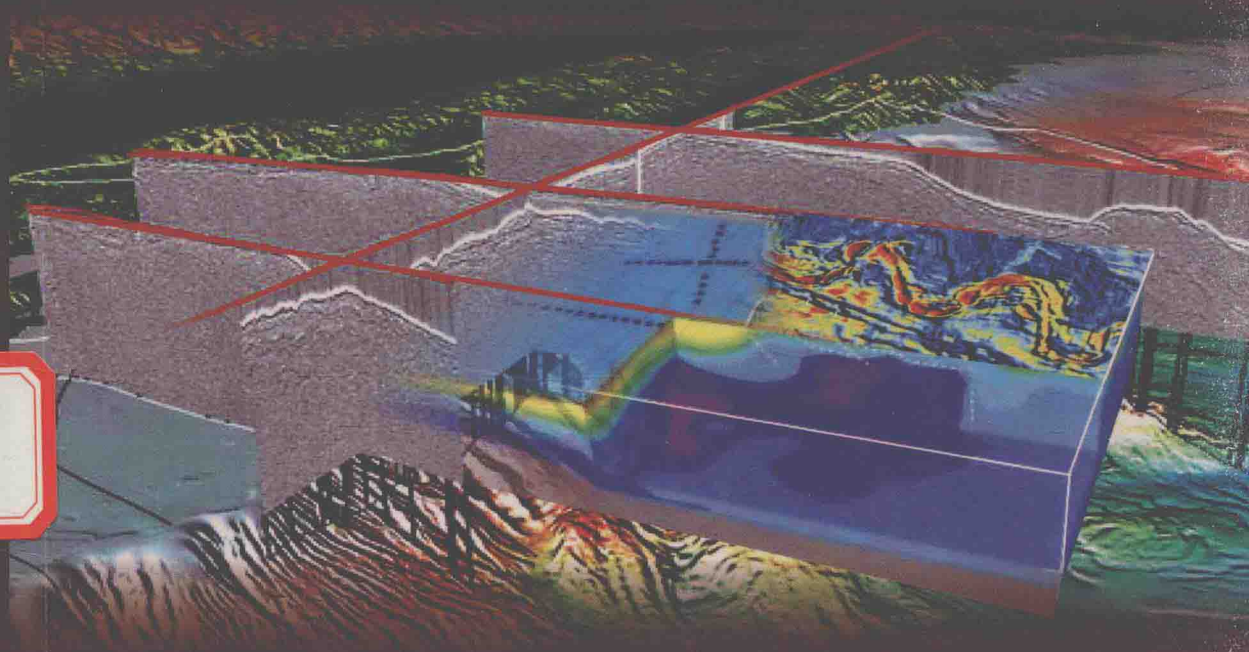


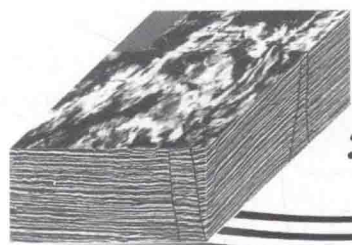
地震沉积学 原理与应用

PRINCIPLE OF SEISMIC SEDIMENTOLOGY
AND ITS APPLICATION

朱筱敏 曾洪流 董艳蕾 等译著



石油工业出版社



地震沉积学形成与发展



从地震地层学到地震沉积学

Zeng Hongliu 著, 朱筱敏 译

摘要 20世纪70年代, 基于二维地震技术, 提出了地震地层学概念。依据地震剖面上地震反射终止关系、内部结构和外部形态, 地质人员可在沉积层序中分析地震相, 并推断区域规模的沉积环境和沉积历史。三维地震资料可为改善地震相分析提供空间密集的、高分辨率的、水平地震反射样式, 从而开展了地震沉积学的研究。相对于地震地层学来说, 地震沉积学就是利用空间地震反射样式和沉积体系地貌学特征研究沉积物的沉积相、岩性和几何结构。地震解释人员要在垂向地震剖面上获取储层规模的沉积界面信息是无能为力的, 但可通过地层切片技术来解决这个问题。该技术在两个地震同相轴之间等比例切片获取沉积界面信息。路易斯安那州两个三维地震区块的地层切片研究表明, 在地震相分析中, 地震沉积学研究明显改善了下列问题: (1)减少了地震相和岩性解释的多解性; (2)提高了垂向分辨率(从分辨100m厚的三级层序到10m厚的储层); (3)利于确定储层规模的沉积几何结构。

引 言

自Vail(1977)发表地震地层学论著(AAPG专题报告26)以来, 地震地层学在地震资料的沉积相解释方面取得了巨大成功。过去20多年发表的许多关于地震地层学的理论和应用的论著标志着该学科的成熟。现今, 地震地层学已成为盆地分析的标准方法, 特别是在仅有二维地震资料的区域。

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、频率、连续性和内部结构等参数描述区域地震相, 进而通过类比地下和露头资料赋予地震相的地层和沉积含义。然而, 为了开展地震相分析, 地层厚度应足够厚到能在一定精度上描述地震相, 这就将地震相分析限制到了100m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。除了改善构造制图精度外, 三维地震技术可在真正意义的界面(或窄时窗)上解释沉积相, 这明显提高了沉积相制图的精度并减少了解释的多解性。Dahm和Graebner(1979)首次在泰国湾三维区块利用时间切片方法进行曲流河沉积体系的地震成像研究。后来, 发表了许多高质量的、类似于卫星照片的沉积体系成像图片(Brown, 1981; Zeng, 1995, 1996)。沉积相制图的分辨率得到了明显改善, 达到了10m级的精度。

地震沉积学成功的关键就是在追踪沉积界面的小时窗中, 利用水平地震图像研究沉积体系。时间切片和水平切片方法常用于具有良好地震界面显示的资料中, 但这些方法的应用是有限制的。只有当地层是水平、席状时, 时间切片才能反映沉积界面特征。当地层倾斜并且呈席状时, 水平切片可获得良好结果。另一种替代方法是地层切片。这种方法在地质上等时的(如最大洪泛面)地震反射同相轴之间, 通过线性切片方法来改善界面的显示特征。在厚度变化的、沉积楔状体和生长断层的断块中均可应用地层切片方法。Zeng(1995, 1998)和

Posamentier(1996)的论著详细介绍了地层切片方法。

本文以路易斯安那州海岸区中新统上部到上新统下部为例(图1),开展了经典地震地层学的地震相分析与地层切片成像分析的对比研究。两个三维区块弗米利恩50区块—老虎滩和西Cote Blanche湾均位于同一个地区,具有类似的区域地质背景。地震资料质量良好,研究层段地震主频为30 Hz。研究表明,地层切片方法比经典的地震地层学方法以更高的分辨率和可信度揭示了沉积体的地貌和沉积相特征。在地震沉积学研究中,还可通过对三维地震资料进行调整处理,研究沉积岩性和几何结构特征。

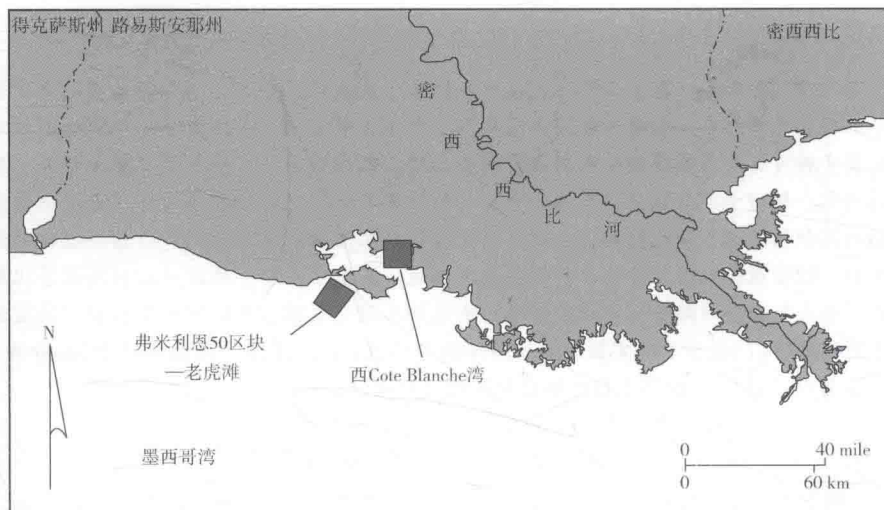


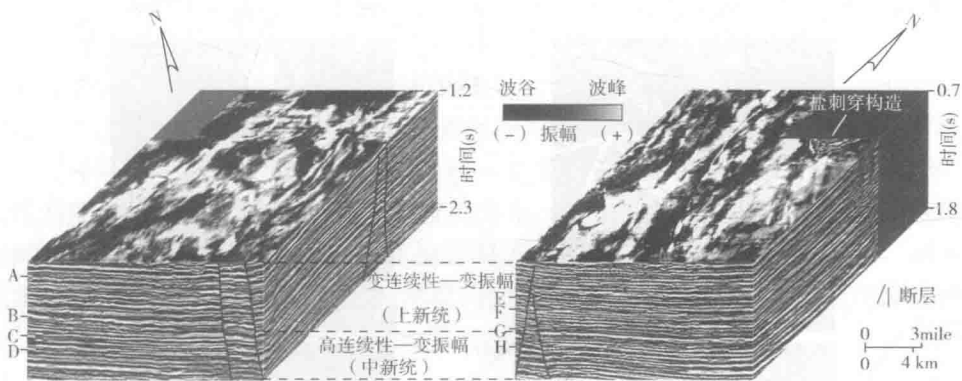
图1 路易斯安那州海岸地区两个三维区块位置图

一、地震相分析

经典的地震相是指有别于相邻地区的地震反射特征(内部结构、振幅、连续性、频率、层速度等)(Mitchum, 1977)。也是指集合的、可统计的地震反射同相轴特征。为了较为准确地编图,编图单元的厚度应至少包括几个同相轴(对于典型资料来说应为几百米厚)。根据二维地震技术的发展状况,主要在垂向剖面上测定地震相参数并进行平面编图。

本文研究的两个三维区块在中新统上部和上新统下部具有相似的地震反射特征(图2)。构造平缓、几乎没有断层以及有盐构造运动引起的轻微形变(图2)。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。地震反射振幅和连续性是唯一描述地震相的参数(图2)。高连续—变振幅(HC—VA)地震相主要发育在中新统上部,变连续—变振幅地震相(VC—VA)在上新统下部更为明显。地震相单元厚度对应400~600ms(480~720m)。

地震相可用来解释形成地震反射的地层、岩性和沉积特征(Mitchum, 1977)。因为地震相单元分辨率的限制,地层解释常是区域规模的,是对较大区域规模的顶超、削蚀、上超、下超以及丘状、杂乱或平行地震相的解释。同样,即使在三维地震资料上开展地震相研究,如未使用井信息对地震相进行标定,也只能通过类比或区域地震相组合推测地震相的沉积意义。根据区域地质背景(Hunt和Burgess, 1995; Galloway, 2000),上中新统HC—VA地震相指示了高连续、波浪搬运的浅水碎屑沉积,即浅海/陆棚沉积。下上新统VC—VA地震相表明了不连续到中等连续的、海岸平原的河流和近岸碎屑沉积。



(a) 弗米利恩50区块—老虎滩

(b) 西Cote Blanche湾

图2 路易斯安那州三维勘探区块中新统上部至上新统下部沉积地震相
A~H标注表示图3地层切片位置

二、地层切片中的沉积相成像

基于地层切片原理,对研究区的两块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3~5ms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。然后,将地层切片采样结果按地质时间顺序存储,以便研究地质历史时期的古地貌特征及其演化。对所有的单个地震同相轴(波峰和波谷)进行切片,替代了原有的地震相单元的综合特征研究,进而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。

在弗米利恩50区块—老虎滩三维探区,对两个地震相进行了273个地层切片研究。这些地层切片表明了盆地发展地质时期的多个沉积旋回和典型的沉积相图像特征。部分典型的地层切片(图3a至d)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(图3b至d)以及小规模的、弯曲的河流和分支河道(图3a至c)。进而推断了由老到新的沉积体系变化,图3d表明下切谷下切在陆棚沉积之上(中新世),图3c说明下切谷下切在高位三角洲沉积之上(中新世),图3b表明下切谷下切在早期海岸平原沉积之上(上新世),图3a说明多期河道位于海岸平原之上(上新世)。该区的基于测井资料的层序地层和沉积相分析也支持上述观点(Hentz等,1999)。

在西Cote Blanche湾三维探区,对两个地震相单元开展了304张地层切片研究。部分切片(图3e至h)具有类似于以及不同于弗米利恩50区块—老虎滩三维探区的地震反射特征。上新统河流和下切河道(图3e,f)总体类似于弗米利恩50区块—老虎滩三维探区(图3a,b)的地震反射特征。然而,在图3g中具有明显的地震反射极性变化,出现了河道形态,这表明存在岸线及其伴生的河口湾/潟湖环境。图3h中尖形及其伴生的河道特征可被解释为浪控三角洲沉积体系。该河口湾/潟湖和浪控三角洲沉积明显不同于弗米利恩50区块—老虎滩三维探区的海岸平原/下切谷沉积,尽管它们的地震相特征相同。

整个地震数据体系统研究揭示,图3中研究区大多数沉积单元类型反复出现在进积和退积沉积序列的某个阶段,将地层切片叠加形成可视化电影格式(未附)能更好地揭示沉积体系迁移的动力和韵律特征。该技术可有助于确信地质解释成果,恢复研究区构造和沉积发育历史。

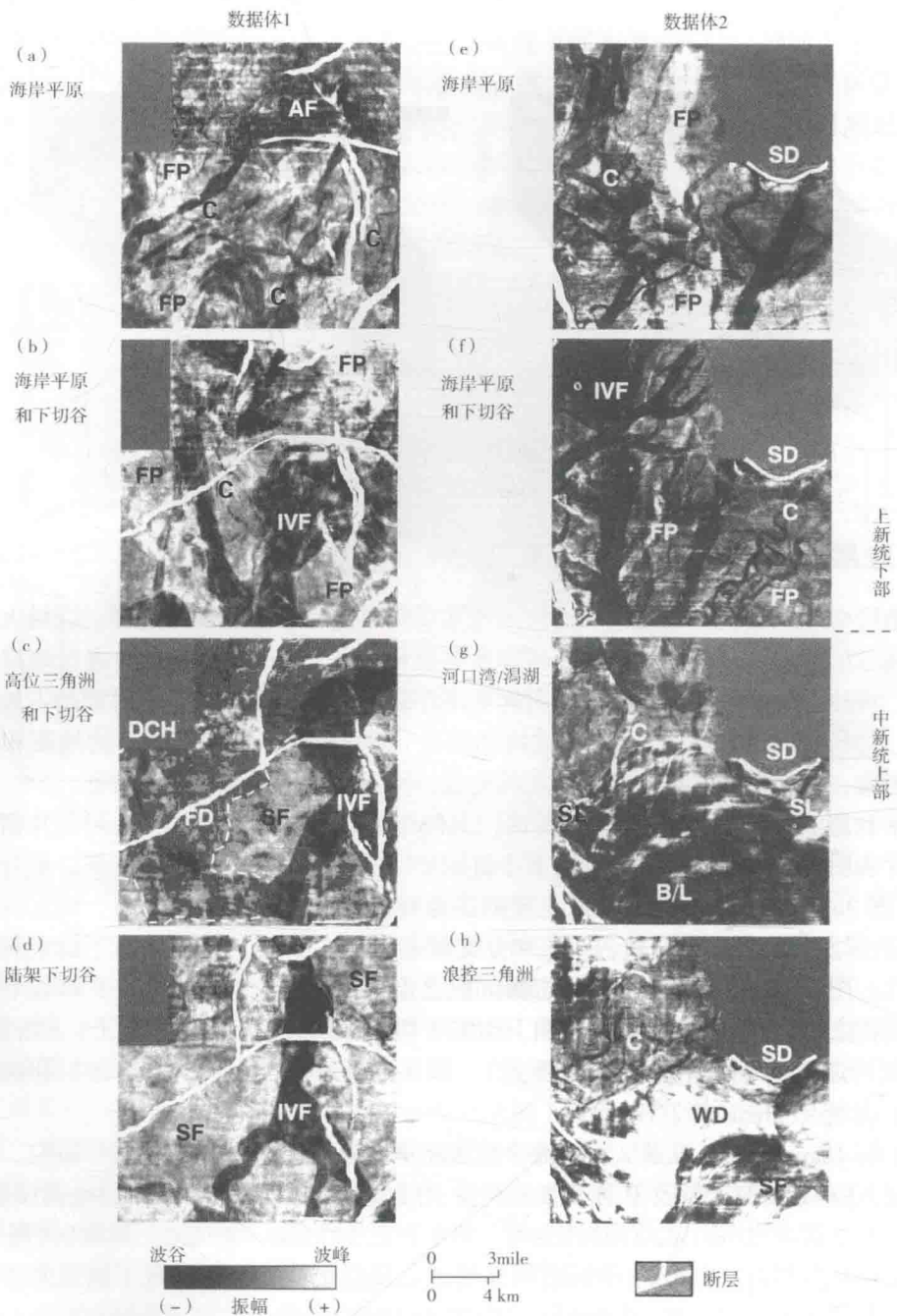


图3 弗米利恩50区块—老虎滩和西Cote Blanche湾三维探区地层切片解释
 三维数据体的位置如图2所示；C—河道；FP—泛滥平原；IVF—下切谷充填；DCH—分支河道；FD—河控三角洲；
 SF—陆架；SL—岸线；B/L—湾/潟湖；WD—浪控三角洲；AF—地震采集噪声；SD—盐刺穿构造

三、岩性特征分析

地层切片除了提供作为储层的沉积单元的地貌形态外，还可更详细地分析储层的岩性特征。为了完成该工作，需要从声学特征上区分砂岩与页岩，研究层段砂岩波阻抗应高于或低

于页岩波阻抗,实际上,墨西哥湾地区许多沉积层序均具上述波阻抗典型特征。另外,还需要调整地震子波相位,使其具有相同反射振幅的地震响应顶底均是对称的。本文对弗米利恩 50 区块—老虎滩三维探区进行了子波相位调整和岩性解释。

通过电性(SP 或 GR)与过井地震相位对比研究表明,地震同相轴(波峰或波谷)与岩性之间具有良好对应关系。在弗米利恩 50 区块—老虎滩三维探区,井震关系剖面表明(图 4),钻井岩性刻度地震数据体可说明砂岩/页岩的分布。不仅连续性好的砂岩对应连续性好的地震波谷同相轴(黑色),而且透镜状砂体也表明了与地震波谷极好的对应关系。而大多数页岩以地震波峰(白色)为特征。通过相(地貌)标定和井刻度,地震振幅可合理准确的表明岩性特征。

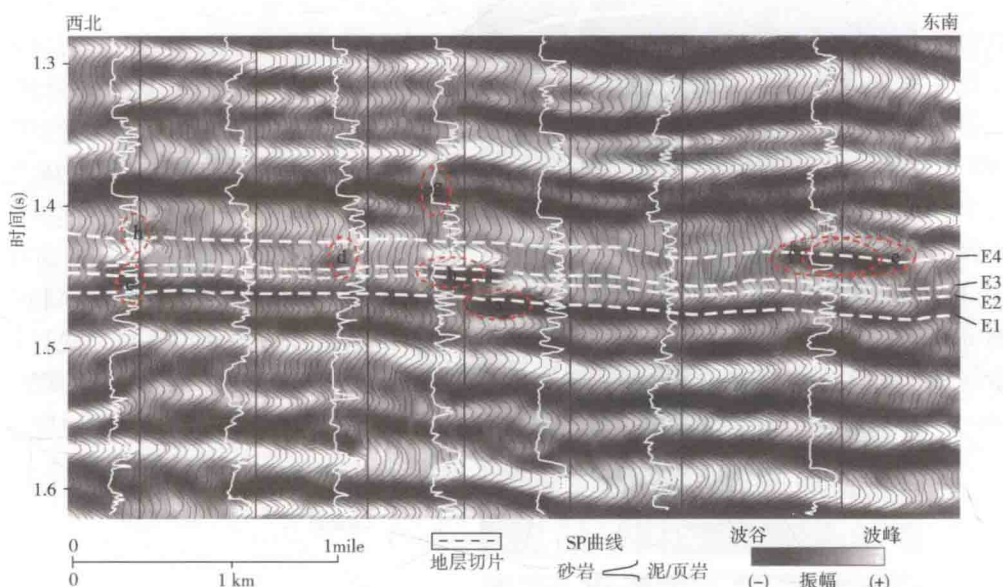


图 4 弗米利恩 50 区块—老虎滩三维探区井震剖面

表明了地震同相轴的岩性含义和地层切片的垂向分辨率,符号 a—f 表示图 5 中 E1—E4 河道地层切片图像

井震关系研究可知,弗米利恩 50 区块—老虎滩三维探区(图 3a 至 d)地层切片上具有河道形态图像的地震波谷或黑色振幅大多数对应砂岩。图 3c 中分支河道周边的黑色较弱振幅也可对应三角洲成因的薄层砂岩。在图 3a 中,未限定在河道形态中的某些黑色振幅可推断为岩性指纹。在地层切片中,响应地震波峰的席状白色振幅可推断为陆架页岩沉积(图 3c, d)或海岸平原沉积(图 3a, b)。

四、分辨率分析

从理论上讲,垂向地震分辨率为 $\frac{1}{4}\lambda$ (Widess, 1973),对于研究区地震资料来说, $\frac{1}{4}\lambda$ 大约为 10m。在许多情况下,地层切片能显示厚度薄于 $\frac{1}{4}\lambda$ 的地质体,因为地层切片可水平探测沉积体。换言之,对于特定的质量好的三维地震资料来说,水平分辨率相同于垂向分辨率(Lindsey, 1989)。因为地震面源(常为 20~35m)通常大于 $\frac{1}{4}\lambda$,实际上,水平分辨率为地

震面源大小。

为了说明地层切片的垂向和水平分辨率，从弗米利恩 50 区块—老虎滩三维探区上新统 30ms 范围(36m 厚)地层中选取 4 个地层切片(图 5 中 E1 至 E4)。根据测井资料解释，该井段为河流沉积砂岩。某些砂岩厚度较大(20~25m)(图 4b, e)并具有较为明显的地震振幅异常。其他砂岩厚度较薄(小于 10m)，具有隐蔽性，难以探测(图 4c, d, f)，图 5 的 4 张地层切片表明了河流演化的 4 个阶段(图 5 中 E1 至 E4)。图 5 中 E1、E2 和 E4 河流沉积体系是易于识别的，图 5 中 E3 表现出小规模(35~70m 宽，或 1~2 个地震道宽)、良好发育的

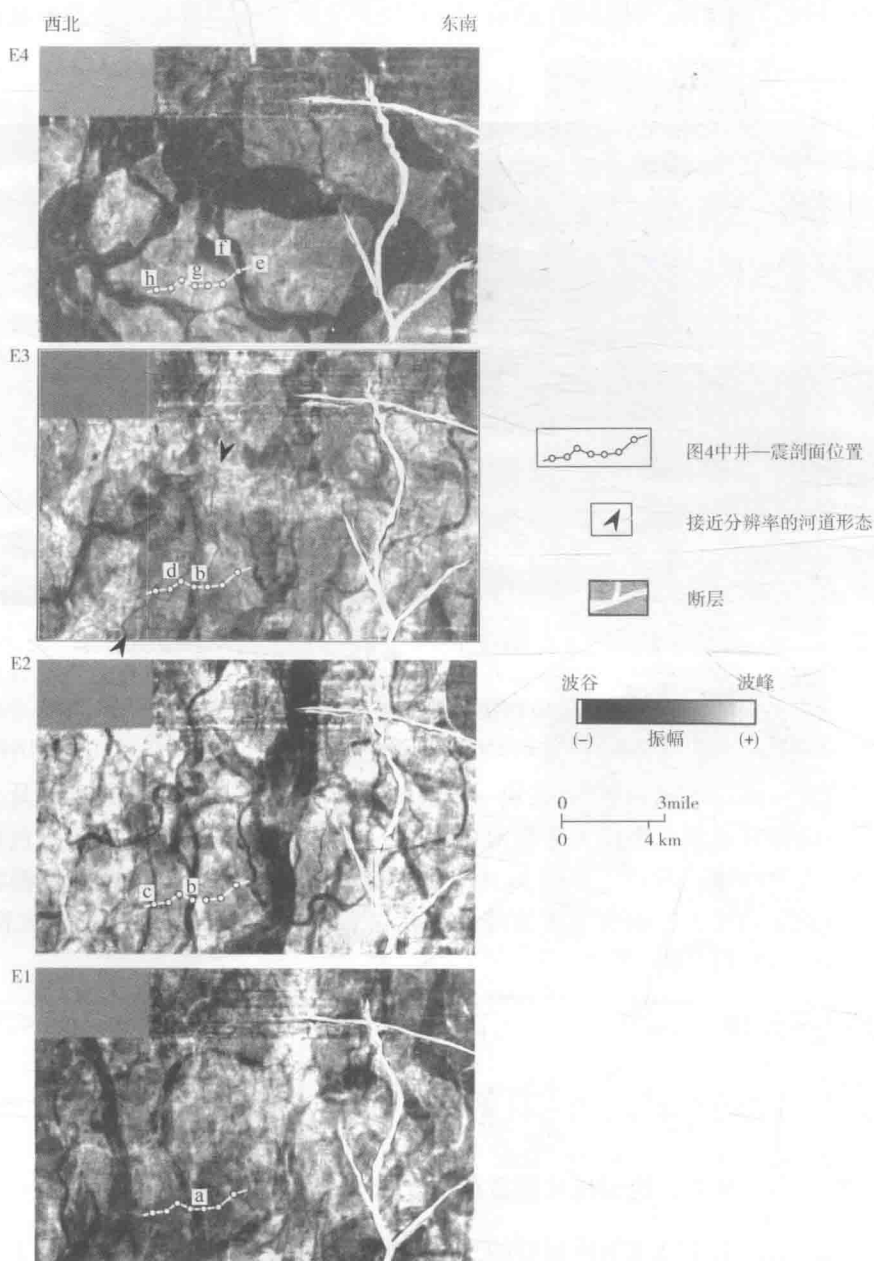


图 5 表示垂向和水平分辨率的地层切片

E1 至 E4 代表了在 30ms 厚(33m)地层中的 4 个河流沉积阶段，位置如图 4 所示

曲流河沉积特征，解释为海岸平原河道(图 5 中 E3，箭头处)。该处测井资料表明该河道砂岩厚约 4m。图 5 中 E3 图像仅位于 E2 图像上方 6ms(7m)处，可能受到 E2 河流沉积体系的影响。尽管这样，E3 曲流河道的确定是可信的。因为在复杂的地层条件下，该区的地震垂向分辨率可低于 $\frac{1}{4}\lambda$ ，这可能代表了地层切片的分辨率极限。

五、沉积结构分析

很少有人关注储层规模的沉积结构的地震分析。通常认为，地震资料没有足够的分辨率来详细研究沉积体系的内部结构。然而，证据表明，地层切片是研究沉积体系结构某些方面(粒度变化、层型、侵蚀、沉积产状等)的良好工具。

例如，砂岩粒度或层型变化可导致沉积体顶、底的地震反射不对称性。在地层切片图像上(相对地质时间)，不同深度的、相同沉积体系的地震切片图像表现出了镜像关系，构成了图像对偶。当适当调整地震子波相位(90°)时，图像对偶反映了砂岩粒度变化趋势。在弗米利恩 50 区块—老虎滩三维探区，可利用地层切片确定三个粒度变化趋势：向上变细(侧向加积)、块状(加积)和向上变粗(前积)的趋势。河流沉积对应典型的向上变细砂岩沉积(图 6a 测井曲线)。大多数河流沉积对应波谷之上的波峰图像(图 6a 切片)。厚度更大的下切谷沉积为纯净的砂岩沉积，对应箱形电测曲线(图 6b 测井曲线)。除了波谷处外(图 6b 切片)，地震波峰处没有下切谷沉积的镜像图像。然而，向上变粗的三角洲沉积体系(图 6c 测井曲线)在地震波峰之上的波谷处产生了与上述河流沉积体系(图 6a 地层切片)相反的镜像图像(图 6c 地层切片)。

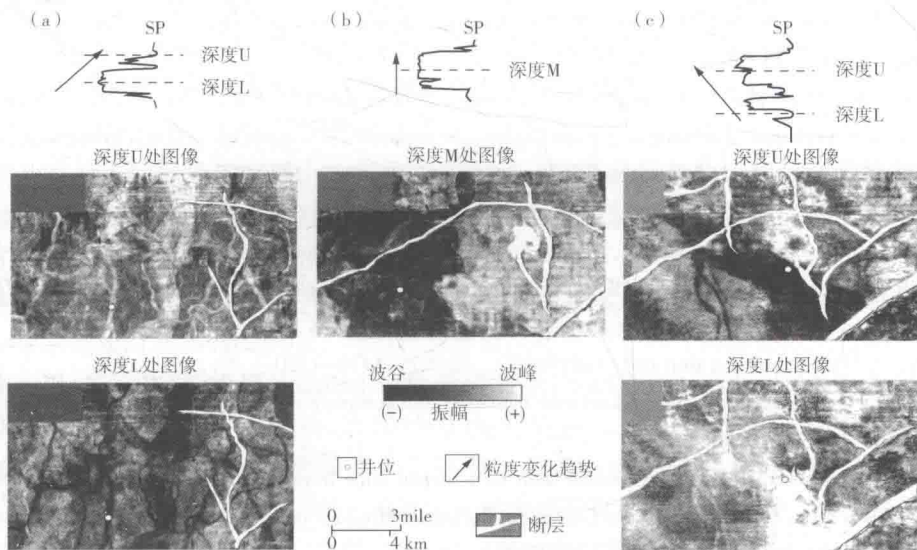


图 6 根据弗米利恩 50 区块—老虎滩三维探区多组地层切片图像推断的三种沉积结构(粒度变化趋势)

(a) 波谷之上的波峰图像表示向上粒度变细或侧向加积；(b) 无波峰特征的波谷图像表示了块状或加积层型；

(c) 波峰之上的波谷图像表示了向上变粗的或前积过程

六、结论

在两个地震勘探区块，上中新统一下上新统经典地震相单元的分类和分析表明了现今路

易斯安那州海岸区低分辨率的区域沉积背景特征。在没有充分的钻井资料控制下,地震相的解释具有多解性。经典地震相定义的垂向地震波形关系是砂页岩结构的地震响应,但分辨率较低(100m)。二维地震结构形态不是特定沉积环境的唯一响应,二维地震相可以或不可以代表类似的沉积环境。

与经典地震相分析相比,地层切片在沉积相解释方面具有更高的分辨率,表现出了良好的唯一性。比如,在主频为30Hz的地震资料中,可识别厚度为4m、宽度为70m的曲流河道沉积。地层切片也能将岩性与储层规模的沉积结构联系起来,利用地震资料研究沉积学特征。

近年来,大量三维地震勘探资料的增加使我们可以开展作为盆地分析新途径的地震沉积学研究。地震沉积学可以提供下列详细的信息:(1)储层和烃源岩的分布;(2)储层质量;(3)油气运移通道;(4)可能的地层圈闭位置。已经证明,上述信息对于勘探决策都是非常重要的。

参 考 文 献

- Brown A R, C G Dahm, R T Graebner. 1981. A stratigraphic case history using three-dimensional seismic data in the Gulf of Thailand; *Geophysical Prospecting*, 29(3): 327-349.
- Dahm C G, R J Graebner. 1979. Field development with three-dimensional seismic methods in Gulf of Thailand a case history in *Offshore Technology Conference*. Paper 3657: 1591-2595.
- Galloway W E, P E Ganey-Cuný, X Li, R Buffer. 2000. Cenozoic depositional history of the Gulf of Mexico basin; *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 84(11): 1743-1774.
- Hunt J L, Jr, G Burgess. 1995. Depositional styles from Miocene through Pleistocene in the north-central Gulf of Mexico: an historical perspective; *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 45: 275-284.
- Lindsey J P. 1989. The Fresnel zone and its interpretive significance; *Geophysics: The Leading Edge of Exploration*, 8(10): 33-39.
- Mitchum R M, Jr, P R Vail, J B Sangree. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. //C E Payton. *Seismic Stratigraphy: American Association of Petroleum Geologists Memoir* 26: 117-134.
- Posamentier H W, G A Dom, M J Cole, et al. 1996. Imaging elements of depositional systems with 3-D seismic data: a case study; *Gulf Coast Section, SEPM Foundation, 17th Annual Research Conference*: 213-228.
- Vail P R, R M Mitchum, Jr, et al. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. //C E Payton. *Seismic Stratigraphy: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 26: 49-212.
- Widess M B. 1973. How thin is a thin bed? *Geophysics*, 38(6): 1176-1180.
- Zeng H. 1994. Facies-guided 3-dimensional seismic modeling and reservoir characterization; *The University of Texas at Austin, Ph. D. dissertation*: 164.
- Zeng H. 1996. A Pliocene distributary system as seen on a stratal slice from an onshore Louisiana 3-D seismic volume; *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 80(2), cover page.
- Zeng H, M M Backus, K T Barrow, N Tyler. 1995. Three-dimensional seismic modeling and seismic facies imaging; *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 45: 621-628.
- Zeng H, M M Backus, K T Barrow, N Tyler. 1998a. Stratal slicing, part I: realistic 3-D seismic model; *Geophysics*, 63(2): 502-513.
- Zeng H, S C Henry, J P Riola. 1998b. Stratal slicing, part II: real seismic data; *Geophysics*, 63(2): 514-522.

译自 *Gulf Coast Association of Geological Societies Transaction*, 2001, 1(1): 413-420.

地震沉积学形成：路易斯安那州近海老虎滩地区和弗米利恩 50 区块中新世—上新世沉积物的地层切片研究

Zeng Hongliu Tucker F. Hentz L. J. Wood 著，陈欢庆译，Zeng Hongliu 校

引言

许多乘坐过飞机的人都观察过现代陆地表面形态，并对河流、三角洲、障壁岛、沙丘等地貌特征产生强烈好奇。这些地貌特征是现代时间界面的完整体现。我们可以通过平面几何学和地形学特点来对图像上的这些特征进行沉积学分类。实际上，现代三维地震技术已经使得描述岩石记录中类似的、但时间上更古老的地貌或沉积特征成为可能。然而，尽管许多储层级别(从井到井)的特征能在地震剖面上检测出来，但是受数据带宽的限制，人们不能在垂向剖面上将其分辨和解释出来。只有在平面上，这些沉积体有足够大的面积被地震资料分辨，并可在地质时间界面上显示出来。

运用时间切片或沿层切片来反映地质时间界面还存在问题。时间切片可以通过恒定的旅行时间在地震数据体中提取。类似地，沿层切片也可以通过从一个解释地震层位平行外推而获取。无论使用何种方法，要想获取精确的切片，必须假设地层是水平均厚层状或者席状的。然而，大多数地震数据体都具有明显厚度变化和断层发育特征，这些都将导致沿层切片或时间切片穿过不同的地质时间。为解决这些问题，需要发展新的切片提取工具和方法以保证正确地提取等时的数据点。这些工具应当最大限度地保留平面地貌学或沉积学特征，这些特征对于正确的地震解释十分有用。

在本次研究中，我们运用了一种叫做地层切片的新技术来提高在楔形的和同沉积断裂的地层层序中提取地质时间界面的精度，同时尽量保留沉积体的平面几何特征以进行储层沉积相解释。弗米利恩(Vermilion)50 区块油田，或称斯塔菲克(Starfak)油田以及附近的老虎滩油田位于路易斯安那州近海浅水区(图 1)，共有 150 口钻井资料。三维地震资料采集了 23mile×14mile 的中新统到上新统地震反射，剖面深度 0.4~4.0s，包含该区所有主力油气产层。虽然三维地震工区位于南路易斯安那陆棚底辟带，但除了一些中等程度的褶皱和断裂，地层并没有被盐构造严重破坏。数据的品质很好，主频的范围从浅层的 40Hz 到深层的 20Hz。

一、地震岩性学关系

首先，把 30-2 井上新统的一段声波和密度测井曲线转换成波阻抗曲线，再将波阻抗与依据密度和自然伽马求得的有效孔隙度(ϕ_e)作图(图 2)。有效孔隙度在此指示岩性，其中有效孔隙度 ϕ_e 大于 0.3 代表纯净的砂岩，有效孔隙度 ϕ_e 小于 0.1 代表页岩，介于两者之间的为泥质砂岩或砂质泥岩。从图 2 中可以看出，波阻抗和有效孔隙度从统计学上看呈反相

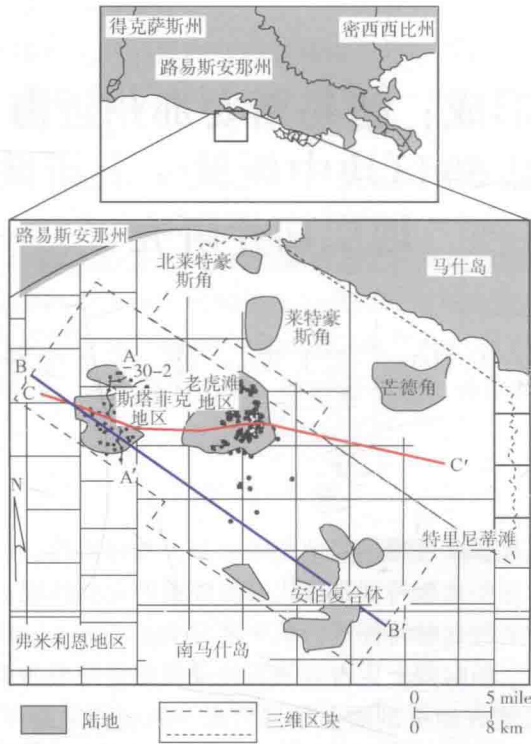


图1 斯塔菲克油田和老虎滩油田的三维地震工区和井位置

关的线性关系。换句话说，砂岩要比页岩波阻抗值低。如果被厚层泥岩分隔，砂岩的顶部将呈现为波谷特征（零相位子波，SEG 反极性）。

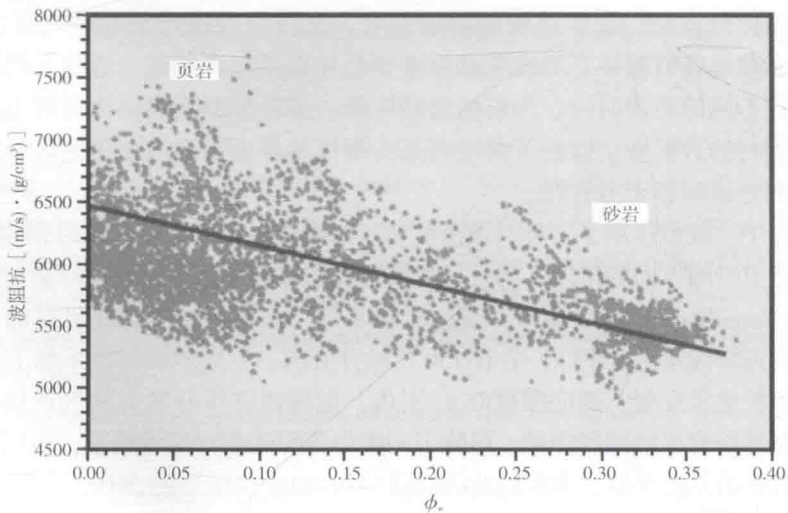


图2 作为岩性(有效孔隙度)标记的波阻抗(AI)

利用声波和密度曲线计算求得 AI(速度和密度的乘积)；根据密度和自然伽马曲线求得有效孔隙度(ϕ_e)
(去掉了黏土作用对密度孔隙度的影响)；数据位于 30-2 井 2000~2700m(上中新统)

通过仔细的时深转换和地震的相位调整，我们可以在井震约束的剖面上直接看到砂岩和页岩。超过 90% 的砂岩(中中新统一上新统)可以通过地震波谷(红色)比较准确地

识别。不但区域连片的砂岩层在地震剖面上表现为波谷特征(B, I 和 N 砂岩; 图 3), 而且许多透镜状的砂体也与补丁状地震同相轴有良好的对比(A, B 和 C 砂岩; 图 3)。相反, 大多数的页岩在地震反射剖面上表现为波峰强反射(黑色)。唯一的例外是中中新统的一些厚层状的页岩体表现为波峰和波谷复杂的交织体, 指示内部非均质性(R-T1; 图 3)。通过有限的井上标定, 地震振幅(波谷)可以作为指示砂岩的一个可靠的标志。然而, 振幅和沉积相之间还缺乏直接的相关关系, 尚需做更多的工作。

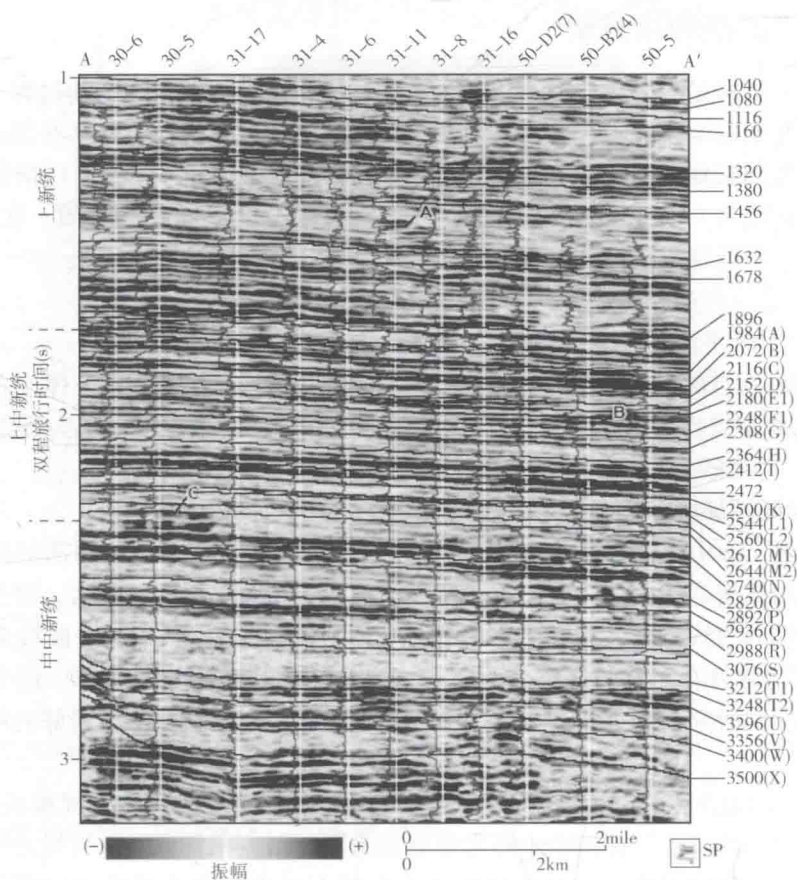


图 3 在斯塔菲克油田横剖面 A—A' 上实现的双程旅行时井震对比

地层切片以地质时间(无尺度)顺序按数字排列; 德士古公司命名的储层(岩石地层学)单元以括号内的字母标识; 三个透镜状砂岩可与补丁状地震同相轴对比, 分别命名为 A、B、C

二、地层切片

如果想让地震属性在最大范围内代表一个沉积单元(例如最大海泛面), 它们必须沿着一个沉积界面(地质时间面)提取。我们称这样的一个地震界面显示为地层切片。地层切片通过在与地质时间界面等价的地震标志同相轴之间线性内插改善地震界面的展示效果。把问题简化一下, 如果这些地震标志同相轴能够轻易追踪, 在做地层切片时, 需假设所有的沉积单元在横向上厚度成比例, 在地震标志同相轴之间没有不整合(削蚀)和其他不协调的反射(上超、下超和顶超等)存在。然而, 在后面我们将展示, 高等级层序边界属于一个例外。沿着这些层序界面平均的侵蚀量仅十数米, 低于地震

分辨率。

为生成中中新统一上新统的一个地层切片数据体,我们使用了13个地震标志同相轴。在大约3s区间内的776个地层切片中,有一些被标在井震剖面(图3)上,以展示代表性双程旅行时地层切片及其与地震同相轴、岩性地层单元和测井曲线特征之间的关系。这些切片演示了在盆地发展不同时期的典型沉积相。然而,在此仅选择性地讨论几张地层切片来探讨地层切片的提取方法和解释要点。

三、模式识别和相分析

地层切片的解释是一个将所有可用的地质钻井资料与地震数据综合的过程。关键是要运用现代沉积学和地貌学模式来帮助识别地震属性切片上的沉积现象。在某些情况下,仅仅根据模式就足以准确解释沉积相(例如一个曲流河沉积体系)。在另外的一些情况下,钻井信息,例如测井相或者井上地层叠置的样式能帮助我们确定沉积特征的性质。在本次研究中,使用了下列信息进行地震模式和沉积相之间的转换:

- (1)几何形态=河道(鞋带状)、叶状、指状、席状/杂乱等。
- (2)模式结构=平滑、补丁状(变化的)、蠕虫状等。
- (3)自然伽马/自然电位模式=向上变细、向上变粗、块状、锯齿状、平直的等。
- (4)振幅(地震岩性学关系)=负振幅(厚层/块状砂岩)、正振幅(页岩/凝缩段)、低/变振幅(变极性,薄层砂岩/页岩)、强负振幅(含气砂岩)。
- (5)关系=区域环境、构造、层序地层学解释的海平面/体系域等。

例如,切片1160(图4a)指示中等弯曲程度的、类似河道的特征。内部的振幅连续性要好于周围。利用地震岩性模型,我们推断负极性的振幅指示厚层状的砂岩。穿过这些特征的井显示向上变细的曲线特征,为河道充填的一个证据(图4a中210-95井曲线2和218-54井曲线3)。在河道之外,测井曲线解释为页岩(图4a中218-54井曲线3)。这个切片来自上新统,层序地层学研究认为大致属于滨岸平原相。因此,对于这些特征最好的解释是小型支流河道充填。

切片2248(图4b)展示了一个明显不同的河道类型。这种河道大多规模较大,低弯度,有向下游局部分支的特征。在河道中心主要表现为平滑负振幅特征,这与河道周围的席状正振幅特征形成了鲜明的对比。这些砂岩在井上主要表现为块状或指状测井响应特征(图4b中218-3井曲线1和218-42井曲线2)。相反,周围的正振幅在井上与页岩相关(图4b中218-10井曲线3)。位于上新统的滨岸平原沉积之下,这些中新统特征代表下切裸露陆棚沉积的下切谷充填相特征。下切谷充填包括低位体系域与海侵体系域沉积。有时可观察到下切谷在滨岸平原沉积物上的上倾尖灭(图4a),指示至少有些下切谷切入了低位体系域滨岸平原的最靠陆部分。

切片2472(图4c)表现为叶状和指状几何学特征,负振幅指示厚层状的砂岩体。每个指状或河道状特征向下倾方向渐变为低或变振幅的叶状体。在井中,河道特征表现为向上变细的支流河道叠置在向上变粗的前积三角洲沉积之上(图4c中210-93井曲线1)。三角洲前缘沉积表现为细粒的、向上变粗的薄层砂泥岩互层反旋回(测井曲线为锯齿状;图4c中31-2井曲线3)。在前三角洲/陆棚环境,砂岩含量进一步减少,井中所见为向上略变粗的泥质沉积(图4c中31-2井曲线3)。由于在层序格架内属于高位体系域,这套沉积被解释为高位期的陆棚三角洲。

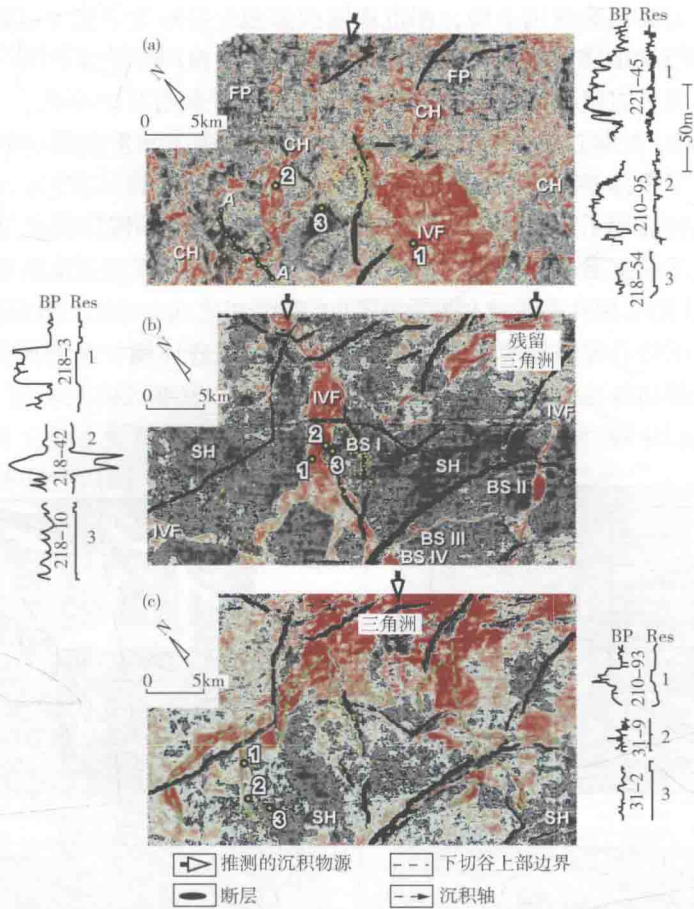


图4 振幅地层切片展示的(a)上新统滨岸平原(切片 1160), (b)上中新统下切谷充填(切片 2248)和 (c)上中新统高位三角洲体系(切片 2472)

地层位置如图3所示; CH—河道; FP—泛滥平原; IVF—下切谷充填; SH—陆棚; BS I—IV—振幅亮点

四、直接烃类指示(DHI)和地层切片

在所研究层段,含气砂岩一般表现为亮点特征。然而,凝缩层和盐层有时也表现为亮点,给解释造成困惑。在地层切片上进行相分析可以减少这种多解性。例如,老虎滩油田的F1砂岩在几口井产气(图4b中218-42井曲线2)。该储层被解释为下切谷河道充填砂岩,地震反射为亮点(BS I)。虽然下切谷充填砂岩厚度的变化可以引起振幅的变化,但是没有证据表明在整个地区有砂岩厚度明显的变化。因此,剧烈的振幅变化是流体含量的函数,可用来发现新的钻探目标。F1砂岩中有几个这种未钻遇的强振幅下切谷砂岩段(BS II—IV;图4b)。它们在上倾方向被断层阻断,可能形成构造/地层含气圈闭。在这些砂岩当中,BS II最近已被钻遇证明为产气层。

五、地层切片与时间切片和沿层切片的对比

时间切片和沿层切片是现在最常见的、用以提取地层学信息的地震界面显示。然而对于沉积相分析而言,这两种方法都有局限性。时间切片只有当地层呈水平席状分布时才是地质时间界面。沿层切片可用于有构造倾角的地层,但地层必须是席状的。地层切片考虑了地层

厚度变化，所以不需要这些应用条件，在沉积楔状体和生长断块中都可以获得正确的切片。

以 M1 砂岩(图 3 和图 5)为例。井资料地质分析表明 M1 砂岩由下切谷充填砂岩以及高位陆棚三角洲砂岩和页岩组成。砂岩的厚度 0~30m，在井间有显著变化。一张时间切片(图 5a、b)在时间 2334ms 处穿过 M1 砂岩最厚处，但由于受构造倾角和断层的影响，并未见到砂体主要部分。一个平行于参照层 B 的沿层切片(图 5a)效果有一定改善，在厚度变化不大和无生长断层的地区显示了两个下切谷体系(图 5c)。然而，下切谷受断层影响，突然在东部终止，暗示在地质学上是不合理的。这种局限性是沿层切片无法适应断层两侧地层厚度变化而引起的。图 5d 地层切片是按比例在参照层 A 和层 B 之间获取的(图 5a)，进一步改善了层位追踪，显示了下切谷完整轮廓以及其前方低位体系域砂体楔，从而印证了 M1 砂体的层序地层学解释。地层切片控制厚度变化的能力体现在整个三维区内沿层切片(图 5c)和地层切片(图 5d)在振幅上的差异。

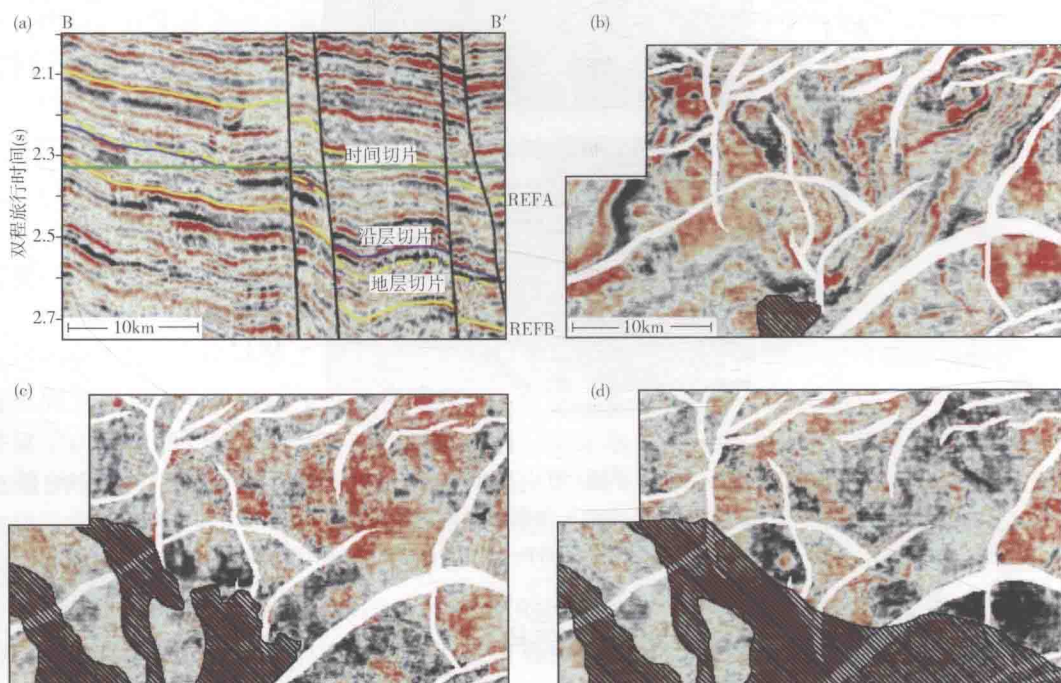


图 5 M1 砂体时间切片、沿层切片和地层切片之间的对比关系

- (a) 地震剖面 B—B'展示了不同方法之间的关系；(b) 下切谷最厚处的时间切片 2334ms 错过了低位体系域沉积体系的大部分；(c) 在参考面 B 之上 90ms 的沿层切片，在地层几乎是席状的地区复原了部分体系，在另一些地区则完全错过了 M1 砂；(d) 地层切片通过在参考界面 A 和 B 之间等比例切片，反映了最完整的低位沉积体系

六、重回虚拟成像

地层切片从本质上而言是在参考面之间或地质时间格架内的一组假想的面。地层切片不必沿着地震同相轴走，不论这些同相轴是波峰、波谷或过零点。这样做依据的假设是地震同相轴不一定在储层尺度内严格遵循地质时间。这种方法使我们想起了早期地震技术，当时采集和处理的地震资料质量很差，没有多少同相轴可以追踪，解释者被迫在地震剖面上直接勾画假想的层面。在过去的 20 年间，地震数据的品质和分辨率得到了大幅度提高，解释者有