

文章编号:1000-0550(2011)03-0417-10

地震沉积学在中国:回顾和展望

曾洪流

(美国德克萨斯大学奥斯丁分校 美国 78758)

摘要 介绍了地震沉积学的发展历史,讨论了地震沉积学的涵义、地质和地球物理背景、关键技术以及近期发展展望。地震沉积学是一个新的学科领域,在其发展过程中不仅得到西方石油工业界和学术界的大力扶持,也得到了中国大多数学者的认同和支持。地震沉积学与地震地层学和层序地层学有着内在联系,但在内容上更注重研究沉积岩和沉积作用。在目前技术条件下,地震沉积学体现为地震岩性学和地震地貌学的综合。地震沉积学得益于对地震水平分辨能力的利用,对地震反射穿时性的认识,及利用等时地层格架内的虚拟作图解决薄层水平成像问题的顿悟。地震沉积学经济实用的两项关键技术是地震道 90° 相位化和地层切片。中国地震沉积学的近期发展可能出现在陆相盆地地震岩性学方法、陆相盆地的地震沉积相模式、及陆相盆地地震沉积学研究规范等方面。

关键词 地震沉积学

作者简介 曾洪流 男 1957年出生 研究员 博士 沉积学及地球物理学 E-mail: hongliu.zeng@beg.utexas.edu
中图分类号 P512.2 P539.1 文献标识码 A

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领域。近年来,地震沉积学在中国石油地质界获得了相当程度的认知,有关概述、研究、应用和讨论的文章显著增加^[1-28]。但由于地震沉积学仍在发展早期阶段,许多概念仍有争论,尚不成熟,目前尚无专著;早期公开发表的主要文献用英语写作,经翻译后才传入中国,难免有文字理解上的偏差;大多数学者涉及地震沉积学研究时间不长,加上缺乏陆相盆地系统研究案例,工作中难免人云亦云,不易建立起信心。因此,对地震沉积学的历史作一个简短回顾,厘清地震沉积学的涵义,对地震沉积学产生的地质、地球物理背景和关键技术进行系统概括,并对近期可能的发展方向作一推测,很有必要。本文旨在帮助有兴趣的读者建立地震沉积学完整概念,在阅读文献时把握重点,减少混淆,对地震沉积学方法的价值作出自己独立的判断。

1 发展简史

地震沉积学的出现与1970年代三维地震技术的发明和在随后几十年的大量普及应用密不可分。1979年Dahm和Graebner第一次在地震时间切片上看到了曲流河道的高分辨率振幅影像^[29],展示了用地震资料水平成像术直接显示沉积体系古地形、古地

貌特征的巨大潜力。在1980年代,地球物理资料解释软件公司(例如Landmark, GeoQuest,等等)开发出层位切片(Horizon slice)技术,改善了地震沉积相成像水平,被工业界广泛采用。笔者于1994年在其博士论文^[30]中第一次讨论了地层切片(Stratal slice)的概念,提出了地震沉积相成像在复杂地层环境下实现的方法,并用仿真地质、地震模型演示了其制作方法,进行了误差分析。1998年,笔者及其同事们第一次提出地震沉积学(Seismic Sedimentology)的概念^[31-32]。2001年,Posamentier^[33]提出了地震地貌学(Seismic Geomorphology)的概念。2004年,笔者及其同事提出地震沉积学详细定义,指出地震沉积学是用地震资料研究沉积岩和沉积作用的一门学科,在当前条件下体现为地震岩性学和地震地貌学的综合^[34]。2000年代地震沉积学和地震地貌学在美国发展很快。2005年地震地貌学国际会议在美国休士顿市召开,并在会后出版专集^[35]。2008年,美国石油地质学家协会(AAPG)圣安东尼奥年会设地震沉积学专场。2009年,美国勘探地球物理学家协会(SEG)北京会议设地震沉积学专场,集中展示了中国学者的研究成果。2010年底,美国沉积学会海湾地区分会(GCSSEPM)研究年会第一次召开沉积体系地震成像国际会议,展示了30多篇关于地震地貌学和地震沉积学的研究论文。

值得一提的是,地震沉积学的概念于2000年左

收稿日期:2010-11-05;收修改稿日期:2011-02-20

右即已引入国内。中国石油东方地球物理公司、中国石油大学(北京、山东)、和中国石油勘探开发研究院是最早关注和应用地震沉积学的几个单位。中国石油东方地球物理公司的几位资深老专家对这一新兴学科表示了浓厚兴趣;袁秉衡先生最早倡导并参与了有关文献编译;孟尔盛先生生前在不同场合宣讲、推荐90°相位技术;李庆忠先生对地层切片技术也进行了肯定^[36]。中国石油大学林承焰、董春梅等最早撰文介绍地震沉积学和他的研究体会^[1~4];朱筱敏、董艳蕾等最早发表陆相盆地地震沉积学系统研究案例,并介绍给国外同行^[10,37];朱筱敏等编译的“地震沉积学”国外文集最近即将由石油工业出版社出版。赵文智等人第一次将地震沉积学应用于中国陆相盆地高分辨率层序地层学和岩性油气藏勘探领域^[38]等等。

2 地震沉积学涵义

笔者和 Hentz^[33] 定义地震沉积学为“用地震资料研究沉积岩和沉积作用”。这一定义较为宽泛,可直接或间接用于沉积岩、沉积相和沉积环境解释的地震解释内容均可纳入,目的是在当时地震沉积学学科体系尚处萌芽状态和三维地震采集、处理、解释技术日新月异的发展环境下,为日后学科的发展留下足够空间。但在已为工业界广泛应用的地震地层学、层序地层学均部分涉及沉积体系解释的情况下,这种宽泛定义对研究者,尤其对初学者,在理解上容易造成误解

和混淆。

为帮助大家厘清地震沉积学(或笔者倡导的地震沉积学)的准确涵义,必须从地层学和沉积学的基本定义谈起(图1)。国际地质科学联合会地层分会对地层学的定义是:描述地壳岩体(沉积岩、火成岩和变质岩)及其结构(可制图单元)的科学;基本程序包括地层识别(描述、分类和命名)和地层对比^[39]。美国地质学会对沉积学的定义是:研究沉积岩和沉积作用的科学^[40]。众所周知,用地震资料研究地层学和沉积学受制于地震分辨率。普遍接受的垂向地震分辨率概念是四分之一子波波长^[41],这也是肉眼能识别的单个地震同相轴的最小厚度;单个地震同相轴的最大厚度约为二分之一子波波长。在盆地尺度(或含矿区带尺度,地层单元厚度大于50 m或大于2~3个同相轴厚度),传统的“相面法”,或用肉眼观察地震剖面反射特征的方法很适用,地层学研究可在地震层序格架内进行,而沉积学信息可用地震相分析获得。但在储层尺度(或砂体尺度,地层单元厚度小于50 m,特别是小于一个同相轴厚度),则情况相当不同,“相面法”不再适用,必须寻找新的解释方法和手段。此时地层格架需用高级层序(或高分辨率层序、高频层序)定义;利用地震资料开展沉积学研究则受制于目前技术水平,仅能研究地震岩性学、地震地貌学、沉积体系结构和盆地沉积史^[34](其中地震岩性学和地震地貌学是核心内容)。

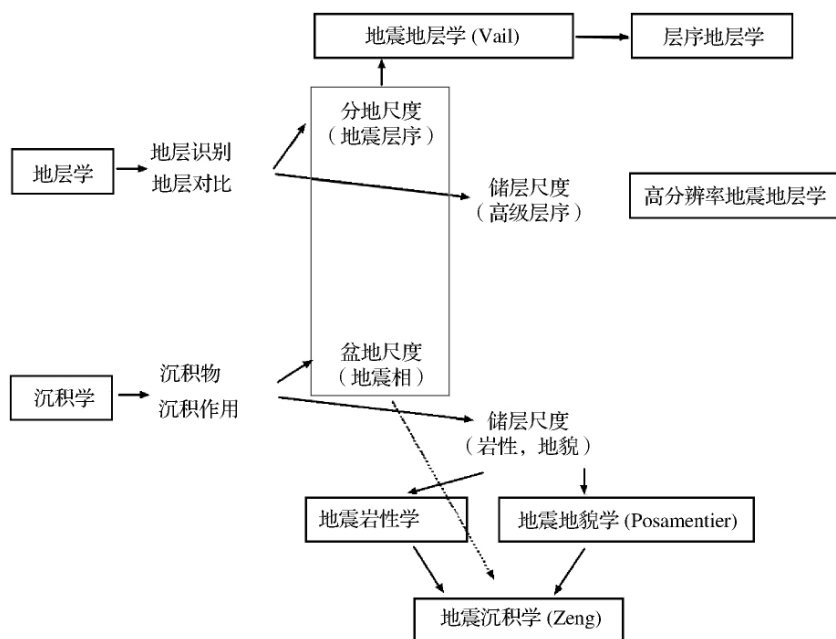


图1 地震沉积学与相关学科的关系。

Fig. 1 Relationship between seismic sedimentology and related disciplines

然而,目前为学术界和工业界广泛接受的地震地层学概念并不是按照这一学科体系走的。Vail 等人^[42]的地震地层学主要包括地震层序划分对比和地震相分析两个部分,分属于地层学和沉积学两个不同的范畴。这种情况反映了当时地震资料以二维为主,地震解释的综合水平不高,以及研究中总是将两者都同时列为研究目标的状态,大家并未感觉到任何不妥。但是地震地层学并未十分强调地震层序(沉积层序)和地震相(沉积相)的因果关系,在实用上地震相分析是可以单独进行的。后来出现的层序地层学^[43]着重强调沉积层序和沉积相的因果关系,相同的地震相若处于不同的体系域,可能代表完全不同的沉积体系。这就使得在层序地层学中地层学和沉积相研究密不可分。

从还原学科体系本来面目的角度出发,笔者认为应该将地震地层学局限于地层学研究的范畴,而让地震沉积学涵盖所有与沉积岩与沉积作用有关的地震解释。目前的定义^[34]是将地震沉积学局限于地震岩性学和地震地貌学的综合研究。如果学术界认可,将来或许可将传统的地震相分析部分纳入。笔者认为单独的地震地貌学^[33]研究不足以解决储层岩性预测问题(例如弯曲河道地貌单元既可代表活动河道砂质充填,也可代表废弃河道泥质沉积),不能满足薄储层,尤其是中国陆相盆地薄砂岩储层预测的要求。

综上所述,笔者等2004年^[34]对地震沉积学的宽泛定义(用地震资料研究沉积岩和沉积作用)和窄义定义(地震岩性学、地震地貌学、沉积体系结构和盆地沉积史)是符合学科逻辑分类体系的,具有合理性。但综合近年来的技术发展及实用研究的需要,可将窄义地震沉积学的定义进一步明确为:通过地震岩性学(岩性、厚度、物性和流体等特征)、地震地貌学(古沉积地貌、古侵蚀地貌、地貌单元相互关系和演变、及其它岩类形态)的综合分析,研究岩性、沉积成因、沉积体系和盆地充填历史的学科。

图1的目的是厘清地震沉积学与其他相关学科的内在关系。我们应该认识到学科分类和定义既是学术问题,也要照顾实用性和使用习惯,问题比较复杂,并非一日之功。本文的讨论仅为抛砖引玉而已。

3 地震沉积学产生的地质和地球物理背景

各种地球物理资料解释方法都有其特定的地质、地球物理条件。了解这些条件对理解该方法的使用

价值、合理性和局限性很有帮助。岩石的层状结构和不同岩层间的声学特性(波阻抗)差异是地震地层学产生的基础。通过分析岩层间地震反射的波形特征(振幅、频率、连续性等)、地震反射终止关系(削蚀、顶超、上超、下超等)、相互关系(几何形态、内部结构等),我们可从宏观(盆地尺度)上推断岩层的地质年代关系、沉积相组成和有利含矿带。然而,地震地层学对微观(储层尺度)研究的实用性就不能满足要求。地震分辨率的限制导致传统的地震层序分析和地震相分析效果变差,甚至不可能完成储层尺度的油气勘探开发研究。要充分利用地震资料开展储层尺度的油气勘探开发研究,或要减少地震分辨率的限制,我们必须利用薄层条件下(地层厚度小于二分之一波长)地震反射和地层干涉的一些特殊规律,寻找新的、能反映储层沉积学性质的解释方法。

制约薄层沉积体系地震成像的因素主要有两个。一是从沉积体的几何特征来说,地质学家很早就认识到,对碎屑岩来说,单个沉积砂体的横向尺寸通常明显大于其纵向尺寸。根据 Galloway 和 Hobday^[44]的统计,即使是相变剧烈的冲积扇砂体,其平均厚度:宽度比也有1:5左右;对相变缓慢的沉积环境(如三角洲边缘砂体、滩坝砂体),这一比例可达1:1000或更高。在中国,除了少量类型的碳酸盐次生储层(如塔里木盆地奥陶系的热液岩溶储层和古岩溶塌陷体,图2A)厚度:宽度接近1:1外,大多数储层,尤其是碎屑岩储层(如松辽盆地白垩系砂岩,图2B),厚度均远远小于宽度。但研究已经证实,对高质量的三维地震数据体而言,地震水平分辨率与纵向分辨率是近似相等的^[45]。这就意味着沉积体的地震成像在水平方向上比在纵向上容易得多。例如图3A,红色振幅代表的地震异常体在水平方向(地层切片)上被地震资料分辨得很好,而且很容易与沉积相挂钩。凡是乘过飞机旅行并观察过地表沉积地貌的人都能解释出这是曲流河道砂体。但在剖面上(图3B),此砂体却未被地震波形充分分辨,地质意义很难解释。从这个例子可以看出,地震成像中对水平分辨率的利用开辟了地震解释的新方向,可以大大改善储层预测水平。但要特别指出的是,这种对水平分辨率的利用只是暂时“绕开”了薄层解释的难点,并不意味着彻底解决了薄层分辨问题。在水平切片上看到的薄层沉积体(如图3河道)顶底仍不清晰,其视厚度(同相轴宽度)并不等于真厚度,只能视为薄层(10~30 m,取决于资料频率成分)沉积单元的综合反映。薄层问题的真正解

决还有待于将来地震资料频率成分的进一步提高。

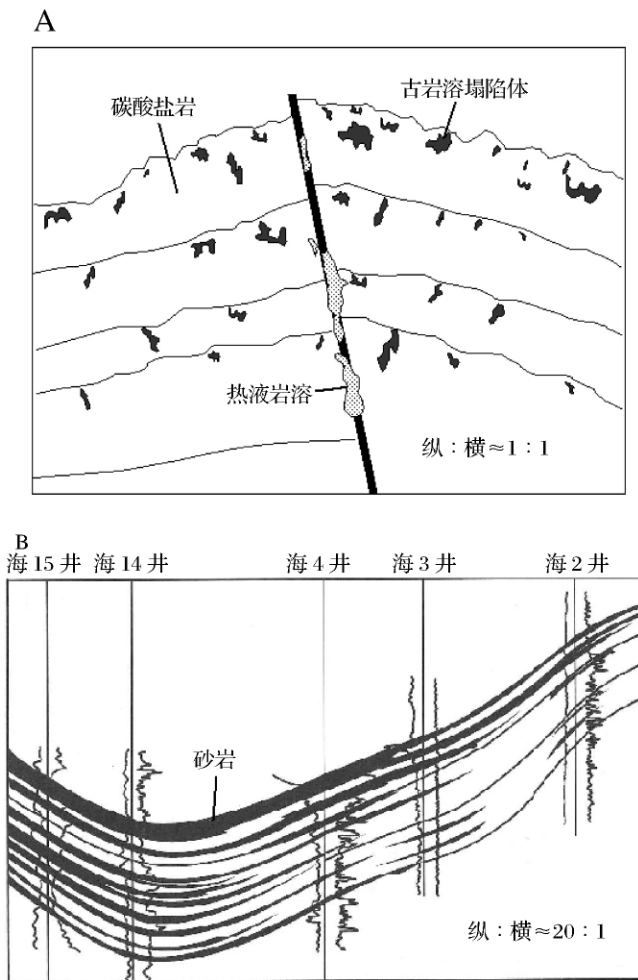


图2 典型储层几何特征

A. 古岩溶塌陷体和热液岩溶储层等次生碳酸盐岩储层横向尺寸和纵向尺寸大致相当(如塔里木盆地轮南奥陶系储层); B. 砂岩储层横向尺寸明显大于纵向尺寸(如松辽盆地白垩系储层,据蔡希源等(2003)^[46]修改)

Fig. 2 Geometries of typical hydrocarbon reservoirs

A. Horizontal dimension of carbonate reservoirs in collapsed paleocaves and geothermal karsts is roughly equal to their vertical dimension (eg., Ordovician reservoirs in Lunan area, Tarim Basin); B. Horizontal dimension of sandstone reservoirs is significantly greater than their vertical dimension (eg., Cretaceous reservoir in Songliao basin, modified from Cai *et al.*, 2003)

制约薄层沉积体系地震成像的另一个主要因素是,许多沉积界面穿过地震同相轴,不能用追踪同相轴的方法进行沉积界面解释。模型和实际资料的观察均已证明^[31, 32, 47],地震反射是地震波频率的函数,即地震反射同相轴的产状和位置不是地层(沉积)界面的唯一代表。尽管地震反射剖面中代表稳定相带(如最大洪泛面凝缩层和深湖泥岩)或特殊岩性(如

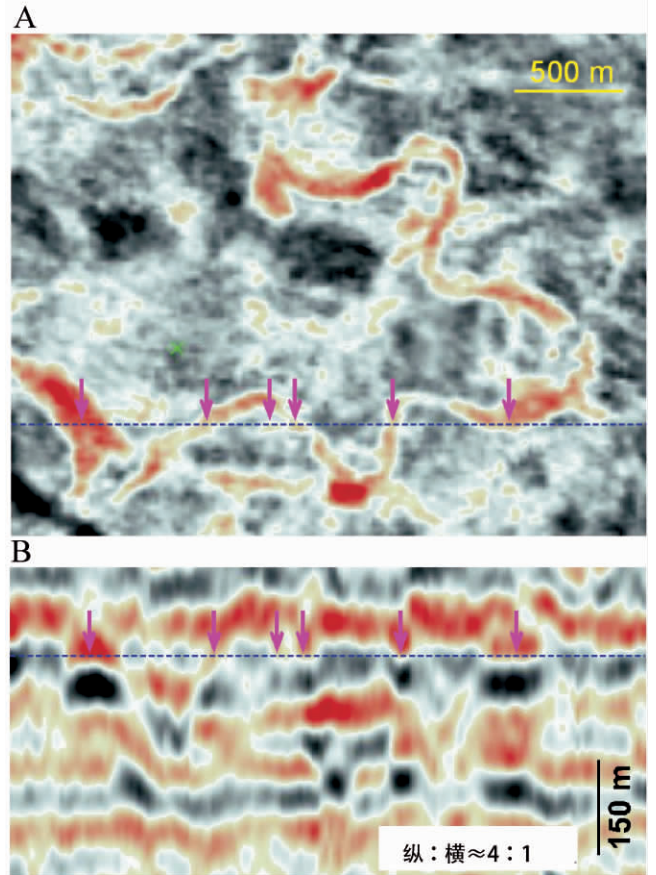


图3 河道充填砂体水平方向和纵向方向地震成像对比

A. 这些宽约50~200 m的河道充填砂体在水平方向(地层切片)上被地震资料分辨,显示清晰的曲流河几何形态; B. 同一河道反射(比较箭头位置)在纵向上未被地震资料分辨,与附近其它砂体反射互相干涉形成复合反射,其地质含义很难解释清楚。地震资料主频约50 Hz,对应地震分辨率为15 m(10 ms)。附近钻井显示砂体厚度小于15 m

Fig. 3 Horizontal versus vertical imaging of channel-filled sand bodies

A. On a stratal slice, 50~200 m wide channels are resolved by seismic with clear, sinuous geometry; B. In vertical section, the same channels (arrows) are not resolved. Instead, they form composite reflections with other sandstones in the neighborhood and are hard to interpret. Resolvable limit for the 50 Hz dominant frequency data is 15 m (10 ms). Wells nearby indicate that the sandstones imaged should be thinner than 15 m

灰岩、煤、火山岩夹层)的少数同相轴受地震波频率影响较小,可以作为等时面追踪(因而可用作等时地层格架标志层),但大多数同相轴或多或少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;而且这种不吻合是随地震资料频率变化而变化的。例如,图4的实际地震资料演示了地震波同相轴产状与地震波频率的关系。通过对比相对低频剖面(图4A)和相对

高频剖面(图 4B)同一位置上的同相轴,可以看到来自稳定相带(如最大洪泛面附近之凝缩层)的反射基本不受频率影响,可视为等时同相轴;而来自不稳定相带(如砂泥岩过渡带)的反射受频率影响较大,产状明显变化,应视为穿时同相轴。在这种地层(沉积)界面测不准的条件下,抛开同相轴即地层界面的传统思路,用一个在等时地层格架内内插的数学模型制作地层切片,预测虚拟地层(沉积)界面反而能获得较好的效果。当然,所谓要求地震反射和地震成像具有等时性只有相对的含义。这一点初学者往往不容易理解。地质年代的等时性与我们日常生活中的等时性不是一个概念。要求地震解释做到绝对等时既不需要,也不可能。我们的目标是保证在地震分辨率范围(四分之一波长,或 10~30 m 厚度)内等时。

4 两项关键技术

如前所述,地震岩性学和地震地貌学是地震沉积学的两个组成部分。我们用地震岩性学方法将一个三维地震数据体转化为一个测井岩性数据体。在这个岩性数据体中,测井岩性曲线(如 GR 和 SP)在一个小的允许误差范围内尽量符合并旁地震道,以保证测井资料与地震数据在储层尺度的最佳拟合。运用地震地貌学,我们可以将地震数据进一步转换为含有岩性标记的沉积相平面图。

当然,地震岩性学和地震地貌学的研究需要有合适的手段。我们希望推广的方法应当(1)适用于大多数资料条件(三维或密集二维,高信噪比或低信噪比,有井或无井),(2)在不同勘探、开发阶段均可使用,(3)经济实用。在目前技术条件下,实现常规地震资料岩性标定的最经济有效的方法是地震道 90° 相位化^[48, 49](图 5)。90° 相位子波将地震响应的主波瓣(最大振幅)移至薄层的中间点,此时的地震响应相对于薄层中点,而不是薄层的顶、底面对称,这使主要地震同相轴对应地质上定义的储层单元(如砂岩层)。这样一来,在 0~1 个波长范围,地震极性可以与岩性相对应。虽然当地层厚度小于四分之一波长时并不是非常准确,但地层的顶底面可以被确定在振幅过零点上。当将这些改进应用于实际资料时,地震同相轴和薄地层岩性单元之间将建立一一对应关系,将使沉积岩性的地震解释工作(如区分砂岩和泥岩)变得更容易^[34]。而这些解释上的优点在零相位资料和其它相位资料中并不存在。

地震地貌学作图则要借助合适的地层切片程序

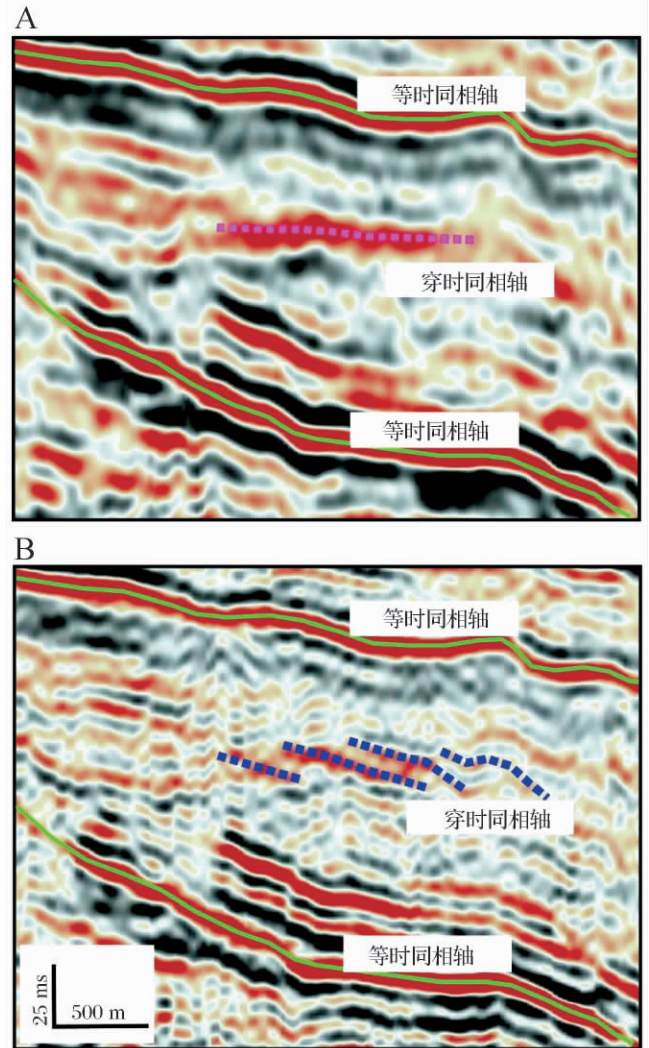


图 4 地震波同相轴产状与地震波频率的关系

A. 相对低频地震剖面; B. 相对高频的同一地震剖面。来自稳定相带(如最大洪泛面附近之凝缩层)的反射基本不受频率影响,可视为等时同相轴(如 A、B 中标绿色的轴);来自不稳定相带(如砂泥岩过渡带)的反射受频率影响较大,产状明显变化,应视为穿时同相轴(比较 A 中粉色同相轴和 B 中蓝色同相轴)。但高频剖面上同相轴穿时程度一般更轻

Fig. 4 Occurrence of seismic events versus seismic frequency
A. A relatively low-frequency seismic section; B. Same seismic section with relatively high-frequency. Reflections from stable sediments (e.g., condensed section near a maximum flooding surface) are not significantly influenced by frequency and therefore can be viewed as time-equivalent events; Reflections from unstable facies (e.g., a sand-to-shale transition zone) could be significantly altered by changing frequency

以及以此为基础的地质体追踪和三维可视化操作。建立准确的时间地层格架是地震地貌学作图取得成功的关键。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

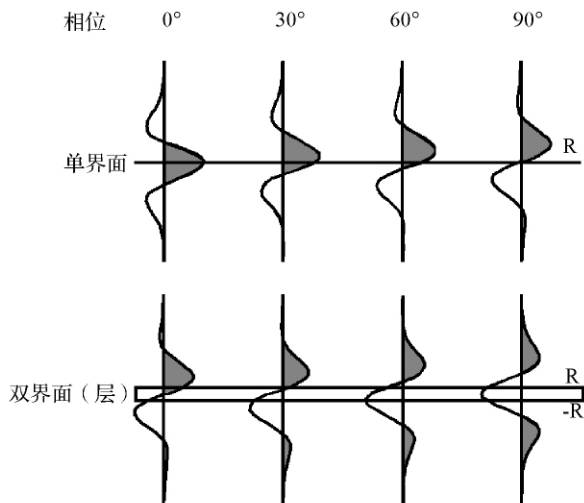


图5 子波相位与地震波波形对称性及地层结构的关系
对单界面(反射系数 R)而言,零相位子波对应的反射波形相对于界面对称,但 90°相位子波反射波形是反对称的;对双界面(地震薄层,顶底反射系数分别为 R 和 -R)来说,情况正好相反:90°相位子波对应的反射波形相对于界面对称,但零相位子波反射波形是反对称的。其它相位子波(30°和 60°)响应不具对称性。90°相位波形(地震道)对薄层解释最有利

Fig. 5 Control of wavelet phase on the symmetry of waveform shape and stratigraphic architecture.

For a single interface (with reflection coefficient R) composite waveform from a zero-phase wavelet is symmetric, but become antisymmetrical if from a 90°-phase wavelet; in a dual-interface case (seismically-thin bed with reflection coefficient at top and base being R and -R, respectively), composite waveform from a zero-phase wavelet becomes antisymmetrical, compared to the symmetric waveform from a 90°-phase wavelet. Waveforms from wavelets of other phases (30° and 60°) are not symmetrical. The composite waveform (seismic trace) from a 90°-phase wavelet is optimal for thin-bed interpretation.

性的反射作为等时地层格架中的标志同相轴;应避免角度不整合面用作标志界面或出现在两个标志界面之间;应杜绝不问青红皂白将现有已追踪层位不经检验直接当作标志界面使用的做法。至于具体切片方法,应根据特定的构造和地层条件选择(图6):如果地层是席状且平卧的,时间切片可能就足够了;如果地层是席状但不平卧,沿层切片非常适合;如果地层既不是席状也不是平卧的,则必须选择地层切片^[31, 32]。在实用上,地层切片是首选方法,对所有三种情况都适用。陆相盆地沉积层序一般横向厚度变化都大,大多数时候必须使用地层切片。

应当指出,所谓关键技术,只是在目前条件下最经济有效的技术而已,并不是指没有别的技术可用,更不是指将来不会有更新方法出现了。事实上,用地

震反演技术、地震参数分析和时频分析技术也可实现地常规震资料岩性标定^[5, 8, 12, 15, 20],而且在某些情况下效果更佳,甚至可实现地震资料的厚度、孔隙度和成岩变化标定,有条件时应当鼓励采用。但它们在处理过程中都需要引入新的假设,导致噪音和多解性增加,在使用中需要注意。

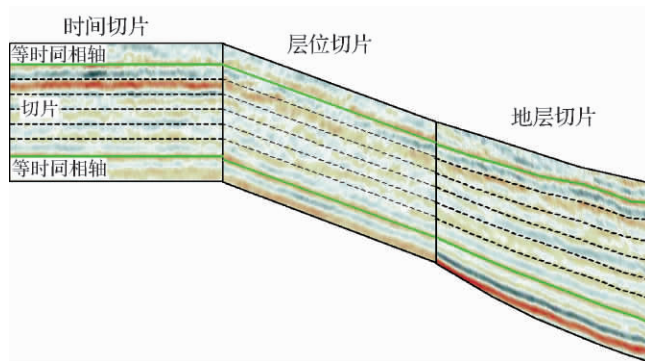


图6 各种地震数据体切片方法的适用条件

如果地层是席状且平卧的,可使用时间切片;如果地层是席状但不平卧,使用沿层切片即可;如果地层既不平卧,也有厚度变化,则必须选择地层切片。在实用上,地层切片适应性最好,可用于任一地层条件

Fig. 6 Slicing methods for different geologic conditions.

Time slicing is good for flat-lying, sheetlike formations; horizon slicing works for sheetlike formations with a dip; stratal slicing has to be performed if a sediment wedge with a dip is encountered. Stratal slicing fits to all three geologic conditions.

5 近期发展展望

地震沉积学经过十几年的发展,已经初具规模。学术界和工业界对这一新学科的兴趣和支持度不断增加。从2010年美国沉积学会海湾地区分会研究年会沉积体系地震成像国际会议上发言的内容分析,目前国际上主要的研究动向包括:地震岩性学方法(时频分析、地震参数分析等),对地层切片方法的改进,露头地貌与地下地震地貌的类比研究,沉积体系地貌形态演变的三维模拟,定量地震地貌学,及复杂沉积层序(河流、浅海陆棚、深水及碳酸盐沉积等)地震沉积学和地震地貌学的应用,等等。

在中国,地震沉积学对研究复杂沉积层序中沉积砂体(尤其是薄层砂体)和地层岩性油气藏的价值,正在被越来越多的人所认识。推广地震沉积学符合中国当前大力加强陆相复杂储层研究,增加油气后备储量的国情。在中国,许多院校和公司已经将地震沉积学纳入学科发展规划和实际研究工作,这必将促进这一新兴学科在今后有一个较大的发展。笔者认为

以下三方面是近、中期应该加强研究并可望获得突破的领域:

(1) 发展适合陆相盆地的地震岩性学新方法。与海相盆地相比,中国陆相盆地的岩性—波阻抗关系更为复杂,地层切片的岩性解释更具有多解性。例如,墨西哥湾第三系岩性简单(大多数情况下仅砂、泥岩而已),且砂、泥岩波阻抗之间普遍存在线性关系,90°相位地震剖面上正、反极性同相轴通常分别代表砂、泥岩,解释相对容易^[34]。而在中国陆相盆地,岩性分布复杂得多(许多情况下砾、砂、泥、灰岩、煤层共存),波阻抗呈多极分布,90°相位地震剖面的岩性校定通常比较困难。另外,陆相盆地湖平面升降频繁,物源多变,砂、泥岩波阻抗关系受沉积旋回影响明显。为提高地层切片的岩性解释水平,应加强岩石物理理论和实验室研究,探索新的90°相位地震剖面的岩性校定方法和新的地震反演、地震参数分析、时频分析方法,以及尝试应用AVO和横波地震资料。

(2) 创立各类陆相盆地的地震沉积相模式。地震沉积相特指地震分辨率尺度下代表特定沉积相的地震特征组合,因而有别于地震地层学中定义的地震相。类似于沉积相模式对沉积相分析的指导作用,地震沉积学分析也应受益于地震沉积相模式的建立。而且相对于常规沉积相模式,地震沉积相模式的指导作用应当更为直接和明显。原因是从沉积相到地震沉积相有一个转换过程,中间加入了地震子波效应和薄层干涉影响,导致地震沉积相只能间接地反映沉积体系,其关系需要标定。地震沉积相和沉积相关系的建立需要多方面资料(岩芯、录井、测井、古生物、地震,等等)综合研究。专家经验也很重要。关系一经建立,解释员仅凭地层切片即可初步分析地震沉积相和对应的沉积相,从而降低资料门槛,提高解释准确性和效率。目前国内仅有各个盆地分散实例发表,尚无不同盆地类型的地震沉积相模式系统总结。在研究过程中,需注意针对各类盆地(拗陷、断陷、前陆)及不同演化阶段(初始期、全盛期、收缩期)的构造背景、盆地结构以及地貌特征等不同特点,分别归纳总结。

(3) 建立陆相盆地地震沉积学研究规范。较之常规地震资料地震地层学解释,地震沉积学对解释员提出了更高的要求。理想的解释员不仅要掌握地质、地球物理基础理论和解释工具,更重要的是能融会贯通,具备综合解释技能,实现“无缝”(seamless)化解释。但做到这一点并非一日之功,需要大量的培训和

经验积累。研究规范的建立能帮助解释员(尤其是初学者)缩短摸索时间,熟悉工作流程,提高效率,减少错误,少走弯路。要根据陆相盆地特点、已有工作经验和研究实例,组织力量制定地震沉积学研究规范。主要内容应包括资料准备、工作内容和程序、适应不同应用阶段的预期成果、质量要求、应避免的解释陷阱,等等。

6 结论

(1) 作为一个新兴学科,地震沉积学从出现到现在只不过十几年时间,但已得到快速发展,初步成型。中国学者和科学家积极参与其中,做出了应有的贡献。

(2) 在研究范围上,地震沉积学应视为与地震地层学平行的学科,主要研究如何用地震资料预测沉积体系中沉积岩分布和沉积作用。地震沉积学目前包括地震岩性学和地震地貌学,但随着地震采集处理技术的进步及地震资料品质的提高不排除将来加入更多内容。

(3) 地震沉积学得益于对地震水平分辨能力的新认识及对地震反射等时性传统观念的突破。利用等时地层格架内的虚拟作图可以解决薄层水平成像问题,提高储层分析的地层分辨能力。

(4) 地震沉积学目前主要用于薄层解释。地震资料90°相位化及地层切片是两项关键技术,可用于大多数资料条件,也经济实用。

(5) 近期的中国地震沉积学发展应关注陆相盆地地震岩性学方法、陆相盆地的地震沉积相模式及陆相盆地地震沉积学研究规范等方面。

致谢 本文写作得益于与中国石油大学(北京)朱筱敏教授和同济大学钟广法教授就相关话题的讨论。他们阅读初稿并提出了建设性的修改意见。特此致谢。

参考文献(References)

- 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):045-409 [Dong Chunmei, Zhang Xianguo, Lin Chengyan. Discussions on several issues about seismic sedimentology [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2006, 41(4): 405-409]
- 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):699-704 [Dong Chunmei, Zhang Xianguo, Lin Chengyan. Concepts, methodologies, and technologies of the seismic sedimentology [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(5):

- 699-704]
- 3 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]
 - 4 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]
 - 5 韩喜,高兴友,车廷信,等. 利用地震属性沿层分析方法研究河流相沉积环境[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(1): 120-124 [Han Xi, Gao Xingyou, Che Tingxin, et al. Using horizon attributes to study fluvial depositional environment [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(1): 120-124]
 - 6 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. Discussions on several issues in seismic slice interpretation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(3): 348-352, 361]
 - 7 钱荣钧. 对地震切片解释中一些问题的分析[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(4): 482-487 [Qian Rongjun. Analysis on some problems in stratal slice interpretation [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(4): 482-487]
 - 8 范洪军,李军,肖毓祥,等. 地震变频技术在扇三角洲演化过程研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 682-692 [Fan Hongjun, Li Jun, Xiao Yuxiang, et al. Application of time-frequency analysis in the study of fan-delta evolution [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(5): 682-692]
 - 9 蒋韧,樊太亮,徐守礼. 地震地貌学概念与分析技术[J]. 岩性油气藏, 2008, 20(1): 33-38 [Jiang Ren, Fan Tailian, Xu Shouli. Concepts and techniques of seismic sedimentology [J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(1): 33-38]
 - 10 董艳蕾,朱筱敏,曾洪流,等. 黄骅拗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, Qinan Sag, Huanghua Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 234-240]
 - 11 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. New methodologies for seismic interpretation and new tools for sedimentological study [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2008, 31(2): 95-101]
 - 12 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 practical seismic sedimentology in depositional facies analysis [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(3): 266-271]
 - 13 吴因业,顾家裕,施和生,等. 从层序地层学到地震沉积学——全国第五届油气层序地层学大会综述[J]. 石油实验地质, 2008, 30(3): 218-222 [Wu Yinye, Gu Jiayu, Shi Hesheng, et al. From sequence stratigraphy to seismic sedimentology: overview of fifth National Conference for Oil and Gas Sequence Stratigraphy [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(3): 218-222]
 - 14 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, Lu Qibiao. Concepts, methodologies, and applications of seismic sedimentology [J]. Jiangnan Petroleum Science and Technology, 2008, 18(2): 7-11]
 - 15 王正和. 地震沉积学研究所采用的地球物理技术[J]. 内蒙古石油化工, 2008, (3): 23-25 [Wang Zhenghe. Geophysical techniques used for seismic sedimentologic study [J]. Inner Mongolia Petroleum Chemistry, 2008, (3): 23-25]
 - 16 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]
 - 17 杜伟,陈娣. 地震沉积学及其与相关学科的比较认识[J]. 内蒙古石油化工, 2008, (19): 16-17 [Du Wei, Chen Di. Seismic sedimentology and its relationship to relevant disciplines [J]. Inner Mongolia Petroleum Chemistry, 2008, (19): 16-17]
 - 18 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]
 - 19 赵海华,吴明荣. 关于地震沉积学几个问题的讨论[J]. 油气地球物理, 2009, 7(3): 9-13, 18 [Zhao Haihua, Wu Mingrong. Discussion on several issues of seismic sedimentology [J]. Petroleum Geophysics, 2009, 7(3): 9-13, 18]
 - 20 刘喜武,李俊瑞,刘培体,等. 地震时频分析与变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]
 - 21 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]
 - 22 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 Zhenglian, 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]
 - 23 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]
 - 24 李斌,杨迎春,何玉萍,等. 塔河油田卡拉沙依组地震沉积学研究及储层预测[J]. 现代地质, 2009, 23(6): 1107-1111 [Li Bin,

- Yang Yingchun, He Yuping, *et al.* Seismic sedimentology and reservoir prediction in Karratha Formation, Tahe Field [J]. *Geoscience*, 2009, 23(6): 1107-1111]
- 25 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]
- 26 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 and Oilfield Development in Daqing*, 2010, 29(3): 32-36]
- 27 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]
- 28 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]
- 29 Dahm C G, Graebner R J. Field development with three-dimensional seismic methods in Gulf of Thailand – a case history [J]. *Offshore Technology Conference*, Paper 3657, 1979: 2591-2595
- 30 Zeng Hongliu. Facies-guided 3-D seismic modeling and reservoir characterization [D]. The University of Texas at Austin, Ph. D dissertation, 1994: 164
- 31 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
- 32 Zeng Hongliu, Henry S C, Riola J P. Stratal slicing, part II: real seismic data [J]. *Geophysics*, 1998, 63(2): 514-522
- 33 Posamentier H W. Seismic geomorphology and depositional systems of deep water environments: observations from offshore Nigeria, Gulf of Mexico, and Indonesia (abs.) [M]. *AAPG Annual Convention Program*, 2001, 10: 160
- 34 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
- 35 London Geological Society. Seismic geomorphology, applications to hydrocarbon exploration and production [M] // Davies R J, Posamentier H W, Wood L J, Cartwright J A, eds. *Special Publication 277*, 2007: 274
- 36 李庆忠, 张进. 岩性油气田勘探—河道砂储集层的研究方法 [M]. 山东青岛: 海洋大学出版社, 2006: 130 [Li Qingzhong, Zhang Jin. *Exploration Method of Lithological Oil and Gas Field: Knowledge of Continental River Channel System Reservoir* [M]. Qingdao Shandong: China Ocean University Press, 2006: 130]
- 37 Zhu X M, Dong Y L. Seismic Sedimentology Applied to Qinan Sag, China (Abstract). *AAPG Annual Convention & Exhibition*; San Antonio, TX, 2008
- 38 Zhao Wenzhi, Zou C N, Chi Y L, *et al.* Sequence stratigraphy, seismic sedimentology, and litho-stratigraphic plays: Upper Cretaceous, Sifangtuozui Area, Southwest Songliao Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2011 (In Press)
- 39 International Subcommittee on Stratigraphic Classification (ISSC), 1994. *International Stratigraphic Guide – A guide to stratigraphic classification, terminology, and procedure* (Amos Salvador, ed.). 2nd edition: The International Union of Geological Sciences and The Geological Society of America, Inc., 214
- 40 American Geological Institute, website <http://glossary.agiweb.org/dbtw-wpd/glossary/search.aspx>
- 41 Sheriff R E. *Encyclopedic dictionary of applied geophysics* (4th edition) [J]. *Society of Exploration Geophysicists*, 2002: 429
- 42 Vail P R, Mitchum R M, Todd Jr, R G, *et al.* Seismic stratigraphy and global changes of sea level [C] // Payton C E, ed. *Seismic Stratigraphy*. *AAPG Memoir 26*, 1977: 49-212
- 43 Weimer P, Posamentier H. eds. *Siliciclastic sequence stratigraphy: recent developments and applications* [M]. *AAPG Memoir 58*, 1996
- 44 Galloway W E, Hobday D K. *Terrigenous clastic depositional systems: Applications to petroleum, coal, and uranium exploration* [J]. New York: Springer-Verlag, 1983: 423
- 45 Lindsey J P. The Fresnel zone and its interpretive significance [J]. *The Leading Edge*, 1989, 8(10): 33-39
- 46 蔡希源, 李思田. 陆相盆地高精度层序地层学—隐蔽油气藏勘探基础、方法与实践 [M]. 北京: 地质出版社, 2003: 271 [Cai Xiyuan, Li Sitian. *High-resolution Sequence Stratigraphy of Continental Basins* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 271]
- 47 Zeng Hongliu, Kerans C. Seismic frequency control on carbonate seismic stratigraphy: a case study of the Kingdom Abo sequence, West Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(2): 273-293
- 48 Zeng Hongliu, Backus M M. Interpretive advantages of 90°-phase wavelets: Part 1 modeling [J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): 7-15
- 49 Zeng Hongliu, Backus M M. Interpretive advantages of 90°-phase wavelets: Part 2 seismic applications [J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): 17-24.

Seismic Sedimentology in China: A Review

ZENG Hong-liu

(University of Texas at Austin , USA , zip code 78758)

Abstract This paper summarizes the history of seismic sedimentology , with a brief discussion of its definition , geologic and geophysical background , key techniques , and future developments. Seismic sedimentology is a new geoscience discipline that has been gaining support from industry and academia both in western countries and in China. Seismic sedimentology is closely related to seismic stratigraphy and sequence stratigraphy , with an emphasis on study of sedimentary rocks and depositional processes. Under current technology , seismic sedimentology is an integration of seismic lithology and seismic geomorphology. The procedure is benefited from a technical breakthrough that images seismically-thin beds by phantom mapping within a time-equivalent seismic stratigraphic framework , which makes a better use of seismic horizontal resolution power. Ninety-degree phasing and stratal slicing are two key , practice and economic techniques. In China , new developments of seismic sedimentology in near future may occur in seismic lithologic methods , seismic depositional models , and study guidelines that are tailored for different types of non-marine basins.

Key words seismic sedimentology; stratal slice; seismic lithology; 90°-phase; seismic geomorphology; seismic depositional model