

海洋 CSEM 法对二维水平板状水合物储集体的横向分辨能力研究

裴建新^{1,2}, 王 启³, 袁 翔¹

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;
3 广州海洋地质调查局资料处理研究所, 广州 510760)

摘 要:在不同发射频率和多收发距情况下,进行二维水平板状储集体正演计算,将模拟结果转换至共收发距域,提出针对此种模型研究归一化异常的方法。研究表明,海洋 CSEM 法对单一水合物储集体具有较好的横向分辨能力,将海洋 CSEM 资料转换至共收发距域可使电磁响应横向分辨能力的分析更为直观,归一化异常可作为定量衡量横向分辨能力的重要依据。

关键词:海洋 CSEM 法;水合物;分辨能力;二维水平板状体

中图分类号:TE122.2 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2015.06007

海洋可控源电磁法(Marine Controlled-Source Electromagnetics,简称:海洋 CSEM 法)是一个新的前沿研究领域^[1,2],加快研究与发展海洋 CSEM 技术可为我国海域天然气水合物等能源的调查、评价提供理论指导,对我国经济发展、能源供给和能源安全有着重要的战略意义。关于海洋 CSEM 法高阻储藏的电磁响应及探测能力研究,Li 等^[3]进行了二维海洋 CSEM 自适应有限元算法的研究,并从电磁响应的 MVO 和 PVO 曲线进行了一些分析;沈金松等^[4]利用有限元方法对偶极子源在二维海底地层上方产生的电磁场响应进行了数值模拟;刘长胜^[5]讨论了在浅海环境下应用海洋 CSEM 探测高阻体的能力;Constable 等^[6]和 Zhao 等^[7]分别进行了海底天然气水合物正演模拟,并应用 MVO 曲线对模型正演计算结果进行了分析;张秀丽等^[8]对海洋

CSEM 探测水合物储层勘探参数进行了探讨。在陆地应用电磁法勘探的分辨能力研究方面,汪光照^[9]对典型异常体的电磁法探测分辨率进行了研究;单春玲等^[10]对人工源电磁测深在深度上的分辨率进行了定量分析;陈清礼等^[11]通过数值模拟对 MT 进行油藏勘探的分辨能力进行了分析。然而,在利用海洋 CSEM 法探测水合物储集体的横向分辨能力方面研究较少,这源于水合物赋存状态复杂且直接使用 MVO、PVO 曲线用于电磁响应分辨能力研究存在难度。本文针对二维水平板状储集体,运用正演模拟方法在共收发距域研究了海洋 CSEM 对海底天然气水合物的横向分辨能力。

1 正演模拟资料的共收发距域分析

1.1 二维水平板状储集体正演模拟

针对典型水合物模型,开展海洋 CSEM 正演模拟研究,在此根据大洋钻探计划 164 航次北美大陆边缘东南布莱克岭 995 号井位钻井资料设计

收稿日期:2015-03-09

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2012DM006);
国家科技重大专项(2011ZX05019-007)

作者简介:裴建新(1975—),男,博士,讲师,主要从事海洋电磁方法方面的研究工作。E-mail:peijx@163.com

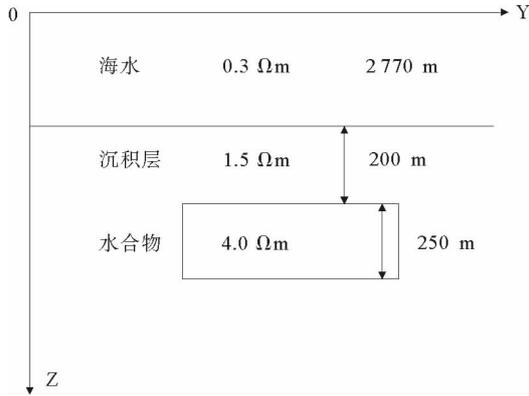


图 1 设计的水合物模型

Fig. 1 A designed hydrate model

的正演模型(图 1)。发射接收装置采用 broadside (赤道观测系统)装置排列。第 1 层为空气层;第 2 层是海水层,海水深度为 2 770 m,海水电阻率

为 0.3 Ωm。水合物储集体厚度为 250 m,储集体的横向范围是 4 km(-2 ~ 2 km),电阻率为 4 Ωm,位于海底以下 200 m 处,围岩沉积层的电阻率为 1.5 Ωm。正演模拟时,假定发射源在海底上方 50 m 处拖曳前行,接收仪布置在海底。

采用 broadside 装置对图 1 所示模型进行正演计算,模拟时选择发射频率为 5 Hz,接收仪沿测线方向的间隔为 250 m,模拟计算接收来自海底地层的电磁信号,将含有水合物储层模型的响应结果与背景模型对比,如图 2 和 3 所示。须指出,就目前海洋电磁测量仪器的水平而言,仪器本底噪声为 10^{-16} V/Am² 左右,在实际勘探中接收到的小于本底噪声的电场值是难以保证数据有效的,故在后续讨论中对低于仪器本底噪声部分的响应值不予以考虑。

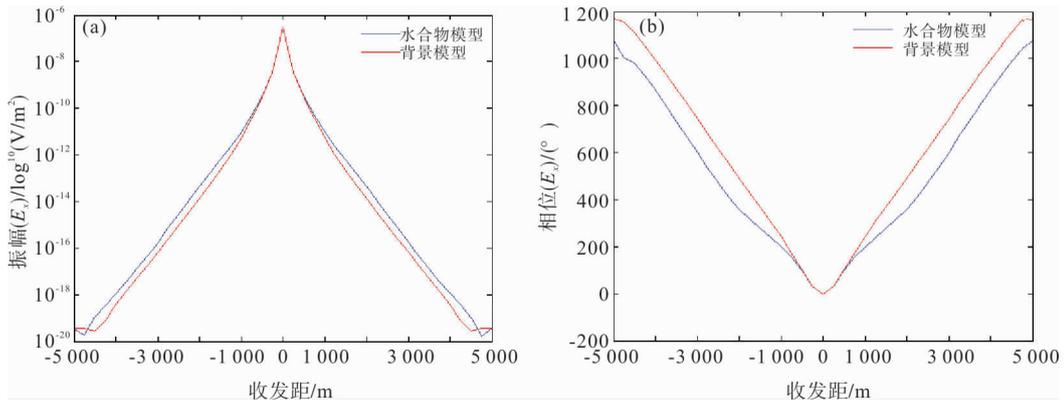


图 2 电场振幅和相位 (E_x)

Fig. 2 The curves of amplitude (a) and phase (b) of electric component (E_x)

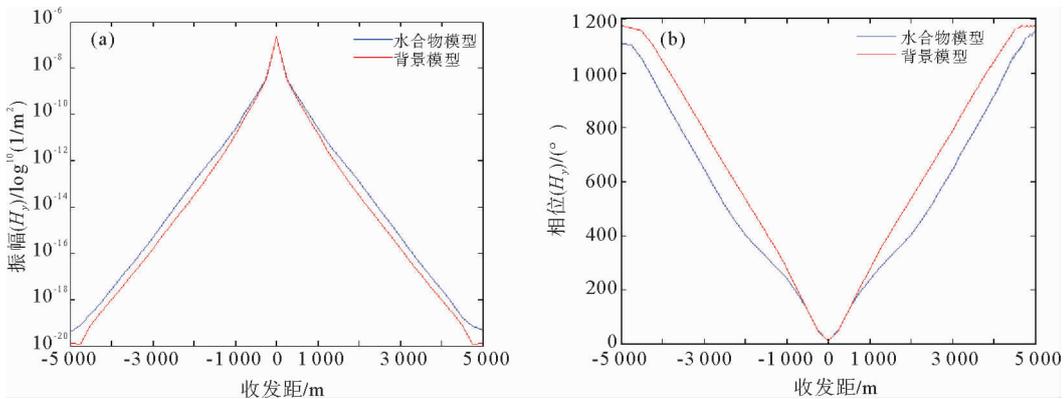


图 3 磁场振幅和相位 (H_y)

Fig. 3 The curves of amplitude (a) and phase (b) of magnetic component (H_y)

图2中a、b分别为电场(E_x)的MVO和PVO曲线;图3中a、b分别为磁场(H_y)的MVO和PVO曲线。从图2、3可以清晰地看出,由于模型关于原点对称且发射源位于原点处,正演计算得到的MVO曲线和PVO曲线也是对称的。当收发距 $<1\ 000\text{ m}$ 时,背景模型和水合物模型的MVO曲线和PVO曲线基本重合,当收发距 $>1\ 000\text{ m}$ 时,含有水合物储层模型的电磁场振幅和相位与背景模型的电磁场振幅和相位存在明显差异。与背景模型相比,含有水合物储层模型的电场分量 E_x 和磁场分量 H_y 的振幅随收发距增大衰减得较慢,相位变化也相对比较缓慢。因此,在利用海洋CSEM方法探测天然气水合物时,可以根据含有水合物储层模型的电磁响应与背景模型电磁响应之间的差异来识别水合物储层。

在实际勘探中,发射频率对电磁响应及分辨能力会产生影响。为了对比分析发射频率与电磁响应特征的关系,以图1所示模型为例,计算和分析不同发射频率的CSEM响应。选择激发频率

为1、2、3、5、7、10、15、20、30 Hz,分别进行正演计算得到各个频率的电场(E_x)振幅和相位与收发距的关系(图4)。从图4a中电场MVO(E_x)曲线可以看出,不同发射频率的电场(E_x)振幅都随着收发距的增大而减小,并且发射频率越高,衰减得越快。因为不同频率的电磁信号在海底地层中衰减的速度不同,因而其趋肤深度和分辨率也各不相同。频率越高,电磁响应衰减得越快,海底穿透深度越小,但分辨率高;信号频率越低衰减越慢,穿透深度大,但分辨率相对较低。当发射频率为5 Hz、收发距 $>3\ 000\text{ m}$ 时,电场振幅值小于仪器本底噪音(10^{-16} V/Am^2);当频率 $<5\text{ Hz}$ 时,收发距在 $>3\ 000\text{ m}$ 时的一段距离,电场值仍然在本底噪音之上;而当发射频率 $>5\text{ Hz}$ 时,收发距在不到 $3\ 000\text{ m}$ 时就已经衰减到本底噪音之下。从图4b中的PVO曲线上可以明显看到,各个频率的PVO曲线具有明显的差异,发射频率越小,相位随收发距的变化越平缓,发射频率越大,相位随收发距的变化越剧烈。

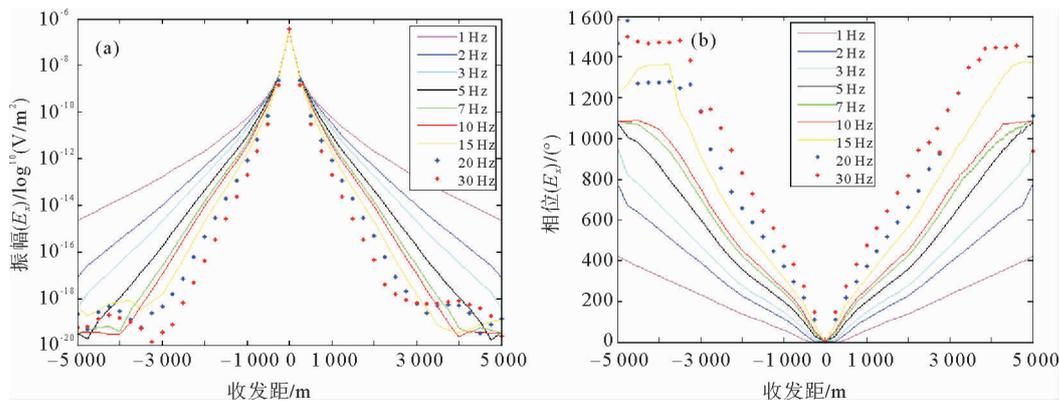


图4 电场振幅和相位(E_x)

Fig. 4 The curves of amplitude (a) and phase (b) of electric component (E_x)

然而,就以上的正演结果而言,直接由振幅和相位曲线不易直观分析二维储集体的横向分辨能力,因此在以上研究的基础上,将正演资料转换到共收发距域中进行讨论,旨在获得直观的分析横向分辨能力的方法。

1.2 共收发距域分析

以图1所示模型为例,设发射频率为10 Hz,设置多个发射源位置和接收仪位置,获得多个共

发射源的MVO(E_x)曲线,从中抽取共收发距模拟数据获得共收发距域资料,即得到各个共收发距域的电场(E_x)振幅和相位(图5)。该结果等同于同时移动发射源与接收仪并提取发射源与接收仪中心位置的响应值。

从图5中可以看出,海洋CSEM法对单一水合物储集体具有较好的横向分辨能力。不同收发距情况下,电场(E_x)振幅曲线在水合物储集体边界($-2\ 000\sim 2\ 000\text{ m}$)的变化趋势不同,收发距

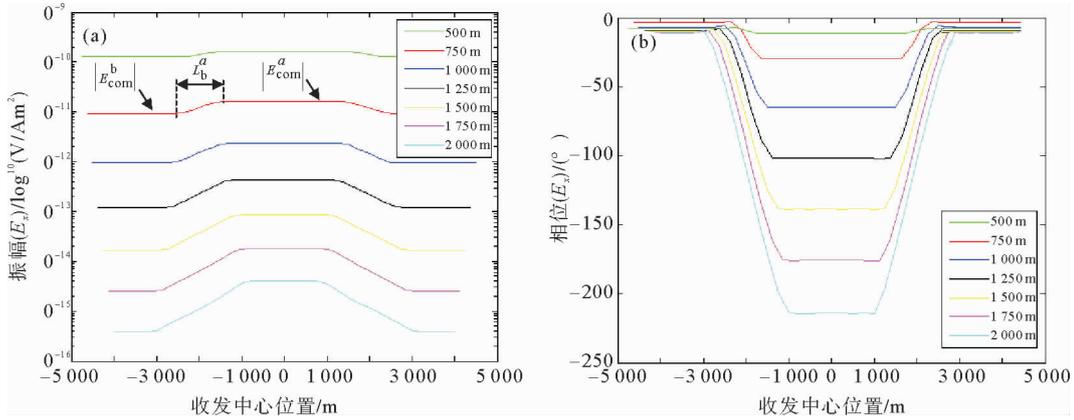


图 5 不同收发距情况下电场振幅和相位曲线 (E_x)

Fig. 5 The curves of amplitude (a) and phase (b) of electric component (E_x) versus offsets

越大曲线变化越缓慢,说明在储集体边界附近的电场变化比较平缓,对储集体边界的分辨率越低。电场 (E_x) 振幅和相位在水合物储集体边界 ($-2\ 000\ \text{m}/2\ 000\ \text{m}$) 两侧的差异随着收发距的增加而增大。当收发距为 $500\ \text{m}$ 时,储集体边界两侧的电场振幅和相位差异较小,难以区分;当收发距 $>1\ 250\ \text{m}$ 时,电场 (E_x) 振幅在储层边界附近变化缓慢,对储集体边界的分辨能力较小;收发距为 $750\ \text{m}$ 和 $1\ 000\ \text{m}$ 时,在储集体边界附近的电场和相位变化比较剧烈,边界两侧的电场和相位具有较大的差异。共收发距域的分析为进一步开展二维水平板状储集体的分辨能力的定量分析提供了基础。

2 二维水平板状储集体横向分辨能力

由二维水平板状储集体共收发距域资料分析可见,当收发距中心超出异常体边界后,由储集体引起的相对高值异常逐渐减小为相对低值异常,该低值异常在很大的横向范围内基本保持一定值,定义其为共收发距域背景值,以 $|E_{\text{com}}^b|$ 表示,同时定义共收发距域异常值为 $|E_{\text{com}}^a|$, $|E_{\text{com}}^a|$ 过渡到 $|E_{\text{com}}^b|$ 之间下降沿的水平宽度为 L_b^a ,如图 5a 所示。认为 CSEM 资料对二维水平板状储集体具有较高的分辨能力需具备 2 个特征:①相对于 $|E_{\text{com}}^b|$ 而言, $|E_{\text{com}}^a|$ 应较大;② L_b^a 值应较小。所以,在共收发距域中设计 2 个衡量标准:

$$\bar{N}_{\text{com}}^{2\text{D}} = \frac{|E_{\text{com}}^a| - |E_{\text{com}}^b|}{|E_{\text{com}}^b|} \times 100\%$$

$$\lambda_{\text{com}}^{2\text{D}} = \frac{\bar{N}_{\text{com}}^{2\text{D}}}{L_b^a}$$

式中: $\bar{N}_{\text{com}}^{2\text{D}}$ 为二维水平板状储集体共收发距域归一化异常(以下简称归一化异常)。 $\bar{N}_{\text{com}}^{2\text{D}}$ 和 $\lambda_{\text{com}}^{2\text{D}}$ 较大时,储集体横向分辨能力就较高。计算的 $\bar{N}_{\text{com}}^{2\text{D}}$ 和 $\lambda_{\text{com}}^{2\text{D}}$ 结果分别如图 6 和图 7 所示。

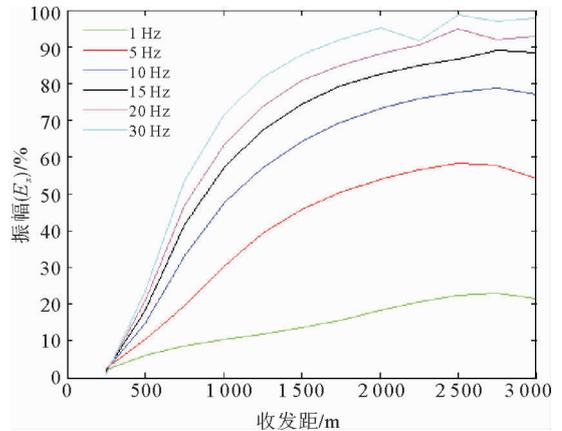


图 6 不同发射频率的 $\bar{N}_{\text{com}}^{2\text{D}}$ 随收发距变化

Fig. 6 The curves of $\bar{N}_{\text{com}}^{2\text{D}}$ of different frequencies versus offsets

为了综合考虑 $\bar{N}_{\text{com}}^{2\text{D}}$ 与发射频率和收发距三者之间的变化关系,我们计算并绘制了如图 8 所示的等值线图。得到如下分析结果:

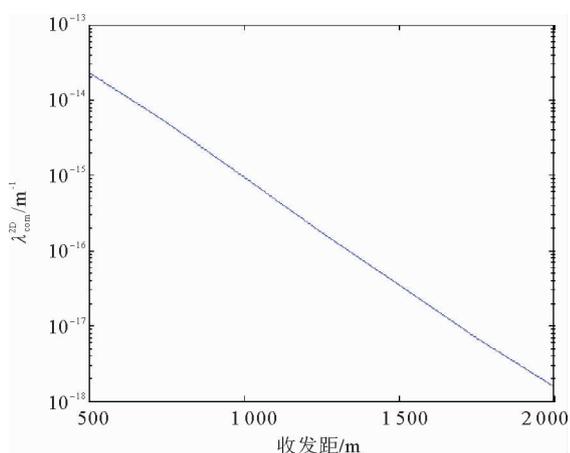


图7 λ_{com}^{2D} 随收发距的变化 (发射频率: 10 Hz)

Fig. 7 The curves of λ_{com}^{2D} versus offsets (Frequency: 10 Hz)

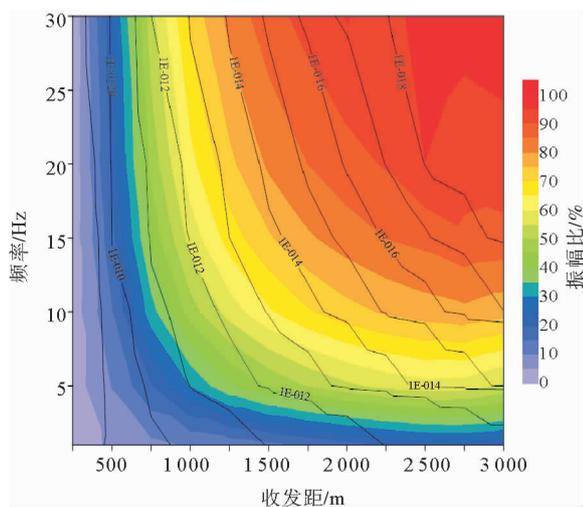


图8 \overline{N}_{com}^{2D} 随频率和收发距变化关系

Fig. 8 The feature of \overline{N}_{com}^{2D} versus frequencies and offsets

(1) 总体而言,发射频率、收发距越大时,归一化异常越大。

(2) 当发射频率较高时,在较小的收发距即可获得较大的归一化异常;当收发距较大时,在较小的发射频率条件下即可获得较大的归一化异常;频率逐渐减小时,欲获得较理想的分辨能力,就需扩大收发距。

(3) 然而,频率和收发距对归一化异常的影响程度是不同的,表现在:①当频率减小到一定程度时,无论如何扩大收发距,也无法获得更高的分辨能力;当发射频率为 10 Hz 时,无论收发距为何值,也无法获得发射频率为 30 Hz、收发距为

1 100~1 700 m 时的归一化异常值;②当收发距减小到一定程度时,无论如何提高发射频率,也无法获得更高的分辨能力;当收发距为 450 m 时,无论发射频率为何值,也无法获得当收发距为 1 700 m、发射频率为 2~30 Hz 时的归一化异常值。

海洋 CSEM 法应用于实际勘探中需进一步考虑获得较高分辨能力的途径。首先,假设发射频率为 10 Hz,鉴于以上分析,欲获得较大的归一化异常,须将收发距扩大至 2 750 m,而在发射频率为 30 Hz 的情况下,收发距为 1 200 m 时就能获得与之相同的归一化异常。其次,考虑 \overline{N}_{com}^{2D} 相对于下降沿水平宽度的比值,该比值标志着异常体相对于背景的突变程度,如图 7 所示,可见当收发距越大时,该比值是持续降低的。考虑这 2 点,可见在实际勘探中扩大收发距并不是提高分辨能力的首选方法。考虑实际勘探的可行性,为了在共收发距域中获得较大的收发距,需要较多的采集站布设于较长的测线上,这对勘探时间都会有很高的要求。

3 结论

(1) 海洋 CSEM 法对单一水合物储集体具有较好的横向分辨能力。

(2) 对于二维水平板状水合物储集体而言,将海洋 CSEM 资料转换至共收发距域可使电磁响应横向分辨能力的分析更为直观,归一化异常可作为定量衡量分辨能力的重要依据。

(3) 虽然通过提高发射频率、扩大收发距均能提高归一化异常,但是为了提高对二维水平板状储集体的分辨能力,可行的手段是在保证一定探测深度的前提下,尽可能提高发射频率,选择较大的频率进行勘探。

致谢:感谢李予国教授在文章思路方面予以的帮助!

参考文献:

- [1] McConnell D R, Zhang Z, Boswell R. Review of progress in evaluating gas hydrate drilling hazards[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 34(1): 209-223.

- [2] 何展翔,孙卫斌,孔繁恕,等. 海洋电磁法[J]. 石油地球物理勘探,2006,41(4):451-457.
- [3] Li Y, Key K. 2D marine controlled-source electromagnetic modeling; Part1: An adaptive finite-element algorithm[J]. Geophysics, 2007, 72(2): WA51-WA62.
- [4] 沈金松,孙文博. 二维海底地层可控源海洋电磁响应的数值模拟[J]. 石油物探,2009,48(2):187-194.
- [5] 刘长胜. 海底可控源电磁探测数值模拟与实验研究[D]. 长春:吉林大学, 2009.
- [6] Constable S, Weiss C J. Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods : Insights from 1D modeling[J]. Geophysics, 2006, 71(2): G43-G51.
- [7] Luanxiao Z, Jianhua G, Shengye Z, et al. 1-D Controlled source electromagnetic forward modeling for marine gas hydrates studies[J]. Applied Geophysics, 2008, 5(2), 121-126.
- [8] 张秀丽,裴建新,王 启. 海洋 CSEM 法探测高阻储层的勘探参数设计[J]. 海洋地质与第四纪地质,2014, 34(4): 179-186.
- [9] 汪光照. 关于电磁法勘探的分辨力[J]. 桂林冶金地质学院学报,1982(2):53-65.
- [10] 单春玲,刘国兴,韩江涛. 大探测深度电磁测深分辨能力的数值模拟[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2008, 38(增刊):24-29.
- [11] 陈清礼,周锦钟,余海勇. 大地电磁法分辨力的模拟分析[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(1):91-95.

LATERAL RESOLUTION FOR 2D HORIZONTAL PLATE-LIKE HYDRATE RESERVOIR DETECTION USING MARINE CSEM METHOD

PEI Jianxin^{1,2}, WANG Qi³, YUAN Xiang¹

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China;

3 Data Processing Institute, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

Abstract: Under the circumstance of different frequencies and multiple transceivers distance, the two-dimensional horizontal plate forward reservoir simulation was carried out. The results were converted to the common transceiver domain, and then a model is proposed for the study of abnormal normalization method. Studies show that marine CSEM method for single hydrate reservoir has high lateral resolution. Marine CSEM data will be converted into a common transceiver domain, the analysis of electromagnetic response of the lateral resolution can be more intuitive, the anomaly normalization can be used as important criteria for quantitative measurement of the lateral resolution.

Key words: marine CSEM; gas hydrates; resolution capability; 2D horizontal plate