

利用地层切片研究河道砂体发育特征

——以南图尔盖盆地 Doshan 地区为例

石巨业^{1,2,3}, 金之钧^{1,3}, 樊太亮², 王宏语², 于东方⁴

(1 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室; 2 中国地质大学(北京)能源学院)

(3 中国石化石油勘探开发研究院; 4 内蒙古矿业(集团)绿能非常规天然气勘查开发有限责任公司)

摘要 针对目的层埋深大、钻井稀少且分布不均所造成的沉积相研究和砂体预测的难题,以哈萨克斯坦南图尔盖盆地 Doshan 地区为例,在层序地层学和沉积学研究的基础上,充分挖掘三维地震数据的横向分辨能力,利用 90° 相位转换、地层切片、分频处理等地震沉积学关键技术,通过单井相标定地层切片属性的实际地质意义,应用纵向关联的多张地层切片,识别出阿克沙布拉克组(SQ₈ 层序)至少发育六期河道,其中 SQ₈₋₁ 旋回内发育两期,为河道发育最广泛、最强盛的时期;SQ₈₋₂ 旋回内河道稀疏,纵向连续性差;SQ₈₋₃ 旋回河道分布局限,水体范围缩小,与 SQ₈₋₁、SQ₈₋₂ 相比较具有沉积的继承性特征,反映出水体深度有所变浅,经历了一期以水进为主的水进—水退过程。研究表明,地层切片技术有效地描述了河道的平面几何形态与不连续性,这为本区岩性地层圈闭的描述与预测提供了地质依据。

关键词 地震沉积学; 地层切片; 地震属性; 河道; Doshan 地区; 南图尔盖盆地; 哈萨克斯坦

中图分类号: TE122.2⁴

文献标识码: A

地震沉积学是在层序地层学和地震地层学基础上发展起来的一门新兴交叉学科,它是利用地震反射的结构、形态和趋势来研究高频层序和沉积体系的有效工具,在岩性、地层等隐蔽油气藏勘探和开发方面具有明显效果^[1-3]。1998年“地震沉积学”一词首次出现;2005年,地震沉积学国际会议在美国休斯敦召开,Posamentier^[4]提出了地震地貌学(Seismic Geomorphology),曾洪流等^[5]提出了地震沉积学(Seismic Sedimentology),地震沉积学作为一门新兴学科受到了国内外学者的关注。之后,林承焰、魏嘉、朱筱敏、张晶等^[6-9]国内学者对地震沉积学进行了更进一步研究,在实践中不断充实改进地震沉积学的技术方法,使这一门新兴的学科得以快速地发展。地震沉积学主要利用三维地震数据的横向分辨力,使得在垂向上无法识别的地质体,在平面上有可能通过地震的横向分辨率被识别出来,它对于勘探程度低但地震数据品质较高、断层少、构造不复杂的地区应用效果更具优越性,其关键技术包括90°相位转换、分频处理和地层切片等。

目前国内外学者利用地震沉积学方法技术对三角洲、扇三角洲、深水浊积扇等沉积体系进行地层切片分析^[10-12],并在油气勘探和开发方面取得显著效果,但对规模较小的河道砂体研究相对较少,并且仅局限在用单张地层切片分析沉积相及河道的平面展布,并没有应用纵向上相互关联的多张地层切片来分析刻画河道砂体的发育期次。本文将展示应用地震沉积学地层切片技术,对哈萨克斯坦南图尔盖盆地 Doshan 地区阿克沙布拉克组(Akshabulak Fm.)的河道进行识别和刻画,明确河道沉积体边界及横向上的展布特征;再应用纵向关联的多张地层切片,研究河道砂体的发育期次及纵向连通性,以此为本区岩性地层圈闭的预测提供地质依据,也为其他类似地区提供方法与技术借鉴。

1 研究区地质概况

南图尔盖盆地位于哈萨克斯坦中南部(图1),主要沉积侏罗系—白垩系,由下至上发育多个大型的区域不整合,受区域构造运动和应力影响,盆地经历了

收稿日期: 2015-08-03; 改回日期: 2016-12-05

本文受中国地质大学(北京)科研生产项目“Aryskum 坳陷斜坡带岩性-地层圈闭评价”项目(编号: CNPCIRC-2013-xx)资助

石巨业: 1989年生,现为中国地质大学(北京)矿产普查与勘探专业在读博士研究生,主要从事层序地层与油气勘探的研究。通讯地址: 100083 北京市海淀区学院路29号; E-mail: shijuyeone@163.com

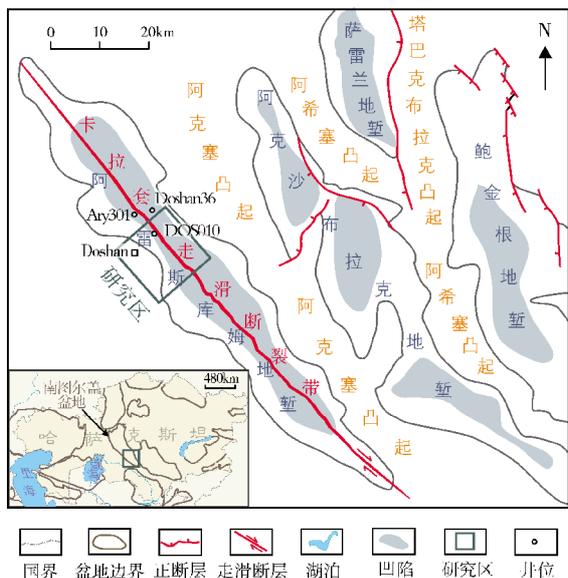


图1 研究区构造位置平面图

断陷期、断拗转换期、拗陷期三个演化阶段(表1)。目前盆地内已发现了多个油气田,中侏罗统多尚组(Doshan Fm.,厚度500~600 m)、卡拉甘塞组(Karagansky Fm.,厚度0~450 m)和下侏罗统埃巴林组(Aybolin Fm.,厚度0~500 m)是主要烃源岩,上侏罗统阿克沙布

拉克组(Akshabulak Fm.,0~600 m)、下白垩统阿雷斯库姆组(Aryskum Fm.)是主要储层,其上一套稳定湖相页岩为区域盖层^[13],本文针对主要储层段阿克沙布拉克组(SQ₈三级层序)的河道沉积体进行识别和刻画。

阿雷斯库姆地堑(图1)作为南图尔盖盆地二级构造单元,位于盆地西侧,目前盆地内已发现的油田大多数分布在该地堑内,是油气资源丰度最高的区域,阿雷斯库姆白垩系大油田正坐落于此^[14]。前人阿雷斯库姆地区有较多研究,毛治国等^[15]认为研究区上侏罗统一白垩统为河流—三角洲沉积环境,并且河流相对发育,微相有河床滞留沉积、河漫滩、边滩等。高金玉等^[16]总结出断拗转换期和拗陷期层序地层模式,并认为断拗转换期发育三角洲和滨浅湖沉积,拗陷期则主要发育河流相沉积。王树慧等^[17]认为研究区为河流入湖形成的三角洲沉积环境,并且在晚侏罗世总体物源方向与阿雷斯库姆拗陷构造线方向基本一致,为西北→东南向。本文研究区位于阿雷斯库姆地堑西北部主要产油区的Doshan地区,面积约824平方千米,其中三维地震工区覆盖面积达630多平方千米(图1),有30余口钻井分布,但由于勘探程度及认知程度的不足,并未细致研究Doshan地区圈闭的分布规律,侏罗系油气勘探程度总体较低。

表1 南图尔盖盆地层序划分方案

系	统	地 层 组	年 龄 (Ma)	层序界面		层序划分方案		构造阶段	
				反射标志	性 质	三级层序	超层序		
白	下	上达乌尔组	136.4	SB ₁₀	Ⅲ级区域不整合: 削截、上超、下切—冲刷面	SQ ₁₀	SSQ _Ⅲ	拗陷期	构造活动以整体沉降为特征,沉积地貌平缓,准平原化沉积背景
		下达乌尔组				140.2			
		阿雷斯库姆组	145.5	SB ₉	I级区域性不整合: 削蚀、上超面	SQ ₈	SSQ _Ⅱ	断拗转换期	弱构造挤压,局部抬升
侏	上	阿克沙布拉克组	155.7	SB ₈	Ⅲ级局部不整合: 削截、河道下切—冲刷面、上超面	SQ ₇	SSQ _Ⅰ	裂陷期	构造拉伸,强烈分异沉降,不同拗陷沉积地貌分异大
		库姆科尔组	164.7	SB ₇	Ⅲ级区域不整合: 削截、上超、构造转换面	SQ ₆			
	中	卡拉甘塞组	171.6	SB ₆	Ⅲ级局部不整合: 下超—构造转换面	SQ ₅			
		多尚组	175.6	SB ₅	Ⅲ级构造转换面: 上超—构造转换面	SQ ₄			
	下	埃巴林组	183.0	SB ₄	Ⅲ级局部不整合:上超面	SQ ₃			
		萨基姆拜组	196.5	SB ₃	上超面	SQ ₂			
前侏罗系	基底	199.6	SB ₂	河道下切冲刷面 基底不整合面: 构造、削截面	SQ ₁				

2 层序地层格架和沉积特征

地震沉积学研究是在等时地层格架内进行地震资料的信息处理和提取,并应用定量的地震信息对地层进行沉积信息分析和沉积相解释。因此,首先,综合利用地震、测井、录井等资料进行层序界面的识别(层序界面性质见表1),通过井震相互标定,实现地震资料与测井资料的精细层位标定和平面上层位的追踪闭合;然后,结合南图尔盖盆地区域构造演化特征,对各级层序界面进行划分及对比,最终将南图尔盖盆地侏罗系—下白垩统分为3个超层序(SSQ_I—SSQ_{III})、10个三级层序(SQ₁—SQ₁₀),建立了Doshan地区的层序地层格架(表1)。

在建立三级层序地层格架基础之上,根据钻井资料和地震资料进一步将Doshan地区重点层位——阿克沙布拉克组(三级层序SQ₈)划分为3个四级层序SQ₈₋₁、SQ₈₋₂和SQ₈₋₃(图2,图3),进而展开高精度层序地层分析。阿克沙布拉克组(SQ₈)底界面为一河道下切冲刷面,为库姆科尔组(Kumkol Fm.)和阿克沙布拉克组之间局部不整合面;顶界面为全盆最大不整合面,即侏罗系与白垩系间的削蚀不整合面。钻井上揭示阿克沙布拉克组顶部的SQ₈₋₃旋回剥蚀严重,例如DOS010井(位置见图1)SQ₈₋₃旋回被完全剥蚀(图3a, 3b),在地震剖面上(图3a)表现为明显的角度不整合,地震反射界面下部表现为削蚀,上部为连续的地震反射。

由于DOS010井的阿克沙布拉克组顶部基准面下降半旋回剥蚀严重,因此选择三维区附近的Ary301井(位置见图1)做沉积相分析,从图2可以看出,在SQ₈₋₁旋回内主要发育灰色、灰白色砂岩,测井曲线上SP、GR为高振幅齿化钟形,低位体系域和水进体系域不发育,基准面半旋回较短,而高位体系域较为发育,为富砂层序;SQ₈₋₂旋回发育多套灰色、灰绿色厚层中-细砂岩,中间夹有灰绿色泥岩,反映水体有所加深,处于还原环境,测井曲线呈泥岩基线上的箱形或钟形组合,高位体系域和水进体系域不发育,基准面下降半旋回较短,而低位体系域较为发育,为富砂层序,储层相对发育;SQ₈₋₃旋回发育灰色砂岩,中间有大段棕色、棕红色泥岩,反映水体突然变浅,处于氧化环境,跟SQ₈₋₁旋回类似,高位体系域较为发育,与SQ₈₋₁和SQ₈₋₂旋回相比,反映水体有所加深又突然变浅的过程。DOS010井与Ary301井显示, SQ₈₋₂层段

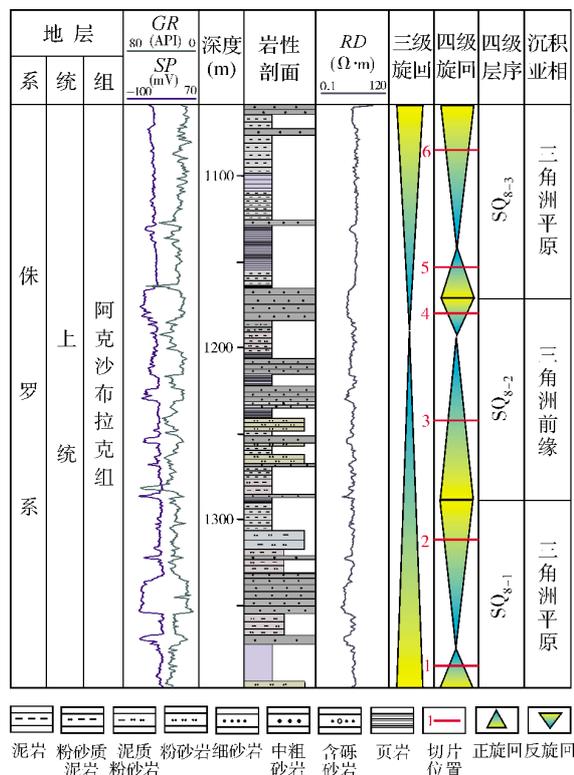


图2 南图尔盖盆地Doshan地区Ary301井沉积相分析柱状图

有大段厚层砂岩,测井曲线为箱形或钟形(图2,图3b),是典型的河道沉积;在地震剖面上,可见强同相轴、强振幅的间断,并伴有下弯或下切现象(如图3a中A、B处),地震反射以中—弱振幅、弱连续为特征,相邻剖面均有与此类似现象。

3 90° 相位转换

一般标准的地震数据体,提供给解释员的都是零相位,地震数据体中的同相轴所反映的是反射系数的差异,所以波峰和波谷对应的是地层界面(图4a)。地震反射和岩性地层之间不存在必然的联系,在薄互层的情况下,地震反射和岩性测井曲线之间的对应关系则更难匹配^[18]。90°相位转换的方法是通过把地震相位旋转90°,将反射波主瓣提到薄层中心(相位反转也并不一定是90°,30°或60°都有可能,具体情况需具体分析),以此来克服零相位波的缺点,将地震反射相对于砂岩层对称而不是相对于地层顶底界面对称。本次地震数据经Landmark地震资料解释软件中的相位谱分析反映为零相位,将地震资料进行90°相位转换,可以看到测井曲线(Doshan36井)

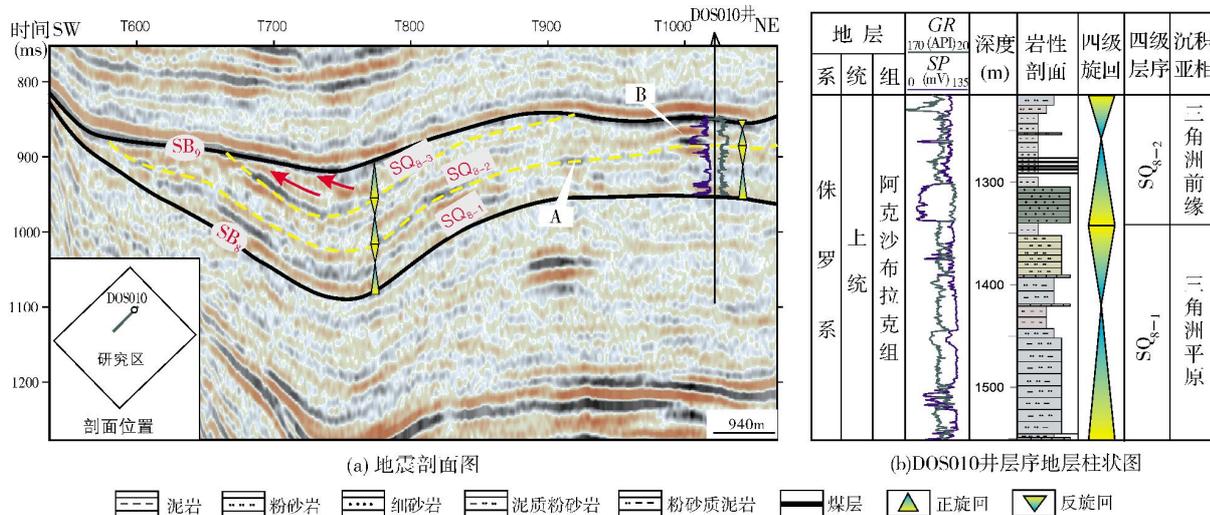


图3 南图尔盖盆地Doshan地区SQ₈(阿克沙布拉克组)四级层序划分

(a)图中A、B指示强同相轴、强振幅的下弯或下切

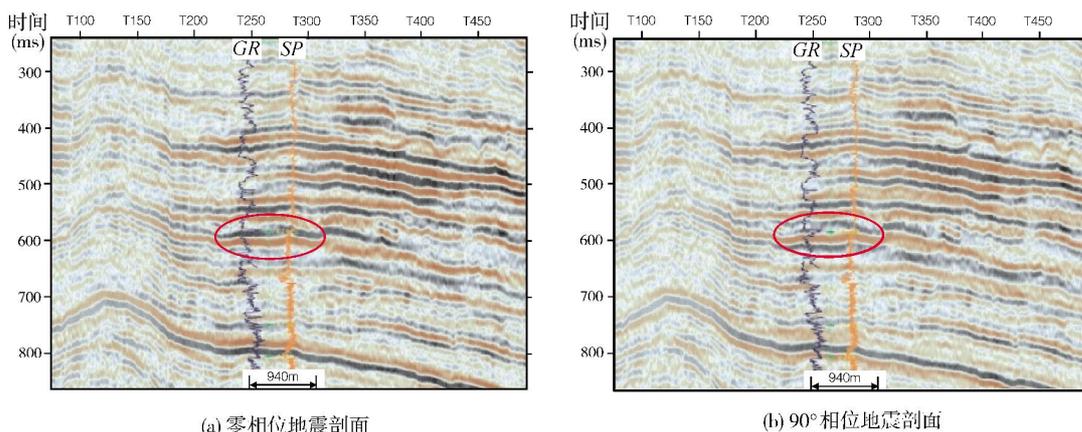


图4 Doshan36 井处零相位和 90°相位地震剖面对比

的尖峰位置与地震同相轴对应得更好(图4b),这使得地震反射的同相轴与地质上的岩层对应,让地震剖面看起来更接近地质剖面,使地震振幅具有了一定的岩性地层意义(这在薄层地震解释中应用效果更好)。

4 地层切片

在研究区,由于三角洲平原河道及三角洲前缘水下分流河道的侧向迁移改道、垂向切割充填作用较强,致使地层横向与纵向上沉积变化较快,标志层少,导致划分河道发育期次难度较大,而地层切片技术对此有较大帮助^[19]。如图5,地震剖面上画出了一部分河道横截面的反射特征,借助地层切片可以研究河道的发育期次,其中,编号为cha-1、cha-2、cha-3的河道处于slice1至slice2范围内,基本是同一时期发育的河

道,但cha-1与cha-2相邻很近,处于盆地中心部位,且相比较于cha-3河道宽度要小、发育稍早,推测为分布范围局限的冲积平原河道。编号为cha-4—cha-7的河道处于slice3至slice5范围内,形成时间要比前一期晚,且cha-4与cha-5河道在纵向上叠置比较明显,属于同一条河道在不同时间横向上的摆动。编号为cha-8、cha-9河道是最晚一期形成的(图5)。

Doshan 地区三维地震数据体已进行 90°相位转换,使地震同相轴和测井曲线之间有了很好的对应关系,目的层 SQ₈ 整体厚度约 180 ms,在阿卡沙布拉克组 3 个四级层序边界约束下,每个四级层序内部内插两张地层切片,并做人工解释调整(图 5),相邻切片间距约 30 ms,选取时窗 10 ms 沿层上下各 5 ms,六张地层切片代表了阿克沙布拉克组六期典型的河道

沉积(图 6a—6f, 剖面见图 5), 把地层切片按时间顺序排列, 可以清晰地分辨河道发育位置与期次。

图 6a、6b 代表阿克沙布拉克组沉积早期, 发育

在 SQ_{8-1} 旋回内, 地层切片上可以看出, 研究区西部隆起区振幅为高值, 是由于 SQ_{8-1} 层序在隆起区顶部被剥蚀而造成层位切割同相轴所引起的, 可以依据

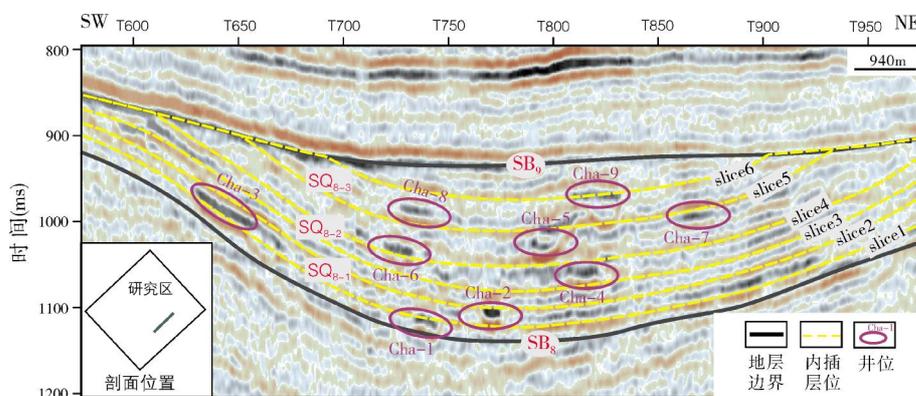


图5 南图尔盖盆地Doshan地区 SQ_8 (阿克沙布拉克组)四级层序内插地层切片地震剖面

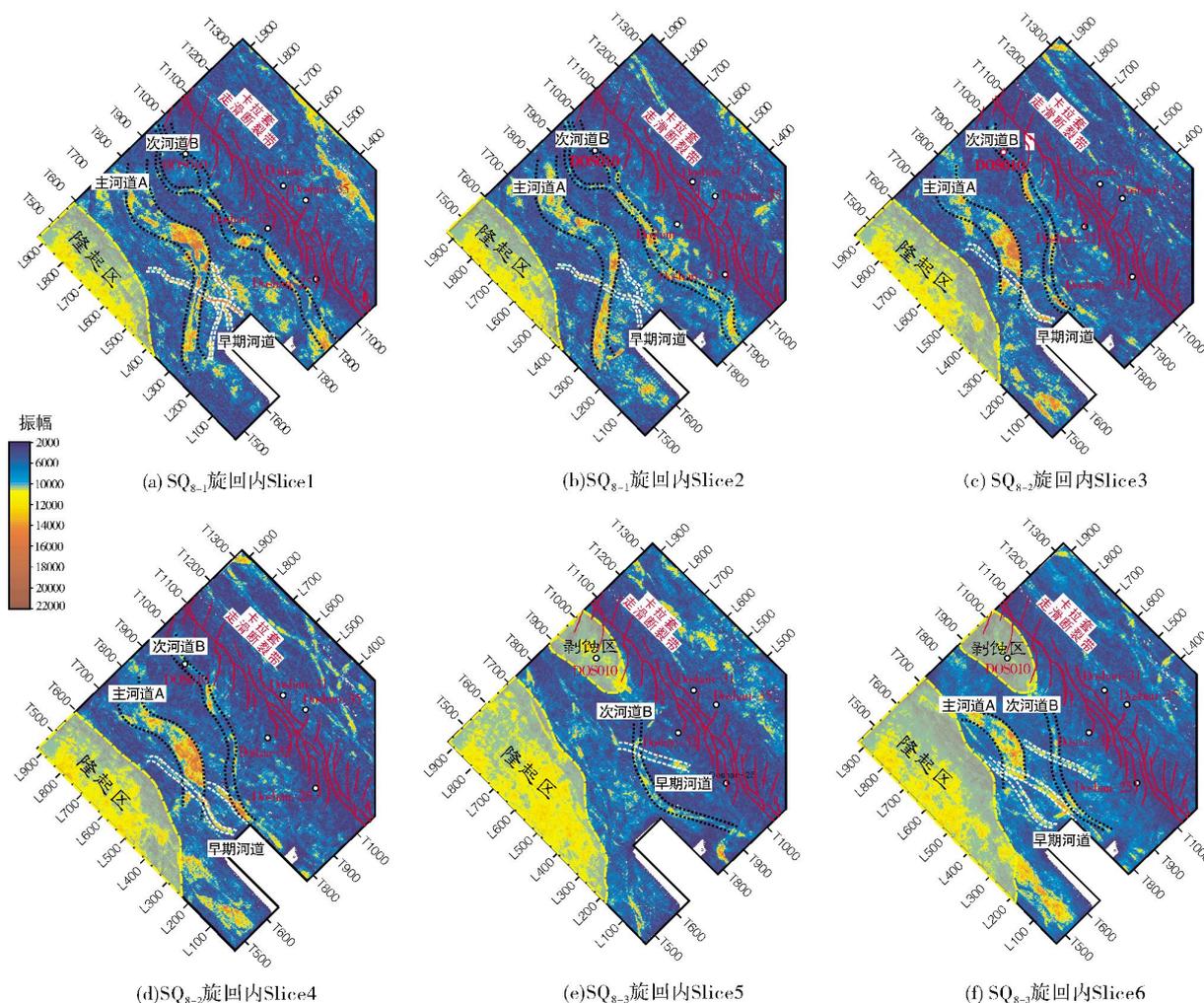


图6 南图尔盖盆地Doshan地区 SQ_8 内地层切片平面图(切片位置参见图2、图5)

强均方根振幅区域画出隆起区的边界(图6a)。此外,根据钻井标定可知,红色和黄色振幅高值区域代表砂体连通性和物性比较好,是主要河道砂体发育的区域;浅黄色振幅中值区域代表连通性和物性较差、泥岩含量比较高;蓝色振幅低值区域表明物性很差、泥岩比较发育。图6a可见南部发育早期窄而局限的分流河道,只在卡拉套走滑断裂带(图中红色断裂带)西侧发育盆地深凹,反映早期湖盆以被河流填平补齐充填为特点,南部大套河流发育,北部河流则不发育。图6b可见两条呈北西—南东向的主河道A和次河道B。根据前期对盆地古地貌、地层厚度和沉积体系的分析^[15-17],确定物源是自西北向东南的方向。DOS010井SQ₈₋₁旋回内部发育一套灰色细砂岩(图3b),电测曲线上SP、GR为高振幅齿化钟形及箱形,判断该时期发育三角洲平原水上分流河道沉积,为阿克沙布拉克组早期沉积,基准面位于地表附近并缓慢上升,可容纳空间较小,水上分流河道纵向叠置较为严重,砂体常常以多层式堆积。

图6c、6d代表阿克沙布拉克组沉积中期,发育在SQ₈₋₂旋回内,基准面持续上升,可容纳空间开始增加,整体发生湖侵,DOS010井SQ₈₋₂旋回内部发育一套灰绿色中-细砂岩(图3b),处于还原环境,湖盆水体深度增加,三角洲向陆方向退积,研究区内主要发育三角洲前缘水下分流河道,河道变得稀疏,单砂层厚度逐渐减薄,自然电位曲线为砂泥互层,此时,有足够可容纳空间供沉积物堆积,河道不再纵向叠置,河道单一边界更加清晰,砂体孤立,砂体与砂体之间的连通性差。物源方向依然是西北→东南向的长轴物源,主河道A未发生明显迁移,下游河道部分被剥蚀,显示不完整,次河道B中下游向西摆动,迁移较为明显,与SQ₈₋₁旋回相比,水体有所加深,具有沉积的继承性特征。

图6e、6f代表阿克沙布拉克组沉积后期,发育在SQ₈₋₃旋回内,由于基准面的下降,可容纳空间逐渐降低,整体发生湖退,三角洲向湖盆深处进积,SQ₈₋₃旋回内发育三角洲平原的分流河道,粗碎屑沉积增多,砂层厚度变大,相当于海相层序地层中的高位体系域,但由于沉积剥蚀,分布范围较窄,DOS010井位置处SQ₈₋₃旋回被剥蚀殆尽,仅在凹陷部位局限分布。

综上所述,在Doshan地区四级层序边界约束下,利用地层切片能够清晰反映出研究区阿克沙布拉克组平面上主要发育主河道A与次河道B,纵向上刻画

出六个期次的河道,其中SQ₈₋₁旋回内发育两期,以湖盆被河流填平补齐充填为特点,代表着河道发育最广泛、最强烈的时期。SQ₈₋₂旋回在最大湖泛面附近,河道稀疏、砂体分选好,但河道砂体的连续性差,容易形成孤立的单河道透镜体岩性圈闭。晚期的SQ₈₋₃层序河道分布局限,水体范围缩小,与SQ₈₋₁、SQ₈₋₂层序相比较,具有沉积的继承性特征,反映出水体深度有所变浅,是以水进为主的水进—水退过程。

5 结 论

(1) 哈萨克斯坦南图尔盖盆地Doshan地区阿克沙布拉克组(SQ₈)可划分为3个四级层序SQ₈₋₁、SQ₈₋₂和SQ₈₋₃,位于阿克沙布拉克组顶部的SQ₈₋₃旋回地层被剥蚀。

(2) 南图尔盖盆地Doshan地区阿克沙布拉克组(SQ₈)平面上发育两条河道,纵向上至少发育六个期次河道,其中SQ₈₋₁旋回内发育两期,代表着河道发育最广泛、最强烈的时期,SQ₈₋₂旋回内河道稀疏、砂体连通性差,SQ₈₋₃旋回内河道分布局限,水体范围缩小。

(3) 利用地层切片技术,结合单井相及区域沉积环境分析,可以有效地描述地质体平面几何形态与不连续性,研究砂体展布规律,充分开发地震资料横向上的分辨能力;应用纵向关联的多张地层切片,研究河道砂体的发育期次及纵向连通性,在保证可靠性的前提下,可解决无井区或井间沉积相分析的难题。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Zeng Hongliu, Loucks R, Janson X, et al. 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.
- [3] Hubbard S M, Smith D G, Nielsen H, et al. 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.
- [4] Posamentier H W. Abstract: Seismic geomorphology and depositional systems of deep water environments; observations from offshore Nigeria, Gulf of Mexico, and Indonesia [C]. AAPG Annual

- Convention Program, 2001, 10: 160.
- [5] Zeng Hongliu, Backus M M. Interpretive advantages of 90° - phase wavelets: Part 1—Modeling[J]. *Geophysics*, 2005, 70(3): 7-15.
- [6] 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): 69-72.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 张晶,李双文,袁淑琴,等. 地震沉积学在识别重力流沉积体系中的应用[J]. *沉积学报*, 2015, 33(3): 578-585.
- [10] 王江,张宏,杨微,等. 地层切片技术在复杂勘探区储层预测与地质体识别中的应用[J]. *海相油气地质*, 2011, 16(1): 74-78.
- [11] 赵东娜,朱筱敏,董艳蕾,等. 地震沉积学在湖盆缓坡滩坝砂体预测中的应用——以准噶尔盆地车排子地区下白垩统为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 55-61.
- [12] 苏玉平,周晨光,王天奇,等. 河道砂体叠前地震属性的优化与应用——以哈萨克斯坦南图尔盖盆地为例[J]. *天然气工业*, 2014, 34(11): 41-47.
- [13] 孔祥宇,殷进垠,张发强. 哈萨克斯坦南图尔盖盆地油气地质特征及勘探潜力分析[J]. *岩性油气藏*, 2007, 19(3): 48-53.
- [14] Moseley B A, Tsimmer V A. Evolution and hydrocarbon habitat of the South Turgay Basin, Kazakhstan[J]. *Petroleum Geoscience*, 2000, 6(2):125-136.
- [15] 毛治国,樊太亮,凌宗发,等. 高精度层序地层格架内的地震沉积学应用——以哈萨克斯坦南图尔盖盆地A区为例[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2010, 41(6): 2296-2304.
- [16] 高金玉,赵伯宇,张元福,等. 哈萨克斯坦南图尔盖盆地层序地层模式[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(3): 27-30.
- [17] 王树慧,吴少波,蔡芳,等. 南图尔盖盆地 Kumkol 油田上侏罗统库姆科尔组沉积相研究[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2012, 27(3): 15-20.
- [18] 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.
- [19] 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.

编辑:黄革萍

A Study of Channel Sandbody by Stratal Slicing: A Case of Doshan Area in South Turgay Basin, Kazakhstan

Shi Juye, Jin Zhijun, Fan Tailiang, Wang Hongyu, Yu Dongfang

Abstract: Taking Doshan area as an example, based on the study of sequence stratigraphy, sedimentology and the lateral resolution of seismic data, this paper characterizes the Akshabulak Formation sedimentary system by using the methods of seismic sedimentology such as stratal slicing, 90° phasing conversion and frequency division. Through calibrating the attributes of strata slice to actual geological significance by combining single well facies with associated stratal slice in vertical, at least 6 periods channels are identified, in which 2 periods are in SQ₈₋₁ Formation that indicate channels developed most widely and intensely; the channels in SQ₈₋₂ Formation are thinning and have poor continuity; the channels in SQ₈₋₃ Formation distribute limited and the water area is shrinking, a main transgressive process is reflected in changing shallow water and sedimentary succession in a transgressive and regressive process compared with SQ₈₋₁ and SQ₈₋₂ Formation. The result shows that the stratal slicing technique describes the plane geometry and discontinuity of the channels effectively, and it can be the geological basis for the description and prediction of lithologic stratigraphic traps in this study area.

Key words: Seismic sedimentology; Stratal slice; Seismic attributes; Channel; South Turgay Basin; Kazakhstan

Shi Juye: PhD degree in progress at School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing). Add: 29 Xueyuan Rd., Haidian Distict, Beijing, 100083, China