

# 海洋 CSEM 探测海底天然气水合物的有效异常研究

裴建新\*<sup>①②</sup> 王 启<sup>①</sup> 张秀丽<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100; <sup>②</sup>海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100)

裴建新, 王启, 张秀丽. 海洋 CSEM 探测海底天然气水合物的有效异常研究. 石油地球物理勘探, 2015, 50(1): 177-183.

**摘要** 鉴于海洋 CSEM 响应对海底地层的电性变化比较灵敏, 故可以依据水合物储层和围岩沉积层的 CSEM 响应差异, 确定海底天然气水合物储层的分布范围。在考虑噪声情况下, 通过建立一维含水合物储层模型, 正演计算获得 CSEM 响应, 进而求得有效异常、综合分析有效异常与发射频率及收发距的关系。研究表明, 电磁响应的有效异常可用于确定合适的勘探频率, 并由此获得相应的归一化振幅比和相位差曲线, 利用有效异常对水合物储层电阻率变化十分灵敏的特性, 寻找水合物储层, 证明海洋 CSEM 探测海底天然气水合物的可行性。

**关键词** 海底天然气水合物 海洋 CSEM 有效异常 归一化

中图分类号: P631 文献标识码: A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.01.027

## 1 引言

天然气水合物是一种新型、高效的能源, 可以满足人类社会从常规油气资源到可再生能源资源转型的能源需求<sup>[1]</sup>。研究表明, 海底中的天然气水合物资源量巨大, 是目前地球上尚未开发的总量最大的化石能源, 有望成为未来重要的替代能源<sup>[2]</sup>。中国是一个海洋大国, 大量的油气资源蕴藏其中, 南海海域以及东海海域都可能是天然气水合物储存区<sup>[3]</sup>。海上地震勘探是目前最常用的海底天然气水合物探测方法, 它根据地震剖面上的似海底反射层(BSR)判断天然气水合物的存在, BSR已成为检测天然气水合物存在的一个重要标志<sup>[4]</sup>。然而, 研究发现 BSR并不能完全指示天然气水合物的存在。例如, 墨西哥湾是已知的天然气水合物储存区, 最近地球物理证据已经表明它的存在, 但墨西哥湾在地震剖面上并不存在连续的 BSR<sup>[5,6]</sup>。海上地震通常只揭示了天然气水合物稳定带的边缘, 而应用海洋

CSEM 在探测水合物饱和度变化方面表现更灵敏。天然气水合物储层是高阻体, 其电阻率比海底沉积物或海水大得多, 所以应用海洋 CSEM 可根据水合物储层与围岩沉积层的电性差异确定天然气水合物的存在, 根据电阻率与储层含天然气水合物饱和度的密切关系探测地层中富集天然气水合物的规律<sup>[7]</sup>, 提高钻井的成功率。

自本世纪初海洋 CSEM 问世以来, 一直受到人们的青睐。Li 等<sup>[8]</sup>进行了二维海洋 CSEM 自适应有限元算法的研究; 沈金松等<sup>[9]</sup>利用等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<sup>[10]</sup>讨论了在浅海环境下应用海洋 CSEM 对高阻体探测能力的研究; Constable 等<sup>[11]</sup>和 Zhao 等<sup>[12]</sup>分别进行了海洋天然气水合物的正演模拟, 它们应用 MVO 曲线对模型正演计算的结果进行直接分析。由于海底天然气水合物具有厚度相对较小、埋深较浅的特征, 加之在实际海洋 CSEM 勘探中, 接收信号易受较多干扰因素影响, 使得识别海底天然气水合物的能力受到局限。本文在

\* 山东省青岛市松岭路 238 号中国海洋大学海洋地球科学学院, 266100. Email: peijx@163.com

本文于 2013 年 10 月 9 日收到, 最终修改于 2014 年 11 月 30 日收到。

本研究受国家自然科学基金重点项目(41130420)、山东省自然科学基金面上项目(ZR2012DM006)和国家科技重大专项课题(2011ZX05019-007)联合资助。

海洋 CSEM 频率域一维正演的基础上,提出由有效异常特征研究应用海洋 CSEM 探测海底天然气水合物的可行性。

## 2 基于振幅比计算 CSEM 资料有效异常的局限

在传统的水合物电磁响应研究中,一般没有将噪声等因素考虑在内,如 Karen<sup>[13]</sup> 在海底天然气水合物研究时,选择一组频率(0.1~300Hz),根据

$$A = \frac{|E_M|}{|E_0|} \quad (1)$$

计算振幅比  $A$ 。其中:  $|E_M|$  为含水合物储层的电场振幅;  $|E_0|$  为背景模型的振幅。

通常的做法是根据水合物的地质、地震勘探、测井勘探等资料设定相关参数,建立背景模型和目标

模型。例如,根据南海已有的相关资料确定如下正演模型参数:海水深度为 1200m,海水电阻率为  $0.3\Omega \cdot m$ ,海水下伏沉积层电阻率为  $1.5\Omega \cdot m$ ;含有天然气水合物储层位于海底下 190m 处,其厚度为 40m,电阻率为  $3\Omega \cdot m$ ;储层下方围岩电阻率为  $1.5\Omega \cdot m$ ,如图 1 所示。正演模拟时,假定发射源在海底上方 50m 处拖曳前行,接收装置布置在海底。

针对图 1 所示的背景模型和含储层模型,选择一组频率(0.1~200Hz),依次计算出每个频率下两个模型的电磁响应,再计算出两个模型各频率情况下的振幅比。以横坐标表示收发距变化,纵坐标表示频率,不同的颜色表示计算得到的电场振幅比,可得不同频率和不同收发距情况下的振幅比特征(图 2)。就目前海洋电磁测量仪器的精度而言,仪器本底噪声约为  $10^{-16} V/Am^2$ ,在实际勘探中接收

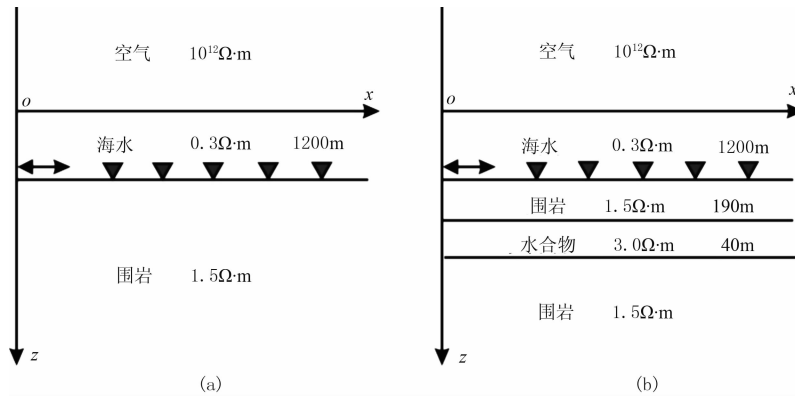


图 1 正演模型

(a)背景模型; (b)含水合物储层模型

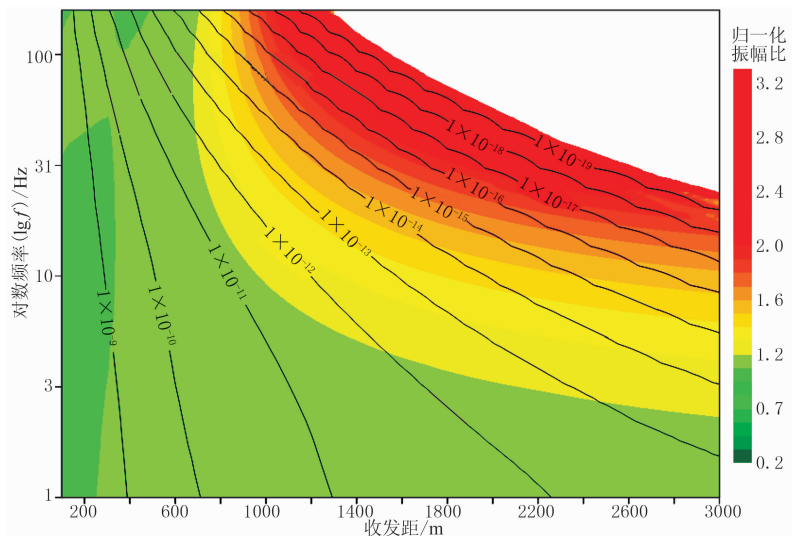


图 2 不同频率与不同收发距情况下对应的振幅比特征( $E_x$ )

到的小于本底噪声的电场值难以保证数据的有效性,故在下面的讨论中对低于仪器本底噪声部分的响应值不予考虑。

由图 2 可见,较大的振幅比主要集中在高频和大收发距部分,且频率越高,振幅比越大。但当频率和收发距增大到一定程度时,水合物模型的电场值将小于仪器本底噪声( $10^{-16}$  V/Am<sup>2</sup>)。重点关注区域应是高振幅比部分,但该部分主要集中在电场值小于( $10^{-16}$  V/Am<sup>2</sup>)的区域。因此,当电场具有较高的振幅比时,不能保证勘探区域电磁响应的有效性。可见,仅依靠振幅比确定适合海底天然气水合物勘探的有效收发距范围和频率范围是有困难的,故必需综合考虑观测误差和仪器本底噪声等在内的有效异常才更为合理。

### 3 有效异常

在海洋 CSEM 正演计算中,通常假设接收仪器水平放置于海底。但在实际工作中,由于海底地形起伏的影响,接收仪在海底并非水平放置,会发生一定角度的偏转或倾斜。另外,仪器系统和观测系统在测量电磁响应数据的过程中也会产生误差。为将这些噪声场和观测误差等因素综合考虑,定义有效异常的概念。选择目标模型与背景模型电场振幅的差,与背景噪声的比值作为有效异常<sup>[14]</sup>,即

$$S = \frac{||E_M| - |E_o||}{|E_{noise}|} \quad (2)$$

$$|E_{noise}| = \sqrt{E_{rel}^2 + E_{rot}^2 + E_{abs}^2} \quad (3)$$

有效异常是异常场相对于噪声水平的倍数。例如,若有效异常为 2,意味着异常场的值(目标模型与背景模型的电场值的差)是噪声水平的 2 倍。在式(2)、式(3)中:  $|E_M|$  是含有天然气水合物储层模型的电场振幅;  $|E_o|$  是不含天然气水合物储层背景模型的电场振幅;  $|E_{noise}|$  是电场噪声;  $E_{rel}$  为振幅的相对误差,包括仪器系统产生的误差和观测误差;  $E_{abs}$  为绝对误差,是发射—接收系统的本底噪声,即接收仪能够接收到得电磁场有效数据的最小值,令  $E_{abs} = 10^{-16}$  V/Am<sup>2</sup>;  $E_{rot}$  为旋转角度引起的误差,是由接收电场电极方位不确定性引起的。设  $\phi$  为旋转误差角度(在此设旋转误差角度为  $\phi = 5^\circ$ ),  $F_x$  和  $F_z$  是真实的电场分量,  $E_x$  和  $E_y$  是测量得到的电场分量,则

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

由旋转引起的电场误差  $\Delta E_x = F_x - E_x$ , 得

$$|\Delta E_{x_{rot}}| = \sqrt{(\cos\phi - 1)^2 |E_x|^2 + \sin^2\phi |E_z|^2} \quad (5)$$

$$|\Delta E_{z_{rot}}| = \sqrt{(\cos\phi - 1)^2 |E_z|^2 + \sin^2\phi |E_x|^2} \quad (6)$$

由上式得到电场水平分量和垂直分量的总体误差

$$|E_{x_{noise}}| = \frac{\sqrt{\alpha^2 |E_x|^2 + (\cos\phi - 1)^2 |E_x|^2 + \sin^2\phi |E_z|^2 + E_{abs}^2}}{\alpha} \quad (7)$$

$$|E_{z_{noise}}| = \frac{\sqrt{\alpha^2 |E_z|^2 + (\cos\phi - 1)^2 |E_z|^2 + \sin^2\phi |E_x|^2 + E_{abs}^2}}{\alpha} \quad (8)$$

在此假设相对误差为振幅值的 5%, 即  $\alpha = 5\%$ 。由式(2)、式(7)和式(8)得电场水平分量和垂直分量的有效异常

$$S_x = \frac{||E_{M_{E_x}}| - |E_{o_{E_x}}||}{|E_{x_{noise}}|} \quad (9)$$

$$S_z = \frac{||E_{M_{E_z}}| - |E_{o_{E_z}}||}{|E_{z_{noise}}|} \quad (10)$$

对于图 1 所示模型,选择一组频率(0.1~200Hz),研究水合物模型不同频率与不同收发距情况的有效异常特征,如图 3 所示。

值得注意的是,在式(3)中含有发射—接收系统的噪声  $E_{abs}$ , 但由有效异常计算公式(式(9)、式(10))可知,当有效异常大于 1 时,  $||E_M| - |E_o|| \geq |E_{abs}|$ , 意味着电磁场异常场值高于仪器的本底噪声  $E_{abs}$ 。由图 3 可看出:

(1)当频率小于 5Hz 时,有效异常随着收发距的增大而增大,但是有效异常相对较小,频率低于 5Hz 时,有效异常较低,含水合物的储层很难被探测到;

(2)当频率增大时,有效异常随着收发距的变化呈现出先增大后减小的趋势,频率为 5~20Hz 时,有效异常大于 1 的部分主要集中在 800~2600m 的收发距范围内;

(3)当频率大于 20Hz 时,有效异常大于 1 的部分主要集中在 800~1600m 的收发距范围内,频率较高时,探测深度较小。

综合考虑较高的有效异常和较大的探测深度,

得到适合该水合物储层模型的频率范围是 5~30 Hz, 合适的收发距范围是 800~2600 m。从图 3

中还可看出, 电场垂直分量计算的有效异常要比水平分量计算的有效异常大。

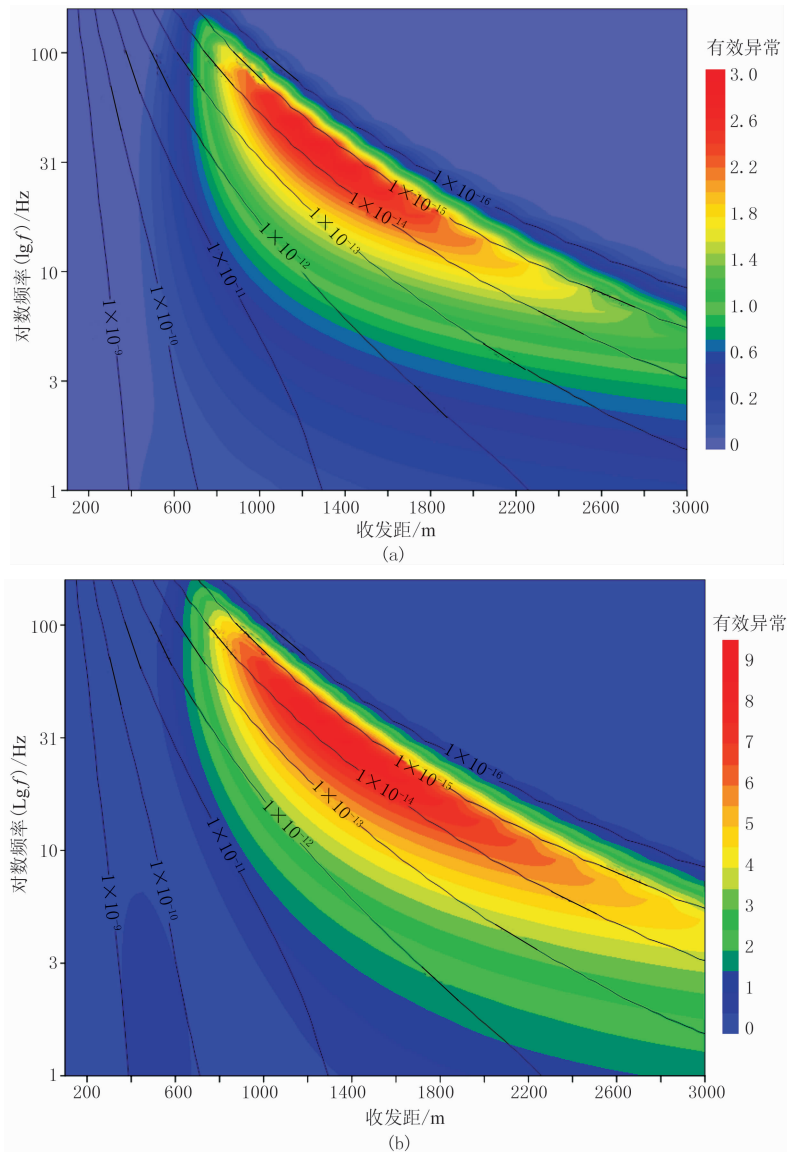


图 3 电场有效异常随频率和收发距变化关系  
(a) 电场水平分量; (b) 电场垂直分量

#### 4 基于有效异常的电磁响应分析

目前,最常用的频率域海洋 CSEM 数据表示方法是制作电磁场振幅和相位随收发距变化的曲线。对于一维模型,电场振幅曲线随收发距的增大而衰减,天然气水合物存在与否的曲线特征差别明显。这是由于电磁场能量在低阻层中衰减迅速,而在高阻层中衰减缓慢。此外,含有天然气水合物储层的电磁场幅度比不存在天然气水合物储层的相对较

高。若海底地层中不存在水合物储层,则接收到的电磁能量要小得多。石油勘探中通过实测电磁场幅度数据与含水合物储层模型的正演模拟结果的对比,可判断目标层的含油气性<sup>[15]</sup>,故本文应用该方法判断含水合物特性。

有些情况下,需计算异常场的归一化振幅和相位差,其公式为

$$N = \frac{|E_M| - |E_0|}{|E_0|} \times 100\% \quad (11)$$

$$\Delta\phi = |\phi_M - \phi_0| \quad (12)$$

其中： $\phi_M$ 为含有水合物储层的电磁场相位； $\phi_0$ 是背景模型的电磁场相位。

一般地，在海洋 CSEM 研究中，接收仪接收到的是总场的值，它包含空气波的影响。为了在一定程度上减弱该影响，突出异常场值，需进行归一化处理。由式(11)将含水合物储层目标模型的电磁场振幅正演结果减去背景模型的电磁场振幅正演结果，再与背景模型的电磁场振幅值求比值，获得振幅归一化处理结果。由式(12)将含水合物储层目标模型的电磁场相位正演结果与背景模型的电磁场相位相减，求得相位差。该方法的应用可在一定程度上减弱空气波的影响。

影响归一化振幅和相位差曲线异常的主要因素有收发距、有效异常及发射频率。本文在有效异常方法基础上，计算较大收发距时较大有效异常所适合的探测频率范围，然后选定几种频率对不同水合物储层电阻率情况下的正演结果进行归一化处理，由异常场与背景场振幅获得振幅比曲线，由目标模型与背景模型相位求出相位差。不同地质条件下形

成的水合物饱和度不同，导致水合物储层的电阻率也各有差异。为了研究不同天然气水合物饱和度模型的海洋 CSEM 响应，在水合物储层厚度均为 40m 情况下，设计如图 4 所示的三个水合物模型：电阻率分别为 3, 4, 5 $\Omega \cdot m$ ，其他参数与图 1 相同。

根据有效异常计算结果，对图 4 进行正演计算，选择频率的范围为 5~20Hz，以 8Hz、16Hz 为例分别计算来自水平电偶源的电场  $E_x$  和磁场  $H_y$  的振幅；由式(9)、式(10)计算电场水平分量和垂直分量的有效异常，得到不同水合物储层电阻率时的有效异常随着收发距的变化关系(图 5)。由图 5 可见，整体上电场水平分量和电场垂直分量的有效异常随收发距增大呈现出先增大后减小的趋势；电场垂直分量有效异常要比电场水平分量大；无论水平分量还是垂直分量，其有效异常都随着水合物储层电阻率的增大而增大，这是因为水合物储层的电阻率越大，储层产生的异常场越强。对比图 5 可见，储层厚度、埋深、电阻率参数相同情况下，发射频率较高时可获得较大的有效异常，但其有效的勘探收发距也

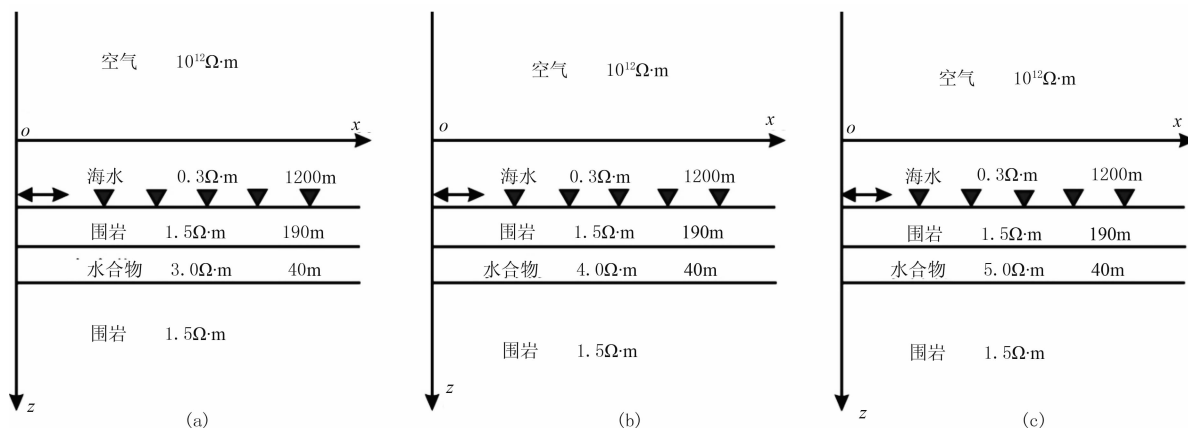


图 4 水合物储层电阻率分别为 3 $\Omega \cdot m$ (a)、4 $\Omega \cdot m$ (b)、5 $\Omega \cdot m$ (c)时的正演模型

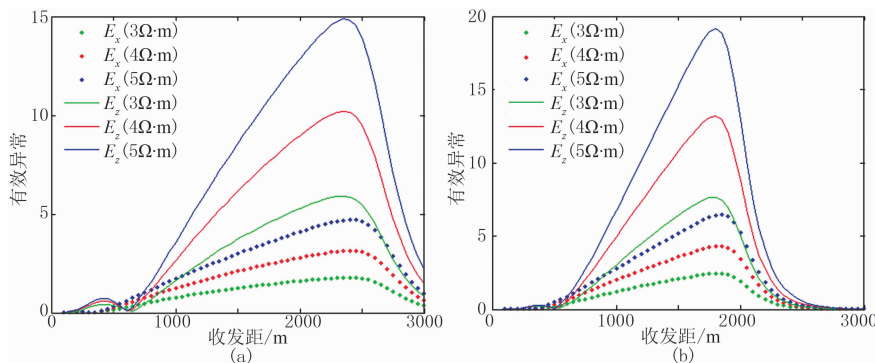


图 5 水合物储层电阻率不同时有效异常随收发距的变化关系

(a)发射频率 8Hz；(b)发射频率 16Hz



会相应变小。该方法可近似确定适合实际勘探的收发距范围。

为了研究不同电阻率的水合物储层 CSEM 响应,根据图 4 模型正演计算出的结果(以发射频率为 8Hz、16Hz 为例),由式(11)进行振幅归一化处理,得到如图 6 和图 7 所示的电磁场响应曲线。图 6a、图 6b 分别是电场( $E_x$ )的振幅比和相位差,图 7a、图 7b 分别是磁场( $H_y$ )的振幅比和相位差。由图 6、图 7 可见,水合物储层电阻率不同的情况下,由高阻储层产生的电磁场的归一化振幅和相位差异明显,

归一化振幅最大差异可达到 50,相位差最大差异可达到  $25^\circ$ ;勘探收发距为 0~500m 范围内,振幅和相位响应曲线基本重合或差异不明显,收发距大于 500m 时,电磁信号特征体现了水合物储层的信息,随着收发距的增大,水合物储层的影响越来越强,振幅比和相位差越来越大,并且水合物储层电阻率越大,振幅比和相位差异越明显;在图 6、图 7 中对比 6Hz 和 8Hz 代表的计算结果,可见当储层电阻率相同时,发射频率为 16Hz 时得到的归一化振幅和相位差普遍要比发射频率为 8Hz 时大,这种差异在收

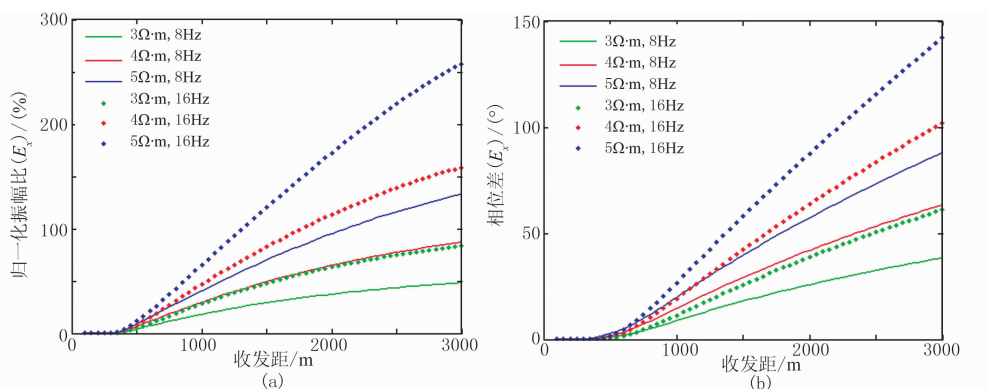


图 6 不同电阻率、不同频率 CSEM 响应电场分量( $E_x$ )归一化振幅比(a)和相位差(b)

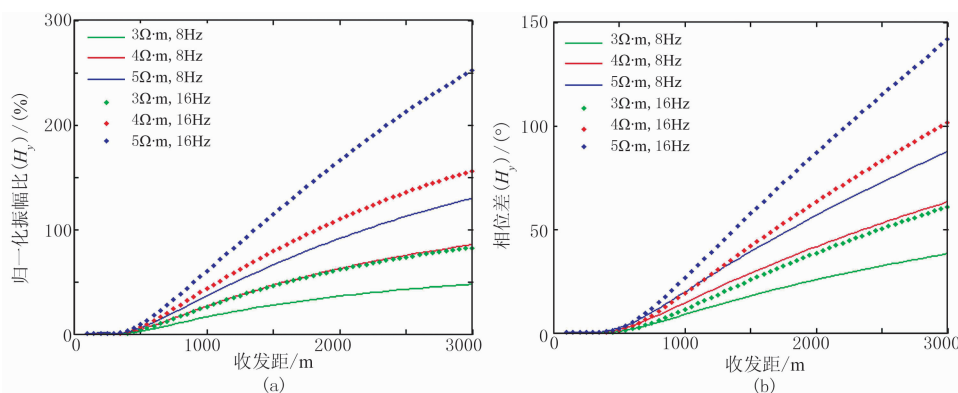


图 7 不同电阻率、不同频率 CSEM 响应磁场分量( $H_y$ )归一化振幅比(a)和相位差(b)

发距加大时尤为明显。

## 5 结论

通过模拟获得海洋 CSEM 探测海底天然气水合物的响应,从有效异常角度出发,将噪声、误差等干扰因素考虑在内,获得基于有效异常的电磁响应分析结果,得到如下结论:

(1)根据有效异常分析可知,随收发距的变化,综合考虑较高的有效异常和较大的勘探范围,可得

适于探测海底天然气水合物的频率范围和收发距范围,便于勘探设计阶段的关键参数设计研究;

(2)电场水平分量和垂直分量的有效异常对海底天然气水合物储层的电阻率变化十分灵敏,且电场垂直分量的有效异常相对较大;

(3)发射频率较高时可获得较大的有效异常,但其有效的收发距范围相对较小;发射频率提高时,其归一化振幅比和相位差计算值相应增大,此差异在收发距加大时尤为明显;

(4)海洋 CSEM 响应有效异常可用于确定合适

的勘探频率,进而获得相应的振幅比和相位差曲线。

感谢李予国教授在文章思路方面给予的帮助。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] McConnell D R, Zhang Z, Boswell R. Review of progress in evaluating gas hydrate drilling hazards. *Marine and Petroleum Geology*, 2012,34:209-223.
- [ 2 ] Smith S L and Judge A S. Estimates of methane hydrate volumes in the Beaufort-Mackenzie region, Northwest Territories, in *Current Research, 1995-B*. Geological Survey of Canada, 1995,81-88 (also Geological Survey of Canada Open File 2746, 1993).
- [ 3 ] 张金华,魏伟,王红岩. 天然气水合物研究进展与开发技术概述. *天然气技术*,2009,3(2): 67-69.  
Zhang Jinhua, Wei Wei, Wang Hongyan. Research on gas hydrate and its development techniques. *Natural Gas Technology*,2009,3(2): 67-69.
- [ 4 ] 史斗,郑军卫. 世界天然气水合物研究开发现状和前景. *地球科学进展*,1999,14(4):330-338.  
Shi Dou, Zheng Junwei. The status and prospect of research and exploitation of natural gas hydrate in the world. *Advance Earth Sciences*,1999,14(4):330-338.
- [ 5 ] Boswell R, Collett T S, Frye M et al. Sheldander subsurface gas hydrates in the northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 2012a,34:4-30.
- [ 6 ] Shedd W, Boswell R, Frye M et al. Occurrence and nature of “bottom simulating reflectors” in the northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 2012,34:31-40.
- [ 7 ] 沈金松,陈小宏. 海洋油气勘探中可控源电磁探测法(CSEM)的发展与启示. *石油地球物理勘探*,2009,44(1):119-127.  
Shen Jinsong, Chen Xiaohong. Development and enlightenment of controlled-source electromagnetic (CSEM) surveying method in marine oil/gas exploration. *OGP*,2009, 44(1): 119-127.
- [ 8 ] Li Yuguo and Key Kerry. 2D marine controlled-source electromagnetic modeling; Part 1: An adaptive finite-element algorithm. *Geophysics*, 2007,72(2): WA51-WA62.
- [ 9 ] 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. *石油物探*,2009,48(2): 187-194.  
Shen Jinsong, Sun Wenbo. Numerical simulation of marine controlled electromagnetic (MCSEM) response to 2-D seabed formation. *GPP*, 2009,48(2): 187-194.
- [10] 刘长胜,海底可控源电磁探测数值模拟与实验研究[博士学位论文]. 吉林长春:吉林大学,2009.  
Liu Changsheng. Numerical Modeling and Experiment Study of Sea-floor Controlled-source Electromagnetic Detection[D]. Jilin University, Changchun, Jilin, 2009.
- [11] Constable S and Weiss J C. Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods; Insights from 1D modeling. *Geophysics*, 2006,71(2): G43-G51.
- [12] Zhao Luanxiao, Geng Jianhua, Zhang Shengye et al. 1-D controlled source electromagnetic forward modeling for marine gas hydrates studies. *Applied Geophysics*, 2008,5(2): 121-126.
- [13] Karen A W. Marine Electromagnetic Methods for Gas Hydrate Characterization[D]. San Diego: University of California, 2008.
- [14] Vanessa Brown, Mike Hoversten, Kerry Key et al. Resolution of reservoir scale electrical anisotropy from marine CSEM data. *Geophysics*, 2012,77(2): E147-E158.
- [15] 何展翔,孙卫斌,孔繁恕等. 海洋电磁法. *石油地球物理勘探*,2006,41(4):451-457.  
He Zhanxiang, Sun Weibin, Kong Fanshu et al. Marine electromagnetic approach. *OGP*, 2006, 41(4): 451-457.

(本文编辑:冯杏芝)

#### 作 者 简 介



裴建新 讲师,博士,1975年生;1999年本科毕业于长春地质学院地球探测与信息技术专业;2007年毕业于中国海洋大学,获海洋地球物理学专业博士学位;现在中国海洋大学海洋地球科学学院主要从事海洋电磁探测方法的教研。