，辅以剖面地震相特征，解释沉积相、沉积环境和沉积体系域分布。

⑪储集层和石油地质评价。综合多学科研究成果，预测砂体厚度、分布范围、储集层质量、地层岩性圈闭等。

## 4 成果图件

地震沉积学研究成果主要反映为各工作流程产生的关键图件。地震沉积学研究应提供下列基本图件(但不局限于此)：联井基干地震剖面网平面图；典型井的声波合成记录及其与井旁地震道对比；井-震三级层序划分的联井基干地震剖面；三级层序和高级别层序的时间或深度等厚图；典型井岩心描述图、岩心照片和单井沉积综合图；典型井的测井相分类图；高级别层序的钻井沉积相综合剖面图；高级别层序的钻井沉积相平面图；典型井的岩性-波阻抗(速度)关系图；地震同相轴极性/振幅-岩性标定图；地层切片处理前(双程时间)后(相对地质时间)地震剖面对比图；高级别层序或地震沉积学最小作图单元的代表性地层切片(振幅或其他能反映岩性的地震参数)图；高级别层序的地震沉积相综合剖面图；高级别层序或地震沉积



学最小作图单元的地震沉积相平面图；其他各种应用图件，如地震成岩相图、砂体分布图、岩性圈闭分布图、生储盖组合图、成藏组合图等。

5 研究实例

以松辽盆地齐家地区白垩系青山口组为例说明地震沉积学工作流程，主要讨论其中的重要步骤和技术要求。

5.1 研究区概况

松辽盆地白垩系泉头组至嫩江组发育典型的大型坳陷型陆相湖盆沉积<sup>[26-28]</sup>。与松辽盆地早期和中国东部其他盆地的断陷沉积不同，此期基底断裂活动微弱，地层发育较为连续、完整，内部缺少明显的角度不整

合。盆地以整体沉降和震荡为主，沿湖发育河流-三角洲体系，沉积相带有明显的环状、多旋回特征。工区齐家地区位于松辽盆地西北部的齐家凹陷（见图 2a），西、北面与盆地斜坡连接，东部与大庆长垣毗邻，南部为凹陷沉积、沉降中心，其盆地充填模式、层序发育特征和沉积体系分布在松辽盆地（尤其是盆地边缘）具有一定代表性。

5.2 联井剖面 and 井-震对比

根据现有钻井密度，选择了 3 横 4 纵 1 斜共 8 条联井地震剖面（见图 2b）组成联井基干地震剖面网（工作流程①）。剖面间距 5~10 km 不等，可大致反映盆地构造和地层分布特点。以与倾向方向一致的基干剖面 A—A' 为例（见图 3），青山口组在本区厚度为 300~

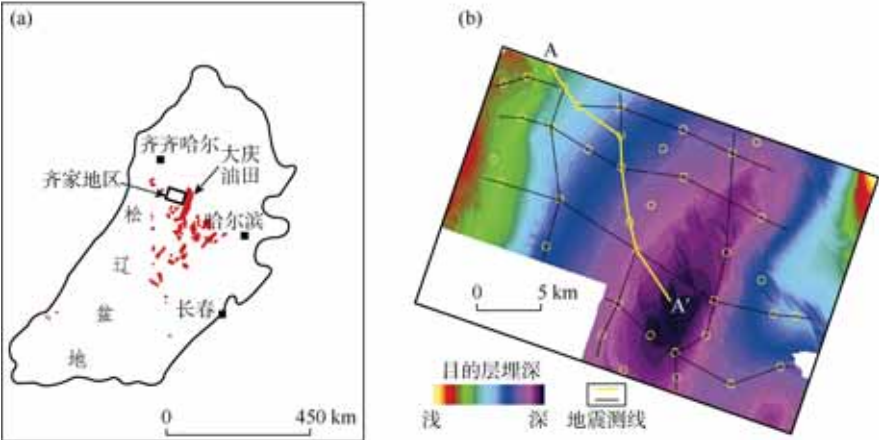


图 2 松辽盆地齐家地区位置 (a) 及三维地震剖面网 (b) 图

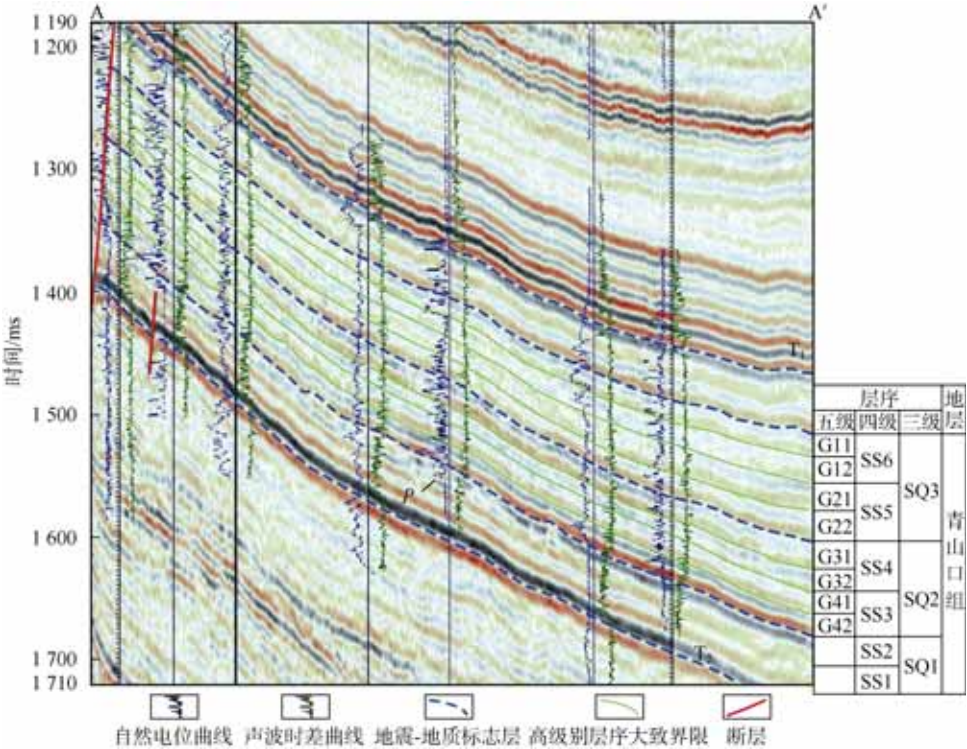


图 3 松辽盆地齐家地区 A—A' 联井地震剖面井-震对比和青山口组层序划分

500 m (200~250 ms), 地层向沉降中心倾斜且加厚, 但厚度梯度不大。地层反射总体连续性较好, 构造简单, 断层小而稀。测井曲线的深-时转换是通过校正后的声波时差曲线制作合成记录实现的(工作流程②), 主要地震标志层(如  $T_1$ 、 $T_2$  强反射层)与相应地质层位(姚家组、泉头组顶部)对比良好。由于地震沉积学要求井震对比误差不能超过一个最小作图单元厚度的一半(即八分之一波长, 在研究区为 10 m), 因此对每口井现有的时-深转换关系都应重新审视。在声波/密度测井资料较好的井, 声波合成记录是实现高质量时-深转换的重要工具。一般而言, 只要选择与地震资料具有相同频率成分(主要是主频)和相位的子波, 合成地震道与井旁地震道可直接进行对比。但是齐家地区的合成记录与井旁地震道对比往往存在一定深度误差, 需要校正后才能进行对比。

### 5.3 地震相位调整

工作流程中的子波相位调整(工作流程③)并不是简单地要求将地震道相位偏移  $90^\circ$ , 而是要根据原始资料子波相位(不一定是零相位)作出相应调整。要将地震道调整到  $90^\circ$  相位, 首先要知道原始三维地震数据体中地震子波的相位。在此实例中, 原始叠后数据的地震子波相位约为  $20^\circ$ 。地震子波相位的估算多解性非常强。估算地震子波相位的一个有效方法是结合地质信息, 根据反射复合波形对称性与子波相位及地层厚度的关系进行判断。例如, 在松辽盆地白垩系(见图 4),

用声波和密度测井可解释出泉头组泉四段顶面( $T_2$ )为单一强正反射界面(波阻抗增加, 区域不整合面), 剖面中部和上部( $T_1$  附近)一些薄砂层顶、底分别为强正、负反射面。相位调整有两个目的: ①将反射波形调整为对目标地质特征对称, 即  $90^\circ$  ( $-90^\circ$ ) 相位波形对薄层(双界面)对称, 或零相位波形对单界面对称。在本实例中, 单界面反射(见图 4 中 a)在零相位剖面上是对称波形(波峰), 而在  $-90^\circ$  相位剖面上是反对称波形; 薄层(见图 4 中 b 和 c)反射只有在  $-90^\circ$  相位剖面上是对称波形(波峰), 而在零相位剖面上表现为反对称、双极性特点。②使地震反射极性与地层波阻抗变化的方向一致, 方便解释。本实例  $-90^\circ$  相位剖面上, 正极性、正振幅对应波阻抗增加(砂岩), 而负极性、负振幅代表波阻抗减小(泥岩)(见图 3)。

### 5.4 追踪地震地质等时标志层

在地震剖面上追踪等时反射同相轴并建立等时地层格架(工作流程④)意义重大。部分研究人员直接选用已经追踪的同相轴层位, 而不检验其是否具有地质年代意义上的等时性。实际上, 地震剖面上多数同相轴都具有不同程度的不等时性。若用直接追踪的同相轴代表地质时间界面(如沉积界面), 其误差经常远远超出地震沉积学最小作图单元厚度。确定一个地震同相轴是否等时有定性和定量两种方法。定性法也即地质统计法, 统计和经验表明, 地震反射剖面中代表稳定相带, 如三级层序和部分四级层序中的最大洪泛面凝缩层和深湖泥岩或某些特殊岩性(如砂泥岩剖面中的薄层灰岩、煤、火山岩夹层)的同相轴, 在一般情况下可以作为等时面追踪, 而其他同相轴多不具有等时性, 需要用地层切片方法近似计算等时面。定量法就是观察地震反射的地质体产状是否随地震波频率变化而变化, 如果一个同相轴的产状随着地震波频率变化而变化, 说明该同相轴受到不稳定相带中薄层不均匀分布引起的薄层干涉的影响, 导致波阻抗界面与地层时间界面不吻合, 因而追踪的地震层位有多种可能的结果。反之, 如果一个同相轴的产状不随地震波频率变化而变化, 它就很可能是等时的。在实践中这两种方法可同时使用, 相互印证, 以提高结果的可靠性。

在齐家地区, 地震等时地层格架主要依据沉积层序中的最大洪泛面确立。在三维地震体中系统追踪了青山口组 4 个比较连续的地震层位(见图 3), 这些层位大多平行于最大洪泛面, 具有等时地层意义。根据测井曲线层序地层分析和地震相特征, 进一步在青山

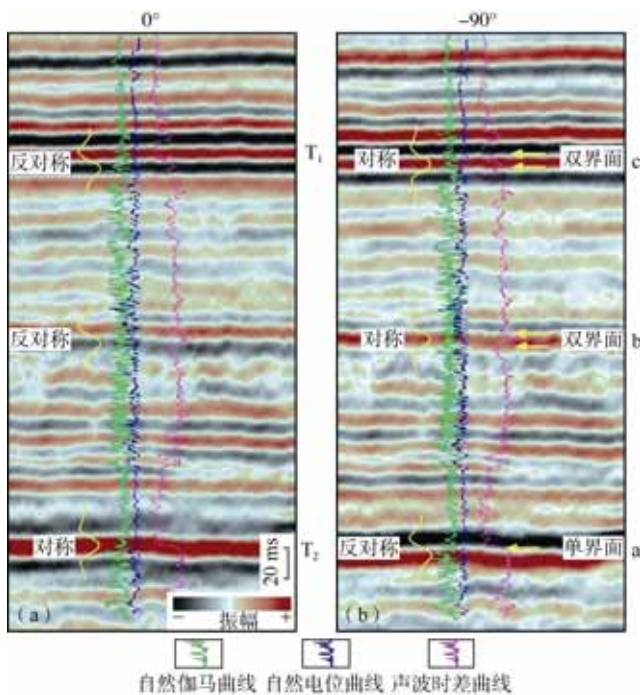


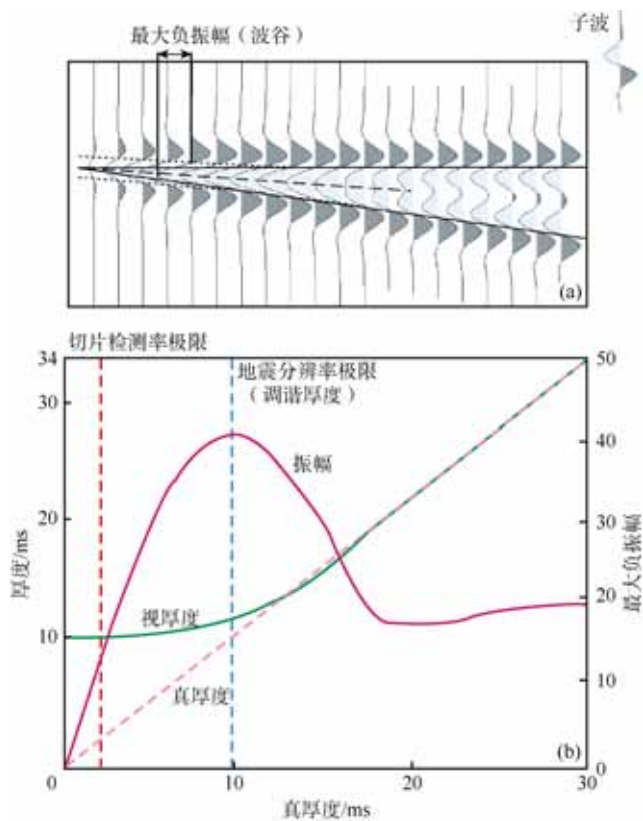
图 4 用单界面和双界面地质特征及反射复合波形对称性与子波相位的关系判断地震子波相位



口组划分了 3 个三级层序和 6 个四级层序。依据自然伽马、自然电位曲线旋回特征和地震同相轴趋势,可进一步追踪五级层序,但地震剖面上的五级层序边界解释受分辨率限制,不能保证等时,仅有象征意义。

### 5.5 地震分辨率估算

地震时间分辨率估算(工作流程⑤)可由楔状体模型厚度调谐曲线(见图 5)获得。本区研究层段(1 200~1 700 ms)三维地震资料频谱分析表明,地震子波主频约为 50 Hz,对应调谐厚度(即地震分辨率极限)为 10 ms(约合速度为 4 000 m/s 的砂岩 20 m)。由于在此厚度内所有地层切片均显示相同极性,振幅模式有很大的相似性,这个厚度限定了本区地震沉积学研究的最小作图单元。在青二段—青三段,五级层序平均厚度约为 40~50 m,地震沉积学最小作图单元大致相当于体系域(LST/TST 或 HST)厚度。由于高等级层序地层格架与地震资料之间的匹配关系良好,本次研究不需要进行地震频率调整(工作流程⑥)。



所用子波相位为 90°, 50 Hz 雷克子波, 模型中未加入噪音

图 5 楔状体模型及厚度调谐曲线

对地震沉积学研究有重要意义的另一个与分辨率有关的概念是切片检测率极限, 其对地震横向分辨率的利用是相对于地震地层学的一个主要进步。大多数储集层, 尤其是碎屑岩储集层, 均具有厚度远远小于

宽度的特点。如果砂体纵向上厚度小于四分之一波长, 但平面尺寸却明显大于四分之一波长, 则砂体在平面上是可分辨的。切片检测率极限指地层切片上可从水平方向分辨的沉积砂体的最小厚度, 其顶底位置由于地震分辨率极限限制不能确定, 但横向位置可确定。切片检测率极限受多个因素控制, 如研究人员对不同沉积相/沉积地貌的认识水平、地貌单元反射强度、资料信噪比等, 但切片检测率极限一般远小于地震分辨率极限。本次研究观察到的最小切片检测率极限(青一段上部砂体, 见图 3 中 P 点砂体)为 0.5 ms(约 1 m)<sup>[29]</sup>。

### 5.6 岩石物理性质研究

利用测井、录井和岩心观察结果所作的岩性-波阻抗关系(工作流程⑦)表明, 青山口组主要由砂质岩和泥质岩组成, 并含少量灰质岩薄层。各类岩性的波阻抗均有一定分布范围: 泥质岩, 从深灰色深湖泥岩到浅灰色滨浅湖泥岩, 波阻抗逐渐增加(主要是地震波速度增加); 砂质岩, 从泥质胶结砂岩到钙质胶结砂岩, 波阻抗也逐渐增加; 灰质岩波阻抗最高且变化较大。各类岩性的波阻抗之间有一定重叠。特定砂体的振幅响应受围岩岩性控制。在最简单的情况下, 当一个砂体在地震资料上表现为一个独立反射时, 其振幅极性和强度取决于相邻岩性间波阻抗差异的大小和方向。如青一段上部的高波阻抗钙质砂岩被夹在厚层低波阻抗深湖泥岩中(见图 6), 为正向高波阻抗层, 在 -90°相位地震剖面上将表现为强波峰(见图 3 中 P 点砂体)。这种情况表明, 振幅是指示岩性的一个有效地震参数(工作流程⑧)。

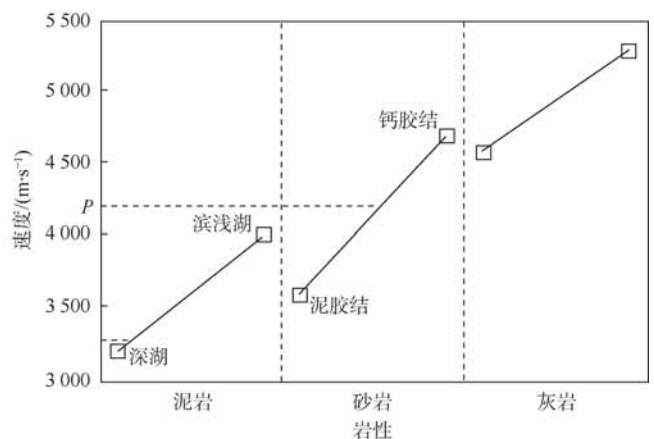


图 6 松辽盆地齐家地区金 44 井青山口组岩性-波阻抗关系

当一个砂体在地震资料上不能表现为一个独立反射时, 单岩性层与反射同相轴一般没有一一对应关系, 地震振幅极性和强度取决于相邻地震沉积学最小作图单元平均岩性间的波阻抗差大小和方向。同相轴只代

表平均波阻抗变化，或反映偏砂相地层（高砂地比）和偏泥相地层（低砂地比）之间的变化。如图 7，井中岩心统计的高含砂段对应于声波曲线平均高速段和地震波峰，而低含砂段对应于声波曲线平均低速段和地震波谷，对比关系非常清楚。但无论极性如何，同相轴内部振幅增强都可能与地层中砂岩含量增加有关。如果地层中存在灰质岩和钙质砂岩，则会进一步造成波阻抗增加及振幅增强。

当岩石物理关系显示储集层（砂岩）和非储集层（泥岩）在声波性质（速度/波阻抗）上几乎相同而不能区分时，用普通叠后地震资料识别岩性效果较差，需要考虑使用更复杂的地震采集处理方法（如 AVO、横波勘探）等。

5.7 地层切片

地层切片处理（工作流程⑨）可以用层拉平的相对地质时间振幅剖面（见图 8）和地层切片（见图 9）显示。在青山口组，以 4 ms 相对地质时间采样率（相当于平均 4 m 深度采样率）得到了 92 张地层切片。原始剖面上的地震地质层位（见图 3）可转换到拉平后的剖面（见图 8）上，以建立地层切片与高等级层序的对应关系。每个五级层序体系域平均约有 6 张地层切片与之对应。密集采样有助于研究人员为每个体系域或层序选择最有代表性的地层切片，也可用于在一定程度上观察沉积体系的纵向结构和演化。

5.8 地震沉积相分析

地震沉积相是指具有一定沉积相指相意义的地震岩性学信息和地震地貌特征的组合。地层切片是地震沉积相的理想载体。地震沉积相必须转换为沉积相才

能体现其地质含义，在生产中发挥作用。

钻井沉积相分析是根据对地层中沉积体不完整的或间接的测量资料（如有限井中的岩心观察、录井图和测井曲线等等）进行的，结论一般具有多解性。相

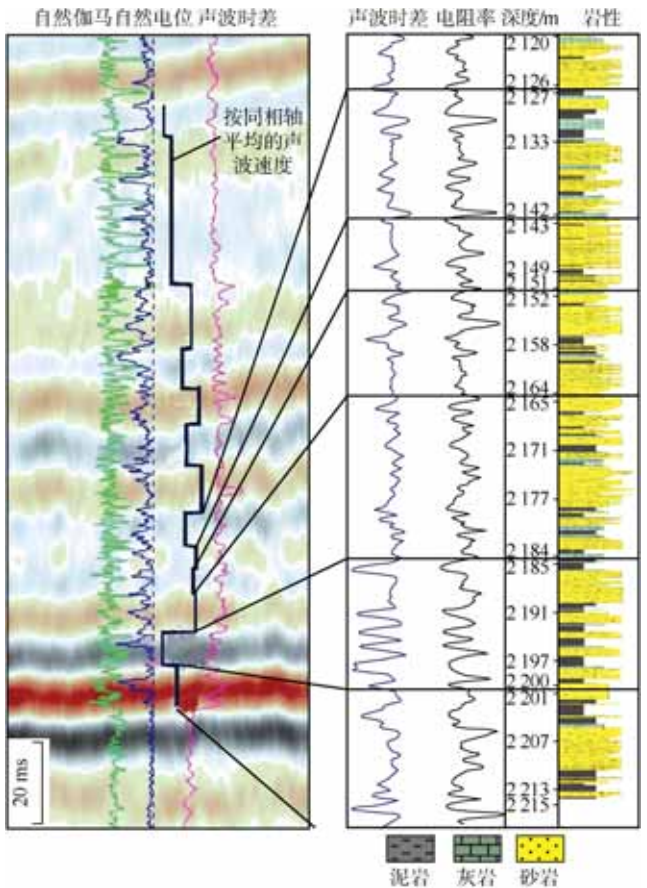


图 7 齐家凹陷金 44 井白垩系青山口组砂岩含量-平均速度-同相轴对比关系

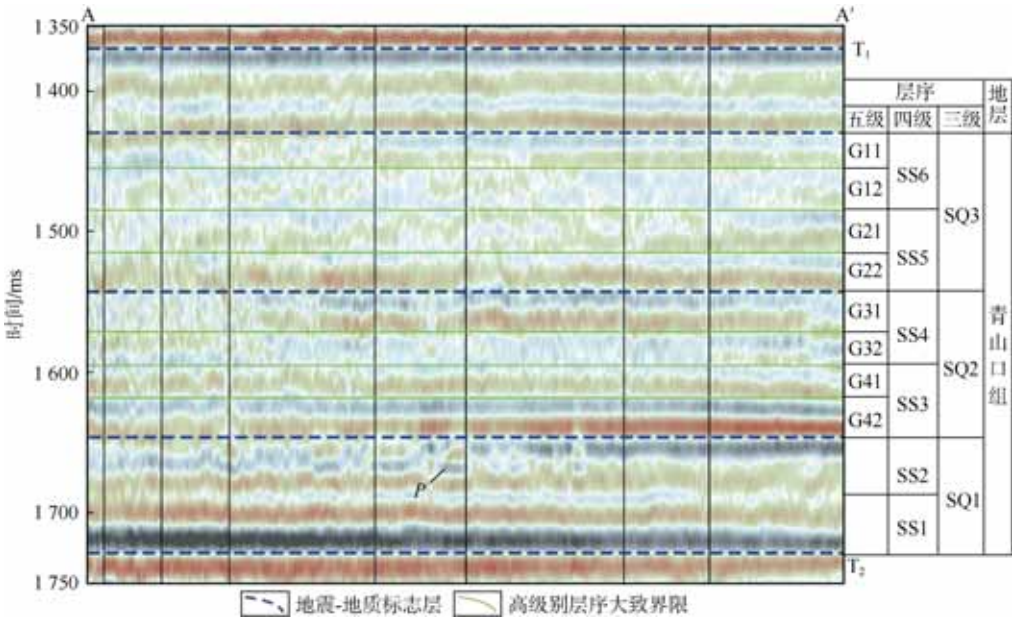


图 8 齐家地区 A—A'地震剖面经地层切片处理（层拉平）后的相对地质时间剖面及其与层序的对比关系



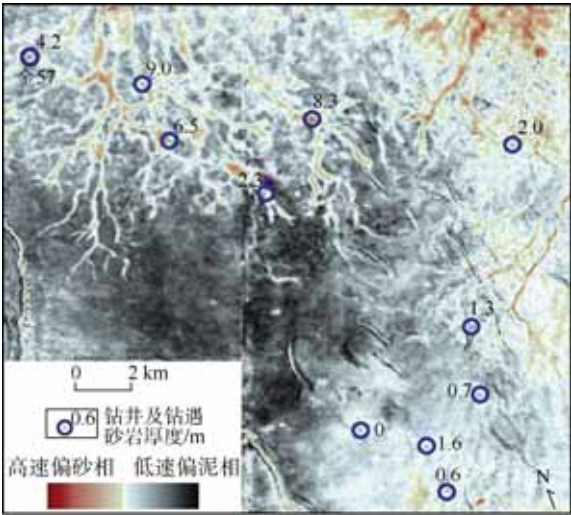
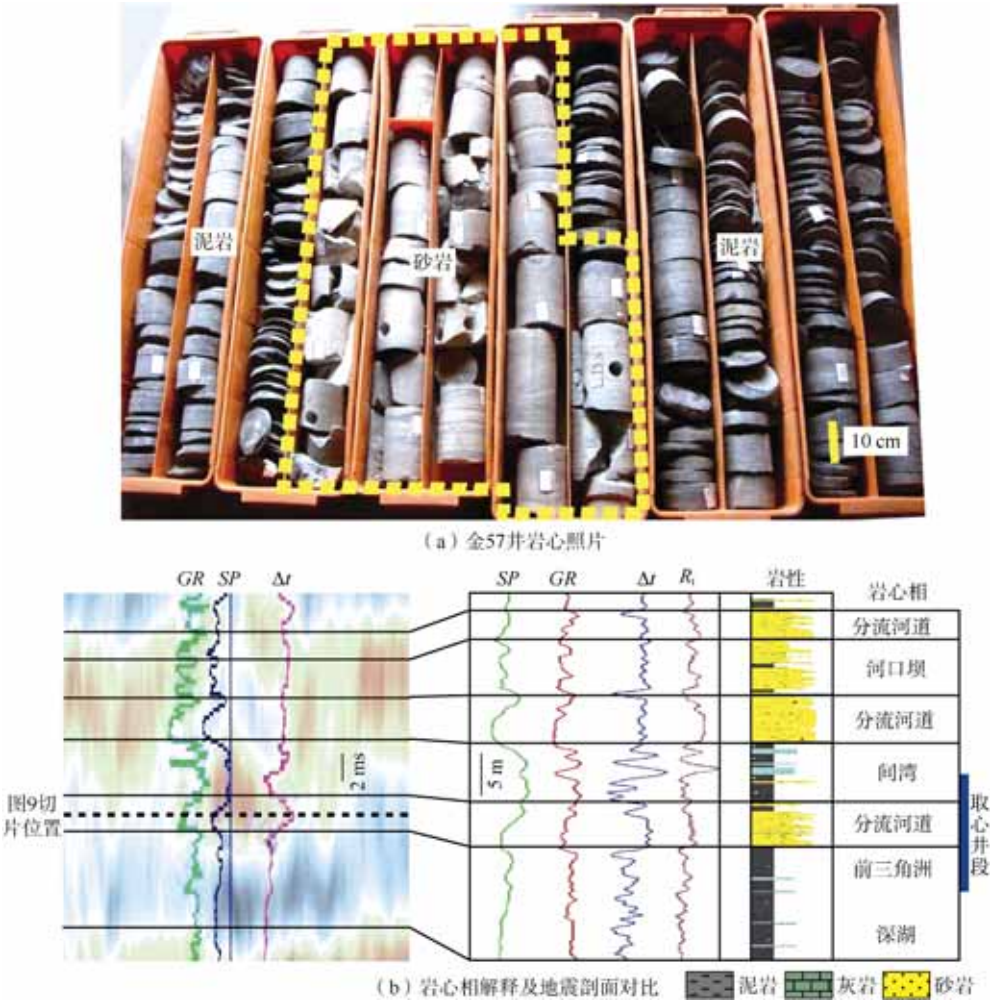


图9 齐家地区青山口组青一段上部(SS2)的一张地层切片(位置见图3和图8中P点砂体)

比之下,地震沉积相相当于钻井沉积相经地震子波平滑和地层反射干涉后的结果,指相意义更为间接,解

释中更容易产生多解性。解释人员对此要有清晰的认识,否则容易错误地将地震属性等同于沉积特征,使解释过分简单化,或者当暂时看不见地层切片与沉积体系的直接对比关系时过早放弃。

因此,在地震沉积相分析(流程⑩)中应当遵循综合解释的原则,尽可能利用各种地质、地球物理信息将地层切片上的地震参数模式(砂体地貌特征)转换成沉积相和砂体分布模式,减少多解性。对本实例而言,对应于青一段上部(SS2)砂体(见图3和8中P砂体)的一张地层切片(见图9)显示了清晰的树枝状河道形态地震地貌模式。地震岩性标定表明河道形地貌单元为正振幅,代表砂岩。数口关键井的岩心观察证实其为浅水三角洲分流河道沉积。钻遇该砂岩并眼的测井曲线显示砂岩厚度为1~9 m。又例如,金57井在该层位见到4.2 m粉砂—细砂岩及上下深灰色泥岩围岩(见图10a)。岩心观察发现砂岩以正韵律为主,



GR—自然伽马; SP—自然电位;  $\Delta t$ —声波时差;  $R_1$ —电阻率

图10 齐家地区金57井岩心照片(a)和岩心相解释与地震对比(b)



底部见冲刷面，并有丰富的交错层理及波状、脉状、透镜状层理，泥岩色偏深，偶见薄介形灰岩。岩心相解释从下向上为深湖、前三角洲、三角洲前缘分流河道和间湾沉积，并以分流河道与河口坝互层结束（见图 10b）。另外，此砂体在地震剖面上反映为单个平行反射（见图 3 和图 8 中 P 砂体），缺乏正常前积三角洲的前积反射地震相（如 S 形或叠瓦形地震相）。综上所述，此沉积体系为松辽湖盆一种典型的浅水三角洲体系（见图 11），包括三角洲平原（洪水面以上）、三角洲内前缘（洪水面与枯水面之间）、三角洲外前缘（枯水面以下）以及浅湖（浪基面以上）等相带，以分流河道充填沉积为主，河口坝和席状砂沉积不甚发育。在盆地向南湖水加深地区，出现薄层浊积水道和浊积扇沉积。

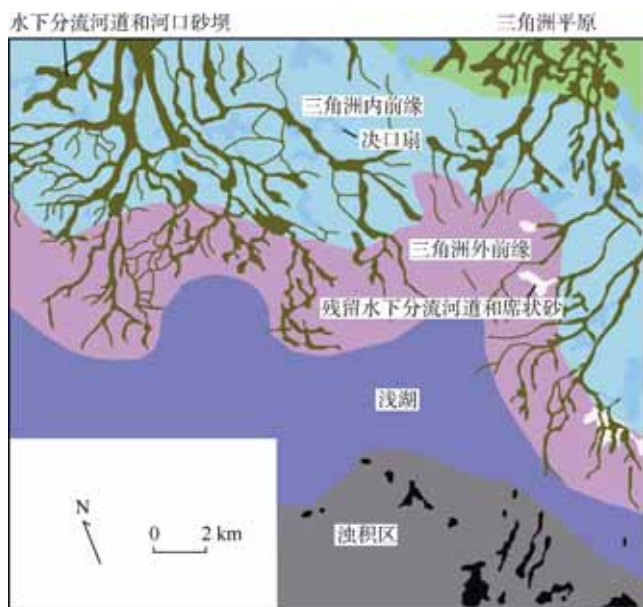


图 11 松辽盆地齐家地区浅水三角洲地震沉积相分布

要提高地震沉积相解释水平，解释人员所具备的沉积学知识和地质经验至关重要。要求解释人员对各种沉积岩和沉积相有相当程度的了解，对沉积体系的三维时空关系或砂体形态有清晰的概念，并可用层序地层学模式解释沉积体系域在地层中的叠置关系和演化规律。另外，研究各种现代沉积地貌单元（如滩、坝、丘、扇）和侵蚀地貌特征（如河道、峡谷、风蚀面）以及它们的相互关系和在地层中的保存规律，也有助于对地震地貌单元的解释，这是一个新的研究课题。

## 6 结论

地震沉积学与地震地层学有明显区别，二者在理

论基础、方法和要求的资料分析精度方面差异明显。地震沉积学所用基础资料包括三维地震叠后数据体，周边二维地震测线和地层、岩性、构造背景资料，以及工区钻井资料。地震沉积学分析强调地震与地质资料综合解释以及与层序地层学分析和地震地层学分析的结合。工作流程包括井震对比、子波相位调整、追踪等时标志层、地震分辨率分析、岩石物理关系分析、地震参数筛选、地层切片处理、地震沉积相分析以及油气勘探开发前景综合评价等。要求的成果图件包括联井基于地震剖面、层拉平相对地质时间剖面、地层切片、沉积相图等十余种。松辽盆地齐家地区白垩系青山口组浅水三角洲沉积地震沉积学研究表明，本文所述研究规范对陆相拗陷型盆地湖相地层薄砂岩储集层的沉积相成图和分布预测是有效的。在理想条件下用 50 Hz 主频三维地震资料可预测 1 m 厚度的分流河道砂体。其研究思路、分析资料和成果图件可作为在其他陆相盆地，尤其是在拗陷型盆地开展地震沉积学研究的参考。

参加本课题研究的还有孙玉、王瑞、周川闽、白斌等，在此一并表示感谢。

### 参考文献：

- [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 seismic data[J]. Geophysics, 1998, 63(2): 514-522.
- [3] Zeng Hongliu, Hentz T F. High-frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology: Applied to Miocene, Vermilion Block 50, Tiger Shoal area, offshore Louisiana[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(2): 153-174.
- [4] 曾洪流. 地震沉积学在中国：回顾和展望[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 61-70.  
Zeng Hongliu. Seismic sedimentology in China: A review[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 61-70.
- [5] 董春梅, 张宪国, 林承焰. 有关地震沉积学若干问题的探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(4): 405-409.  
Dong Chunmei, Zhang Xianguo, Lin Chengyan. Discussions on several issues about seismic sedimentology[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(4): 405-409.
- [6] 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.
- [7] 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. Concepts of seismic sedimentology and its preliminary applications[J]. Acta Petrolei

- Sinica, 2007, 28(2): 69-71.
- [8] 张军华, 周振晓, 谭明友, 等. 地震切片解释中的几个理论问题[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(3): 348-352, 361.  
Zhang Junhua, Zhou Zhenxiao, Tan Mingyou, et al. Discussions on several issues in seismic slice interpretation[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(3): 348-352, 361.
- [9] 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 sedimentologic study of Tertiary Sha-1 sequence, Qi'nian Sag, Huanghua Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 234-240.
- [10] 魏嘉, 朱文斌, 朱海龙, 等. 地震沉积学: 地震解释的新思路及沉积研究的新工具[J]. 勘探地球物理进展, 2008, 31(2): 95-101.  
Wei Jia, Zhu Wenbin, Zhu Hailong, et al. New methodologies for seismic interpretation and new tools for sedimentological study[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2008, 31(2): 95-101.
- [11] 王正和, 蒋能春, 吕其彪. 地震沉积学的概念、方法和应用[J]. 江汉石油科技, 2008, 18(2): 7-11.  
Wang Zhenghe, Jiang Nengchun, Lü Qibiao. Concepts, methodologies, and applications of seismic sedimentology[J]. Jianghan Petroleum Science and Technology, 2008, 18(2): 7-11.
- [12] 郭海洋, 巫芙蓉. 地震沉积学在 GA 地区的初步应用[J]. 物探化探技术, 2008, 30(5): 102-105.  
Guo Haiyang, Wu Furong. Preliminary application of seismic sedimentology in GA area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 30(5): 102-105.
- [13] 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.  
Zhang Yi'na, Zhu Xiaomin, Liu Changli. Seismic sedimentology and its application in south area of central Asia[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 74-79.
- [14] 刘喜武, 宁俊瑞, 刘培体, 等. 地震时频分析与分频解释及频谱分解技术在地震沉积学与储层成像中的应用[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1679-1688.  
Liu Xiwu, Ning Junrui, Liu Peiti, et al. Application of time-frequency analysis, frequency-dependent interpretation, and spectral decomposition in seismic sedimentology and reservoir imaging[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(5): 1679-1688.
- [15] 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. Application of seismic sedimentology in prediction of non-marine lacustrine deltaic sand bodies[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 915-921.
- [16] 林正良, 王华, 李红敬, 等. 地震沉积学研究现状及进展综述[J]. 地质科技情报, 2009, 28(5): 131-137.  
Lin Zhengliang, Wang Hua, Li Hongjing, et al. Overview of status and progress of seismic sedimentologic research[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(5): 131-137.
- [17] 李斌, 宋岩, 何玉萍, 等. 地震沉积学探讨及应用[J]. 地质学报, 2009, 83(6): 820-826.  
Li Bin, Song Yan, He Yuping, et al. Discussion and application of seismic sedimentology[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 820-826.
- [18] 孙海雷, 吴海波, 王雅峰, 等. 英台—大安地区姚二三段地震沉积学研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2010, 29(3): 32-36.  
Sun Hailei, Wu Haibo, Wang Yafeng, et al. Study of seismic sedimentology in Yao-2 and Yao-3 members, Yingtai-Da'an area[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2010, 29(3): 32-36.
- [19] 陈雪菲, 王绪本, 刘力辉. 地震沉积学在 D 区的初步应用[J]. 物探化探计算技术, 2010, 32(5): 126-131.  
Chen Xuefei, Wang Xuben, Liu Lihui. Preliminary application of seismic sedimentology in D area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 32(5): 126-131.
- [20] 李全, 林畅松, 吴伟, 等. 地震沉积学方法在确定沉积相边界方面的应用[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2010, 32(4): 50-55.  
Li Quan, Lin Changsong, Wu Wei, et al. Application of seismic sedimentology in determining depositional facies boundaries[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2010, 32(4): 50-55.
- [21] Zhao W Z, Zou C N, Chi Y L, et al. Sequence stratigraphy, seismic sedimentology, and litho-stratigraphic plays: Upper Cretaceous, Sifangtuozhi Area, Southwest Songliao Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(2): 241-265.
- [22] Posamentier H W. Ancient shelf ridges, a potentially significant component of the transgressive systems tract: Case study from offshore northwest Java[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(1): 75-106.
- [23] Kolla V, Bourges P, Urruty J M, et al. Evolution of deep-water Tertiary sinuous channels offshore Angola (west Africa) and implications for reservoir architecture[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85: 1373-1405.
- [24] Zeng Hongliu, Backus M M. Interpretive advantages of 90° phase wavelets: Part 1: Modeling[J]. Geophysics, 2005, 70(3): 7-15.
- [25] Zeng Hongliu, Backus M M. Interpretive advantages of 90° phase wavelets: Part 2: Seismic applications[J]. Geophysics, 2005, 70(3): 17-24.
- [26] Zeng Hongliu, Posamentier H W, Miall A D, et al. 地震沉积学[M]. 朱筱敏, 曾洪流, 董艳蕾, 等. 译. 北京: 石油工业出版社, 2011.  
Zeng Hongliu, Posamentier H W, Miall A D, et al. Seismic sedimentology[M]. Zhu Xiaomin, Zeng Hongliu, Dong Yanglei, et al, Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [27] Yang W L. Daqing oilfield, People's Republic of China, a giant field with non-marine origin[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69: 1101-1111.
- [28] Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, et al. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, northeast China[J]. Basin Research, 2010, 22: 79-95.
- [29] Zeng H, Zhu X, Zhu R, et al. Ultra-thin, lacustrine sandstones imaged on stratal slices in the Cretaceous Qijia Depression, Songliao Basin, China[R]. Tulsa: 81st Annual International Meeting, SEG, 2011: 951-955.

第一作者简介: 曾洪流 (1957-), 男, 江西宁都人, 美国德克萨斯大学奥斯丁分校德州经济地质调查局研究员, 主要从事地震沉积学研究工作。  
地址: Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin, 10100 Burnet Rd., Bldg 130, Austin 78712, Texas, USA. E-mail: hongliu.zeng@beg.utexas.edu

收稿日期: 2012-01-13 修回日期: 2012-03-18

(编辑 黄昌武 绘图 刘方方)