

天然气水合物准三维地震调查面元参数优化研究*

赵庆献

(国土资源部广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

摘要: 在我国某海域对天然气水合物研究过程中, 使用了单源单缆准三维地震勘探方法, 获得了天然气水合物矿体较好的三维成像效果。影响天然气水合物矿体三维成像的因素很多, 其中, 面元参数的选取是最直接的影响因素之一。本文分析了大量试验数据, 结果表明, 在确定了电缆的排列长度为 2400m(192 道)的前提下, 面元横向最佳优化尺寸应为 50m, 处理面元为原始采集面元大小的 1/2(即面元大小为 12.5m×25m)时, 可以兼顾地层的真实性和连续性。以此为基础可获得较高质量的准三维地震处理资料。

关键词: 天然气水合物; 准三维地震; 面元; 横向分辨率; 定位精度

中图分类号: P738 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2011)01-0070-08

Optimized bin parameter on gas-hydrate quasi-three-dimensional seismic survey

ZHAO Qing-xian

(Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: In a sea area of China, the “single source-single streamer quasi-three dimensional seismic survey” method was applied in the gas-hydrate investigation, and a satisfying three-dimensional (3D) image was obtained. The bin parameter is one of the important parameters that can influence the 3D imaging. According to the result of data, if a streamer length of 2400m (192 channels) is fixed, the best optimization bin size (transverse) should be 50m and processing bin should be half of the original acquisition size, i.e., 12.5m×25m, which can take into account of the authenticity and continuity of strata. A good quality of the quasi-3D seismic image can then be obtained.

Key words: gas-hydrate; quasi-three-dimensional seismology; bin; transverse resolution; positioning precision

目前, 地震调查在国内外水合物勘探界应用非常广泛^[1], 但使用准三维地震勘探方法(即单源单缆三维地震勘探方法)在国外尚未发现。而我国也只是从近几年才开始在南海北部陆坡区水合物勘探中采用准三维地震勘探方法。经过几年的研究与发展, 天然气水合物准三维地震勘探采用单源单缆地震勘探方法获得了较好的三维成像效果^[2-3]。

对于水合物准三维地震调查而言, 为了达到较好的成像效果, 必须提高定位精度。而实际上, 面元

大小的选择与定位误差之间形成了一种相互关联、相互制约的关系。面元参数优化是水合物三维地震技术研究的关键内容之一^[4]。首先, 需要建立相应的地质模型(或地球物理模型), 然后, 利用相关的数学模型进行模拟。本文以试验数据为基础, 研究时综合考虑的主要因素如下: 水合物目标尺寸、最高无混叠频率、横向分辨率、导航动态定位精度。最后, 通过实际资料的对比验证确定达到面元参数优化的目的^[4]。

收稿日期: 2010-05-27; 修订日期: 2010-06-17。卢冰编辑

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划 (2006AA09A202-01)

作者简介: 赵庆献(1971—), 男, 山东省郯城县人, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋石油和天然气水合物的地球物理勘探研究。E-mail: zhqx@hydgc.cn.

* 感谢广州海洋地质调查局的许多同事在完成本文过程中对我耐心的帮助; 感谢南海海洋研究所的丘学林教授就本文给予了技术上的指导。

1 水合物目标尺寸

根据相关资料(Andreas Cordsen, 1996 年)^[5]研究结果, 测量一个小的目标体通常需要有 2—3 个地震道, 如果目标体是一个小礁体或一条狭窄的河道砂, 那么面元就要很小, 能够保证至少在目标范围内有 2 个地震道(最好 3 道)。这样就能够对实际面元边长进行很好的初步估计。三维调查的目标地质体的尺寸与面元边长存在以下经验法则:

$$\text{面元边长} = \text{目标尺度} / 3 \quad (1)$$

海洋天然气水合物矿体的分布具有一定的特殊性, 即使在水合物稳定带之内, 矿体的分布也具备多种形态: 分散状、瘤状、层状、块状、团状和其他不规则形状, 分布间隔从十几米到几十米甚至上百米不等^[6]。假如分布间隔从 20—100m, 根据面元尺寸的经验法则式(1), 如果按照 3 道的要求在三维数据体上识别水合物矿体, 面元大小应该为 6.75m×6.75m—33m×33m 不等, 理论上讲面元越小, 精度越高。而实际选择面元时, 一般使面元的边长 b 与地震道间距 L 满足如下关系:

$$b = n \times L \quad (2)$$

式中, n 取值为 1/2、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4...; L 通常为 12.5m。

综合上述各种因素, 面元边长取值范围分别为 6.25m、12.5m、25m、37.5m、50m...

2 无混叠频率与面元大小的关系

每个倾斜同相轴都有一个偏移前可能的最高无混叠频率 F_{\max} (其周期为 T), 高于这个值的频率在偏移前会有混叠, 只有低于这个值的频率才能保持同

相轴的真实倾角^[7]。零炮检距射线间的时差大于半个周期时将发生空间混叠(基于每个波长 2 个样点; 采用更严格要求时, 用 3 个或 4 个样点, 甚至非整数, 面元边长则相应减少)。最高无混叠频率与面元大小的关系的计算公式如(3)式^[8], 面元边长和最高无混叠频率

$$F_{\max} = V / (4 \times b \times \sin \theta) \quad (3)$$

式中, V 为同相轴的上一层的地层的地震波速度; θ 为地层倾角; b 为面元边长。由(3)式可以得出 b 的值, 即面元边长, 如(4)式; 面元边长与最高无混叠频率关系计算见图 1。

$$b = V / (4 \times F_{\max} \times \sin \theta) \quad (4)$$

天然气水合物地震识别技术的研究结果表明: 就我国南海北部天然气水合物调查而言, 为提高 BSR 的识别程度, 其地震调查的合适频带为 10—120Hz, 主频 40—70Hz 为好^[8]。

一般来说, 地震勘探的最高无混叠频率约为优势频率的 2 倍, 即存在下述关系:

$$F_{\text{dom}} \approx F_{\max} / 2 \quad (5)$$

式中, F_{dom} 为优势频率, F_{\max} 为最高无混叠频率。

综合考虑上述因素, 水合物调查地震勘探中的最高无混叠频率取值为 120—150Hz。地层倾角的取值范围为 0—15°。在地层倾角和层速度相同的情况下, 最高无混叠频率分别取值 120、150Hz 时, 所计算出的面元边长值见表 1。

计算结果表明:

1) 南海某海域天然气水合物调查时, 最高无混叠有效频率为 120Hz, 地层倾角为 0—15°, 面元边长最佳值为 17.7—71.7m。

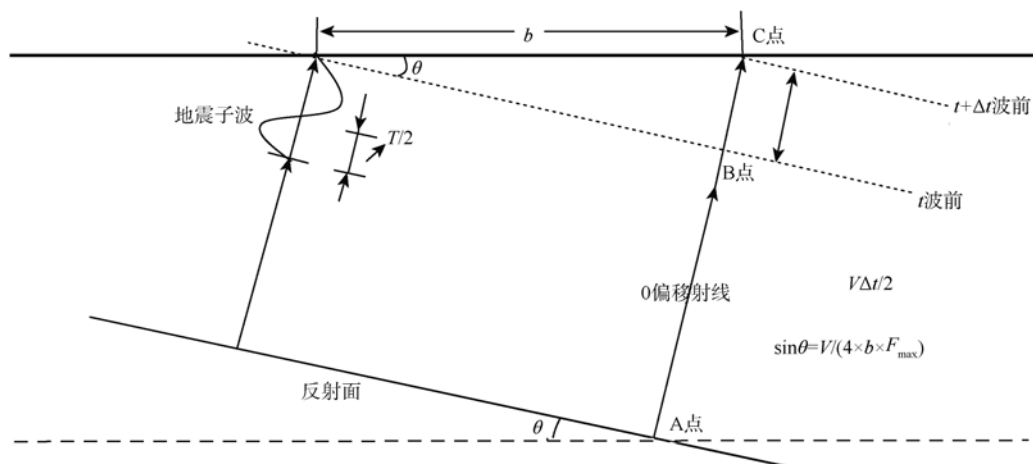


图 1 面元边长与最高无混叠频率之间关系剖面图

t 为 A 点到 B 点地震波的双程旅行时间; Δt 为 B 点到 C 点地震波的双程旅行时间。

Fig. 1 Section map of relation between the bin size and the highest frequency without aliasing

表 1 最高无混叠频率分别取值 120、150Hz 时, 所计算出的面元边长值

Tab. 1 Bin size as the highest frequency is 120 or 150Hz

地层倾角 /°	层速度/ (m·s ⁻¹)	$F_{\max}=150\text{Hz}$ 时 面元边长/m	$F_{\max}=120\text{Hz}$ 时 面元边长/m
5	3000	57.4	71.7
5	2600	49.7	62.2
5	2200	42.1	52.6
10	3000	28.8	36.0
10	2600	25.0	31.2
10	2200	21.1	26.4
15	3000	19.3	24.2
15	2600	16.7	20.1
15	2200	14.1	17.7

2) 为了获得更高的分辨率, 将最高无混叠频率提高到 150Hz, 地层倾角仍然保持 0—15°, 面元边长最佳值为 14.1—51.4m。

3 横向分辨率与面元大小的关系

菲涅耳带直径决定偏移前的横向分辨率, 从绕射的观点来说, 横向分辨率依赖于分辨两个邻近的绕射的能力。偏移前, 两个绕射的距离小于第一菲涅耳带直径时不能分辨开^[9], 这个距离一般较大, 在 CMP(common midpoint, 共中心点) 叠加很容易漏掉小断层等。偏移后, 横向分辨率依赖于目的层反射的最高频率, 两个绕射的距离小于最高频率的一个空间波长时不能分辨开。

因最高频率在实际工作中很难测出, 对每个优势频率的波长取两个样点, 就能得到良好横向分辨率的面元边长。根据有关资料^[10], 考虑横向分辨率时, 有关面元的计算公式如下:

$$b = V_{\text{int}} / (2 \times F_{\text{dom}}) \quad (6)$$

式中, b 为面元尺寸; V_{int} 为目标上面一层的层速度; F_{\max} 为最高无混叠频率; F_{dom} 为优势频率。

根据天然气水合物调查特点, F_{\max} 取 120Hz, F_{dom} 取 60Hz, V_{int} 取值范围为 2200—3000Hz, 面元边长的计算结果如表 2。由计算表得出在考虑横向分辨率时, 面元边长以十米至三十几米为宜。

表 2 面元大小计算表(横向分辨率)

Tab. 2 Bin size table from the criteria of transverse resolution

最高无混叠频率 F_{\max}/Hz	优势频率 F_{dom}/Hz	层速度 (m·s ⁻¹)	面元边长 /m
120	60	3000	25.0
120	60	2800	23.3
120	60	2600	21.7
120	60	2400	20.0
120	60	2200	18.3
120	60	2000	16.7
120	60	1800	15.0

4 定位精度与面元大小的关系

海上三维地震调查均存在定位误差精度问题^[11], 真正意义上的面元覆盖如图 2 所示, 由于误差的影响, 叠加时相邻面元之间会出现重叠现象, 重叠面积越小则越有利于三维成像^[12]。据有关资料分析, 为了保证三维成像质量, 定位误差精度控制在 CMP 面元边长的三分之一至二分之一时^[13], 较为有利。表达式为(7)—(8):

$$E_b = (E_1 + E_2) / 2 \quad (7)$$

式中, E_b 为 CMP 面元的定位误差, E_1 和 E_2 分别为震源中心和电缆道的定位误差范围。

根据 $b/6 - b/4 = (E_1 + E_2)/4$, 则定位误差与 CMP 边长的经验公式如下:

$$\text{面元边长 } b = (E_1 + E_2) - 3/2(E_1 + E_2) \quad (8)$$

就 CMP 面元而言, 动态定位误差主要考虑震源

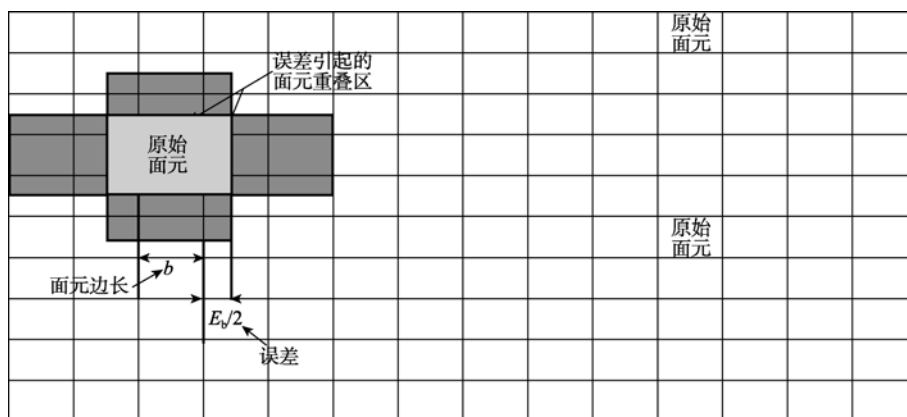


图 2 面元覆盖示意图

Fig. 2 Diagram of bin coverage

中心、电缆道定位误差两种, 其中, 电缆道的定位误差由电缆头标 RGPS(Range Global Position System, 测距

定位系统)节点、电缆尾标 RGPS 节点和电缆罗盘精度共同决定^[14]。CMP 与定位误差关系如图 3 所示。

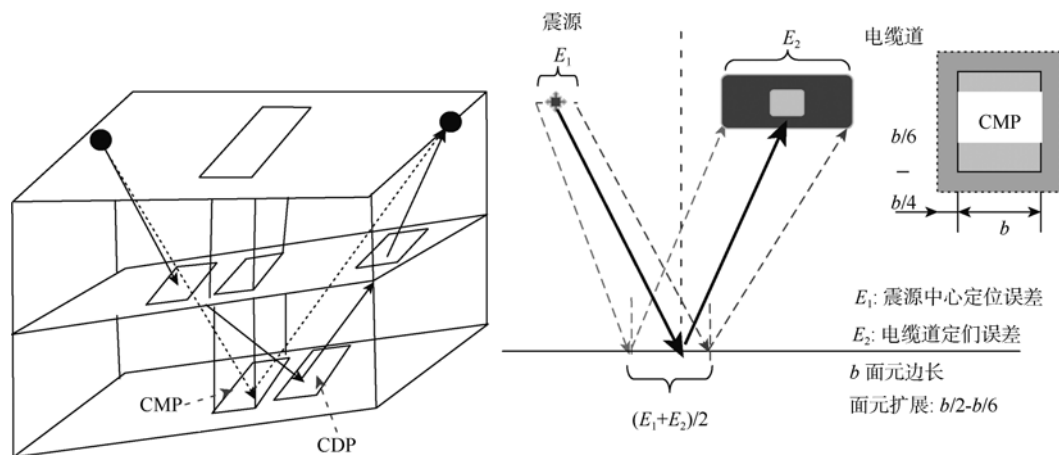


图 3 CMP 与定位误差关系示意图

CDP 为共深度点(common depth point); CMP 为共中心点(common midpoint)

Fig. 3 Diagram of the relations between positioning error and CMP

根据导航定位技术的研究结果: 没有震源中心和头标 RGPS, 仅采用尾标 RGPS 和罗盘设备进行定位, 震源中心定位精度在 5m 以内, 电缆道的定位精度为十几至几十米; 采用完整的“网络三节点法”进行定位, 震源中心定位精度优于 1m, 电缆道的定位精度优于 10m。采用式(8)计算, 最佳面元尺寸为: 无震源中心和电缆头标 RGPS 定位时, E_1 和 E_2 分别取值 5m 和 10—25m, 面元大小应为 30—45m; 网络三节点定位时, E_1 和 E_2 分别取值 1m、10m, 面元大小 22—33m。

5 施工质量及效率对面元参数的影响

水合物单源单缆准三维调查对野外采集具有较高的要求, 其中, 如何达到规定的面元覆盖率是施工方法所必须解决的难点之一。相对于南海某海域天然气水合物调查而言, 由于调查海域的水文、气象条件的特殊性, 作业黄金季节为 4—5 月, 9—10 月次之, 其他月份海况恶劣, 很难满足准三维调查的质量要求, 因此, 为了满足准三维施工的要求, 需将施工质量与效率结合起来考虑。研究表明: CMP 线的间距对准三维的补线率造成一定影响, 如何降低补线率将是提高作业效率的关键, 由于原始面元横向边长即为准三维原始采集 CMP 线的间距, 因此面元大小直接决定了野外施工效率。根据水合物单源单缆准三维调查野外采集规范, 补线率要求不大于 30%^[9]。

通过电缆的横向偏移距离可以估算补线率从而达到“通过面元参数优化提高施工效率和质量”的

目的。换算关系如下:

$$N = \text{INT} \{ [L/2 \times \sin(\theta) - D]/D \} + 1 \quad (9)$$

其中, L 表示电缆横向偏移, θ 表示羽角, D 表示准三维调查 CMP 线间距(面元横向边长), N 表示偏离到第 N 条邻近本线的 CMP 测线, 偏移起始点以 CMP 本线线边(电缆偏移相反方向)为参考点, INT 为取整函数。

对于排列长度为 3.0km 的电缆, 如果按照羽角 10° 左右情况进行施工, CMP 线原始采集线间距为 75m 时, 补线率估算结果为 30%左右; 如果 CMP 线原始采集线间距为 50m 时, 补线率估算结果为 40%以上。为了提高定位精度及降低补线率, 将排列长度改为 2.4km, 在作业羽角 15° 的情况下, 如果 CMP 线原始采集线间距为 50m 时, 补线率的估算结果将小于 30%, 如果 CMP 线原始采集线间距为 25m 时, 补线率估算结果将大大超过 30%。野外准三维调查实际补线率证明了估算结果的正确性。

6 准三维地震资料处理对面元参数的要求

由于水合物赋存条件的复杂性, 在对水合物准三维地震资料处理时发现: 如果采用原始 CMP 线间距作为面元横向边长的尺寸, 对于海底(或地层)起伏大的地方, 地层界面的连续性明显很差。如果将面元横向尺寸减小到原来的一半, 与原来的处理结果进行对比处理, 发现地层界面连续性明显改善(图 4)。因此为了改善准三维剖面的连续性, 是否可以在准三维定位误差允许的范围内将面元继续细分? 针对这个问题, 需要对剖面的连续性与真实性问题进行

行展开研究。

6.1 面元横向边长研究

以道间距为 12.5m 不变为基础进行研究。图 5 为 CMP 测线间距为 75m 的准三维采集资料的散点

分布图。面元优化模拟计算结果表明: CMP 横向边长为 37.5m 比较合适。为了将计算结果与实际资料对比,在资料处理时,对面元大小进行了重新划分,将面元的横向大小由 75m 变为 25m,随着面元尺寸

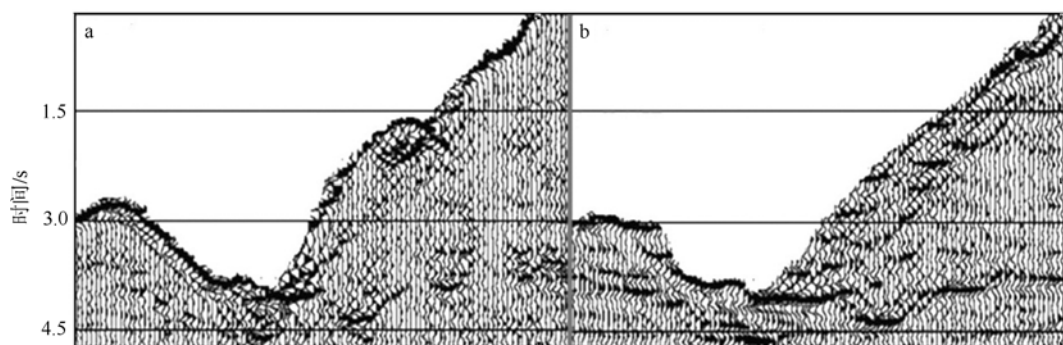


图 4 不同面元大小处理后水合物剖面的对比

a. 原始面元 12.5 m × 75 m; b. 面元重划分成 12.5 m × 37.5 m

Fig. 4 Influence of different processing bins on the hydrate profile

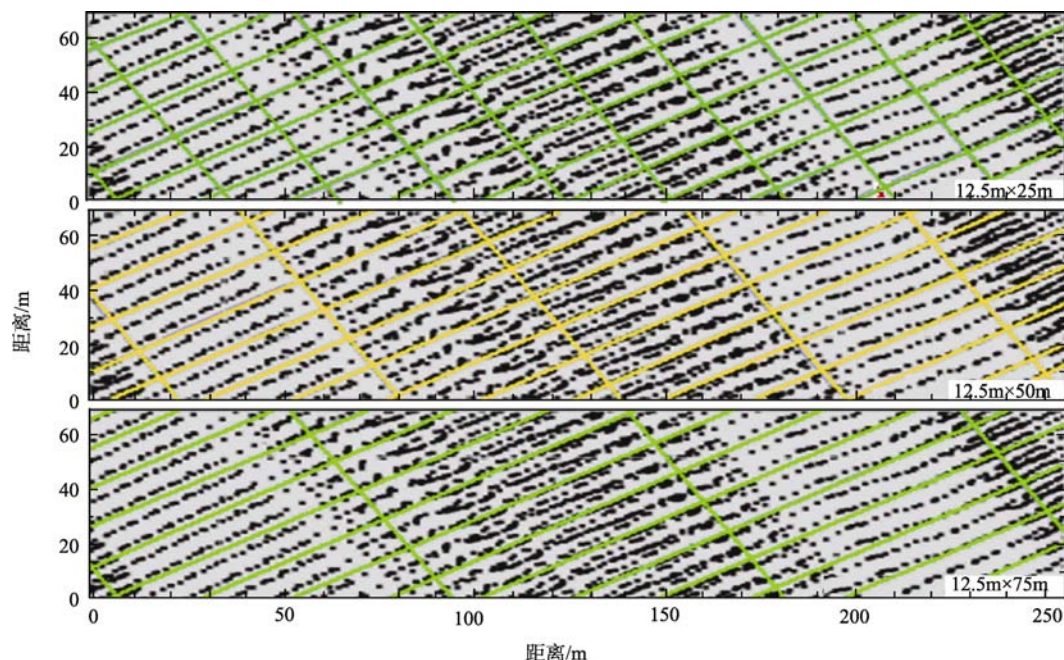


图 5 面元散点分布图(局部)

Fig. 5 Distribution map of bin splashes (local)

的缩小,面元的覆盖次数逐步变小,在叠加剖面上表现为空白(图 6b,对浅层的影响尤为严重)。为了改善准三维资料的成像效果,处理时,根据需要对面元进行纵、横向扩充,扩充比率为 25%—50%,进行借道处理,处理效果得以改善。研究表明:通过原始面元重划分技术,利用借道(或偏移)可以改善水合物准三维的成像效果。

对 CMP 测线间距为 50m 的准三维采集资料,进行面元重划分处理,面元横向边长分别为: 25m、37.5m 和 75m。比较剖面实际效果,可以看出面元横向边长为 25m 即为原始面元横向尺寸的 1/2 时,水

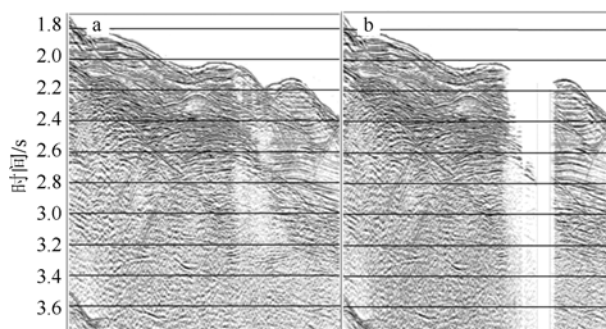


图 6 面元重划分处理效果

a. 借道处理后; b. 借道处理前

Fig. 6 Results of after (a) and before (b) resized bin

合物剖面的连续性得到改善，见图 7 中圆圈部分及海底形态。

资料处理时是否可以将采集面元无限细分呢？以上研究表明：当原始采集 CMP 线间距为 75m 时，若处理时将面元横向边长细化至 25m，将会造成准

三维剖面局部覆盖严重不足，甚至出现大面积空缺现象。为此，有必要进行准三维叠加、偏移剖面的对比研究，并且处理时需将采集资料进行面元重划分处理。图 8 中的 a 为叠加剖面，b 为偏移剖面。处理面元的横向尺寸为 25m，为原始面元横向尺寸的

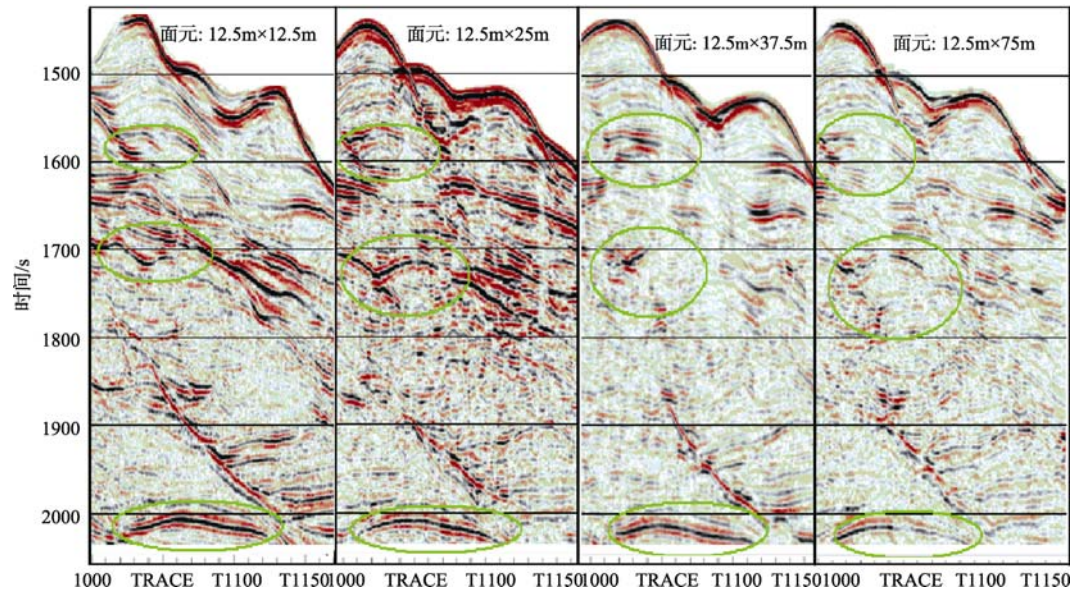


图 7 面元重划分处理剖面的连续性效果对比
Fig. 7 contrast of treating profile continuity after re-classifying the bin

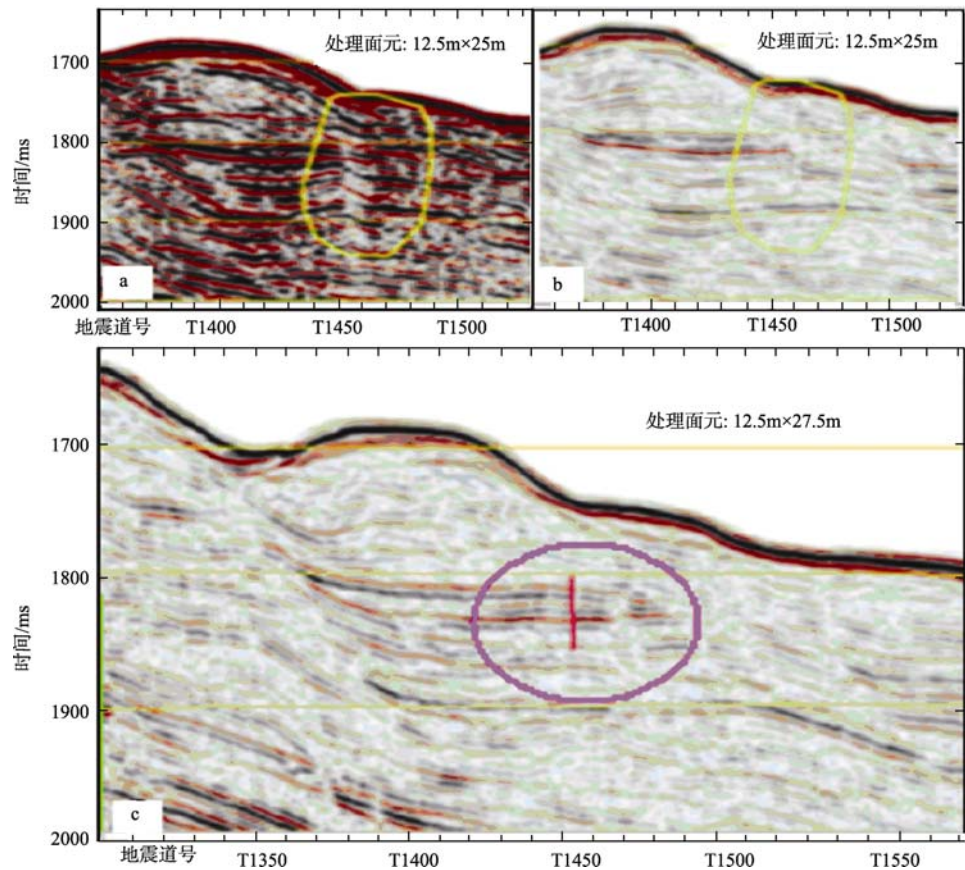


图 8 面元采集参数优化与水合物准三维地震调查效果分析
a. 叠加剖面；b. 偏移剖面；c. 偏移剖面

Fig. 8 Effect of bin acquisition parameter on the gas-hydrate quasi-three-dimensional seismic survey

1/3。尽管有些地方分辨率较好,但由于面元覆盖不足,造成偏移剖面中部分地层不连续(见图中黄圈部分),不能反映地层的真实情况。因此由于存在面元覆盖率的问题,对原始采集面元的划分不能无限细化(小于原始面元的 1/3),为了保证地层细节的真实性,必须保证面元具有一定的覆盖率。

图 8 中偏移剖面(c)处理面元大小为 $12.5\text{m} \times 37.5\text{m}$,是原始面元大小的一半,其中红圆圈部分地层能够真实反映地层细节,但由于原始面元横向边长较大,对较小地质体的识别不利,且海底连续性变差,主要原因是:面元横向边长较大时,面元内叠合的地质信息过多,不能识别小的地质体。

根据上述研究结果,原始采集 CMP 线间距为 75m 时,即使处理面元为其边长的 1/2,仍有许多不足之处,因此后期的水合物准三维地震调查时将 CMP 线的间距调整为 50m,资料处理是采用 $12.5\text{m} \times 25\text{m}$ 的面元大小,三维成像效果得到明显改善,见图 7 中 $12.5\text{m} \times 25\text{m}$ 的处理剖面。

通过以上实际资料的处理对比得知,对于水合物特定的调查海域而言,面元太大地层细节清晰度

变差;面元变小则有利于地层分辨率的提高,但受单源单缆三维覆盖相对不足的影响,面元过小造成散射点缺失,影响地层细节的真实性。优化结果:处理面元的横向边长为原始面元的 1/2 时,可以兼顾地层的真实性和连续性。

6.2 面元纵向边长研究

野外资料采集时通过“平差”处理可以将电缆道的纵向误差降到最低限度^[15],因此,在 CMP 沿线方向采用并道处理的方法,进行剖面效果对比,可以为面元纵向边长的确定提供依据。同时,根据水合物准三维海底地形变化特点,通过对比,为最终确定面元大小提供依据。

准三维地震资料处理时以野外实测测线为基础,其原始采集道间距为 12.5m,分别进行以下并道处理工作(图 9):两道并一道处理(简称二并一,或 $2\text{in}1$);四道并一道及六道并一道处理。

比较几种剖面的处理效果,结果如下:

1)对于原始剖面(图 9a),其 CDP 间距为 6.25m(即面元纵向边长为 12.5m),剖面上地层界面的连续性好,分辨率较高,但背景噪声较大;

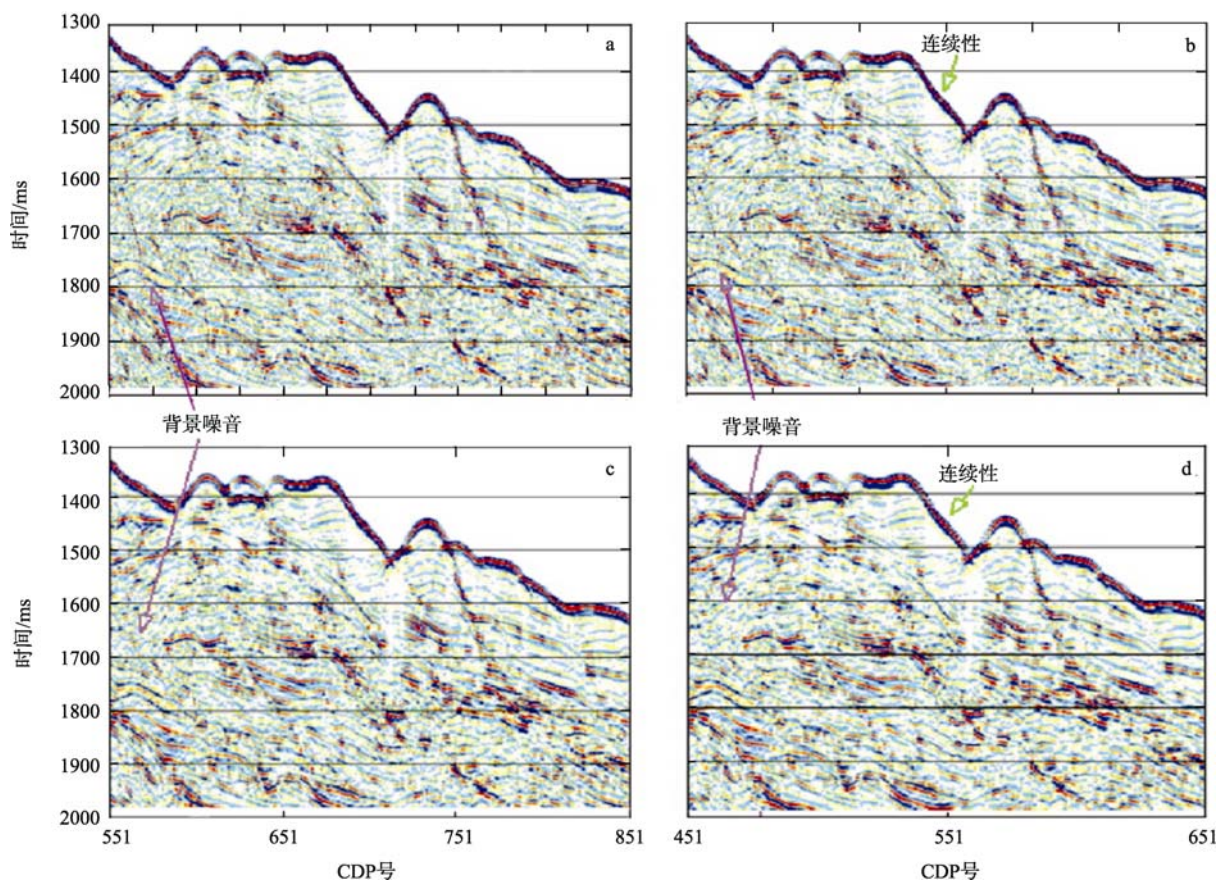


图 9 地震分辨率与并道之间关系对比图

a.原始剖面; b.两道并一道处理剖面; c.四道并一道处理剖面; d.六道并一道处理剖面

Fig. 9 Section map of relation between seismic resolution and combing channel.

2)对于二并一处理剖面(图 9b), CDP 间距为 12.5m, 剖面上的地层界面连续, 背景噪音明显降低, 但地层界面变粗, 分辨率有所下降。

3)对于四并一处理(图 9c), CDP 间距为 25m, 背景噪音水平较低, 但分辨率下降。

4)对于六并一处理(图 9d), CDP 间距为 37.5m,

背景噪音基本被压制, 但剖面连续性变差(如海底陡峭的地方地层界面变粗, 图 10)。

5)基本结论: 由以上剖面对比可知, 原始出来面元即沿线方向 CDP 间距为 6.25m(纵向边长为 12.5m)时剖面上地层界面的连续性好、分辨率较高。因此面元纵向边长选择 12.5m 时, 处理效果最好。

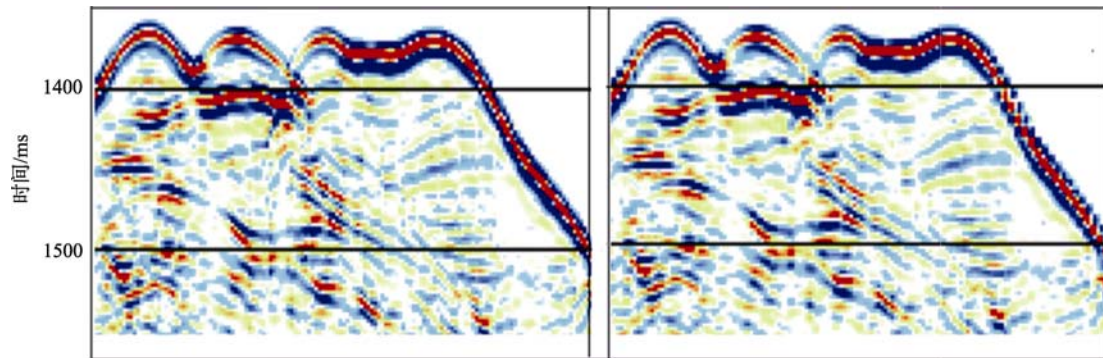


图 10 地震并道与地层界面连续性关系对比图

a.四道并一道处理剖面;b.六道并一道处理剖面

Fig. 10 Section map of relation between combing channel and stratum continuity

7 结论

1) 面元优化涉及水合物目标尺寸、最高无混叠频率、横向分辨率、导航动态定位精度、野外施工质量及效率等多个问题, 必须综合研究, 并通过效果对比验证方能确定。

2) 水合物一般埋藏不深, 为了兼顾施工质量和效率, 准三维地震调查地震电缆排列长度选取

2.4km 时(排列长度的选取在另外的文献中有专门的研究), 面元最佳优化尺寸(横向)应为 50m;

3) 通过连续性与真实性的对比研究, 水合物准三维 CMP 线间距为 50m 时(道间距为 12.5m); 处理面元大小不能太小, 为原始采集面元大小的 1/2(即面元大小为 12.5m×25m)时, 可以兼顾地层的真实性和连续性。

参考文献

- [1] 何汉漪. 海上高分辨率地震技术及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 7: 27-44.
- [2] 张光学, 黄永样, 陈邦彦. 海域天然气水合物地震学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 15-20.
- [3] 张光学, 张明. 天然气水合物地震识别技术[R]//广州海洋地质调查局. 课题研究技术报告, 2005: 62-63.
- [4] BERTIE J E, BATES F E, HENDRICKSEN D K. Seismic character of gas hydrates on the southeastern U. S. continental margin[J]. Marine Geophysical Researches, 2006, 53: 71.
- [5] ANDREAS CORDSEN. 三维地震资料采集的观测系统设计[J]. 国外油气勘探, 1998, 10(5): 586-598.
- [6] 杨文达. 南海陆坡区天然气水合物地震波特征研究[J]. 上海地质, 2004 (1): 39-45.
- [7] CLAYPOOI G E, PRESLEY B J, KAPLAN I R, et al. Initial reports of the deep sea drilling project, v.19[R]. US Government Printing, 2003: 879-884.
- [8] 张光学, 耿建华, 刘学伟. 天然气水合物探测技术[R]//广州海洋地质调查局. “十五 863” 课题研究技术报告, 2005: 1-3.
- [9] 何樵登, 韩立国, 朱建伟, 等. 地震波理论[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2005: 8.
- [10] CORDSEN A. Narrow-versus wide-azimuth land 3D seismic surveys[J]. The Leading Edge, 2002, 21 (8): 764-770.
- [11] DAVIDSON D W, RIPMEESTER J A. Water: a comprehensive treatise[M]. New York: Plenum press, 2006: 21-33.
- [12] 凌云, 吴琳, 陈波, 等. 宽/窄方位角勘探实例分析与评价(二)[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(4): 423-427.
- [13] 伍忠良, 陆敬安. 海洋地震勘探直达波综合效应分析[J]. 海洋技术, 2006, 25(1): 111-114.
- [14] 罗文造, 韦成龙, 王立明, 等. 海上地质勘探主要采集参数的选取与验证[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(4): 93-101.