

· 采集技术 ·

宽/窄方位三维观测系统对地震成像的影响分析 ——基于地震物理模拟的采集方法研究

狄帮让* 孙作兴 顾培成 魏建新 徐秀仓

(中国石油大学 CNPC 物探重点实验室·北京)

狄帮让,孙作兴,顾培成,魏建新,徐秀仓. 宽/窄方位三维观测系统对地震成像的影响分析——基于地震物理模拟的采集方法研究. 石油地球物理勘探, 2007, 42(1): 1~6

摘要 “在复杂地区采用宽方位还是窄方位观测问题”,成为近十年中三维地震方法研究的一个热点问题。考虑到该问题的复杂性,本文结合中国东部淮海地区的地质特点,选择了一个水退模式扇形薄砂体构建地质模型,设计了16线4炮全方位和6线4炮窄方位两个观测系统,对扇体进行了地震物理模拟分析。通过对三维偏移数据体时间切片的宏观全局分析和偏移剖面的微观局部分析,得出如下认识:在上覆地层相对平缓、速度横向变化不大的地质背景下,通过采用CMP叠加偏移处理,宽方位和窄方位三维采集都能对地下目标实现基本正确的地震成像,且两者的成像分辨率基本相当。

关键词 宽方位角 窄方位角 三位观测系统 地震分辨率 地震物理模拟

1 引言

随着油气勘探的主要地质目标向隐蔽油气藏和岩性油气藏转移,中国的地震勘探工作也由常规的三维地震转向高精度三维地震,三维观测系统优化设计是高精度三维地震数据采集中的主要环节,它直接关系到地质目标的地震成像质量,因此各探区都进行了三维观测参数试验。受文献[1]的影响,很多探区都进行了宽方位观测的勘探效果试验。在理论上采用宽方位观测优于窄方位,但是前者的野外施工复杂性要比后者大得多,对野外施工设备的要求也高得多,而各探区试验结果又各不相同,因此“在复杂地区采用宽方位还是窄方位观测问题”引起了地球物理学界的争论^[2~7],成为近十年中三维地震方法研究中的一个热点问题。窄方位观测的支持者认为^[2~4]:①全方位的高覆盖次数观测应是三维地震的理想观测方式,但现有的勘探条件达不到这种观测方式的要求;②对于速度横向变化不大的东部地区(包括西部各大盆地中央平缓倾角区),宽方

位与窄方位采集的效果基本无差别;③在现行的勘探程序和目前的处理技术条件下,对于西部地区或速度横向变化显著、地层倾角大的复杂地区,实践证明,采用窄方位观测比宽方位效果更好。强调宽方位观测的主要代表是凌云研究组^[5~7],该研究组选择了中国西部地区的3个宽/窄方位勘探实例,在上覆地层相对平缓、速度场相对平稳的地区,论证了宽方位观测的优越性,认为:宽方位勘探比窄方位勘探具有更强的识别岩性尖灭和小断裂的能力^[5];窄方位勘探可能在垂直构造方向上有较好的地震成像分辨率,而宽方位勘探则可以在全方位获得高分辨率空间成像,因此更适合河流相储层、岩性边界和复杂断裂勘探^[6,7]。争论双方都强调了在上覆地层相对平缓、速度横向变化不大的地质背景下,宽、窄方位三维观测各自的优越性。

本文针对上覆地层相对平缓、速度横向变化不大的地质背景,同时考虑到目前计算机水平还难以实现三维地震数值模拟,故采用三维地震物理模拟来研究上述问题。选择中国东部淮海地区的水退模式扇形薄砂体构建地质模型,分别利用全方位三维

* 北京市昌平区中国石油大学资源与信息学院 CNPC 物探重点实验室, 102249

本文于2006年6月1日收到,修改稿于同年11月23日收到。

本项目为中国石油天然气集团公司基础性研究项目(06A10102)。

观测系统和窄方位三维观测系统进行地震物理模拟分析后认为,在上覆地层相对平缓、速度横向变化不大的地质背景下,通过采用CMP叠加偏移处理,宽方位和窄方位三维采集都能对地下目标实现基本正确的地震成像,且两者的成像分辨率相当。

2 三维地震物理模拟

2.1 地震物理模型及观测系统

中国东部滩海地区的水退模式扇形薄砂体地质模型如图1所示,地质模型的具体参数如表1所示。超声波主频为220kHz(相当于实际地震波主频44Hz),目标层(扇体)地震波主频约为40Hz。根据扇体埋深(910~970m)及上覆介质的平均速度(1530m/s)可计算出叠加剖面的水平分辨率(为第一菲涅尔带半径) $R_1 \approx 130\text{m}$,偏移剖面水平分辨率的极限为 $RF_b = v/(2f) \approx 24\text{m}$ (v 为层速度, f 为地震波主频)。CMP面元设计为 $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$,远小于水平分辨率极限和最小扇体S4的宽度,因此本次地震物理模拟属于高精度三维地震勘探。利用全方位三维观测系统和窄方位三维观测系统进行地震物理模拟分析,观测系统如图2所示,表2列出了两种观测系统的纵横比等数据。由表2可看出,全方位的指数为窄方位的4.57倍。

表1 地质模型参数

岩层	WB	LV	SH	BA	S1	S2	S3	S4
厚度/m	500	150	320	250	57.5	48	35	19.5
速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1480	1340	1920	2640	2210	2290	2380	2470
双程旅行时/ms	676	224	333	189	52	42	29	16

2.2 三维数据采集和处理

全方位观测系统的三维数据共计采集1796608道模拟地震记录,窄方位观测系统的三维数据共计采集1827840道模拟地震记录,两者总采集工作量相近,采集时间均为7天。三维资料处理采用常规的先叠加后偏移流程,采样率为1ms,处理成果为两个三维偏移数据体。

3 扇体成像分辨率分析

3.1 宽/窄方位观测的反射子波对比分析

在实验室先采集全方位三维数据,后采集窄方

位三维数据,延续时间长达14天,因实验环境有微小变化及观测系统不同等原因,导致两种偏移数据体的地震反射子波略有差异。

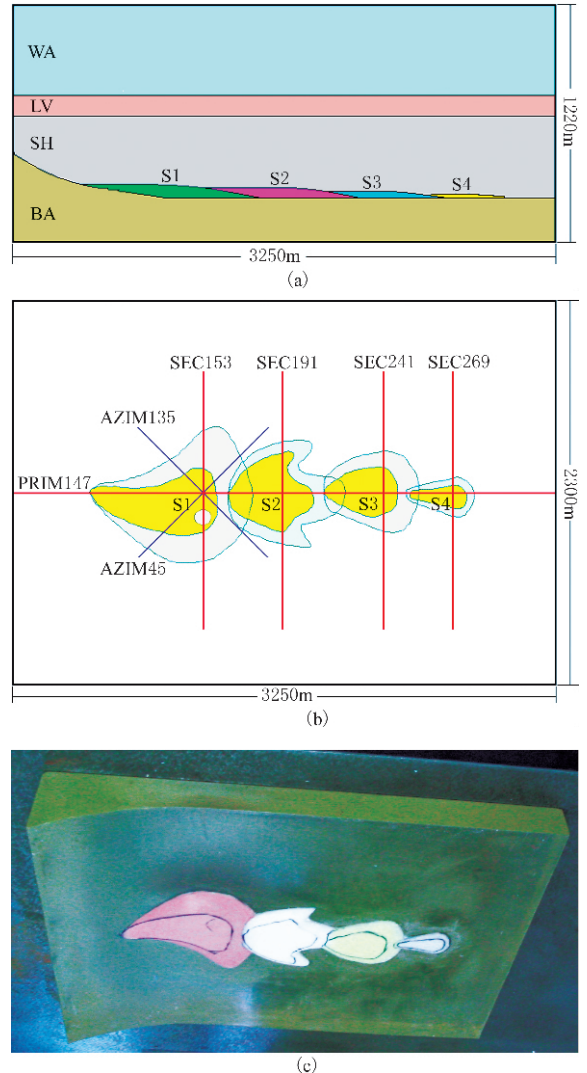


图1 水退模式扇形薄砂体地质模型

(a)穿过模型中轴线的垂直切片;(b)4个扇体的水平透视图及7条扇体成像分辨率分析线(1条穿过4个扇体的纵向(0°)测线(PRIM147)、4条横切各个扇体的横向(90°)测线(SEC153,SEC191,SEC241和SEC269线)和两条斜交(45° 和 135°)测线(AZIM45和AZIM135线)),在制作扇体S1过程中出现一次失误,异物掉在尚未固化的S1顶面上形成一个坑;(c)制模过程中的实物照片

水退模式扇形薄砂体沉积模型由底层基岩(BA)、中层泥岩(SH)、上层低速带(LV)、水层(WA)4层介质组成,左边基岩为海岸陡坡带,在基岩顶面、泥岩底部,从左到右沉积了4个扇形薄砂体S1、S2、S3、S4,扇体为扁平状,边缘为楔形尖灭,4个扇体相互叠置,大小和厚度依次递减(最小的S4宽为230m、面积为 0.06km^2),扇体埋深为910~970m,上覆介质的平均速度约为1530m/s。地震物理模型的参数比为:尺度比1:5000(时间采样率比为1:5000,频率比为5000:1),速度比1:1。物理模型大小为 $650\text{mm} \times 460\text{mm} \times 244\text{mm}$ (换算成实际地质模型为 $3250\text{m} \times 2300\text{m} \times 1220\text{m}$)

图 3 是从扇体 S1 顶面反射同相轴上提取出来的混合相位子波,由图 3 可看出:①在 1200ms 前为初至,1200ms 以后第一个负相位为次强振幅,第二个正相位(红色)为强振幅波峰,第三个负相位(蓝色)为强振幅波谷,第四个又为正相位,从第五个相位开始与 S1 底部反射子波叠加,形成合成子波;②全方位观测反射子波的波峰和波谷时刻分别为 1215ms 和 1226ms,半周期为 11ms,窄方位观测反射子波的波峰和波谷时刻分别为 1217ms 和 1228ms,半周期为

表 2 宽/窄方位三维观测系统的纵横比参数

纵横比	观测模板	覆盖次数	综合指数
全方位	0.91	1	0.96
窄方位	0.26	0.15	0.21

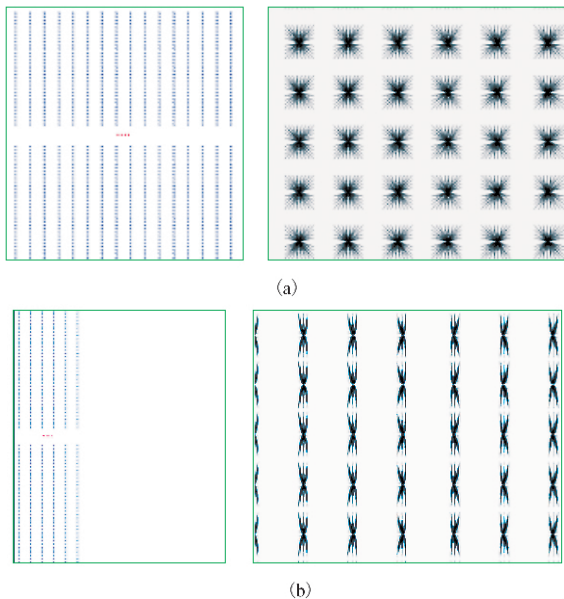


图 2 宽/窄方位三维观测系统

(a)16 线 4 炮全方位观测模板及 CMP 面元炮检方位分布图。采用 16 线 4 炮/2×32 道/8×8 次/12.5m×12.5m 正交型束状观测系统。纵向道距为 25m,滚动距离为 100m,滚动 29 个模板;横向线间距为 100m,炮点距为 25m,滚动 1 线 100m,共计 17 束线。16 线观测系统的横向覆盖次数渐减带很宽,为了减少横向覆盖次数渐减带,提高满覆盖次数所占面积的百分比,采用了类似野外的“滚进滚出”施工方法,即从第 1 束线(SW1)到第 6 束线(SW6),排列线数由 11 条递增到 16 条,横向不对称施工。从第 12 束线(SW12)到第 17 束线(SW17),排列线数由 16 条递减到 11 条,横向不对称施工。CMP 面元的最大炮检距为 1134m,略大于地质目标埋深。地面观测面积为 4000m×2100m=8.4km²,地下资料覆盖面积为 6.1km²。(b)6 线 4 炮窄方位观测模板及 CMP 面元炮检方位分布图。采用 6 线 4 炮/2×40 道/3×20 次/12.5m×12.5m 正交型束状观测系统。纵向道距为 25m,滚动距离为 50m,滚动 56 个模板;横向线间距为 100m,炮点距为 25m,滚动 1 线 100m,共计 17 束线,每束线都为 6 条排列线。CMP 面元的最大炮检距为 1085m,略大于地质目标埋深。地面观测面积为 4300m×2100m≈9km²,地下资料覆盖面积为 6.2km²

11ms,两个子波的时差为 2ms,说明两种时间剖面的同相轴错动 2ms,但视周期均为 22ms,说明反射波视主频相同,均为 44.5Hz。通常,方位宽窄不影响地震成像纵向时间分辨率,本次实验资料分析也证实了这一点。

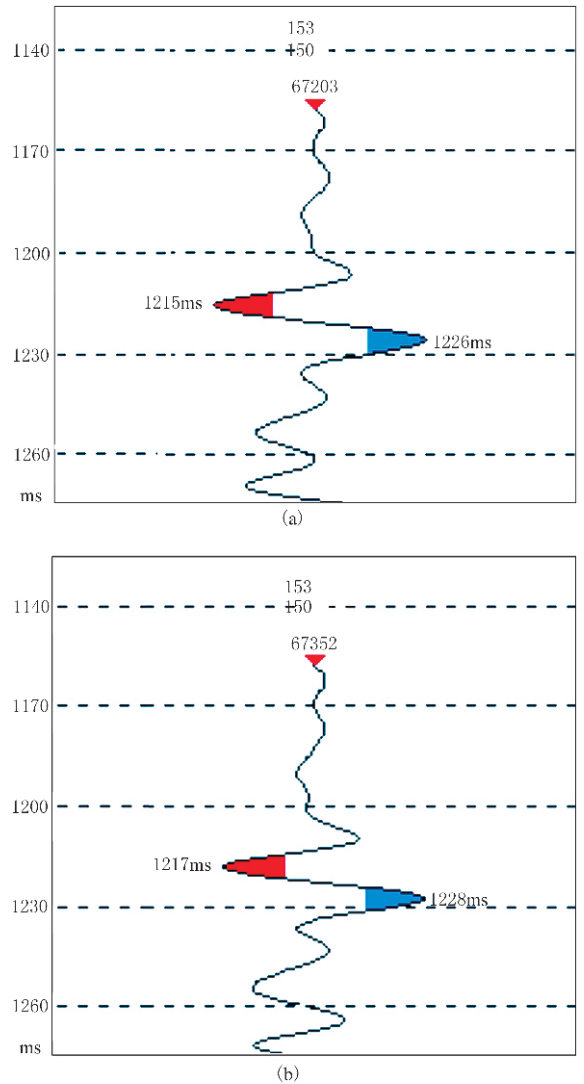


图 3 SEC153 线偏移剖面上的 S1 顶面反射子波对比 (a)全方位;(b)窄方位

3.2 时间切片的全局性定性分析

借助于三维偏移数据体的时间切片,可以进行两种观测系统的地震成像横向分辨率的定性对比分析,这种分析是宏观的、全局性的。以间隔 1ms 为单位,从 1190ms 扇体 S1 初至波正相位(红色)成像开始切片,一直切到 1285ms 的基底反射同相轴为止,两个三维数据体各自 96 张时间切片,本文选择其中部分切片进行分析、对比,因为窄方位观测的同相轴比全方位滞后 2ms,所以两者的时间切片也应

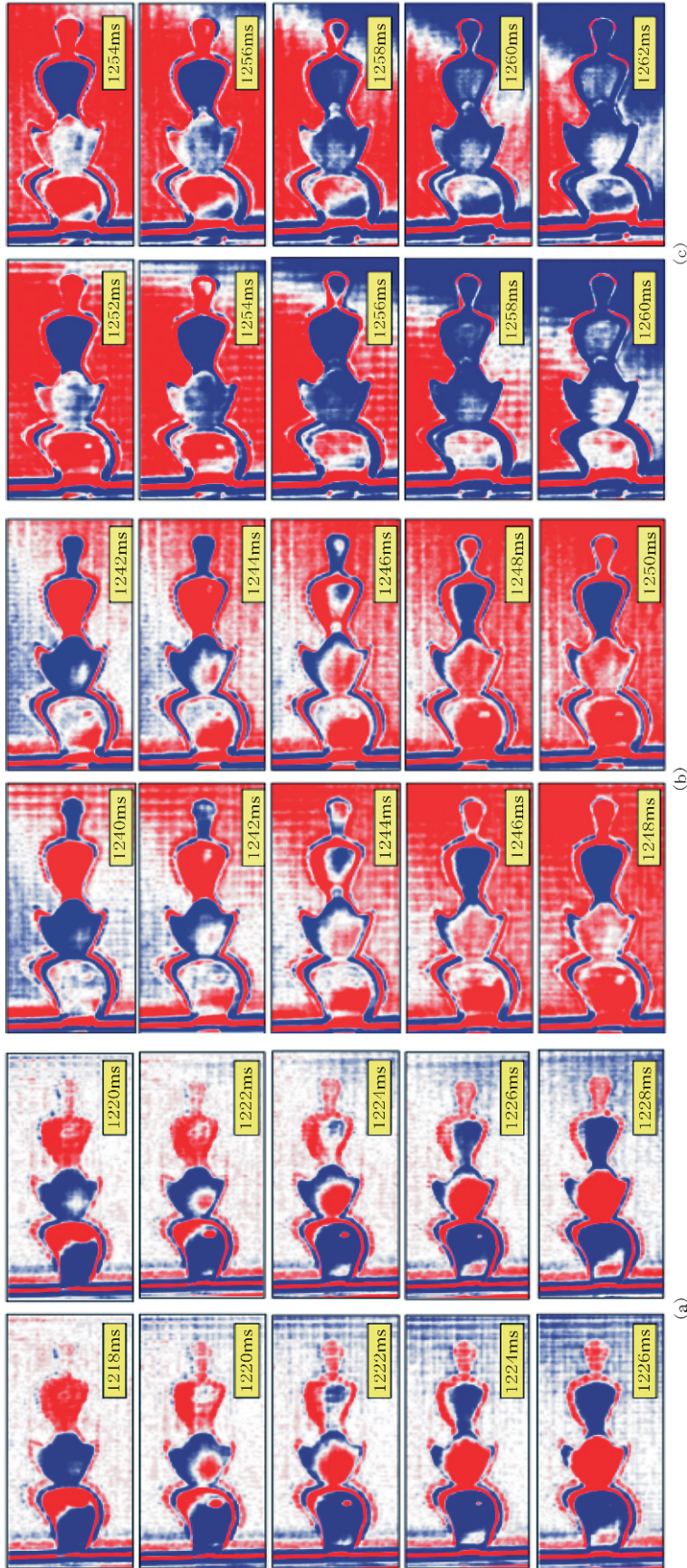


图4 扇体成像的时间切片对比

(a) S1振幅最强、S2振幅最强、S3振幅最强、S4初至时刻段的成像质量对比；(b) S1的砂状边缘、S2、S3、S4强振幅时刻段的成像质量对比；

(c) 由红色波峰向蓝色波谷过渡的基底顶面反射成像。每张图左侧为全方位观测的切片，右侧为全方位观测的切片，时间切片上红色为正、蓝色为负、白色为零

错动 2ms 来进行对比,同时为了增加动态感,以 2ms 为间隔,进行连续对比(图 4)。由图 4 可见:①在 1218ms 和 1220ms 时段, S1 为红色波峰成像,随后变为蓝色波谷, S2 和 S3 为初至波成像,在 1224ms 和 1226ms 时刻, S1 为蓝色波谷成像, S2 为红色、 S3 为蓝色的次强振幅成像,而 S4 则已进入初至成像(图 4a),在 1220~1222ms、1222~1224ms 和 1224~1226ms 三对切片图上, S1 顶面上的小坑成像也几乎相同;②在 1240~1250 ms 时段, S1 则主要考察边缘楔状尖灭成像, S2、 S3、 S4 则考察其强振幅成像(图 4b);③在 1252~1260 ms 时段,可以看到基底顶面反射波由红色波峰向蓝色波谷过渡(图 4c)。对比图 4 左、右错动 2ms 切片的全部图像,发现两者差别很小,因此两种观测系统都能使 4 个扇体较好地成像。

3.3 偏移剖面的局部性定量分析

定量检测选择了图 1b 所示的 7 条扇体成像分辨率分析线。定量分析目标是在 0°、45°、90° 和 135° 等 4 个方向上检测 4 个扇体边缘尖灭点的偏移归位精度(相当于预测实际的小幅度储层范围),分析方法采用波形特征鉴别法。

图 5 为 PRIM147 线宽、窄两种观测系统的纵向偏移剖面。由图 5 可见,宽、窄两种观测系统的 4 个

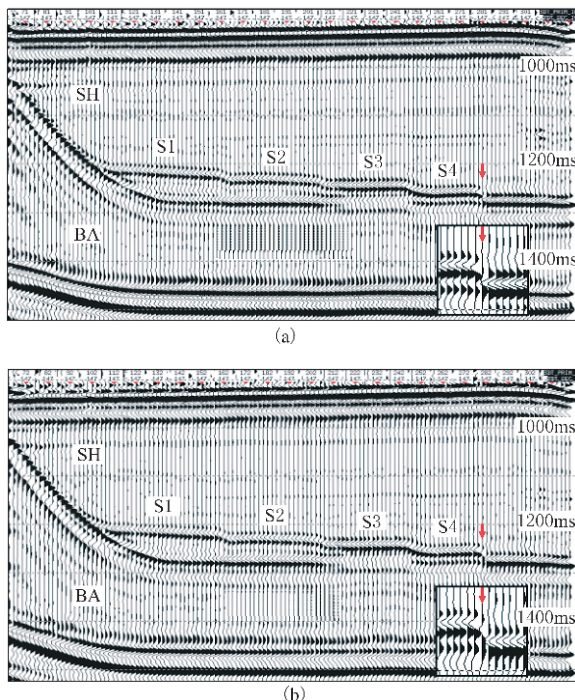


图 5 PRIM147 线窄(a)、宽(b)方位偏移剖面
图中红色箭头为扇体 S4 右端的楔形尖灭成像及其放大图像

扇体顶、底反射同相轴及它们之间的叠置波形、陡倾角及平界面的基底成像、受 S3、 S4 薄层调谐作用影响而消失的基底图像等都很相似。岩性尖灭点左侧为砂岩与基岩交界面,右侧为泥岩与基岩交界面,尖灭点处的岩性突变会造成同相轴波形特征发生明显变化,此种现象可作为尖灭点的判据之一。仔细观察宽、窄方位两种观测系统对扇体 S4 右端的楔形尖灭成像及其放大图像(图 5 中的红色箭头)可以看出,两者的波形变化特征都十分清楚、相像,都在 CMP281 道两侧波形发生明显变化,因此可以确定尖灭点在 CMP281±0.5 道上(标准值为 CMP280.5,误差 1 道(12.5m)),说明宽、窄方位两种观测系统对 S4 的成像精度相当。

图 6 为 SEC 241 线宽、窄方位偏移剖面;图 7 为 AZIM 45 线宽、窄方位偏移剖面。这两张图都是岩性突变处发生同相轴波形突变的典型图例,因此很容易确定尖灭点位置。并非所有尖灭点都有如此特征,例如当楔形尖灭坡度较小时,尖灭点检测误差就较大。表 3~表 6 是 4 条横向测线和两条斜交测线的检测结果。由表 3~表 6 可见,理论预测薄扇体的最佳偏移归位精度为两个 CMP 道 (RF_n = 24m),实验检测的最大误差为两个 CMP 道。定量对比结果表明,宽、窄两种观测系统都能使 4 个薄扇体正确成像,且两者的成像分辨率基本相当。

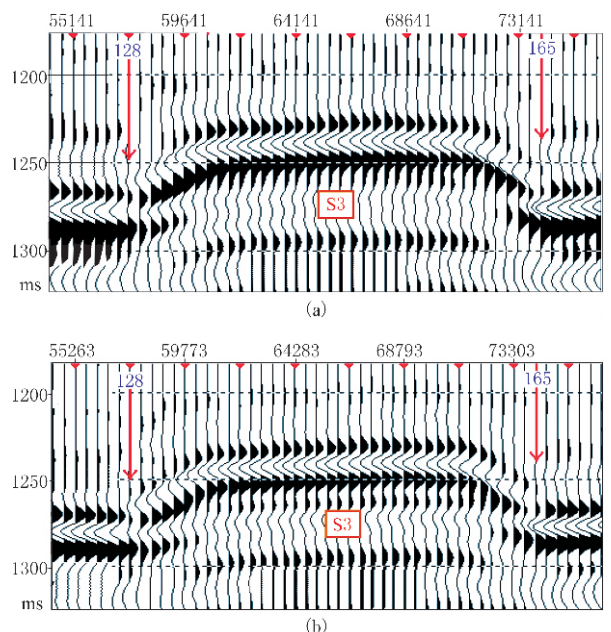


图 6 SEC 241 线宽(a)、窄(b)方位偏移剖面

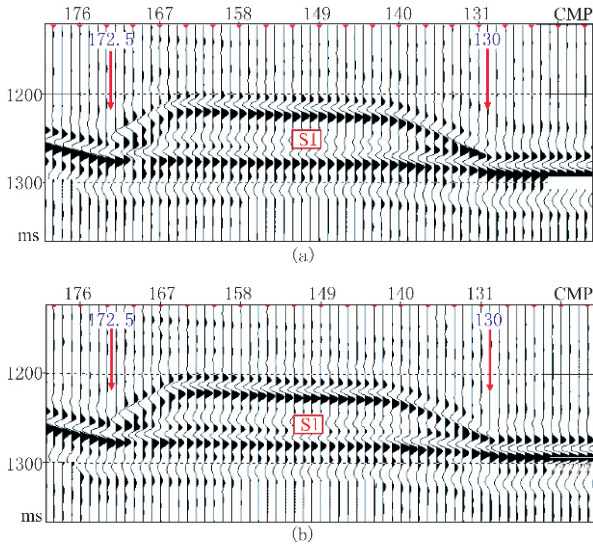


图7 AZIM45线宽(a)、窄(b)方位偏移剖面

表3 全方位观测的90°方向4条偏移剖面的检测结果
(单位:1个CMP道(12.5m))

检测对象	标准 CMP 号	实验检测 CMP 号						评价
		线号	扇体	上边界	下边界	上边界	误差	
SEC153	S1	117	179.5	118-0.5	0.5	178+0.5	1	优
SEC191	S2	122.5	172	123-0.5	0	170+0.5	1	优
SEC241	S3	128	165.5	128-0.5	0.5	165+0.5	0	优
SEC269	S4	141	157.5	140.5-0.5	1	156+0.5	1	优

表4 窄方位观测的90°方向4条偏移剖面的检测结果
(单位:1个CMP道(12.5m))

检测对象	标准 CMP 号	实验检测 CMP 号						评价
		线号	扇体	上边界	下边界	上边界	误差	
SEC153	S1	117	179.5	118-0.5	0.5	178+0.5	1	优
SEC191	S2	122.5	171.5	123-0.5	0	169+0.5	2	优
SEC241	S3	128	165.5	128-0.5	0.5	165+0.5	0	优
SEC269	S4	141	157.5	140.5-0.5	1	156+0.5	1	优

表5 全方位观测的斜交方向两条偏移剖面的检测结果
(单位:1个CMP道(12.5m))

检测对象	标准 CMP 号	实验检测 CMP 号						评价
		线号	扇体	上边界	下边界	上边界	误差	
AZIM45	S1	130	174	130-0.5	0.5	172.5+0.5	1	优
AZIM135	S1	130.5	164.5	131-0.5	0	164+0.5	0	优

表6 窄方位观测的斜交方向两条偏移剖面的检测结果
(单位:1个CMP道(12.5m))

检测对象	标准 CMP 号	实验检测 CMP 号						评价
		线号	扇体	上边界	下边界	上边界	误差	
AZIM45	S1	130	174	130-0.5	0.5	172.5+0.5	1	优
AZIM135	S1	130.5	164.5	131-0.5	0	164+0.5	0	优

4 结束语

本文针对上覆地层相对平缓、速度横向变化不大的地质背景,选择中国东部滩海地区的水退模式扇形薄砂体构建地质模型,分别利用全方位三维观测系统和窄方位三维观测系统进行了地震物理模拟后认为,在上覆地层相对平缓、速度横向变化不大的地质背景下,通过采用CMP叠加偏移处理,宽方位和窄方位三维采集都能对地下目标实现基本正确的地震成像,且两者的成像分辨率相当。尚需指出,有关宽/窄方位三维观测系统对复杂地质目标地震成像分辨率的影响分析,涉及到采集、处理、解释一体化的综合方法研究,因此应结合CMP叠加偏移处理方法和CRP偏移叠加处理方法研究,才能得出比较全面、合理的认识。

参考文献

- [1] Andreas Cordsen 等著,俞寿朋等译.陆上三维地震勘探的设计与施工.石油地球物理勘探局,1996,24~31
- [2] 阎世信等.三维地震观测方式应用的几点意见.石油地球物理勘探,1998,33(6):787~795
- [3] 李庆忠.对宽方位角三维采集不要盲从.石油地球物理勘探,2001,36(1):122~124
- [4] 熊翥.我国物探技术的进步与展望.石油地球物理勘探,2003,38(4):447~459
- [5] 凌云研究组.宽方位角地震勘探应用研究.石油地球物理勘探,2003,38(4):350~357
- [6] 凌云等.宽/窄方位角勘探实例分析与评价(一).石油地球物理勘探,2005,40(3):305~308,317
- [7] 凌云等.宽/窄方位角勘探实例分析与评价(二).石油地球物理勘探,2005,40(4):423~427

(本文编辑:刘勇)